

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

АРХИТЕКТОНСКИ ФАКУЛТЕТ

Татјана Д. Косић, дипл. инж. арх.

**ПРИМЕНА СТАКЛА У
МАТЕРИЈАЛИЗАЦИЈИ ГЕОМЕТРИЈСКИ
КОМПЛЕКСНИХ ФОРМИ ОМОТАЧА
АРХИТЕКТОНСКИХ ОБЈЕКТА**

докторска дисертација

Београд, 2016

UNIVERSITY OF BELGRADE

Faculty of Architecture

Tatjana D. Kosic

**APPLICATION OF GLASS IN
MATERIALIZATION OF GEOMETRICALLY
COMPLEX FORMS OF ARCHITECTURAL
BUILDING ENVELOPES**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2016

МЕНТОР:

Проф. др Александра Крстић-Фурунџић, дипл.инж.арх.,
редовни професор Архитектонског факултета Универзитета у Београду

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ:

Проф. др Александра Крстић-Фурунџић, дипл.инж.арх.,
редовни професор Архитектонског факултета Универзитета у Београду

Проф. др Ана Радивојевић, дипл.инж.арх.,
ванредни професор Архитектонског факултета Универзитета у Београду

Проф. др Милена Ставрић, дипл.инж.арх.,
ванредни професор, Институт за архитектуру и медије,
Технички универзитет у Грацу

Датум одбране докторске дисертације:

Београд

ДОКТОРАТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА
Област: АРХИТЕКТУРА И УРБАНИЗАМ

ПРИМЕНА СТАКЛА У МАТЕРИЈАЛИЗАЦИЈИ ГЕОМЕТРИЈСКИ КОМПЛЕКСНИХ ФОРМИ ОМОТАЧА АРХИТЕКТОНСКИХ ОБЈЕКТА

Резиме

Све већа заступљеност архитектонских објеката комплексних форми, примена закривљеног стакла, стакла као конструктивног материјала, као и захтеви за већом транспарентношћу омотача, наводе на потребу за комплексном анализом елемената стакленог омотача геометријски комплексних форми, посебно закривљеног стакла.

Предмет докторске дисертације представља истраживање потенцијала и ограничења примене (закривљеног) стакла у материјализацији омотача архитектонских објеката геометријски комплексне форме, с циљем остваривања обликовно разноврсних и економски прихватљивих решења, физички и технички одговарајућих перформанси омотача, такође узимајући у обзир енергетске и у извесној мери, конструктивне карактеристике. Полазиште рада представља анализа улоге архитектонске геометрије у пројектовању стакленог омотача као и анализа типолошки различитих студија случаја уз установљење типологије геометријски комплексних форми стаклених омотача/конструкција и геометрије стаклених елемената који су даље у раду коришћени и анализирани.

У истраживању је примењен метод анкете с циљем идентификовања елемената процеса пројектовања и конструкције геометријски комплексног стакленог омотача, након чега је приступљено изради мапе процеса коју су верификовали главни учесници у процесу, што представља главни допринос овог истраживања.

Детаљном студијом креираних хипотетичких модела истражена је геометрија форме и материјализације појединачних панела као и целог стакленог омотача на коме је примењено закривљено стакло. Сагледане су визуелно-обликовне и технолошко-економске карактеристике хипотетичких модела омотача на основу претходно дефинисаних критеријума ради одређивања потенцијала и ограничења примене стакла. Извршена је компаративна анализа добијених резултата уз одговарајући коментар и дефинисане су препоруке за материјализацију стакленог омотача применом закривљеног стакла.

Кључне речи: закривљено стакло, конструктивно стакло, геометријски комплексна форма омотача, потенцијали и ограничења, материјализација, Србија

ДОКТОРАТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА

Научна област: **АРХИТЕКТУРА И УРБАНИЗАМ**

Ужа научна област: **АРХИТЕКТОНСКЕ КОНСТРУКЦИЈЕ, МАТЕРИЈАЛИ И ФИЗИКА ЗГРАДА**

УДК број: 692.232.4:691.6(043.3)

APPLICATION OF GLASS IN MATERIALIZATION OF GEOMETRICALLY COMPLEX FORMS OF ARCHITECTURAL BUILDING ENVELOPES

Abstract:

Increasing the representation of architectural structures of free forms, the use of curved glass, glass as a construction material, as well as the requirements for greater transparency of the building envelope, indicate to the need for a complex analysis of elements in the glass envelope of geometrically complex form, especially curved glass.

The subject of this doctoral dissertation is research of potentials and limitations of (curved) glass application in the materialization of building envelope of geometrically complex form in order to realize a variety of design and economically acceptable solutions, both physically and technically adequate performance envelope, also taking into account the energy, and, to a certain extent constructive characteristics. The starting point of the research is the analysis of the role of architectural geometry in the design of the glass envelope as well as analysis of typologically different case studies with the establishment of a typology of glass envelope of geometrically complex forms and geometry of glass elements that were used and analyzed.

In the research was applied the method of the survey in order to identify the elements and steps of the process of design and construction of geometrically complex glass envelope, after which it has been carried out creation of the process map and its verification by the major participants in the process, which represents the main contribution of this research.

By detailed study of created hypothetical models, the geometry of form and materialization of each panel, as well as the entire glass envelope in which curved glass was applied, were investigated. The designs, the technological and economic characteristics of the hypothetical models are analysed based on pre-defined criteria in order to determine the potentials and limitations of the application of glass. The results are cross-compared and thoroughly interpreted and recommendations for materialization of the building envelope by application of curved glass are defined.

Key words: Curved glass, Structural glass, Geometrically complex form of building envelope, Potentials and limitations, Materialization, Serbia

Scientific field:**ARCHITECTURE AND URBANISM**

Specific scientific field:**ARCHITECTURAL CONSTRUCTION, MATERIALS AND BUILDING PHYSICS**

UDK number:692.232.4:691.6(043.3)

Садржај

ПРИМЕНА СТАКЛА У МАТЕРИЈАЛИЗАЦИЈИ ГЕОМЕТРИЈСКИ КОМПЛЕКСНИХ ФОРМИ ОМОТАЧА АРХИТЕКТОНСКИХ ОБЈЕКТА

| | |
|--|-----------|
| Увод | 1 |
| а. Проблем и предмет истраживања | 1 |
| а.1. <i>Дефинисање значаја предмета истраживања</i> | 5 |
| а.2. <i>Теоријско и операционално одређење предмета истраживања</i> | 5 |
| б. Научни циљ истраживања | 7 |
| в. Задаци истраживања | 9 |
| г. Научне хипотезе | 9 |
| д. Научне методе истраживања | 10 |
| ђ. Технике истраживања | 11 |
| е. Научна оправданост дисертације, очекивани резултати истраживања и практична примена резултата | 12 |
| ж. Преглед досадашњих истраживања | 14 |
| ж.1. <i>Инострана искуства</i> | 14 |
| ж.2. <i>Домаћа истраживања</i> | 18 |
| з. Преглед садржаја дисертације | 18 |
| 1. Приказ развоја геометријски комплексних архитектонских форми | 21 |
| 1.1. Историјски правци и савремене тенденције | 21 |
| 1.2. Улога архитектонске геометрије у пројектовању стакленог омотача геометријски комплексних форми | 25 |
| 1.2.1. Улога геометрије у архитектури | 25 |
| 1.2.2. Типологија геометријски комплексних форми стаклених омотача/конструкција | 34 |
| 1.2.3. CAD и геометрија | 51 |
| <i>Основни елементи и карактеристике NURBS-a</i> | 54 |
| <i>Софтвери за моделовање геометријски комплексних форми</i> | 59 |
| <i>CAD-CAM фабрикација стаклених конструкција</i> | 60 |

| | |
|--|-----------|
| 1.2.4. Панелизација и оптимизација стаклених површина геометријски комплексних форми | 69 |
| <i>Типови панелизације</i> | 69 |
| <i>Параметри оптимизације</i> | 77 |
| 2. Анализа примера/студије случаја геометријски комплексних форми стаклених омотача архитектонских објеката | 81 |
| 2.1. Анализа примера примене геометријски комплексних форми стаклених омотача архитектонских објеката изведених у свету и Србији | 81 |
| 2.2. Критеријуми за анализу | 83 |
| 2.3. Приказ анализираних примера/студија случаја | 87 |
| 2.4. Опште карактеристике и специфичности анализираних примера – сумирање резултата | 94 |
| 3. Закривљено vs. равно стакло примењено на архитектонским објектима | 97 |
| 3.1. Карактеристике равног и закривљеног стакла | 97 |
| 3.1.1. Састав и хемијске карактеристике | 99 |
| 3.1.2. Особине стакла | 102 |
| <i>Изглед</i> | 104 |
| <i>Механичке особине</i> | 106 |
| <i>Термичке особине</i> | 113 |
| <i>Оптичке особине</i> | 116 |
| <i>Акустичке особине</i> | 118 |
| <i>Хемијске особине</i> | 119 |
| 3.2. Савремене технологије производње и обликовања стакла | 120 |
| 3.2.1. Приказ историјског развоја технологије производње стакла | 120 |
| 3.2.2. Савремени процес производње стакла | 125 |
| 3.2.3. Завршна обрада и дорада | 129 |
| 3.2.4. Савремене технике обликовања (закривљеног) стакла | 131 |
| 3.2.4.1. Поступак термичког обликовања стакла | 132 |
| <i>Термичко обликовање стакла уз помоћ калуна</i> | 135 |
| <i>Термичко обликовање стакла на производној линији</i> | 138 |

| | |
|---|------------|
| 3.2.4.2. Поступак хладног савијања стакла | 141 |
| <i>Хладно савијање механичким путем</i> | 153 |
| <i>Хладно савијање поступком ламинирања</i> | 153 |
| 3.2.4.3. Поступак преднапрезања (каљења) закривљеног стакла | 156 |
| <i>Термичко каљење</i> | 157 |
| <i>Хемијско каљење</i> | 157 |
| 3.3. Конструктивно (закривљено) стакло | 158 |
| 3.3.1. Генералне смернице, принципи и основна правила за пројектовање и сигурност компоненти од конструктивног (закривљеног) стакла | 159 |
| 3.3.2. Класификација конструктивних елемената од стакла | 160 |
| <i>Секундарни елементи</i> | 161 |
| <i>Примарни елементи – робусност и толеранција на оштећење стакла</i> | 163 |
| 3.3.3. Специјална оптерећења конструкција од стакла | 164 |
| <i>Сеизмичко оптерећење и асеизмичке конструкције</i> | 164 |
| <i>Оптерећење од експлозије</i> | 167 |
| 3.3.4. Потенцијална класификација елемената од стакла | 168 |
| 3.6. Преглед релевантних стандарда | 168 |
| 3.6.1. Успостављање Еурокода за пројектовање конструкција од стаклених компоненти | 171 |
| 3.6.2. Еурокодрави применљиви за стаклене конструкције | 173 |
| 4. Мапирање процеса пројектовања и конструкције геометријски комплексних стаклених омотача | 176 |
| 4.1. Процес пројектовања и конструкције геометријски комплексних стаклених омотача | 178 |
| 4.2. Израда мапе процеса пројектовања и конструкције геометријски комплексних стаклених омотача | 179 |
| 4.2.1. Узорак | 182 |
| 4.2.2. Анкета | 183 |
| 4.2.3. Мапа процеса пројектовања и конструкције геометријски комплексних стаклених омотача | 189 |

| | |
|---|------------|
| 5. Потенцијали и ограничења примене стакла у материјализацији геометријски комплексних форми омотача | 202 |
| 5.1. Визуелно-обликовни аспект | 205 |
| 5.1.1. Естетски потенцијали и феномен перцепције (архитектуре од стакла) геометријски комплексних форми | 205 |
| 5.1.2. Визуелно-обликовни критеријуми | 214 |
| 5.2. Енергетски аспект | 225 |
| 5.2.1. Утицаји енергетске ефикасности на примену стакла у материјализацији омотача | 225 |
| <i>Параметри енергетских перформанси стаклених елемената</i> | 226 |
| 5.2.2. Параметри прорачуна топлотног оптерећења и топлотних карактеристика (закривљених) стаклених елемената омотача | 233 |
| <i>Сунчево зрачење</i> | 235 |
| <i>Физика кретања сунчеве енергије кроз стаклене елементе</i> | 241 |
| <i>Климатско оптерећење (закривљених) термоизолационих стаклених панела</i> | 254 |
| 5.2.3. Могућност интеграције соларних система у стаклени омотач геометријски комплексних форми | 263 |
| 5.2.4. Критеријуми са енергетског аспекта | 266 |
| 5.3. Технолошко-економски аспект | 267 |
| 5.3.1. Технолошко-економски параметри производње закривљеног стакла | 268 |
| <i>Форма</i> | 268 |
| <i>Димензије</i> | 271 |
| <i>Чврстоћа</i> | 273 |
| <i>Премази</i> | 274 |
| <i>Визуелни недостаци</i> | 277 |
| <i>Трошкови производње</i> | 280 |
| 5.3.1. Могућности производње закривљеног стакла у свету и код нас | 282 |
| 5.3.2. Технолошко-економски критеријуми | 289 |
| 6. Испитивање хипотетичких модела материјализације стакленог омотача | 292 |
| 6.1. Дефинисање хипотетичких модела | 292 |

| | |
|---|------------|
| 6.1.1. Геометрија хипотетичких модела (форма, растер, панелизација) | 294 |
| 6.1.2. Материјализација | 306 |
| 6.2. Резултати компаративне анализе хипотетичких модела | 308 |
| 6.2.1. Анализа визуелно-обликовних карактеристика | 308 |
| 6.2.2. Анализа технолошко-економских карактеристика | 312 |
| Закључак | 319 |
| Литература | 329 |
| Прилог 1 – Примери/Студије случаја | 344 |
| П1.1. Студије случаја термичког стакленог омотача ГКФ са равним стакленим елементима | 345 |
| П1.2. Студије случаја термичког стакленог омотача ГКФ са закривљеним стакленим елементима | 359 |
| П1.3. Студије случаја нетермичког стакленог омотача ГКФ са закривљеним стакленим елементима | 390 |
| П1.4. Студије случаја нетермичког стакленог омотача ГКФ са закривљеним стакленим елементима примењеног на надстрешницама и у ентеријеру | 408 |
| Прилог 2 – Анкета | 417 |
| Биографија аутора | 440 |

УВОД

а. Проблем и предмет истраживања

Све већа заступљеност архитектонских објеката комплексних форми, примена стакла као конструктивног материјала, као и захтеви за већом транспарентношћу омотача, наводе на потребу за комплексном анализом елемената стакленог омотача геометријски комплексних форми. С обзиром на то да се кроз омотач зграде одвијају све интеракције између спољашње средине и унутрашњег простора, он представља један од кључних елемената у објекту утичући, више него било који други систем, како на перформансе тако и на спољшњи изглед архитектонских објеката. Са усложњавањем геометрије омотача, повећавају се и изазови који се постављају пред пројектанте, инжењере, математичаре, индустрију стакла и произвођаче фасада са циљем проналажења оптималног решења и могућности извођења омотача зграде комплексне форме. Не ретко, грађевинска индустрија није у могућности да испуни захтеве тако комплексног стакленог омотача. Разлог томе је што процес пројектовања не подразумева унапред уграђена ограничења произашла из карактеристика стакла као материјала и нових технологија производње и израде различитих конструктивних система, система застакљења, спојева и веза стакленог омотача (отвореност пројектовања је условљена отвореношћу технологије). Овај проблем је актуелнији уколико се узме у обзир не постојање одговарајућих стандарда за овакве врсте омотача, већ сваки овакав геометријски комплексан стаклени омотач представља уникатно решење и изискује проналажење увек нових веза и решења за појединачне елементе.

У савременој пракси као најчешћи и најприхватљивији начин материјализације стакленог омотача геометријски комплексних форми примењује се панелизација на дискретне мање елементе тј. индивидуалне равне стаклене панеле који су најчешће у облику троуглова или паралелограма. Овај процес оптимизације површине стакленог омотача представља значајан изазов за грађевинску индустрију. Примена равних стаклених елемената, која је једноставнија за реализацију код закривљених површина са већим

полупречником, доприноси увек незнатним одступањима од првобитног концепта комплексне геометрије омотача што даље доводи до лошег квалитета рефлексије светлости стаклене површине и непријатног ефекта искривљене слике, нарочито посматрано споља. Из поменутих разлога, примена закривљеног стакла је све присутнија омогућавајући у потпуности глаткоћу референтне површине и доприносећи истовремено много бољем квалитету површине омотача. С друге стране, примери објеката у чијој материјализацији омотача је примењено закривљено стакло указују да је у већем броју случајева оно примењено као елемент застакљења (испуне), занемарујући његове значајне конструктивне карактеристике. Нарочито, за омотаче малих димензија и геометрије која подразумева мање полупречнике, коришћење закривљеног стакла представља једино решење са циљем постизања жељеног архитектонског дизајна омотача.

На основу претходно изложеног, средишњи предмет истраживања је проучавање потенцијала и ограничења примене стакла, посебно закривљеног стакла, у материјализацији омотача геометријски комплексне форме с циљем остваривања обликовно разноврсних решења, физички и технички одговарајућих перформанси омотача, узимајући такође у обзир технолошко-економске, али у извесној мери и енергетске карактеристике. У том контексту се свеобухватно сагледавају параметри од утицаја на ефикасност његове примене. Генерално, под појмом стаклени омотач геометријски комплексне форме посматра се све оно што у материјално-конструктивном смислу чини неортогонални омотач као подсистем објекта.

Основни проблем истраживања јесте успостављање веза и интерактивног односа између процеса пројектовања на концептуалном нивоу, материјализације и реализације стакленог омотача геометријски комплексне форме применом закривљеног стакла, као и дефинисање фактора који су са аспекта обликовања, материјализације и производње, а у извесној мери и економичности, од значаја за изводљивост стакленог омотача. Такође, мали број истраживања на ову тему у светској литератури и потпуно одсуство у домаћој литератури, мали број изведених примера стакленог омотача са применом закривљеног стакла код нас као и у малој мери дефинисани стандарди и законске регулативе у области

примене закривљеног стакла на интернационалном нивоу, представљају проблеме са којима се сусреће ово истраживање.

У раду се разматра утицај и значај примене закривљеног конструктивног стакла у материјализацији геометријски комплексних форми омотача архитектонских објеката како би се установила предност оваквог приступа и потенцијални ризици. Кроз теоријску анализу, на студијама случајева архитектонских објеката са омотачем од стакла, посебно закривљеног стакла, установиће се које карактеристике су релевантне за дефинисање његове примене.

Детаљним анализирањем проблематике примене закривљеног стакла у материјализацији геометријски комплексних форми омотача архитектонских објеката сагледавају се могућности за реализацију различите геометрије и система застакљења применом закривљеног конструктивног стакла, уочавају обликовни и конструктивни потенцијали и формирају критеријуми за сагледавање ограничења примене закривљеног стакла са обликовног, технолошког и економског аспекта. Формирани критеријуми омогућавају дефинисање и успостављање параметара за пројектовање и материјализацију геометријски комплексних форми омотача применом закривљеног стакла.

Детаљна студија нових хипотетичких модела испитује геометрију форме и материјализацију појединачних панела и површина као и целог стакленог омотача на коме је примењено закривљено стакло. Дефинишу се нивои комплексности нових хипотетичких модела у погледу геометрије и материјализације. Сагледавају се карактеристике хипотетичких склопова као и њихова изводљивост на основу претходно дефинисаних критеријума. Након упоредне анализе модела, доносе се закључци о најповољнијим моделима у погледу материјализације, као и са визуелно-обликовног и технолошко-економског аспекта. На крају, дефинишу се препоруке за материјализацију стакленог омотача применом закривљеног стакла.

Предмет истраживања је посматран:

- у односу на геометрију комплексне форме стакленог омотача, као и типове панелизације површине омотача,
- у односу на различите системе застакљења,

- у односу на карактеристике закривљеног стакла, његове физичке, обликовне, конструктивне и производне перформансе, уз стално поређење са карактеристикама равног стакла,
- у односу на хипотетичке моделе материјализације стакленог омотача на којима је примењено закривљено стакло и карактеристичне нивое комплексности у погледу геометрије и материјализације.

Предмет истраживања дисертације просторно је одређен подручјем Европе, јер се анализирају карактеристични примери архитектонских објеката са стакленим омотачем геометријски комплексних форми, као и зато што истраживање обухвата анализу карактеристика и техника обликовања и израде закривљеног стакла произвођача на европском тржишту. Примери зграда који су узети за анализу јесу објекти претежно јавних функција као што су музеји, станице, аеродроми, надстршнице и сл. Истраживање такође обухвата подручје Србије с обзиром на то да је последњих година изграђено неколико архитектонских објеката са стакленим омотачем геометријски комплексних форми, као и због чињенице да истраживање обухвата анализу могућности за производњу хипотетичких модела омотача од закривљеног стакла од стране произвођача стакла доступних на домаћем тржишту.

Предложена теза поседује теоријску и практичну димензију. Теоријска димензија заснива се на успостављању критеријума и параметара за пројектовање и материјализацију омотача применом закривљеног конструктивног стакла кроз дефинисање обликовних, технолошких и економских потенцијала и ограничења за његову примену, те успостављању типологије панелизације геометријски комплексних форми стакленог омотача. Практична димензија се огледа у томе што се успостављени критеријуми и параметари за пројектовање и материјализацију омотача применом закривљеног конструктивног стакла, као и успостављена типологија панелизације, проверавају на хипотетичким моделима омотача како би се показала примењивост успостављеног методолошког поступка у процесу пројектовања и материјализације стакленог омотача геометријски комплексне форме како нових објеката тако и у реконструкцији постојећих.

a.1. Дефинисање значаја предмета истраживања

Посебан значај предмета истраживања ове докторске дисертације је у:

- наглашавању и указивању на могућност и потенцијале у обликовном, конструктивном, технолошком и економском погледу који се могу постићи применом закривљеног стакла у материјализацији стакленог омотача геометријски комплексних форми,
- свеобухватном приступу анализи проблема конструкције стакленог омотача геометријски комплексних форми који ће представљати јединствено истраживање тог типа на подручју наше земље, па и у Европи, као и истраживању примене закривљеног стакла у материјализацији омотача које је недовољно истражено и разматрано и у пракси примењено и на интернационалном нивоу,
- формирању типологије стакленог омотача геометријски комплексних форми у односу на геометрију,
- раду на теми која је све више актуелна у Европи и у свету и која ће у будућности постати значајна и у Србији,
- дефинисању критеријума за сагледавање ограничења за примену закривљеног стакла у материјализацији омотача комплексне форме,
- успостављању критеријума и параметара за пројектовање и материјализацију стакленог омотача применом закривљеног стакла,
- стварање теоријске основе за унапређење европских и националних стандарда у области примене стакла у грађевинарству,
- креирању хипотетичких модела стакленог омотача применом елемената закривљеног стакла.

a.2. Теоријско и операционално одређење предмета истраживања

a.2.1. Теоријско одређење предмета истраживања

Садржаји предмета истраживања се могу разврстати на релативно истражене, делимично истражене и неистражене.

Из теоријског и искуственог фонда информација које су релевантне за предмет истраживања примене стакла у геометријски комплексним формама омотача архитектонских објеката, могу се по нивоу обрађености класификовати следећи садржаји:

а) релативно истражени и проверени садржаји:

- примена конструктивног стакла,
- типологије конструктивних стаклених фасада стандардне геометрије са аспекта конструктивног система, система застакљења, спојева и веза,
- архитектонска геометрија комплексних форми.

б) делимично истражени, али необједињени и непроверени садржаји:

- погодности примене закривљеног стакла у материјализацији омотача архитектонских објеката,
- решења различитих конструктивних система, система застакљења, спојева и веза стакленог омотача применом закривљеног стакла
- технике обликовања и производње закривљеног стакла на европском и домаћем тржишту.

в) непроверени и непознати садржаји:

- ограничења примене закривљеног стакла у материјализацији омотача архитектонских објеката са обликовног, конструктивног, економског и технолошког аспекта,
- препоруке за пројектовање и материјализацију омотача применом закривљеног стакла,
- анализа решења стакленог омотача архитектонских објеката применом закривљеног стакла по различитим нивоима комплексности са аспекта геометрије и материјализације.

а.2.2. Операционално одређење предмета истраживања

Операционално одређење предмета истраживања се посматра кроз просторни, временски и димензионални аспект.

1. Просторно одређење предмета истраживања

Просторно одређење предмета истраживања првенствено обухвата подручје Европе, јер се анализирају карактеристични примери архитектонских објеката са стакленим омотачем геометријски комплексних форми, као и зато што истраживање обухвата анализу карактеристика и техника обликовања и израде закривљеног стакла произвођача на европском тржишту. Примери зграда који су

узети за анализу јесу објекти претежно јавних функција као што су музеји, станице, аеродроми, надстршнице и сл.

Истраживање такође обухвата подручје Србије, с обзиром на то да је последњих година изграђено неколико архитектонских објеката са стакленим омотачем геометријски комплексних форми, као и да истраживање обухвата анализу могућности произвођача стакла доступних на домаћем тржишту за производњу хипотетичких модела омотача од закривљеног стакла.

2. Временско одређење предмета истраживања

Временско одређење предмета истраживања је одређено временским периодом изградње архитектонских објеката у Европи и у Србији у чијој материјализацији геометријски комплексног омотача је примењено стакло (период последње деценије 20. века и касније).

Историјска искуства користиће се као неопходна сазнања и поуке за изналажење адекватних решења у садашњости, односно за непосредну будућност.

Истраживање се највећим делом везује за садашњост јер је његов најзначајнији део усмерен на анализу могућности примене закривљеног стакла у материјализацији геометријски комплексних форми омотача архитектонских објеката у Европи, укључујући и Србију, у данашњим условима.

Истраживање се једним делом односи на блиску будућност, с обзиром на све већи број архитектонских објеката комплексних форми и константни пораст потрошње стакла примењеног на зградама, који на годишњем нивоу у свету износи око 4%.

3. Димензионално одређење предмета истраживања

Предмет истраживања припада области архитектуре и урбанизма, као и грађевинарства, ослањајући се на области математике (геометрије) и физике. Кореспондира са друштвеним и економским наукама.

6. Научни циљ истраживања

Основни циљ у тези усмерен је ка документованом и научно аргументованом утврђивању могућности примене стакла у материјализацији геометријски комплексног омотача архитектонских објеката путем анализе потенцијала и ограничења примене закривљеног стакла, односно његових

визуелно-обликовних, енергетских и технолошко-економских потенцијала и ограничења. Из овако дефинисаног основног циља истраживања произилазе следећи циљеви:

- успостављање типологије геометријски комплексних форми стакленог омотача архитектонских објеката са аспекта геометрије,
- анализа карактеристика архитектонских објеката – одабрани примери у Европи и Србији, са аспекта материјализације стакленог омотача геометријски комплексних форми,
- анализа и формирање критеријума оцене визуелно-обликовних и технолошко-економских карактеристика закривљеног стакла доступног на домаћем тржишту, као и упоредна анализа произвођача стакла на домаћем и иностраном тржишту, како би се уочили недостаци и указало на правце развоја домаћег тржишта,
- преглед европских и домаћих стандарда за конструктивну примену стакла у грађевинарству,
- дефинисање обликовних, енергетских, технолошких и економских потенцијала и ограничења за примену закривљеног стакла, са акцентом на примену у материјализацији омотача геометријски комплексних форми,
- успостављање типологије панелизације геометријски комплексних форми стакленог омотача,
- формирање критеријума и параметара за пројектовање и материјализацију омотача геометријски комплексних форми применом закривљеног стакла - успостављање методолошког поступка у процесу пројектовања и материјализације,
- креирање хипотетичких модела материјализације стакленог омотача геометријски комплексних форми применом закривљеног стакла – анализа различитих решења по одређеним нивоима комплексности у погледу геометрије и материјализације као и евалуација разматраних решења.

Коначни циљ тезе огледа се у дефинисању препорука за пројектовање и материјализацију стакленог омотача архитектонских објеката који би омогућио развој и већу примену закривљеног стакла са циљем постизања решења

материјализације стакленог омотача геометријски комплексних форми која су естетски разноврсна, конструктивно стабилна и економски прихватљива.

Тема је интересантна и код нас недовољно истраживана.

в. Задаци истраживања

На основу дефинисаних научних циљева дисертације издвајају се основни задаци истраживања:

- идентификација и анализа кључних параметара релевантних и неопходних за истраживање могућности и ограничења примене закривљеног стакла у материјализацији геометријски комплексних форми омотача архитектонских објеката, и то у погледу обликовних, енергетских и технолошко-економских катактеристика закривљеног стакла,
- прикупљање, упознавање и анализа стандарда из области примене стакла у грађевинарству и конструктивне примене стакла у Европи и у Србији,
- идентификација, анализа и евалуација хипотетичких модела материјализације стакленог омотача геометријски комплексних форми применом закривљеног стакла, који јасно треба да представе могућности и ограничења примене закривљеног стакла у омотачу архитектонских објеката,
- идентификација и дефинисање критеријума и параметара за пројектовање и материјализацију омотача применом закривљеног стакла,
- дефинисање препорука за пројектовање и материјализацију стаклених омотача геометријски комплексних форми са циљем успостављања методолошког поступка у процесу пројектовања и материјализације стакленог омотача комплексних форми како нових објеката тако и у реконструкцији постојећих.

г. Научне хипотезе

У складу са изнетим циљевима истраживања могу се дефинисати следеће полазне претпоставке од којих се полази у тези:

- Уочавањем општих и специфичних карактеристика стаклених омотача геометријски комплексних форми и њихових основних типолошких образаца, могу се идентификовати потенцијали и ограничења у погледу

примене закривљеног стакла, који се потом могу приказати кроз критеријуме и параметре за пројектовање и материјализацију, односно успоставити методолошки поступак.

- Постојећа теоријска и практична искуства у домену пројектовања и материјализације стакленог омотача геометријски комплексних форми коришћењем закривљеног стакла, могу послужити за дефинисање хипотетичких модела и проверу могућности њихове фабрикације у Србији.
- Применом закривљеног стакла у материјализацији омотача геометријски комплексних форми могуће је постићи максимално искоришћење карактеристика стакла.

д. Научне методе истраживања

Имајући у виду претходно изложене циљеве и задатке истраживања, у раду ће се користити следеће опште и посебне методе истраживања:

- формулација проблема и предмета истраживања и интерпретација основних теоријских појмова који су од значаја за истраживање,
- прикупљање података, проучавање доступне литературе и анализа претходних истраживања из области релевантних за сагледавање могућности примене закривљеног стакла у материјализацији геометријски комплексне форме омотача архитектонских објеката, како би се адекватно формирала слика чињеничног стања и прикупили подаци који ће представљати базу за касније фазе истраживања у овом раду; обрада података и систематизација података на основу којих ће бити разрађен систем хипотеза; метод **анализе садржаја** библиографских извора подразумева доношење одређених закључака о природи и карактеру проблема, којима ће се потврдити систем хипотеза,
- **анализа** и **компаративна анализа** постојећих примера архитектонских објеката са стакленим омотачем геометријски комплексних форми из европске и српске праксе,
- детаљна **анализа** могућности примене закривљеног стакла у материјализацији геометријски комплексних форми омотача

архитектонских објеката са обликовног, енергетског и технолошко-економског аспекта,

- прикупљање техничко-технолошких и других података **анкетирањем** произвођача равног и закривљеног стакла,
- **структурална и дијалектичка анализа** проблематике примене закривљеног стакла у метријализацији омотача архитектонских објеката у циљу успостављања и дефинисања критеријума за пројектовање и материјализацију стаклених омотача геометријски комплексних форми,
- **метод систематског опажања** (посматрања) с циљем стицања реалне слике о могућности креирања хипотетичким моделима материјализације омотача применом закривљеног стакла,
- спровођење **анкете** с циљем утврђивања мишљења архитеката у вези са естетским карактеристикама различитих решења хипотетичких модела стакленог омотача,
- **метод студије случаја** представља специфичну врсту метода решавања оперативних проблема, која се користи за прикупљање података о новим и непознатим појавама на основу комплексног истраживања појединачних случајева материјализације стакленог омотача (истраживање ће се обавити на одабраном узорку геометријски комплексних стаклених омотача архитектонских објеката),
- **евалуација** и упоредна анализа хипотетичких модела стакленог омотача.

Истраживање се закључује завршном **интерпретацијом резултата** спроведених анализа у оквиру којих ће бити извучени закључци и дефинисани нови уочени научни проблеми и питања до којих се дошло у процесу истраживања. **Синтеза** свих претходно прикупљених података која се овом приликом спроводи треба да послужи и у сврху успостављања корелације са полазним чињеницама и постојећим стањем примене стакла у материјализацији омотача како би се установили основни принципи и закључци.

ђ. Технике истраживања

Истраживање се врши помоћу: личне комуникације са стручњацима у Енглеској, Аустрији и Србији (инжењери и архитекте) са јаким искуством

пројектовања стаклених фасада и структура; техничке документације и примарних и секундарних извора: истраживање литературе (која је у непосредној или посредној вези са темом) као и теренског рекогносцирања (обилазак објеката, фабрика за производњу стакла и фасада, фотографисање и записивање на лицу места).

е. Научна оправданост дисертације, очекивани резултати истраживања и практична примена резултата

Повод за ово истраживање је уочена чињеница да нови културолошки и економски модели функционисања друштва и града траже и нове приступе у пројектовању и конструисању омотача објеката по коме се простор, у контексту времена, налази у сталним променама. Ови процеси акцентују архитектуру комплексних форми која је пре свега динамична, променљива, као и стакло које је комплексан и софистициран материјал. Наша архитектонска пракса полако постаје осетљива на ову врста промена.

Актуелност теме је у вези са чињеницом постојања већег броја нових квалитетних примера објеката комплексних форми са стакленим омотачем, не само у веома богатим срединама, већ и у нашој средини и непосредном окружењу.

Научна оправданост дисертације се огледа у неопходности научног и детаљног приступа проблему материјализације комплексних форми стакленог омотача архитектонских објеката. Овим истраживањем биће омогућено преношење знања целокупној домаћој стручној и научној јавности која би била упозната са релевантним факторима, потенцијалима и ограничењима примене закривљеног стакла, као предусловом за укључивање у свеобухватни, интерактивни и мултидисциплинарни приступ пројектовању стакленог омотача комплексних форми уопште, а посебно применом закривљеног стакла, и који треба да обједини интересе архитектонске струке са инжењерима, технолозима, произвођачима стакла и фасада, инвеститорима, итд. Допринос овог истраживања огледаће се у сазнању о проблематици примене закривљеног стакла за омотач објекта, систематизацији релевантних параметара карактеристичних за његову примену, као и објашњењу условљености одабира обликовних, конструктивних, технолошких и економских карактеристика закривљеног стакла.

Посебан допринос овог истраживања може се очекивати у следећим областима: идентификацији кључних разлога за примену закривљеног стакла у материјализацији омотача архитектонских објеката, са посебним акцентом на обликовне и конструктивне карактеристике као најутицајније на његов избор за апликацију у омотач објекта; идентификацији утицаја нових тенденција у пројектовању архитектонских објеката комплексних форми, као и у области конструктивне примене стакла; изучавању хипотетичких модела материјализације омотача комплексних форми применом закривљеног стакла; успостављању критеријума за пројектовање и материјализацију геометријски комплексне форме омотача применом закривљеног стакла.

Очекивани резултати тезе се огледају у испуњењу постављених циљева истраживања, као и кроз потврду или негирање постављених хипотеза. Очекивани резултат је операционализација (стављање у функцију пројектовања) знања за пројектовање и материјализацију геометријски комплексних форми омотача с циљем побољшања квалитета стаклене површине омотача кроз максимално искоришћење обликовних и конструктивних карактеристика закривљеног стакла. На овај начин би се избегла неповољна решења узрокована непријатним ефектом искривљене слике, којима се знатно угрожава естетски квалитет омотача. Очекивани резултати докторске дисертације представљаће значајан допринос архитектонској и грађевинској струци на територији Србије као и Европе, с циљем олакшања сарадње стручњака, пошто савремени архитектонски концепти конструктивних стаклених омотача захтевају блиску сарадњу архитекте са грађевинским инжењерима и другим компетентним лицима из домена који је релевантан за стаклени омотач.

Архитектима и грађевинским инжењерима су намењене бројне информације, детаљи, правила и препоруке за пројектовање и материјализацију геометријски комплексних омотача са применом закривљеног стакла, јер пројектовање стакленог омотача захтева да архитекта, односно грађевински инжењер поседује адекватна знања о стаклу као материјалу омотача зграда и могућностима његове примене. Индустији грађевинских материјала, тачније произвођачима стакла и фасада ова докторска дисертација ће отворити могућност сагледавања компатибилности сопствених производа са савременим

архитектонским трендовима, и карактеристика у односу на производе на европском тржишту. Овај рад ће јасно исказати будуће потребе и неопходност унапређења постојећих производа на нашем тржишту, с циљем олакшања пројектовања и изградње објеката геометријски комплексних форми омотача са применом закривљеног стакла који ће моћи у потпуности да испуне захтеве архитеката.

Кроз ову докторску дисертацију моћи ће да се сагледа основа за унапређење европских и националних стандарда у области примене стакла у грађевинарству.

Посебан добринос ове докторске дисертације јесте практична примена истраживања. Наиме, истражени хипотетички модели омотача са применом закривљеног стакла, могу применити у процесу пројектовања и материјализације како нових објеката тако и реконструкције постојећих. Провера оптималних решења са обликовног аспекта и аспекта материјализације, као и процена њихове изводљивости треба да подстакне архитекте и инвеститоре на већу примену закривљеног стакла.

ж. Преглед досадашњих истраживања

Велики број научника из различитих области науке (архитектуре, грађевине, безбедности) бави се феноменом стакла у архитектури проучавајући га са различитих становишта, а у највећем броју случајева са становишта функције - конструкције, како појединачних стаклених елемената, тако и целокупне стаклене структуре. Знатно мањи број истраживача се бавио геометријски комплексним формама стаклене архитектуре, а типологија геометријски комплексних форми стаклених структура као и потенцијали и ограничења примене закривљеног стакла веома ретко су изучавани у светској литератури, док код нас истраживачи нису разматрали овај проблем.

ж.1. Инострана искуства

Коришћење конструктивних карактеристика стакла први пут је дошло до изражаја у раним деветесетим годинама када су прва искуства из инжењерске праксе публикована у књизи *Glass in building* (Button and Pye, 1993) са циљем да демистификују улогу стакла примењеног на објектима. Најзад, свеобухватни

преглед значаја и технологије стакла у савременој архитектури приказан је у књизи *Glass in Architecture* (Wigginton, 1996), након чега је уследио велики број студија и публикација који садрже детаљне анализе различитих конструкција у све широј области конструктивне примене стакла. Специјално издање часописа *Journal of Architectural Engineering* под насловом *Structural Design of Architectural Glazing* (Behr and Minor, 1996), фокусиран на наизглед парадокс у представљању конструктивног аспекта компоненти архитектонског застакљења, а које су углавном пројектоване као неконструктивне или као компоненте архитектонског омотача објекта, подстакао је полемику стручне јавности у погледу дефинисања врсте и реда стаклених елемената (елементи првог, другог, трећег реда..), који морају бити пројектовани као конструктивни елементи. У наведеном тексту се даље наводи да у случају природних катастрофа (озбиљних олуја и земљотреса) и катастрофа чији узрочник је и сам човек (експлозија), архитектонско застакљење је често на првој линији одбране зграде што указује да, у том контексту, мора бити пројектовано као конструктивна компонента. Међународни пројекат *COST Action TU0905: Structural Glass – Novel design methods and next generation products*, а чији учесник је био и аутор докторске дисертације, уврстио је публикацију *Structural Use of Glass* (Haldimann et al., 2008) у својеврстан водич за примену стакла као конструктивног елемента. Међу најзначајније изворе који се односе на савремене технологије конструктивних стаклених фасада могу се навести *Structural Glass Facades and Enclosures* (Patterson, 2011) *Glass Structures: Design and Construction of Self-supporting Skins* (Wurm, 2007).

С друге стране, у технолошки развијеним земљама традиционални метод пројектовања се променио у основи последњих година услед промена у културном контексту и померања граница савремених технологија стварајући нове могућности и значења за архитектонски пројекат. Ово је омогућило архитектама и инжењерима слободу у погледу експериментисања са комплексним формама уз коришћење традиционалних материјала. Такви архитектонски објекти су постали симбол елеганције, грациозности, прогреса и иновација. Према Шумахеру (Schumacher, 2012) та комплексност се не може свести и објаснити на једноставан начин, јер је чине концептуална, просторна, технолошка комплексност што захтева дубљу и критичку анализу. Комплексна архитектонска

форма се састоји из много делова који су у интеракцији једни са другима тако да сваки део има степен независности у односу на друге али уједно и зависи од других. Посматрано са аспекта стакленог омотача комплексне форме, могу се препознати три различита типа комплексности (Paoletti, 2005):

- Први тип може се препознати у геометрији флуидних форми, тачније површинама омотача које нису базирани на стандардној геометрији већ на сегментима сферичних облика, формирајући волумене са различитим степеном закривљености.
- Други тип укључује функционални аспект целокупног система омотача или компоненте, оба са техничког и архитектонског аспекта. Тако на пример, комбинација равних, конкавних и конвексних стаклених панела омотача уграђених у ромбоидну решетку у случају Прада (*Prada*) објекта у Токију омогућила је да форма панела, заптивка и додатни елементи омотача заједно допринесу хиперстатичком укрућењу конструкције као одговор на сеизмичке услове у Јапану.
- Трећи тип односи се на комплексне форме настале кроз однос архитектонског модела и особина материјала. У овим пројектима, рачунарске и дигиталне технологије омогућавају да, уз помоћ метода математичких прорачуна, првобитан концепт (идеја) постане реалан производ. Овај концепт назван је "F2F" (*File to Factory*), односно од "дизајна до производње кроз коришћење заједничког језика".

Иако је комплексна форма архитектонских објеката предмет разних дискусија и истраживања, питање њене изводљивости још увек није у потпуности јасно, јер таква форма захтева другачији приступ од традиционалне конструктивне логике. Најкраће речено, неопходно је удружити слободу креативног дизајна и одабир одговарајуће технологије за производњу сваког елемента, јер изводљивост комплексних форми зависи, истовремено, од конструкције, материјала и технологије.

Генерално, коришћење закривљеног стакла постаје све популарније у архитектонском пројектовању, због чега је неопходно имати у виду његове другачије конструктивне карактеристике, утицај на пројектовање применом конструктивног стакла, као и његова обликовна, конструктивна, економска и

производна ограничења у поређењу са равним стаклом. Многа ограничења произилазе из димензије омотача и карактеристика самог материјала.

Разне савремене технологије израде стакла омогућиле су данас производњу материјала са одређеним сетом механичких и физичких карактеристика у широком опсегу различитих облика и величина. Закривљена стакла подразумевају једноструко закривљена и двоструко закривљена стакла која могу бити обликована и произведена са потпуно произвољном геометријом граничних кривих. Једноструко закривљено стакло може да се примени да генерише функцију лука или да стабилизује панел против извијања, док двоструко закривљено стакло се примењује у материјализацији купола и геометријски комплексних форми омотача. Комбинација стаклених елемената примењена у различитим конструктивним системима и изабраној геометрији доприноси одређеним конструктивним карактеристикама, а правилно одабрана комбинација обликовних, конструктивних и физичких карактеристика стаклених елемената може допринети исправној материјализацији стакленог омотача комплексне форме.

У савременој пракси примењују се следећи начини производње закривљеног стакла:

1. Поступак савијања загревањем и гравитацијом,.
2. Поступак савијања на производној линији,
3. Поступак хладног савијања у комбинацији са процесом ламинирања,.
4. Поступак хладног савијања током монтаже,.

Сваки од наведених производних процеса утиче значајно на физичко-механичке карактеристике финалног производа одређујући истовремено максималне димензије, визуелни квалитет и могућност даље обраде закривљених стаклених елемената.

Са аспекта трошкова производње, геометрија стакла (тип закривљења) директно је повезана са ценом, и у том смислу двоструко закривљено стакло је знатно скупље него цилиндрично једноструко закривљено стакло. Смањење трошкова подразумева примену метода оптимизације површине стакленог омотача са аспекта геометрије, врсте стакла, панела и технологија њихове производње. У том смислу, чешћа је примена геометријски једноставних облика

стакленог панела као и принцип понављања истог облика панела на различитим деловима стакленог омотача комплексне форме.

Данас је јасно теоретски усвојено, а у пракси и потврђено да примена закривљеног стакла у омотачу архитектонских објеката има предности које су у најкраћем следеће:

- већи распон, односно конструктивни растер стакленог омотача,
- флексибилност дизајна и димензија стаклених елемената,
- већа крутост појединачних елемената, као и целокупног омотача,
- мањи број елемената видне потконструкције,
- већа транспарентност стакленог омотача.

Један од значајних недостатака примене закривљеног стакла је цена његове производње.

ж.2. Домаћа истраживања

Домаћа истраживања која су се бавила феноменом стакла у архитектури, његовим обликовним и конструктивним потенцијалима, као и типологијом са аспекта конструкције и застакљења веома су скромна.

Треба истаћи књигу Јасне Чикић "Стакло и конструктивна примена у архитектури" (Чикић, 2007), у којој се ауторка бавила применом стакла као материјала носећих елемената и склопова у архитектури, односно стакла као конструктивног материјала. Приказ типологије конструктивних елемената, склопова и веза сведен је на стаклене структуре са применом равног стакла. Ова књига је значајна за ово истраживање, и на неки начин теза се ослања на научне чињенице приказане у магистарској тези, која је претходила књизи.

з. Преглед садржаја дисертације

Структуру рада поред Увода и Закључка чине 6 поглавља: Приказ развоја геометријски комплексних архитектонских форми, Анализа примера/студије случаја геометријски комплексних форми стаклених омотача архитектонских објеката, Закривљено vs. равно стакло примењено на архитектонским објектима, Мапирање процеса пројектовања и конструкције геометријски комплексног стакленог омотача, Потенцијали и ограничења примене стакла у материјализацији геометријски комплексних форми омотача, Испитивање хипотетичких модела материјализације стакленог омотача.

Прво поглавље - *Приказ развоја геометријски комплексних архитектонских форми* - даје теоријске поставке на којима се базира истраживање и основне принципе архитектонске геометрије. У овом поглављу се такође даје и типологија геометријски комплексних форми стаклених омотача, као и појединачних стаклених панела, према начину генерисања и типу закривљености, а који ће даље у раду бити коришћени и анализирани.

У другом поглављу под називом - *Анализа примера/студије случаја геометријски комплексних форми стаклених омотача архитектонских објеката* - се детаљно дефинише предмет истраживања. Анализирају се примери/студије случаја геометријски комплексних форми стаклених омотача, њихове генералне техничко технолошке карактеристике, примењени системи конструкције, начини материјализације и специфичности. Студије случаја су сврстане у категорије према геометрији стаклених елемената и једној од основних функција – термичкој заштити.

Треће поглавље - *Закривљено vs. равно стакло примењено на архитектонским објектима* - даје увод у основне аспекте коришћења и карактеристике равног и закривљеног стакла као грађевинског материјала. Главни фокус представља идентификација различитих технологија производње и обликовања закривљеног стакла, као и анализа основних принципа за пројектовање компоненти од конструктивног (закривљеног) стакла. С обзиром да нова техника хладног савијања стакла није била позната, до сада, у Србији, дате су основне теоријске поставке и детаљно објашњење две основне технике хладног савијања, као и преглед најзначајнијих утицајних фактора, и начина примене. Идентификацијом неких, до сада у домаћим условима непознатих информација, обезбеђен је фокус за истраживање у следећим поглављима.

У четвртном поглављу - *Мапирање процеса пројектовања и конструкције геометријски комплексних стаклених омотача* - се прво идентификују најзначајнији поступци/кораци карактеристични за пројектовање и конструкцију геометријски комплексних форми стаклених омотача да би се креирала мапа процеса (применом начина графичког представљања специфичних процеса у моделу пословног процеса - *BuildingSMART's adaptation of Business Process Map Notation*, и коришћењем одговарајућег софтвера *Visio Professional*) и њени

елементи проверавали кроз спроведене интервјуе са стручњацима у Европи и Србији. Поред тога, применом методе анкете добијени су специфични искуствени подаци. Сама мапа представља основу за развој подржавајућих алата који помажу ефикасном складиштењу, приступу и преносу информација о предложеном моделу закривљеног стакленог омотача.

Пето поглавље - *Потенцијали и ограничења примене стакла у материјализацији геометријски комплексних форми стаклених омотача* - представља део истраживачког процеса у коме су анализирани визуелно-обликовни, енергетски и технолошко-економски потенцијали и ограничења примене, и како они утичу на перформансе самог стакла и целог омотача. На основу анализираних аспеката дефинисани су релевантни критеријуми. Утврђени критеријуми коришћени су при вредновању креираних модела.

У шестом поглављу - *Испитивање хипотетичких модела материјализације стакленог омотача* - се креирају карактеристични хипотетички модели различитих варијантних решења обликовања стакленог омотача у погледу, како различите геометрије и димензија самих стаклених панела, тако и различите геометрије укупне површине стакленог омотача. Такође, дефинисане су подваријанте у погледу материјализације што подразумева различите типове застакљења која се најчешће примењују. Потом је извршена евалуација и компаративна анализа модела са аспекта претходно дефинисаних визуелно-обликовних и технолошко-економских критеријумских параметара. Илуструје се студија случаја различитих модела и даје преглед анализираних модела са компаративном анализом добијених вредности.

У *Закључку* се даје приказ резултата истраживања, потврђују постављене хипотезе, образлаже применљивост постигнутих резултата и указује на правце даљих истраживања. Дискутују се резултати спроведене евалуације и доказује могућност практичне примене закривљеног стакла и нове технике обликовања. Поред тога треба истаћи да је дефинисан модел мапирања процеса пројектовања и конструкције геометријски комплексног стакленог омотача, чије коришћење је могуће како у свакодневној пракси тако и у даљим истраживањима. Такође се указује на потенцијалне нерешене проблеме како на теоријском тако и на практичном плану и идентификују правци даљег истраживања.

1. Приказ развоја геометријски комплексних архитектонских форми

У овом поглављу дате су теоријске поставке на којима се базира истраживање, као и основни принципи архитектонске геометрије. Поред тога, дефинисана је типологија геометријски комплексних форми стаклених омотача/конструкција, као и појединачних стаклених панела према типу геометрије (начину генерисања) и типу закривљености, а који су даље у раду коришћени за креирање геометријски различитих хипотетичких модела и њихову анализу.

1.1 Историјски правци и савремене тенденције

Прва појава нерегуларних кривих у архитектури је везана за период барока. Естетски се повезује са жељом за уношењем покрета у архитектуру а математички је везана за појаву интегралног рачуна (Giedion, 1941). Најистакнутије примере тог периода представљају дела архитекте Франческа Бороминија (Francesco Borromini) *Sant' Ivo alla Sapienza* и *San Carlo alle Quattro Fontane* (Слика 1.1).



Слика 1.1. Црква *San Carlo alle Quattro Fontane*, 17. век, Рим
(Извор: Преузето са https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Roman_architecture.jpg, 06. 4. 2016)

Следећи период интензивне употребе нерегуларних кривих у архитектури је везан за период арт нувоа (*Art Nouveau*) где је њихова употреба била знак раскида са традиционалним еклектичким стиловима путем имитације природних форми и тежње за стварањем модерне архитектуре. Најзначајнији представник овог периода је Антони Гауди чији архитектонски објекти попут *Casa Batlló* и *Sagrada Familia* у Барселони и данас представљају изузетне примере архитектуре слободних форми (Слика 1.2).



Слика 1.2. Објекти Антонија Гудија, Барселона: а) *Casa Mila*; б) *Casa Batlló*; ц) *Sagrada Familia* (Извор: Аутор, 2014)

Прву половину 20. века обележила је употреба армираног бетона и експериментисање са могућношћу његовог коришћења ради добијања различитих архитектонских форми. Као дело које је оставило трага у историји архитектуре може се поменути објекат Ле Корбизијеа *Chapel of Notre Dam Du Haut* (Слика 1.3).



Слика 1.3. Црква *Chapel of Notre Dam Du Haut*, архитекта Ле Корбизије, Ronchamp, Француска (Извор: Преузето са <https://en.wikipedia.org/w/index.php?curid=19648493>, 06. 4. 2016)

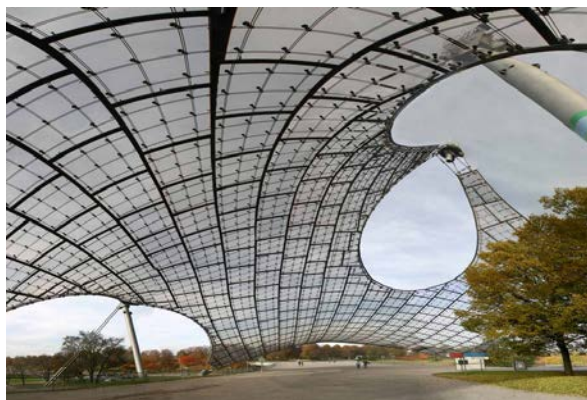
Истраживање обликовних могућности армираног бетона је добило посебан замах са развојем танких бетонских љуски које су заслужне за многобројне

футуристичке архитектонске објекте средином 20. века, међу којима је најпрепознатљивији објекат *TWA* аеродромског терминала (Слика 1.4) архитекте Ера Саринена (Eero Saarinen).



Слика 1.4. *TWA* аеродромски терминал, архитекта Еро Саринен, Њу Јорк (Извор: Преузето са <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=46423333>, 06.04.2016.)

Поред бетонских, истраживане су могућности коришћења и других материјала за остваривање танких љуски које би ослободиле архитектонске објекте традиционалних стега масивних носећих конструкција. Најпознатији истраживач у овој области је био Ото Фрај (Otto Frei) који је својим комплексом Минхенског олимпијског стадиона изненадио свет 1972. године (Слика 1.5).



Слика 1.5. Обешена надстрешница Минхенског олимпијског стадиона, архитекта Ото Фрај, Минхен; (Извор: Преузето са <http://www.e-architect.co.uk/wp-content/uploads/2015/03/munich-stadium-by-frei-otto-.jpg>, 06. 4. 2016)

Почетком 21. века архитектура слободних форми добија нови замах са појавом рачунарских програма који омогућавају пројектовање и извођење архитектонских објеката сложених форми. Међу архитектама који су први усвојили рачунарске системе за моделовање архитектонских објеката, био је Френк Гери (Frank Ghery) (Слика 1.6).



Слика 1.6. Музеј *Guggenheim*, архитекта Френк Гери, Билбао
(Извор: Преузето са <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1229011>, 06. 4. 2016)

Даљи развој рачунарских програма, тежња ка ослобађању архитектуре од свих стега, унапређење техника извођења и појава нових материјала утицали су на све већу заступљеност грађевина слободних форми у данашњој архитектури као што показују бројни примери/студије случаја приказани касније у дисертацији. Стаклене површине на зградама, такође прате тренд геометријски комплексних форми, било да би се уклопиле у геометрију објеката, било због посебних захтева за застакљењем што доводи до све већег интересовања архитеката за коришћењем закривљеног стакла у њиховим пројектима.

1.2 Улога архитектонске геометрије у пројектовању стакленог омотача геометријски комплексних форми

1.2.1 Улога геометрије у архитектури

Геометрија је део математике који се бави формама, облицима, димензијама, пропорцијама, где је доминатно визуелно опажање и представљање. Како је визуелно представљање доминантан део архитектонског пројектовања, тако је и геометрија важан део архитектуре. С обзиром на то да се при пројектовању и грађењу константно примењује визуелизација, архитекте у свом раду константно примењују различите елементе геометрије. Преко 2000 година Еуклидска геометрија је сматрана јединим системом геометрије који се могао применити у реалности. Током 19. века дошло се до сазнања да постоје и други применљиви системи геометрије, као што су сферички и хиперболички. Такође, постоје и другачији начини представљања геометрије до којих се дошло с временом, као што су перспектива, пројектантска геометрија, картезијанска геометрија, диференцијална геометрија, фрактална геометрија, топологија и сл., с одговарајућим применама у архитектури.

У овом поглављу биће истражене врсте геометрије, њихов утицај на савремене комплексне (слободне) форме у архитектури, као и могуће везе и односи између различитих концепата геометријски комплексних форми стакленог омотача, укључујући њихове основне елементе, и различите аспекте геометрије и њене улоге у пројектовању геометријски комплексних форми стакленог омотача.

Како се геометрија развијала у математици, тако се њена примена у архитектури мењала. Претпоставља се да су се основне идеје о формама и облицима развиле кроз посматрање природе и неба још у раним цивилизацијама, што је касније могло додатно да се примени за практичне потребе као што су мерење и прорачун простора. Порекло речи геометрија која потиче од грчке речи *geo* (земља) и *metron* (мерење) указује на то да су се још Грци односили према њој као метричкој науци, а отишли су и корак даље тиме што су установили прорачуне ("Geometry-Mathematics", 2015). Слично, како се геометрија у математици развијала од дводимензионалне, као и апстрактног описивања окружења, до момента када је могуће било уочити и представити комплексну и

специфичну природу различитих облика, тако је постојао и развојни процес од дводимензионалног једноставног приступа форми и простору у архитектури до комплексних тродимензионалних форми. Док су значајни помаци у развоју увек били у домену математике, архитекте су ретко долазиле до нових решења и концепата геометрије. То потврђује чињеница да је већином увођење нових концепата геометрије у математици, праћено увођењем нових принципа геометрије у архитектури, али скоро увек у значајно каснијем периоду.

Пројектовање савремених архитектонских објеката данас, тешко је замислити без примене различитих принципа и елемената геометрије који су се с временом развили и који приказују колико је важна њена улога у архитектонском пројектовању и изградњи: од приступа пројектовању у модерном покрету који се заснивао на развоју визуелних елемената (правих, кривих) за описивање окружења још у предшколском образовању (Баухаус); затим увођења нацртне геометрије у архитектонско образовање и систематичнијег начина описивања објеката којим се генеришу различити изгледи објекта неопходни у процесу производње првенствено његовог омотача; преко дигиталних алата развијених крајем 20. века чија примена је неопходна како за генерисање геометријски комплексних модела објеката тако и за његову изградњу; па до новије примене геометрије у зеленој архитектури за дефинисање одговарајућих соларних углова с циљем потенцирања коришћења сунчеве енергије или одређивања углова и размака застора за заштиту од сунчевог зрачења.

Различите геометријски комплексне и креативне форме које нису део нашег свакодневног искуства и које данас постављају нове темеље у геометрији и теорији форми, у потпуности су доступне архитектама и могуће их је представити и визуелизовати уз помоћ савремених компјутерских програма базираних на различитим геометријама. Највећи број савремених комплексних форми омотача објеката генерисан је уз помоћ различитих кубуса, закривљених динамичких структура и извитоперених решетки. Чарлс Џенкс (Charles Jencks), архитекта урбаниста и дизајнер, и теоретичар, и критичар архитектуре, у свом есеју о теорији дигиталног пројектовања поставља питање да ли је нова нелинеарна архитектура у односу на стари модернизам супериорнија, сензуалнија, функционалнија, погоднија за кориснике, ближа природи и нашем разумевању

космоса; такође, да ли је ближа естетским кодовима који су уграђени у нашу перцепцију и може ли да замени традицију из које су настали постмодерна и деконструктивизам. На сва постављена питања Џенкс, имплицитно, даје само један одговор, да може бити "да", али је сувише рано да се каже, с обзиром на то да постоје и други аргументи који подржавају културну и духовну природу, а да би архитектура била у духу савременог живота и форми у уметности, мора да истражује "нове језике" који рефлектују нови поглед на свет. Такође, Џенкс даље полемише: да ли се овој новој парадигми свесно тежи и да ли се препознаје само паралела између науке и архитектуре или нешто дубље; и да ли је коришћење компјутера за пројектовање закривљених објеката мода или промена у менталном "пејзажу" (Сагро, 2013). Колико, заиста, архитекте разумеју фрактале, теорију појава, савијање, нелинеарност и самоорганизујуће системе, и може ли овај тренд да успостави нову иконографију, нови стил и ново значење, као и да ли се може изпројектовати цео један град на овај начин, су питања за која теоретичари и даље траже одговоре.

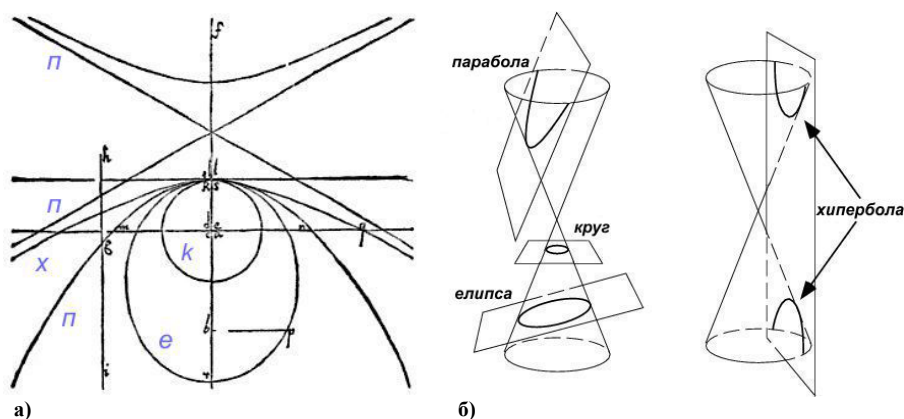
Према Бранку Коларевићу (Kolarevic, 2003) идеја француског мислиоца и филозофа Жила Делуза (Gilles Deleuze) да постоје хиљаде "платоа" - мноштво позиција са којих се могу креирати различите конструкције, у суштини, на нелинеаран начин, је жељно прихваћена од стране великог броја авангардних архитеката да би оспорила све присутну линеарну условљеност пројектовања. Коларевић, даље, истиче важност Грег Линовог (Greg Lynn) промишљања, записаног у есеју о "Архитектонској криволинеарности", о новом приступу пројектовању које се удаљава од "логике сукоба и супротности" присутне у деконструктивизму, да би се развила више "флуидна логика повезивања" (Kolarevic 2003, p.4). Та нова флуидност повезивања манифестована је кроз процес "набирања" структура – стратегија која се разликује од Еуклидске геометрије дискретних равних кубуса представљених у картезијанском простору, и која користи принцип тополошког представљања форме или геометрије гумених елемената које су представљене континуалним кривама и кривим површима.

Прва формална и систематична верзија постулата и теорема геометрије представљена је кроз 13 књига под називом "Елементи" грчког математичара Еуклида 300 године пре нове ере ("Euclids Elements", 2015) и данас представља

основ разних истраживања у математици, где су се првих шест књига бавиле дводимензионалном геометријом, а последње три тродимензионалним геометријским облицима (правилни полиедри) али не укључује дескриптивне теореме које се баве положајем облика или објеката већ само метричким теоремама које подразумевају мерења или својства предмета или објеката. Размишљање о архитектури кроз векове било је засновано на Еуклидским елементима као и Платоновим телима. Еуклид је користио пет основних постулата од којих су прва четири сматрана очигледним (права се добија спајањем две тачке; свака права се може неограничено продужити; свака права је полупречник круга; сви прави углови су подударни) и представљају постулате апсолутне геометрије. Пети постулат "паралелности" тврди да су две линије паралелне, односно не секу се ако је трећа линија сече под правим углом. У Еуклидској геометрији то подразумева да у свакој тачки постоји само једна паралелна линија у односу на било коју другу линију. Еуклид је користио постулате да докаже већину својих теорема, од којих су најважније Питагорина теорема и теорема о подударности и сличности троуглова, али све теореме су се односиле на једну раван. Грци су били заинтересовани за дефинисање апсолутних и непроменљивих метричких карактеристика предмета и објеката као што су сегменти правих, углови, површине и запремине и њихови односи, али нису имали концепт тродимензионалног континуитета и бесконачног простора. Из тог разлога, грчка геометрија и њен приступ формама сматрају се дводимензионалним, а њихово бављење тро-димензионалним предметима углавном је било усмерено на "коначне границе" самих објеката које су у ствари биле генерисане помоћу дво-димензионалних облика (троуглова, четвороуглова и петоуглова). Управо пети, горе поменути постулат је отворио врата за не-Еуклидске геометрије чије постојање је, касније на почетку 19. века, успешно демонстрирао Карл Фридрих Гаус (Carl Friedrich Gauss).

Линеарна перспектива као један од начина представљања геометрије, у правом смислу свог значења, коришћења је у ренесансном сликарству да да визуелну дубину и да тачно представи стварност, односно да представи тродимензионалне предмете у дводимензионалној равни. Први писани запис о перспективи дао је Алберти (Leon Battista Alberti) у својој књизи "О сликарству"

(*Della Pittura*) из 15. века (Leon Battista, 1970), где је основни принцип да раван слике представља пресечну раван "видног конуса". Албертијев начин представљања перспективе са фокусом у једној тачки био је основни и најједноставнији начин њеног представљања. Касније су сликари попут Пјера дела Франческе (Pierro Della Francesca) и Алберта Дирера (Albrecht Dürer) истраживали цртање кривих у перспективи. Линеарна перспектива развијена током ренесансе је први познати начин приказивања објеката у тродимензионалном простору са жељом да тачно представе стварност. Такође, у овом периоду постојао је двосмерни однос између објекта и посматрача, и важан је био начин на који се мењао изглед објекта у односу на позицију поматрача при чему се појединачна својства објекта не мењају док су настале промене резултат другачије позиције поматрача ("Linear Perspective", 2016). Нучници често полемишу да начин на који је перспектива геометријски конструисана не представља просторну структуру нашег визуелног простора, већ посебан поглед на простор.



Слика 1.7. Кеплеров систем конуса: а) Различита својства конуса представљена у једној равни; и б) Различити пресеци конуса генерисани пресеком равни кроз конус под различитим угловима, (Извор: а) Field 1997: 184; и б) Преузето са <http://mathworld.wolfram.com/ConicSection.html>, 12. 3. 2014)

Једним од првих дефинисања елемената кривих може се сматрати Кеплеров предложени систем конуса који је објединио свих пет могућих пресека конуса (круг, елипса, парабола, хипербола и права) у једној равни, са заједничком осом и средишњом тачком (Слика 1.7). С обзиром на то да је Кеплер предпоставио да сви конусни пресеци имају два средишта, у случају круга и линије средишта су у једној тачки. Систем је компликован с обзиром на то да се својства конуса мењају лагано из једног типа у други (средиште се приближава померањем елипсе све ближе форми круга и обрнуто померање све ближе форми

параболе, он се удаљава; удаљеност је коначна у случају елипсе и хиперболе и бесконачна у случају параболе) (Field, 1997). Ово је допринело идеји да је линија круг са центром у бесконачности и отворило даља истраживања о промени пројектоване слике услед промене угла или позиције равни која сече видно поље.

Тако је Дусарге (Girard Desargues) средином 17. века развио пројективну геометрију с циљем проучавања особина објеката које варирају услед пројективне трансформације. Он је први направио значајно одступање од метричких теорема геометрије које се заснивају на концепту растојања, тако што је указао на бесконачност (сваки сегмент линије може се бесконачно продужити на обе стране; све паралелне линије се пресецају у бесконачности; свака равна се може проширити до бесконачности) и тиме закључио да су конус и цилиндар слични тако што цилиндар може бити конус са врхом у бесконачности. Појам пројективног простора је првобитно уведен као проширење Еуклидовог простора додавањем тачака у бесконачности како би се дефинисала пројекција сваке тачке. Он је предложио теорему да начин на који се криве и праве секу остаје непромењен у односу њихову колинеарност, размак и редослед тачака, и на овај начин отворио могућност јединственог приступа различитим геометријским формама објеката.

Уз помоћ нацртне геометрије сваки објекат у тродимензионалном простору може се представити дводимензионалном равни из било које тачке посматрања. Геспар Монж (Gaspard Monge) је први увео координатни систем са три осе какав данас познајемо и првобитну идеју генерализовао и поједноставио за коришћење стручњацима који нису математичари. Тако је основа објекта пројектована на хоризонта претпоставком да је посматрач бесконачно удаљен. Монж је такође предложио да су основа, пресек и изглед довољни да дају комплетну слику датог објекта. Нацртна геометрија је постала важан алат за визуелизацију и представљање у архитектури и инжењерству. Након што је уведена на факултету *Ecole Polytechnique* крајем 18. века постала је обавезан предмет у свим школама архитектуре и инжењерства широм света. Овај метод представљања објеката су наставили, данас, да користе комјутерски софтвери.

Аналитичка геометрија настала је у 17. веку истраживањем нових начина представљања кривих као и техника за обједињавање алгебре и геометрије.

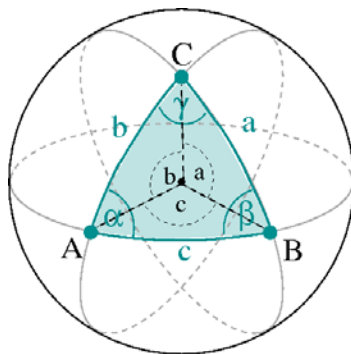
Развијена Декартова (Rene Descartes) метода хоризонталног и вертикалног одстојања сваке тачке, позната данас као координатни систем, представљала је основ за развој савремене математике и компјутерске графике. Желећи да пронађе метод за дефинисање сваке могуће криве која постоји, Декарт је користио метод континуалног кретања тачке дуж хоризонталне линије на различитом одстојању од ње. Тако свака крива има једначину са две променљиве која јединствено описује све тачке на њој. Његов рад омогућио је даљи развој алгебарског представљања комплексних кривих.

Диференцијална геометрија настала је током 19. века као грана геометрије која користи разне прорачуне за проучавање комплексних кривих и површи. Прорачуни на бази концепта аналитичке геометрије су развијени од стране Исака Њутна (Sir Isaac Newton) и Пјер Фермаа (Pierre Fermat) за линије као што су конусни пресеци, циклоиди и епициклоиди које се сматрају дводимензионалним кривама. Површине као што су хиперболички параболоид, елиптички конус и параболнички цилиндар, као и неке ротационе површине попут једнограног хиперboloида могу се изразити као једначине другог реда са три променљиве. Диференцијална геометрија је коришћена да изрази геометријска својства као што су закривљеност, нагиб, површина, дужина лучног сегмента (низ малих линија) било дводимензионалне или просторне криве, или површи. Насупрот томе, немогуће је било извести једну једначину за просторну криву попут спирале или друге комплексне закривљене површи. Методе диференцијалне геометрије су биле веома корисне у анализи глаткоће криве и површи. Сматрало се да се било која крива са оштрим кривинама може разложити на мање криве. Тако је постављен први концепт фрактала и фракталне геометрије у другој половини 19. века. За неке математичаре, дефинисање кривих комплексних закривљених површина, представљало је прави изазов. Тако је Карл Фридрих Гаус (Carl Friedrich Gauss) почетком 19. века показао да се закривљеност површине у једној тачки може изразити у виду два специфична нормална пресека у тој тачки, што је касније допринело идеји о n -димензијама и неееуклидској геометрији.

Радови Гауса (Carl Friedrich Gauss), Лобачевског (Nicolai Lobachevsky), Римана (Riemann), Хелмхолца (Helmholtz) и других математичара и физичара показали су да простор није само закривљен већ је и мултидимензионалан.

Показујући да геометрије могу бити засноване на неевклидским односима, као што је паралелизам, отворили су уједно и друге просторне могућности. Они су утврдили да за дату праву и тачку изван ње постоји више од једне праве која је паралелна са датом правом и предложили су да нова геометрија не буде раванска геометрија као што је Еуклидска геометрија. Гаус је дефинисао криву разликујући њена својства у односу да ли се посматра споља или са ње саме. Његов ученик Риман је разјаснио даље Гаусову идеју увођењем апстрактног математичког простора са променљивим димензијама. Тако простори варирају од једне димензије, до две, три, четири и даље до n димензија. Димензија представља број варијабила потребних за дефинисање тачке у простору. Он је такође предложио да простор у било којој димензији може бити раван или закривљен. У његовој геометрији, познатој као сферичној геометрији, раван је површина сфере, а линија је круг који има исти полупречник као сфера. За било које две тачке постоји само један круг који их повезује. У овој сферичкој геометрији не постоје паралелне линије, и свака бесконачна линија односно круг сече сваку другу бесконачну линију, као и размак између две тачке је "криви размак". Такође, други значајан концепт који је Рејман поставио је концепт закривљености простора и простор позитивне и негативне закривљености. Ова дефиниција простора подразумева Еуклидски равански простор који заузима средњи положај са нултом закривљеношћу, што даље подразумева да је Еуклидска геометрија специјална врста геометрије, посебна тачка на бесконачној скали савијања или набирања која производи равнину као манифестацију равнотеже у односу на различите утицаје приликом стварања закривљеног простора. Ово даље говори да Рејманов концепт простора подразумева да су 'кутије' и 'балони' једноставни елементи на клизној скали формалне комплексности који се могу претворити једни у друге једноставним варирањем параметара простора који дефинишу (Kolarevic 2003). Хелмхолц је касније користио Рејманове идеје да предложи три различите варијанте простора. Ако је крива позитивна, то представља сферички простор (сферичка геометрија) где све линије формирају кругове када се продуже и где не постоје паралелне линије, док је збир унутрашњих углова троугла већи од 180° (Слика 1.8). Ако је крива негативна, постоји бесконачан број паралелних линија кроз тачку, док је збир унутрашњих углова троугла мањи од 180° (хиперболичка

геометрија). У случају када је крива једнака нули, то представља Еуклидову геометрију где пети Еуклидов постулат важи и под тим условима збир унутрашњих углова троугла је 180° . Са архитектонског становишта неевклидске геометрије дају могућност мапирања објеката између себе омогућавајући радикално различиту концептуализацију простора. Неки софтвери за моделовање омогућавају ограничену трансформацију картезијанског простора која се приближава просторним карактеристикама неке од неевклидских геометрија.



Слика 1.8. Сферичка геометрија, (Извор: Преузето са <http://www.hopfenwiesen.de/1-runterladen/1-12-sphaerGeo.php?Sprache=en>, 05. 6. 2015)

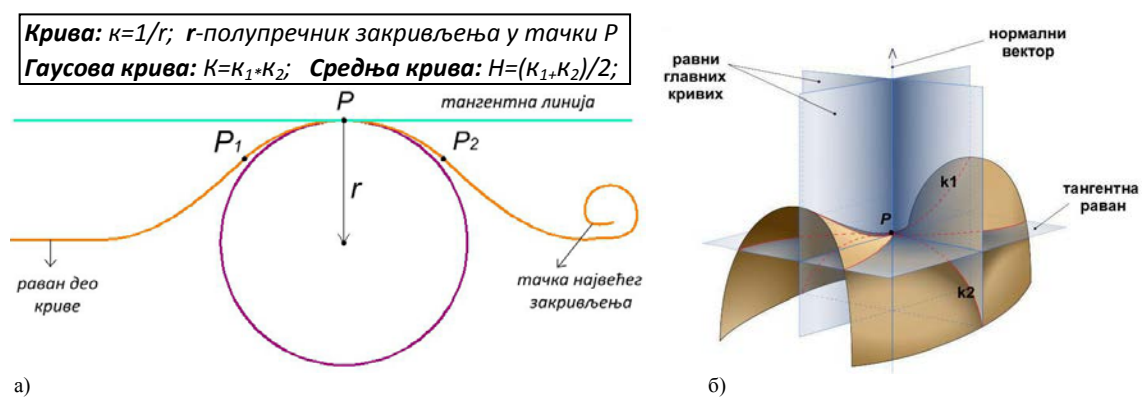
"Како се архитектонска концепција простора померила са тродимензионалног картезијанског простора ка четворо-димензионалном простору који подразумева интеракцију између простора и времена, друге димензије и друге концепције простора почињу да се отварају представљајући интригантне могућности, који могу или не могу да понуде нове потенцијале за архитектонско промишљање. Архитектура уврнутог мултидимензионалног простора би требало да превазиђе саму манипулацију облика и форми у погледу мултидимензионалних догађаја, утицаја и односа" (Kolarevic, 2003: 15).

Од пре једне деценије, постало је јасно архитектама, извођачима и индустрији да у време све веће примене геометријски комплексних форми постоје велики проблеми геометријске природе за које је потребно пронаћи адекватна решења, као и да постоји много могућности за оптимизацију, али је неопходно разумевање и познавање геометрије. Ова област истраживања названа је архитектонска геометрија, и укључује велики број релевантних стручњака из различитих области. У односу на старе успостављене концепте геометрије, нове апликације су постале доступне. Архитектонска геометрија поставља занимљива питања, али даје и нова решења (уместо класичне мреже могућа је другачија комбинација/поставка "испреплетане" конструкције). Такође, нумеричка

оптимизација има важну улогу, али њеном применом без разумевања различитих аспеката геометрије, не би се много постигло. Ово све указује да је архитектонска геометрија постала корисно поље истраживања.

1.2.2 Типологија геометријски комплексних форми стаклених омотача/конструкција

Површине омотача представљају "кожу" архитектонских објеката. Визуелним сагледавањем самих површина омотача, препознајемо форму објеката у нашем окружењу. Такође, помоћу површина које га затварају или ограничавају, простор се може дефинисати и мерити. Генерално говорећи, у случају стакленог омотача геометријски комплексних форми, може се закључити да његове површине представљају дводимензионалне или тродимензионалне облике који "носе" геометријске елементе, као што су тачке, праве и криве линије, и мреже (подела панела, елементи потконструкције, спојеви), а сами су садржани у геометријски тродимензионалном простору.



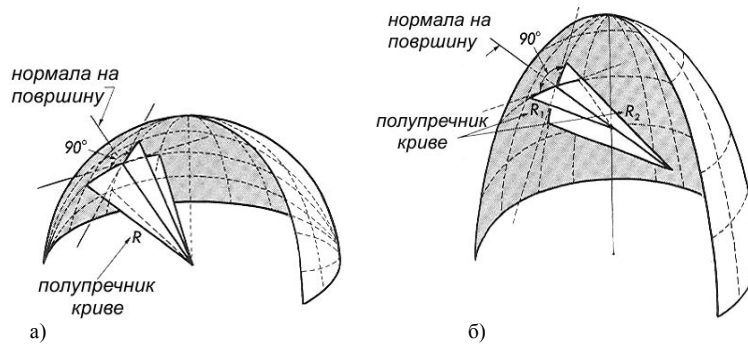
Слика 1.9. Главни елементи криве и површи,
 (Извор: а) Аутор; и б) Преузето са https://en.wikipedia.org/wiki/Principal_curvature, 11. 2. 2014)

Главни елемент криве је полупречник закривљења r (Слика 1.9а). У диференцијалној геометрији две главне криве (κ_1 и κ_2) у датој тачки P једне површи (Слика 1.9б) су криве карактеристичних вредности којима може да се одреди њена закривљеност у односу на различите правце и различите вредности закривљења а тиме и да се одреди врста површи. У свакој тачки једне површи налази се нормални вектор који је под правим углом у односу на површину, односно тангенцијалну равном у датој тачки P (Слика 1.9б). Равни које га садрже су нормалне равни. Пресеци нормалних равни и саме површи (нормални пресеци)

формирају криве које се зову нормалне криве. Кроз нормалу (нормални вектор) која пролази кроз произвољну тачку P може се поставити бесконачан број равни. Ове равни секу површ по различитим кривама. Од свих кривих можемо издвојити две криве које у тачки P имају највећу и најмању закривљеност и које стоје управно једна на другу и које се зову главне криве (κ_1 и κ_2) (Слика 1.9b). Гаусова крива представља производ две главне криве ($K = \kappa_1 \times \kappa_2$).

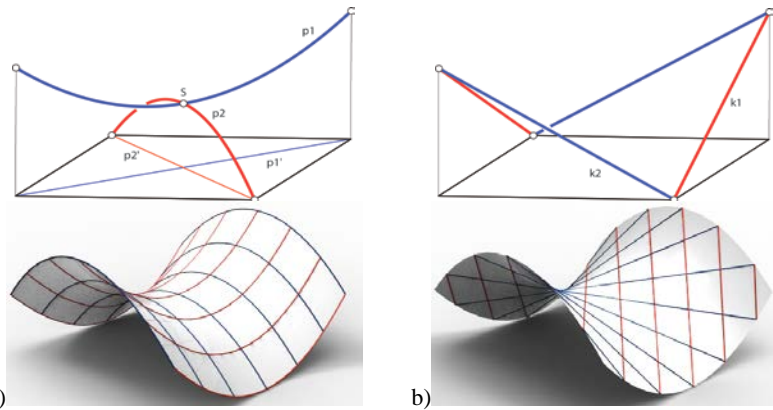
Знак Гаусове криве може да се користи као један од начина којим се геометријски дефинише површ:

- Када су две главне криве истог знака ($\kappa_1 \kappa_2 > 0$), тада је Гаусова крива позитивна а површина има елиптичку тачку. Сама површина је у облику куполе, лежећи са једне стране тангенцијалне равни. Све пресечне криве су истог знака. У случају сферне куполе, све криве су идентичне. У случају других форми, криве се смењују од максималне до минималне у зависности од ротације пресечне равни (Слика 1.10).



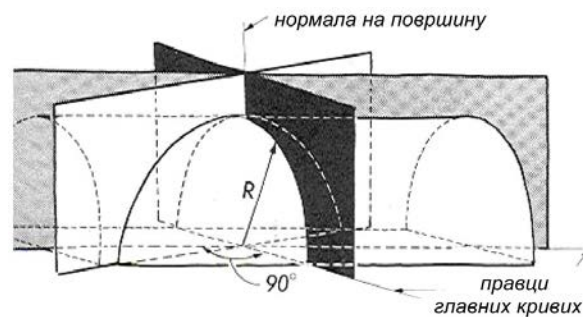
Слика 1.10. Криве: а) сферичне куполе, и б) куполе у форми параболоида (Извор: Salvadori, Tuba 2007: 21)

- Када главне криве имају различите знакове ($\kappa_1 \kappa_2 < 0$), тада је Гаусова крива негативна а површина има хиперболичку тачку. У тим тачкама површ је у облику седла (Слика 1.11a), лежећи са обе стране тангенцијалне равни. У случају хиперболичког параболоида кроз сваку тачку ове површи пролазе по две изводнице (Слика 1.11b), чија закривљеност је једнака нули. Ове праве линије су асимптотски правци на којима леже асимптотске криве формирајући ортогоналну мрежу која укршта мрежу главних кривих.



Слика 1.11. Површ у облику седла: а) Хиперболички параболоид као главне криве; б) Хиперболички параболоид као асимтотска мрежа – правоизводна површ; (Извор: Stavric, 2013: 52, 53)

- Када је једна од главних кривих нула ($\kappa_1 \kappa_2 = 0$), тада је Гаусова крива једнака нули а површина има параболичку тачку (Слика 1.12). Класични примери такве површи су цилиндар и конус.



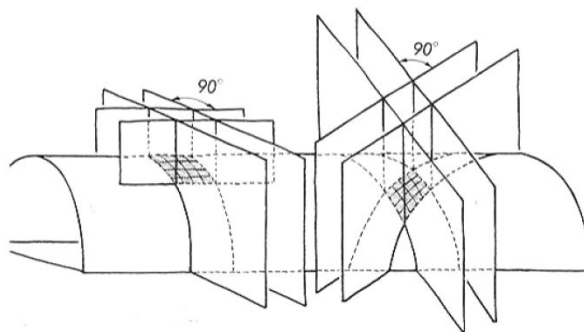
Слика 1.12. Главне криве цилиндричне површи (Извор: Salvadori, Tuba, 2007: 24)

Средња крива ($H=(\kappa_1+\kappa_2)/2$) је мера спољашње закривљености, у диференцијалној геометрији, и додатно описује закривљеност једне површи у простору попут Еуклидовог простора. Једна површ је минималне површине уколико има средњу криву чија вредност је нула у свим тачкама ($H=0$). Класични примери такве површи су хеликоид и катеноид (видети Табелу 1.1).

У случају стаклених омотача геометријски комплексних закривљених форми, већина површина садржи подручја са позитивном Гаусовом кривом (елиптичке тачке) и подручја са негативном Гаусовом кривом (хиперболичке тачке) која су одвојена кривом са тачкама нулте Гаусове криве која се зове параболичка линија.

Значајна карактеристика већих стаклених површина је подела на мање елементе - панелизација, како због премошћавања конструктивних растера тако и због димензија стаклених елемената које омогућавају њихову производњу.

Уколико је подела у правцу главних кривих, може се рећи да појединачни елементи нису "уврнути". У супротном, елемент са ивицама које нису паралелне са главним кривама, може се сматрати "уврнутим" и његове ивице су закривљене (Слика 1.13). Ова карактеристика је значајна за процес производње стаклених елемената, јер на датом примеру и један и други елемент су део цилиндричне површине, али закривљеност ивица елемента отежава процес његове производње (видети Поглавље 3).



Слика 1.13. Неуврнути и уврнути сегмент цилиндричне површине
(Извор: Salvadori, Tuba, 2007: 24)

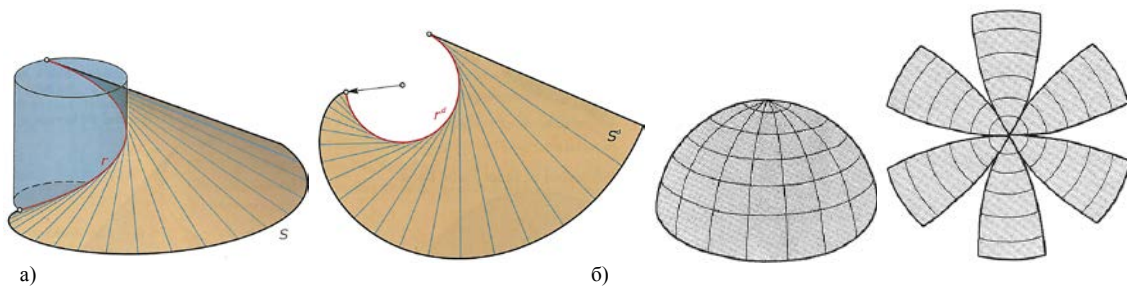
Стаклене површине могу да се дефинишу и класификују на различите начине. У односу на геометрију, површине стакленог омотача могу да се пре свега класификују према вредности укупне, односно Гаусове криве која показује тип закривљености и дефинише ниво комплексности, а затим и да се класификују према начину генерисања површи (Табела 1.1).

У односу на **тип закривљености**, као што приказује Табела 1.1, стаклене површине се могу класификовати на:

- Равне,
- Једноструко-закривљене, развојне (препознају се по контури која је равна линија),
- Једноструко закривљене, неразвојне - правоизводне (препознају се по контури која је крива линија),
- Двоструко закривљене, неразвојне, с позитивном Гаусовом кривом, и
- Двоструко закривљене, неразвојне, с негативном Гаусовом кривом.

Такође, подела на развојне и неразвојне површи указује на површи које су са нултом Гаусовом кривом (развојне) које се могу добити из једне равни површи њеним савијањем, набирањем, роловањем, а затим и сечењем, што је у случају стакла веома значајно јер подразумева једноставнији начин његовог обликовања.

Односно, развојну стаклену површ карактерише могућност да се изометријски њена површина "мапира" на једну раван (Слика 1.14) – равну стаклену плочу, коју је потребно затим исећи према добијеној контури и савити у жељену форму. Такође, значајно је поменути да су у тродимензионалном простору све развојне површи истовремено и правоизводне, што у супротном није случај. У пракси се често примењује термин "торза" који подразумева архаичан назив за нестандартну развојну, једноструко закривљену површ, и даље у раду ће бити коришћен (стандардним површима се могу сматрати цилиндричне и конусне површи).



Слика 1.14. Мапирање-развијање површи на једну раван: а) једноструко закривљене хеликоидне развојне површи (развијена крива r (хеликс) је круг r^d ; и б) двоструко закривљене неразвојне са позитивном кривом (Извор: а) Pottmann et al., 2007: 553; и б) Salvadori, Tuba, 2007: 21)

У конструктивном смислу један од најчешћих начина формирања геометрије једне стаклене површине је коришћењем правих или кривих линија које представљају основне линије и путање, и које најчешће представљају и конструктивне осе елемената потконструкције, а њихови пресеци средишњу тачку веза елемената потконструкције. У зависности од усвојене геометрије стаклених елемената - испуне (равни или закривљени) и од карактеристика самог материјала (различите врсте стакла), дефинишу се њихове димензије. Начин ослањања површине стакленог омотача указује на правце постављања његове потконструкције (најчешће у правцу највећих сила), а тиме и на могући начин панелизације (поделе) површине на мање стаклене елементе. Такође, начин генерисања, односно формирања геометрије површи, најчешће, може да представља модел за њену панелизацију, али то није увек случај.

У односу на **начин генерисања**, према већини аутора (Stephan et al. 2004), генерално, површине омотача геометријски комплексних форми се могу класификовати на:

- Површине које се генеришу **негеометријским** процесом који подразумева утицај спољнег чиниоца на форму, као што су Земљина гравитација, притисак ваздуха, силе преднапрезања (Слика 1.15а и ц), и
- Површине које се генеришу **геометријским** процесом (Табела 1.1).



Слика 1.15. Различити начини генерисања површи: а) Обешена и преднапрегнута мембранска конструкција (акрилно стакло) олимпијског парка у Минхену, 1972, архитекте Фрај Ота добитника Прицкерове награде за 2015.год.; б) обешена конструкција коноидне геометрије аутобуске станице Зуидпорт у Делфту; ц) Пнеуматски панели зимске баште Форума у Верони (термопластични флуорокарбонатни полимер-ETFE); (Извор: а) Преузето са <http://www.dezeen.com/2015/03/11/frei-otto-a-life-in-projects/>, 24. 6. 2015; б) Аутор, ц) Преузето са <http://canobbio.net/spry.php>, 24. 6. 2015)

Негеометријски начин **генерисања** површина омотача односи се на методе изналажења форме, које могу бити експерименталне методе и аналитичке односно, нумеричке методе. Тако, viseће мрежне конструкције које су у конструктивном смислу под силама притиска, затим форме у облику "балона сапунског филма" (средња крива је увек константна у свакој тачки истог дела балона, и углови су увек близу вредности тетраедарског угла од 109.47°) које указују на пнеуматски начин обликовања, као и преднапрегнуте кабловске мреже (минималних површина) добро су познати примери експерименталних метода изналажења форме. Аналитички методи као што је метод "густине силе" и метод "динамичке релаксације" за добијање аналитички минималне површине су углавном нумерички делови експерименталних метода (Stephan et al., 2004). С обзиром на то да се овде ради о закривљеним површинама, примена стакла код ових типова конструкција је могућа, нарочито након првих примена нове технике обликовања стакла хладним савијањем (Слика 1.15б), која на овај начин омогућава његову примену код viseћих и кабловских мрежних структура. Пнеуматски начин обликовања просторних структура, углавном подразумева примену лаганих материјала попут термопластичног-флуорокарбонатног

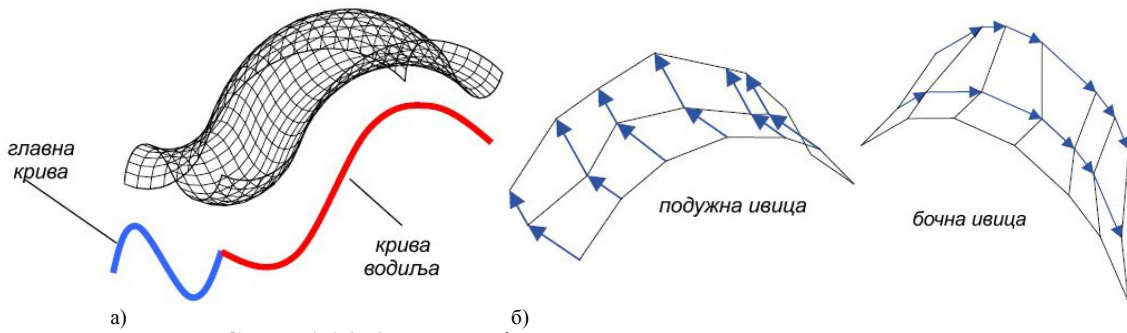
полимера (*ETFE* филм - етилен тетрафлуороетилен, који је лаган у односу на стакло –свега 1% његове тежине, еластичан, има мању U -вредност и g -вредност, као и могућност самоочишћења и погодан је за рециклажу), затим текстила или других синтетичких флуорополимера који се лако могу прилагодити оваквим формама. У погледу примене стакла и пнеуматског начина обликовања, како истиче Тим Мекфарлејн, инжењер и аутор великог броја стаклених конструкција (McFairlane, 2014), можда баш традиционална техника обликовања стакла - дувањем може да представља потенцијал за нове начине обликовања и производње закривљеног стакла.

У односу на **геометријски начин генерисања** површина омотача, стаклене површине се могу поделити на:

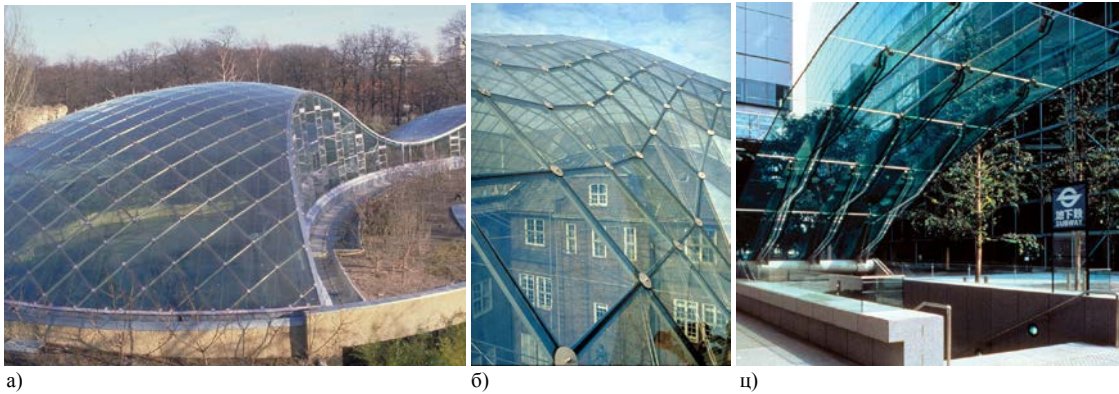
1. Традиционалне, и
2. Површине "слободних форми" (геометријски комплексне форме) – *NURBS* површине.

Класификација традиционалних површина, материјализованих у стаклу, углавном је заснована на кинематичком генерисању, односно начину на који се главна крива (поделе) креће. Сходно томе разликујемо:

- **Транслационе** површи које се генеришу транслацијом главне криве (*generatrix*) дуж криве водиле (*directrix*) (Слика 1.16а). Такве транслационе површи садрже низ кривих које су подударне са главном кривом. Свака од главних кривих сече криву водилу. С обзиром на то да овај начин подразумева два сета подударних параметара (главна крива и крива водилу), сматра се веома предодређеним за пројектовање и израду стакленог омотача геометријски комплексних форми, што потврђује све већи број примера изграђених објеката. За апроксимативно генерисање криве, може се користити полилинија (изломљена линија) уместо глатке криве линије (Слика 1.16б). На тај начин постиже се транслациона површина са раванским елементима (паралелограмима) што у погледу челично-стаклених конструкција може бити веома економично (Слика 1.17а и б), а у погледу само стаклених конструкција изводљиво (Слика 1.17ц).



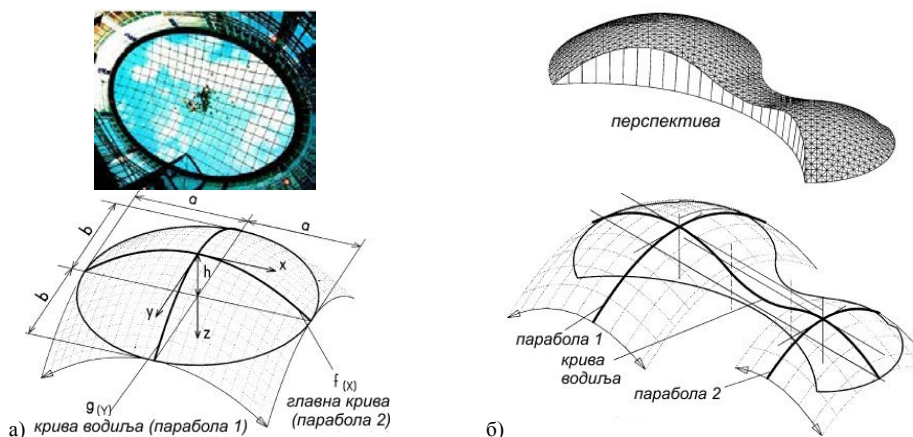
Слика 1.16. а) Геометријски принцип транслационе површи; б) Пример апроксимативног генерисања кривих помоћу полилинија у оба правца од којих је бар један увек паралелан, који омогућава трапезоидну форму четвороугаоних елемената различитих димензија; (Извор: Glymph, 2004: 189-190)



Слика 1.17. Транслационе површи реализоване у стаклу: а) Стаклени кров куће нилског коња са четвороугаоним равним термоизолационим панелима, Зоолошки врт у Берлину; б) Застакљени атријум историјског музеја у Хамбургу у виду полуобличастог свода; ц) Стаклена конструкција *Yurakuchō* надстрешнице станице метроа, Токио (Извор: а) и б) Schober, 2006: 2,7; ц) Преузето са <https://steelandglass2015.wordpress.com/category/glass/glass-research/>, 03. 5. 2012)

Сличан начин транслације, познат као "растегљива трансформација" подразумева транслацију криве дуж равне линије и то на два начина (развлачењем и скупљањем). Њеном применом може се постићи мрежа са правим линијама које су паралелне у тродимензионалном простору генеришући правоизводну једноструко закривљену површ, чија је материјализација у стаклу поједностављена самом чињеницом непостојања закривљења у другом правцу (Табела 1.1). Треба истаћи да специјалне транслационе површине (Pottmann et al., 2007) могу бити и површи као што су ротациони параболоид, елиптички параболоид и хиперболички параболоид, а које се могу генерисати транслацијом параболе дуж друге параболе (Табела 1.1). Хиперболички параболоид се генерише транслацијом параболе дуж параболе које су различитих знакова (+ и -), формирајући два сета линија - кривих у облику параболе, и правих (Слика 1.11а и б). Део ове површи исечен по правим линијама-изводницама даје једну извитоперену површ равних ивица над правоугаоном или

квадратном основом (Табела 1.1), што пружа бољу могућност уклапања спојева у случају појединачних елемената у односу на елементе пресечене по кривама. Ова форма је добро позната у материјализацији бетонских и дрвених просторних конструкција – љуски, с обзиром на то да позитивне конструктивне карактеристике ове форме омогућавају веће распоне са релативно малим дебљинама. Иако ова двоструко закривљена површ, под називом "хипар" (често коришћена у пракси), на први поглед изгледа компликована за материјализацију стакленог омотача, нове технике обликовања стакла су омогућиле њену једноставну реализацију, што ће бити објашњено у Поглављу 3. Такође, најновија истраживања су приказала конструктивне перформансе стаклених елемената настале услед напрезања приликом обликовања хипар форми стаклених површина, и дефинисала их кроз Стаксов закон (видети Поглавље 3).



Слика 1.18. Различити начини генерисања транслационе површи: а) Мрежаста конструкција стаклене куполе у форми елиптичког параболоида; б) Геометријска форма стакленог крова Зоо врта у Берлину генерисана транслацијом две различите параболе као главне криве дуж слободно дефинисане просторне криве водилје; (Извор: Glymph, 2004: 197, 199)

Следећа могућност транслације параболе дуж друге параболе истог знака а различитог закривљења генерише површ која се зове елиптички параболоид, и која у основи покрива правоугаону површину (Слика 1.18а). Хоризонтални пресеци ове форме су елипсе, док су вертикални пресеци параболе, а у случају када су параболе идентичне, хоризонтални пресеци параболоида су кругови (Табела 1.1). Иако је елиптички параболоид као транслациона површ био форма првобитно материјализована као танка бетонска љуска са почетка прошлог века, тек крај века донео је могућност материјализације овог типа површи у стаклу првенствено у виду

обличастих сводова (једноструко закривљених) и то као мрежастих конструкција, а касније и у виду комплекснијих геометријских форми (Слика 1.18б).

- **Ротационе** површи настају ротацијом равне или просторне криве око осе (Слика 1.19а, б, ц). Свака тачка генерисане криве описује круг који лежи на равни нормалној на осу и на тај начин свака ротациона површина садржи кругове у паралелним равнима. Раван која садржи осу ротационе површине сече површину по кривама (меридијанима), и нормална је на ослоначку раван. То подразумева да се паралелни кругови и меридијанске криве секу под правим углом формирајући мрежу ортогоналних кривих на површи (Слика 1.19б). Нормални вектори у свим пресечним тачкама ротационе површи секу ротациону осу. Овај принцип генерисања је веома једноставан и зато често примењиван у савременој архитектури од стакла.



Слика 1.19. Ротационе површи реализоване као челично-стаклене конструкције: а) Троугаоно-ромбоидна мрежа торња *Gherkin* у Лондону у форми "бачве"; б) Купола *Reichstag* у Берлину архитекте Нормана Фостера у форми половине ротационог елипсоида; ц) Катедрала у Бразилији архитекте Оскара Нимејера у форми једнограног ротационог хиперболоида; д) Геометријска форма железничке станице *TGV* у Авињону настала пресеком два прстенаста торуса;

(Извор: Преузето са а) <http://now-here-this.timeout.com/2012/09/22/unmissable-buildings-at-open-house/the-gherkin-c-londongherkin/>, 12. 10. 2014;

б) <https://www.google.co.uk/search?q=architecture+of+reistag+berlin>, 12. 10. 2014;

ц) <https://www.pinterest.com/pin/553168766706680912>, 12. 10. 2014; и

д) Pottmann et al., 2007: 294 и Baldassini, 2006: 34)

Најчешћа примена овог начина генерисања јесте уз помоћ дискретизације површине са одговарајућим равним стакленим елементима, али је све присутнија и глатка стаклена површина геометријски комплексне форме постигнута применом како једноструко тако и двоструко закривљених елемената од стакла. У зависности од генерисане форме, могуће је уочити разлике у погледу конструктивних перформанси које настају услед различитог закривљења површине. Тако, елипсоидна форма генерисана

ротацијом половине елипсе око мање осе (хоризонтална позиција) је мање ефикасна у погледу конструктивних карактеристика у односу на сферну форму из разлога равније површине темена, као и смањења закривљења, односно полупречника меридијанске криве, што доприноси већој могућности извијања. Супротно томе, параболичка форма и елипсоидна форма (Слика 1.19б) постављена вертикално, пружају боље конструктивне карактеристике услед већег закривљења на темену, чак и у поређењу са сферном формом. Пројекти у оквиру конструкција различитих типова самонесећих стаклених купола (љуски) са двоструко (сферно) закривљеним стакленим панелима, као и равним елементима су још увек у домену истраживања, односно на нивоу експерименталних прототипова, с обзиром на то да овај тип конструкције подразумева конструктивну примену стаклених елемената с помоћним елементима конструкције или без њих. У односу на претходно поменуте сферне форме стаклених површина, конус и цилиндар представљају површи генерисане ротацијом вертикалне праве или косе линије око вертикалне осе (Табела 1.1). Непостојање закривљења у једном правцу (развојна једноструко-закривљена површ) омогућава једноставнију фабрикацију стаклених елемената. Такође, треба истаћи да су специјалне форме ротационих површи (Pottmann et al., 2007), као што су сфера, цилиндар, конус, торус (генерисан ротацијом круга око произвољне линије који леже у истој равни) (Табела 1.1), данас све више присутне у материјализацији стаклених омотача. Поред тога, исечени делови одређених форми, као и пресеци две различите форме или различите величине истих форми представљају нове могућности и изазове за материјализацију стаклених омотача (Слика 1.19д).

- **Правоизводне** површи, по дефиницији, подразумевају површине генерисане кретањем праве линије (Слика 1.20а и б). Постоји неколико могућности за дефинисање кретања праве линије (енг. *generatrix*) као што је кретање праве линије дуж линије водиље (енг. *directrix*), при чему су праве линије увек паралелне у 3Д простору. Овај начин генерише форму коноида (Табела 1.1). Друга могућност подразумева кретање праве линије,

односно једне њене тачке (обично средишње) дуж круга, континуално ротирајући, при чему је права нормална на круг. Овај начин генерише форму траке (енг. *Mobius strip*). Такође, повезивањем одговарајућих тачака било на два крива водила (круговима) или два правих водила могуће је генерисати на други начин форме једнограног хиперболоида и хиперболичног параболоида (Табела 1.1). С обзиром на то да у овом случају правоизводних површи, ове две форме једине имају две различите фамилије правих - изводница, често се називају и двоструко правоизводне површи. У случају једнограног хиперболоида може се раћи да је могуће применити још једну трансформацију - ротацију која подразумева кретање косе праве линије дуж две криве клиније, при чему су, праве линије увек паралелне у 3Д простору (Табела 1.1).



а)

б)

Слика 1.20. Правоизводне површи реализоване као челично-стаклене конструкције:

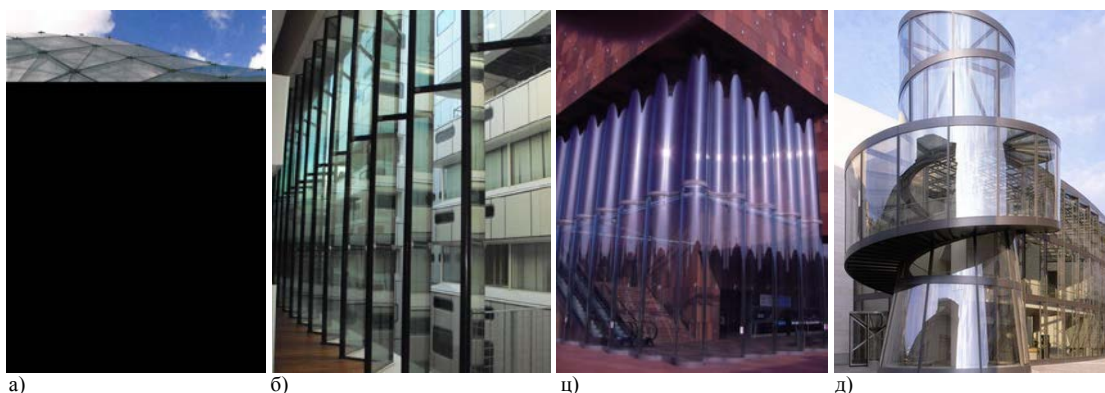
а) Железничка станица *Reggio Emilia AV Mediopadana* у Болоњи;

б) *New State Gallery* у Штутгарту; (Извор: а) Преузето са: <http://www.reggioexpo2015.it/en/discover-reggio-emilia-places-for-expo-2015/reggio-emilia-av-mediopadana>, 22. 7. 2015; б) Stavric, 2013: 83)

Позитивне статичке перформансе ових просторних форми, познате као љуске, одавно су истражене у бетонским и дрвеним конструкцијама, а од недавно су познате и конструктивне карактеристике "хипар" форми стаклених елемената. С обзиром на то да правоизводне површи имају бројне равне линије, данас уз помоћ нових техника обликовања, лако се могу извести у стаклу, што ће детаљније бити представљено у Поглављу 3.

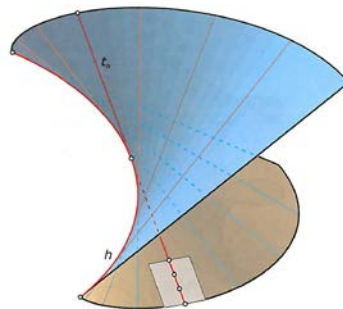
- **Специјални типови** подразумевају површи чија геометрија није често примењивана у материјализацији стаклених омотача или је њена примена тек започета, као што су набори и хеликоидне (спиралне) површи (Слика 1.21). Такође, подразумевају комбинације математички дефинисаних површи с циљем добијања комплекснијих форми, као што је на пример

пресек два обличаста стаклена свода (Слика 1.21а), који формирањем увале доприноси креирању не-регуларне мреже. Конструкције у виду набора састављене од крутих плоча - шајбни примењују се од почетка 20. века као бетонске конструкције, али њихова разноврсна примена је тек уследила након што су ове конструкције статички разјашњене и истражене у погледу разноврсних обликовних могућности (Несторовић, 2000). Конструктивне и обликовне могућности стаклених конструкција од набора су по први пут сагледане на примеру самоносеће *ZigZag* стаклене структуре висине 11m састављене од равних елемената - термоизолционих панела који представљају елементе за стабилизацију форме док су челични елементи само за везу-повезивање (Слика 1.21б). Такође, њихова примена у погледу утицаја различитих форми стаклених кровних конструкција од набора на њихове конструктивне карактеристике је истражена од стране групе аутора (Krstic et al., 2013). Закривљени наборани стаклени омотач висине 11 m (2 x 5,5m) састављен од једноструко застакљених панела *S* форме, ширине 1,80 m, примењен је у пракси по други пут у циљу постизања већег распона и укрупњења стакленог омотача (Слика 1.21ц), док су различита обликовна и конструктивна решења набораних стаклених фасадних панела приказана од стране групе аутора (Krstic et al., 2012). Производња једноструко закривљених набораних стаклених панела, због форме, захтева комплекснију технику, односно термичко обликовање уз помоћ калуца.



Слика 1.25. Специјални типови површи реализованих у стаклу: а) Регуларна мрежа прекинута продором два обличаста стаклена свода и формирањем увале са нерегуларном мрежом; б) Наборана структура самоносећег стакленог *ZigZag* зида од термоизолционих панела, висине 11 m, едукационог центра *EMC* у Ротердаму; ц) Закривљена наборана структура једноструко застакљеног зида, висине 11 m, музеја *MAS* у Антверпену; д) Стаклени омотач хеликоидне форме кружног степеништа на улазу у историјски музеј у Берлину (Извор: а) Wurm, 2007: 141; б) Аутор, 2015; ц) Аутор, 2012); д) Преузето са <https://www.google.co.uk/search?q=historical+museum+in+berlin&rlz=1T4FTSG>, 10. 5. 2015)

Хеликоидна површ је генерисана глатким спиралним кретањем просторне криве, и чини је мрежа главних правих и спиралних кривих (хеликса) који формирају развојну једноструко закривљену правоизводну површ (Слика 1.21д и Табела 1.1), или кривих и спиралних кривих (хеликса) који формирају неразвојну двоструко закривљену површ (Табела 1.1). Такође, један од важних начина генерисања правоизводне хеликоидне површи је примена спиралног кретања тангенте хеликоидне криве (хеликса). Ова тангента генерише развојну правоизводну површ (Слика 1.22). Хеликс је јединствена крива површи и као таква формира оштру контуру површи. С обзиром на то да на овај начин генерисана површ представља развојну једноструко закривљену и правоизводну површ, може се рећи да припада типу површи званих "торза".



Слика 1.22. Хеликоидно кретање тангенте хеликоидне криве (хеликса) генерише хеликоидну површ која је истовремено и развојна правоизводна површ (Извор: Pottmann et al., 2007: 328)

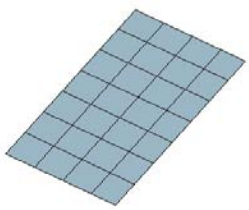
Овај принцип уврнутих површи је добро познат у архитектури и често примењиван у материјализацији других елемената објеката, често из функционалних разлога, као што је уврнута површ плафона спиралног степеништа. Увртање значајно повећава могућност израза архитектонске форме, због чега у последње време постоји значајно интересовање за примену овог типа трансформације у материјализацији омотача архитектонских објеката. Уврнута површ не може бити мапирана - развијена на раван без потпуног истезања или извијања, као што је то у случају цилиндричних и конусних панела, код којих је једна страна површине напрегнута силом притиска, а друга силом затезања, док је неутрални међуслој који се налази негде између спољашње и унутрашње површине једини који не показује промене у дужини елемента. Због овакве различите врсте напрезања, у случају стакла материјала мале еластичности, увртање представља комплекснији процес од савијања (Vollers, 2001).

- **NURBS** површине, односно површине геометријски комплексних форми представљају велику групу површина чије се геометријске карактеристике заснивају на посебним математичким принципима и процедурама обухваћене називом *NURBS* где овај термин подразумева нерегуларне Б-сплајн линије (*non-uniform rational B-splines*). Тешко је постићи довољну флексибилност у пројектовању 3Д форми уз помоћ класичних површина као што су цилиндар, конус, сфера, такође, ротационе и правоизводне површи. То је омогућено површинама слободних форми које пружају већу флексибилност. У пракси, *NURBS* површине и њихове различите технике омогућавају моделовање и реализацију било које замишљене форме (Табела 1.1). За разлику од површина као што су сфера, цилиндар и разне врсте параболоида које се формирају директно уз помоћ одређених једначина, *NURBS* површине захтевају комплексну конструкцију уз помоћ математичких елемената као што су линије, криве, равни, као и формула и процедура с циљем креирања једне форме на интерактиван начин.

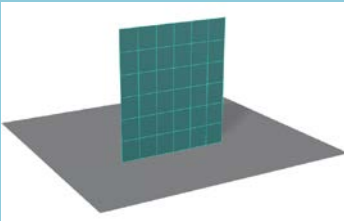
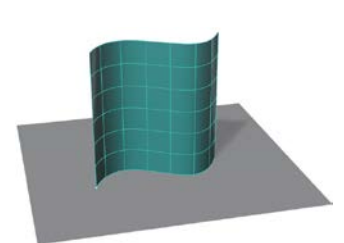
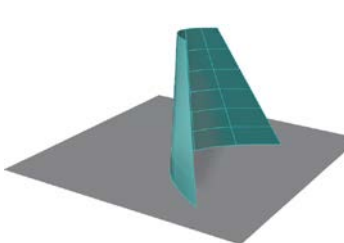
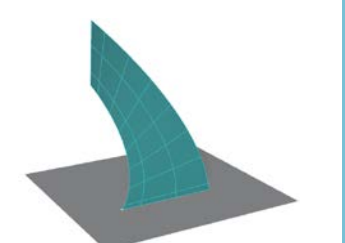
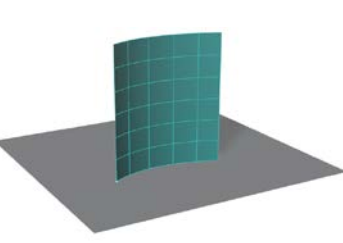
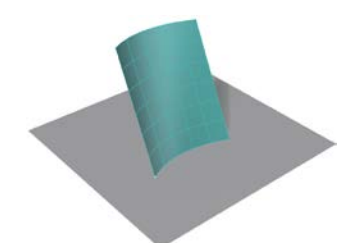
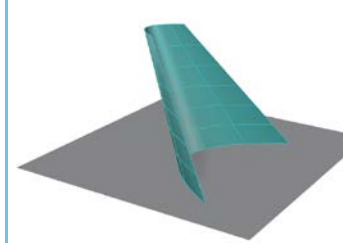
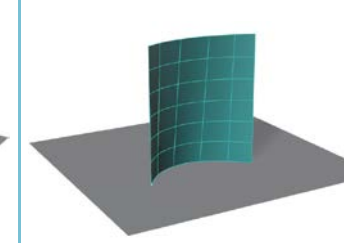
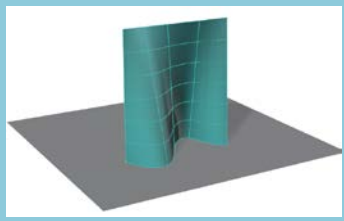
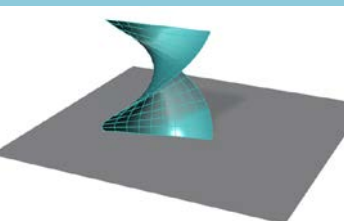
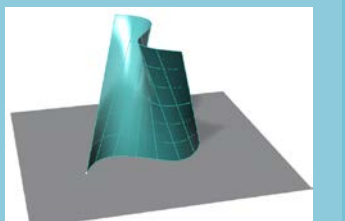
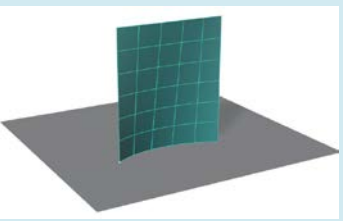
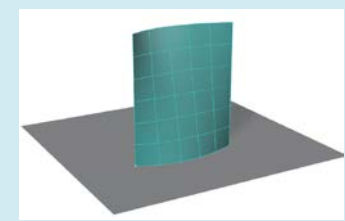
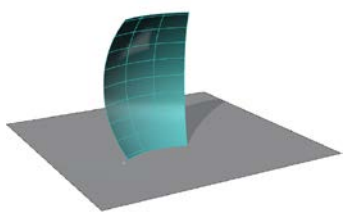
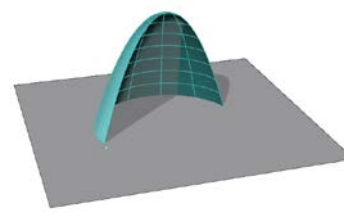
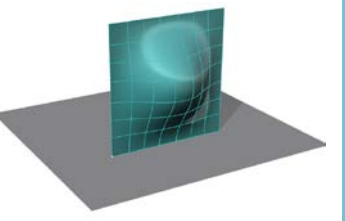
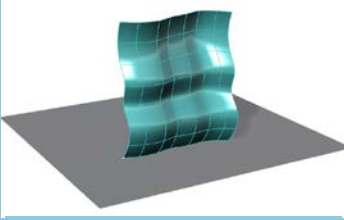
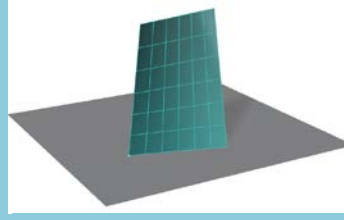
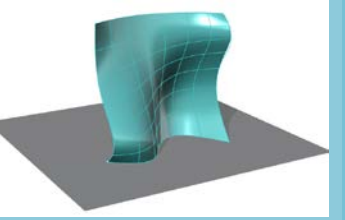
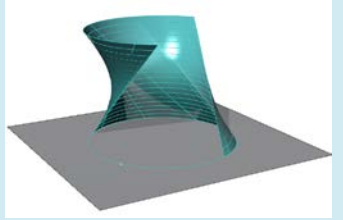
У погледу геометрије површина стаклених омотача, данас, не постоје ограничења у процесу њиховог моделовања. Сама реч "слободна форма" говори да је могуће креирати нове форме, уколоко су архитекте и дизајнери упознати, како са геометријом основних геометријских форми, тако и са свим елементима геометрије. Ограничења настају касније у процесу израде, односно фабрикације елемената стакленог омотача, када сами процеси обликовања и производње дефинишу ограничења у погледу максималних и минималних димензија, форме и закривљења, физичких и механичких особина.

На основу претходно изложеног, као и дате класификације геометријски комплексних форми (слободних форми) стаклених омотача у односу на тип закривљења и начин генерисања површина, дата је типологија стаклених елемената-панела у односу на њихову геометрију (Табела 1.2). Предложени геометријски типови стаклених елемената биће коришћени и анализирани даље у раду. Предложени су референтни модели, као и варијантни модели који представљају варијанте одређеног геометријског типа или позиције стаклених елемената - панела. Остала могућа решења (алтернативе) за све предложене моделе односе се на радијусе кривих односно закривљења.

Табела 1.1. Типологија стаклених површина према начину генерисања и типу закривљености (Извор: Табела аутора; Извор илустрација: <http://mathworld.wolfram.com>, 25. 5. 2015; <https://yazdanistudioresearch.wordpress.com/2012/02/10/sports-stadium-data-driven-panelization-pt-2/>, 25. 5. 2015; Pottmann et al., 2007: 287, 308; Vollers, 2001: 159)

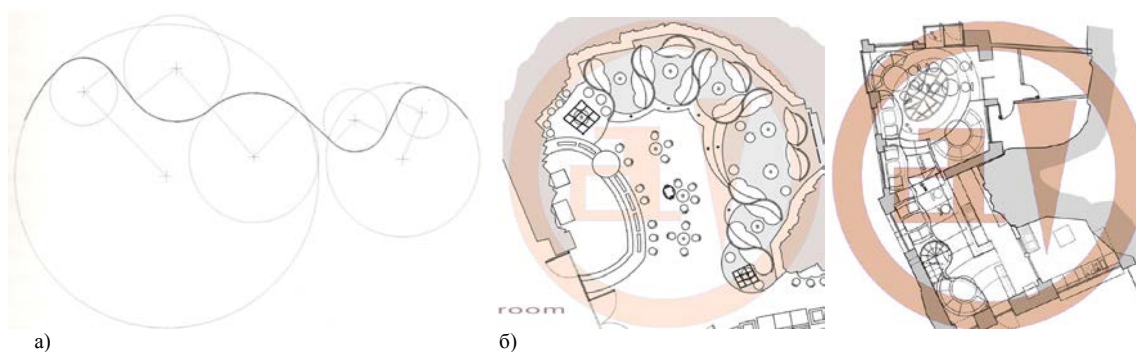
| | | Геометријски начин генерисања површи | | | | |
|---------------------|------------------------|---|---|---|--|---------------------------|
| | | Транслационе (транслација, развлачење) | Ротационе | Правоизводне | Друге геометријске процедуре (Хеликоидне-спиралне, Увртуте) | NURBS (Слободне форме) |
| Закривљеност површи | Развојне површи | <p>Равне (Гаусова крива $K = 0, \Gamma = \infty$)</p>  <p>Раван</p> | | | | |
| | Развојне закривљене | <p>Транслациона (развлачењем)</p> <p>Хиперболички Цилиндар</p> <p>Параболички Цилиндар</p> | <p>Кружни Цилиндар</p> <p>Кружни Конус</p> | <p>Елиптички Цилиндар</p> | <p>Хеликоид</p> | |
| | Једноструко закривљене | | | <p>Плицкеров Конус</p> <p>Општа Правоизводна</p> | <p>Увртута</p> | |
| | Неразвојне површи | <p>Параболоид</p> <p>Елипсоид</p> | <p>Сфера</p> <p>Параболоид</p> <p>Елиптички Торус</p> | <p>Правоизводна</p> | | |
| | Двоструко закривљене | <p>Општа Транслациона</p> <p>Хиперболички Параболоид</p> | <p>Ротациона</p> <p>Једнограни Хиперболоид</p> | <p>Хиперболички Параболоид</p> <p>Једнограни Хиперболоид</p> <p>Елиптички Хиперболоид</p> | <p>Хеликоид</p> | <p>NURBS</p> |

Табела 1.2. Типологија стаклених елемената у односу на геометрију и тип закривљености

| | | Геометрија стаклених елемената – панела | | | | | | |
|---------------------|---|---|--|---|---|--|---|---|
| | | Референтни модели (површи) | | | Варијантни модели (површи) | | | |
| Закривљеност површи | Развојне површи | <p>Равне (Гаусова крива $K = 0, r = \infty$)</p>  <p>Раван</p> | | | | | | |
| | Развојне површи |  <p>Цилиндар 01</p> |  <p>Конус 01</p> |  <p>Торза</p> |  <p>Цилиндар 02</p> |  <p>Цилиндар 02-накривљен</p> |  <p>Конус 01-накривљен</p> |  <p>Конус 02</p> |
| | Једнострано закривљене (Гаусова крива $K = 0, H < 0$) |  <p>Коноид 01</p> |  <p>Хеликоид</p> |  <p>Општа Правоизводна</p> |  <p>Коноид 02</p> |  <p>Коноид 03</p> | | |
| | Неразвојне површи |  <p>Сфера</p> |  <p>Параболоид</p> |  <p>Исупчен у раванском раму</p> | | | | |
| | Двострано закривљене (Гаусова крива $K < 0$) |  <p>Општа Транслациона</p> |  <p>Хипар - ХП</p> |  <p>NURBS</p> |  <p>Једнограни хиперболоид</p> | | | |

1.2.3 CAD и геометрија

Геометрија је имала кључну улогу у представљању-визуелизацији архитектонских објеката. Полазећи од ренесансне перспективе па све до нацртне геометрије (Monge) развијане су различите технике са циљем што вернијег представљања објеката. За израду извођачких пројеката и радионичких цртежа примењивана је нацртна геометрија и то је био најбољи начин комуникације пројектаната са произвођачима. До осамдесетих година 20. века цртежи су ручно израђивани уз коришћење лењира-шина и троуглова. У предигиталној архитектури, где је потенцијал проналажен у померању граница Еуклидске геометрије (линије, кругови, четвороуглови), конструкција комплексних кривих је постигнута апроксимацијом уз помоћ надовезивања тангентних кружних лукова и линијских сегмената који су се са лакоћом могли означити како на папиру тако и на градилишту (Слика 1.23).



Слика 1.23. Конструкција сложене криве на цртежу и на градилишту: а) Апроксимација уз помоћ надовезивања тангентних кружних лукова и линијских сегмената; и б) Исти принцип конструкције криве примењен за изцртавање криволинијске форме подијума на самом градилишту, пројекат ВИП-собе и Кафе-клуба, Андерграунд, аутори: Т. Косић, Д. Игњатовић и Н. Ђуковић Игњатовић, 2001. и 2003. год.; (Извор: а) Kolarevic, 2003: 15; б) Захвалношћу Д. Игњатовића)

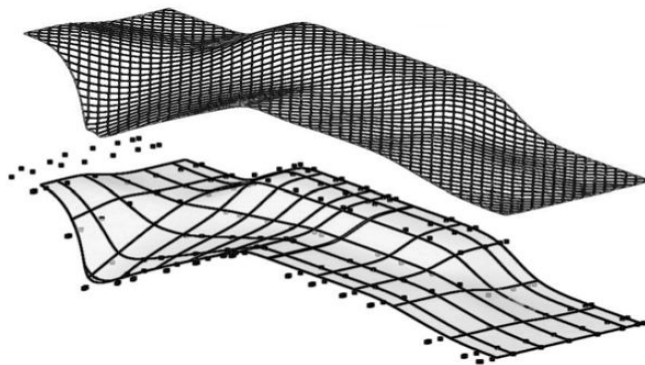
Први *CAD (computer aided design)* софтвер из шездесетих година 20. века коришћен је само за 2Д израду цртежа. Ови софтверски програми су били замена за ручно цртање, али с обзиром на то да је њиховом применом смањена људска грешка и дата могућност поновног коришћење цртежа, били су веома корисни ("CAD software history, 1970s, Internal to international standard", 2016). Док је кориснички интерфејс прилично био једноставан (на бази концепта еуклидске геометрије - линије, углови, криве од којих су израђени цртежи), софтверски инжењери су користили сложене концепте геометрије за дизајнирање софтвера. Компјутерски програми за моделовање и визуелизацију су израђени уз широку

примену елемената диференцијалне геометрије, вектора и матрица. Први *CAD* софтвери користили су интерфејс за моделовање чврстих фигура за генерисање тродимензионалних модела који се састојао од основних облика као што су коцка, призма, цилиндар, конус, сфера и торус на којима је било могуће применити операције као што су пресеци, сједињавање, одузимање. Тиме је омогућено креирање геометријски комплексних модела из једноставних геометријских фигура, али није било могуће извршити мале промене и креирати органске форме. Ови софтвери су били веома скупи, и такође им је недостајао добар кориснички интерфејс. Аутодеск (*Autodesk*) је осамдесетих година 20. века понудио много прихватљивије софтвере са интерактивним системима као што је НУРБС – нерегуларне Б-сплајн линије (*non-uniform rational B-splines - NURBS*), а оно што *NURBS* криве и површи чини тако привлачним је способност контролисања форме интерактивним манипулисањем контролних тачака, удаљења и чворних тачака (чворова). Алати који су то омогућили, развијени су још шездесетих година од стране Пола де Кастељау (*Paul de Casteljau*), Пиера Безиера (*Pierre Bezier*), Стивена Кунса (*Stevens Coons*) и других и представљају основ моделовања комплексних кривих и површина, али су у употреби од 1980-тих година 20. века. За разлику од првих програма који су коришћени само за представљање објеката, најновији са *CAD-CAM* интерфејсом омогућавају директно конструисање тродимензионалних објеката из компјутерског модела.

Архитекте и дизајнери су веома ретко упознати са комплексним математичким записима и процедурама, али применом специјализованих програма где су апстрактни елементи и функције математичког система имплементирани у виду *CAD* алата омогућено им је креирање таквих форми. Често, ови алати се користе веома интуитивно у процесу креирања, разраде и геометријске конструкције површина геометријски комплексних – слободних форми.

Пројектант обично започиње процес дефинисањем граничних линија једне површине делећи је даље на мање једноставније површинске елементе уз помоћ линија и кривих с циљем формирања грубе форме (Слика 1.24). Иако једноставне линије и криве могу да се користе за дефинисање сегмената унутар површине, најчешће се користи крива сплајн (*spline*) јер омогућава описивање било које

форме. Термин сплајн потиче из индустрије изградње бродова, где је коришћен као назив за комад пареног дрвета савијеног у жељену форму глатке површи, која је причвршћена помоћу стега и клинова (Kolarevic, 2003). Густина мреже са контролним тачкама и полигонима је обично одређена комплексношћу и глаткоћом површине која се моделује (Слика 1.24).



Слика 1.24. Регуларна мрежа мапирана на *NURBS*-површини и мрежа коју чине делови површине са контролним тачкама и контролним полигонима; (Извор: Stephan, 2004: 4)

Унутрашње границе појединачних сегмената представљају значајна места пресека површи и инструмент су за моделовање појединачних делова. Глаткоћа површи је један од главних критеријума за обликовање закривљених сегмената и њихово повезивање у чворним тачкама мреже. Појединачни површински сегменти се затим генеришу уз помоћ алата или функције површинског генерисања који поседују читав спектар различитих геометријских облика. Следећи корак подразумева повезивање појединачних сегмената на њиховим заједничким границама, у смислу обезбеђивања глаткоће закривљења, тангентности и одговарајућег одстојања, с циљем да комплетна површина буде континуиране форме. Обликовање стаклених површина слободних форми омотача архитектонских објеката јесте комплексан процес. Дефинисање финалне форме је више од једноставног моделовања, односно представља релативно дуг процес са пуно поновљеног моделовања и побољшања саме форме, провере функција и исправки грешака, имајући увек у виду карактеристике стакла као материјала и сва ограничења која оно подразумева.

Мрежаста структура која представља један од начина материјализације геометријски комплексног стакленог омотача помоћу елемената потконструкције и стаклених елемената - панела, може се постићи на више различитих начина, као што је паралелна пројекција спољашње равне мреже на дату површ (Слика 1.24),

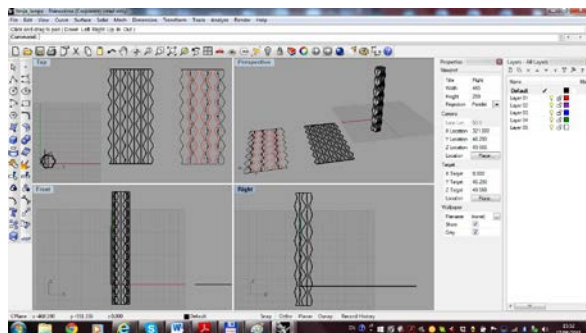
постављање мреже према кривама дате површине, или неком другом врстом мапирања или геометријске конструкције.

Основни елементи и карактеристике NURBS-a

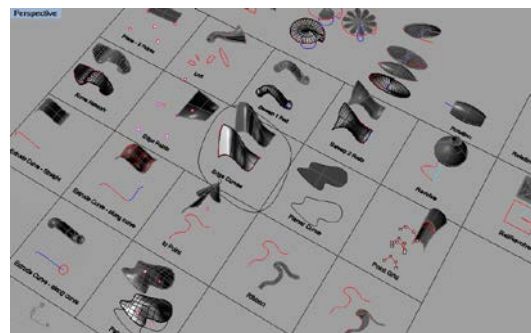
NURBS омогућава хетерогене, али кохерентне форме дигиталне архитектуре које су рачунарски могуће, али исто тако чини достижном њихову изградњу путем рачунарски (нумерички) контролисаних (*CNC*) машина.

NURBS геометрија поседује неколико карактеристика које су значајне за компјутерско моделовање:

- Постоји неколико стандардних начина за размену *NURBS* геометрије као што су моделовање, приказивање, анимација и апликације за инжењеринг, и све информације се могу чувати у сврху коришћења након завршетка пројекта (Слика 1.25а),
- *NURBS* може да конструише и прецизно прикаже широк спектар геометријских форми, како праве линије и стандардне геометријске форме (Платонова тела), тако и геометријски веома комплексне извајане површи (Слика 1.25б),
- Са компјутерске тачке гледишта, *NURBS* омогућује презентацију геометријских форми коришћењем минималне количине података и релативно малог броја корака у прорачуну, због чега се највећи број програма за моделовање заснива на *NURBS*-у као компјутерској методи за конструисање модела комплексних површи,
- Успостављен је стандард за архитектуру и инжењерство с циљем размене *NURBS* геометрије (*IFC* Стандард).



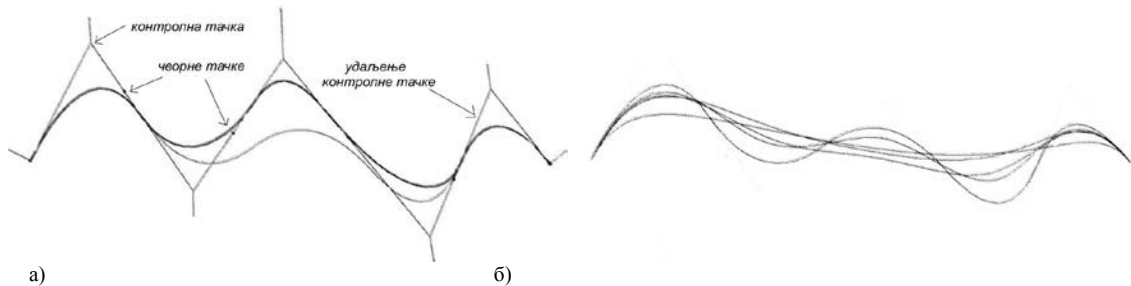
а)



б)

Слика 1.25. а) Интерфејс софтверског програма *Rhino* (моделовање и приказивање); б) варијанте површи настале уз помоћ различитих кривих у програму *Rhino*; (Извор: а) Аутор; б) *Rhino*)

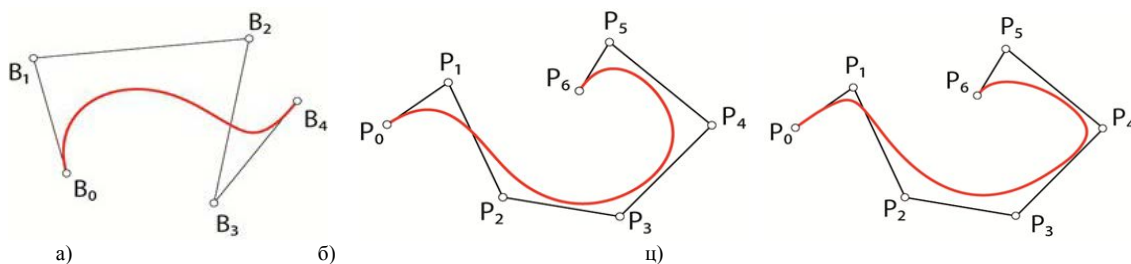
Основни елементи *NURBS*-а су фамилије комплексних *NURBS* кривих, чија форма се може мењати манипулисањем њиховим контролним тачкама и одговарајућом "тежином" привлачења и чворним тачкама, као и степеном закривљености саме криве (Слика 1.26 и 1.27ц). Промена локације контролних тачака утиче на њену форму, а "тежина" привлачења одређује степен њиховог утицаја на криву где се повећањем "тежине", одговарајући сегмент криве или површи повлачи према контролној тачки и обрнуто.



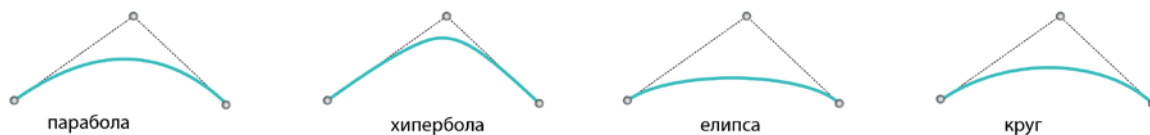
Слика 1.26. Промена форме *NURBS* кривих помоћу интерактивног манипулисања: а) контролних тачака, "тежина" привлачења и чворовних тачака, б) степена закривљености; (Извор: Kolarevic, 2003: 16)

Лобачевски (Nikolai Lobachevsky) је већ у 19. веку изучавао могућност да се било која крива апроксимира помоћу полинома. Током 20. века Исак Ђејкоб Шонберг (Isaac Jacob Schoenberg) је развио теорију сплајнова (*splines*) која представља нумеричку функцију која је у корацима дефинисана полиномијалним функцијама и која поседује висок степен глаткости на местима где се полиномијални сегменти додирују.

Безиерове криве, развијане паралелно од стране Пјер Безиера (Pierre Bézier) у Цитроену и Пол де Кастаљау (Paul de Casteljaeu) у Реноу засноване су на математичком моделу апроксимације произвољних кривих помоћу полинома. Први алгоритам, који се с временом показао као најробустнији и најпрецизнији развио је Пол де Кастаљау, али су криве добиле назив по Пјер Безиеру који је публиковао радове на ту тему.

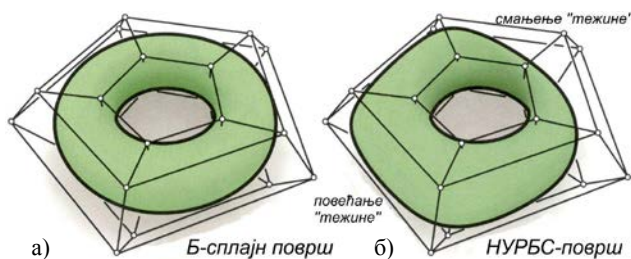


Слика 1.27. Различите врсте кривих: а) Безиерова крива 4 степена са 5 контролних тачака, б) Б-сплајн крива, ц) *NURBS* крива 3 степена са "тежином" привлачења=3 у тачкама P_1 и P_4 ; (Извор: Stavric, 2013: 39, 42)

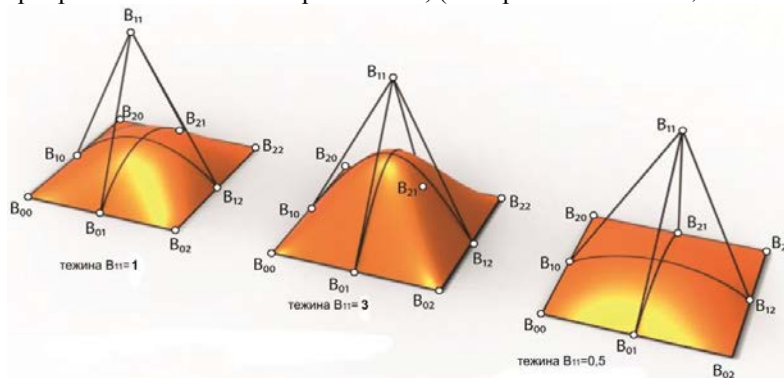


Слика 1.28. *NURBS* криве различите "тежине" привлачења;
(Извор: Аутор)

Безиерове површи су по угледу на криве дефинисане контролним тачкама које "истежу" површину према себи као да поседују привлачну силу. Безиерове криве су заправо Б-сплајн са једнаким растојањима чворних тачака (дакле, чворне тачке нису приказане) (Слика 1.27а). Рационалне криве, за разлику од традиционалних Безиерових кривих поседују различиту тежину "привлачења" (Слика 1.27ц и 1.28) у свакој контролној тачки омогућавајући већу контролу над формом криве површи (Слика 1.29б и 1.30)



Слика 1.29. Различите врсте површи: а) Б-сплајн површ исте "тежине" привлачења, б) *NURBS* површ различите "тежине" привлачења; (Извор: Pottmann et al., 2007: 377)



Слика 1.30. *NURBS* површи различите "тежине" привлачења;
(Извор: Stavic 2013: 73)

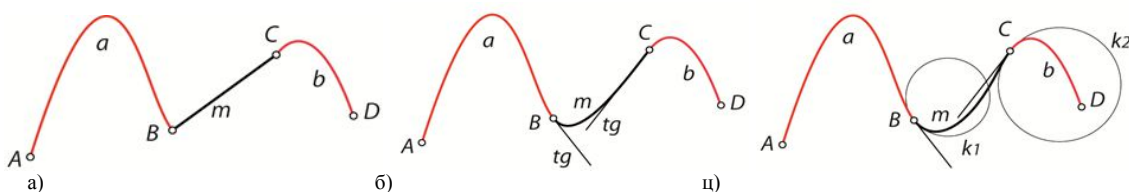
Б-сплајн (*B-spline*) је скраћеница за основни сплајн (*basis spline*), и представља генерализацију (уопштавање, проширење) Безиерових кривих развијену од стране Карл де Бора (Carl R. de Boor) који је дефинисао и алгоритам за њихову синтезу. Б-сплајн криве су заправо *NURBS* криве са подједнаком "тежином" привлачења контролних тачака (дакле, "тежине" нису приказане) (Слика 1.27б) што даје уједначену форму (Слика 1.29а). Б-сплајн дефинише како се сегменти Безијерових кривих повезују у сложену криву и како да се постигне глаткоћа на месту повезивања.



Слика 1.31. Оштар и гладак спој две Безиерове криве; (Извор: <http://www.rw-designer.com/NURBS>)

Тачке спајања две Безиерове криве могу бити једнолично дефинисане (*uniform*) или помоћу вектора тако да сваки прелаз може бити другачији (*non-uniform*) (Слика 1.31). *NURBS* је скраћеница за (*Non-Uniform Rational B-Spline*), што подразумева да тај математички модел кривих користи рационалне Безиерове криве, као и дефиницију тачке прелаза помоћу вектора. *NURBS* крива је она код које утицај контролних тачака (са придруженом полиномијалном функцијом) на криву може да се мења са променом положаја чворних тачака дуж контролног сегмента који повезује две контролне тачке.

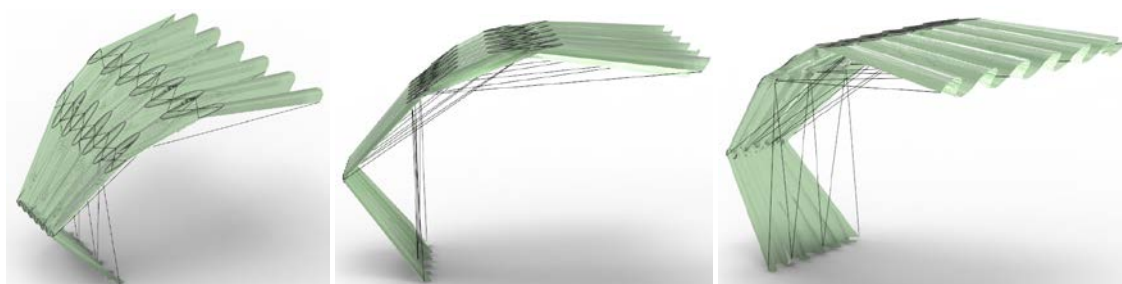
Важна особина кривих састављених од сплајнова је да се њихова закривљеност, односно радијус криве, мења континуално дуж њихове дужине, насупротив кривих састављених од тангентних кружних лукова који, упркос гладком изгледу, имају тачке у којима се закривљеност нагло мења. Постоје три нивоа континуитета кривих (Слика 1.32): а) криву $C0$ континуитета представљају две криве спојене правом са оштрим врхом; б) криву $C1$ континуитета формирају две криве спојене кривом са којом имају заједничку тангенту; ц) крива константне закривљености - $C2$ континуитета представљена је двема кривама које су спојене кривом са којом имају заједничку кружницу односно 3 тачке. Положај контролних тачака *NURBS* криве може да утиче на њен континуитет што подразумева да различити сегменти могу да имају различит ниво континуитета, дајући разноврсност. Континуитет криве је веома значајан, нарочито у случају стакла, како са естетског тако и производног аспекта, због чега већина данашњих програма за моделовање поседују алате за анализу континуитета.



Слика 1.32. Три нивоа континуитета кривих: а) крива $C0$ континуитета, б) крива $C1$ континуитета, ц) крива $C2$ континуитета; (Извор: Stavríc, 2013: 46)

Алгоритми развијени за *NURBS* омогућавају развој интуитивног интерфејса у програму помоћу кога пројектант може јасно да схвати како његове интервенције над контролним тачкама површине утичу на промене у закривљености површи. Такође, површине произведене на основу програма у потпуности одговарају ономе што је било приказано током израде модела помоћу рачунара. Захваљујући томе, *NURBS* данас представља стандард за моделовање закривљених површина помоћу рачунара и подржане су у свим програмима за 3Д моделовање.

Такође, значајно је нагласити важност параметрицизма у оквиру *NURBS* геометрије који обезбеђује важну концепцију архитектонске форме уз помоћ различитих могућности које су омогућене низом варијабила, односно параметара који могу бити независни или зависни, као и њиховом разноврсношћу. Параметрички опис форми обезбеђује посебан начин представљања комплексних кривих и површи уз помоћ којих архитекте могу да креирају бесконачан број сличних објеката. У параметричком пројектовању, параметри имају већи значај од саме форме. Додељивањем различитих вредности параметрима као и применом параметарских једначина које описују односе између различитих елемената, могуће је креирати различите објекте или конфигурације. У случају комплексног стакленог омотача, параметрички модел може да обухвати, како опис свих елемената потконструкције, тако и одговарајућих елемената застакљења, односно целокупне форме геометријски комплексног стакленог омотача (Слика 1.33).



Слика 1.33. Истраживање могуће примене закривљене наборане стаклене конструкције: дигитални модел стаклене надстрешнице потиче од једног параметарског модела, (Извор: Аутор, 2012)

Дакле, веома комплексна хијерархија међузависности свих елемената стакленог омотача може се параметрички моделовати, омогућавајући итеративно прецизирање, односно димензионо "подешавање" у свим фазама пројекта, од идејног решења до процеса његове изградње. Из горе наведеног може се

закључити да је параметрицизам посебно користан за моделовање геометрије комплексних форми, у овом случају стаклених омотача.

Софтвери за моделовање геометријски комплексних форми

У данашње време, мноштво различитих софтверских програма доступно је архитектама и дизајнерима, а избор често долази из личног става у односу на употребљивост софтверског "интерфејса", као и техничке способности програма. Пројектовање помоћу рачунара *CAD (computer aided design)* јесте термин који покрива значајан број програма који деле низ заједничких карактеристика, али такође имају посебне карактеристике у виду специјалних апликација. Најпознатији пакети за архитектуру су: *AutoCAD* и *MicroStation*. Као додатна подршка *CAD* софтверима постоје програми који су специјално дизајнирани за тродимензионално моделовање и визуелизацију. Иако, генерално говорећи, било који пакет горе поменут може да задовољи највећи број захтева корисника, постоји неколико важних програма који се све више користе у архитектонским школама и пракси а то су *3ds Max*, *Google SketchUp*, *Maya*, *Catia*, и *Rhino*. Следећа подгрупа софтвера за моделовање су софтвери за генерисано пројектовање *Generative Design* који користе додатне компјутерске записе и програме који се називају додаци (*plug-ins*) а који могу да повећају могућности 3Д моделовања помоћу софтвера. С друге стране, лични критеријуми могу да имају утицај на избор, али најчешће коришћени програми су: *Grasshopper*, *MAX script*, *Digital Project*, *GenerativeComponents*, *MEL script*, и *Processing*.

Питање од суштинског значаја које се са појавом нестандартних архитектонских омотача често поставља јесте како да се од пројекта, у овом случају, геометријски комплексног стакленог омотача настави ка изводљивом и приступачном начину његове изградње (производње и монтаже). Чињеница да тренутно на тржишту има мноштво софтвера и додатака који нуде решења за архитектонско пројектовање, такође, поставља питање у којој мери се ови софтвери могу користити не само у процесу пројектовања, већ и на начин да обезбеде пренос података који су неопходни за даљу конструктивну и термичку анализу, као и израду елемената не-стандардног стакленог омотача. С обзиром на то да производни процеси ограничавају могуће форме и димензије стаклених

елемената и елемената потконструкције, истраживање најбољег начина фабрикации целокупног омотача треба спровести истовремено са процесом пројектовања. Тачније форма, синоним конструктивне ефикасности, мора бити у складу са геометријом омотача и шемом поделе на мање елементе застакљења. С обзиром на то да се комплексна геометрија нестандартних омотача углавном састоји од сегмената *NURBS* геометрије, која је у овим новим програмским софтверима математички дефинисана и самим тим без одговарајуће дебљине и физичке материјалности, сам процес пројектовања би требало да обезбеди одговарајуће комплексне везе које треба укључити у процес архитектонског пројектовања. Такође, узимајући у обзир сваку различиту технику обликовања стаклених елемената и елемената потконструкције, може се рећи да процес моделовања задовољава пројектанте у погледу обликовања, док се особености у погледу материјала и саме фабрикации накнадно морају узети у обзир. Такви проблеми често резултују чињеницом да идејни пројекат често мора да се мења и прилагођава у процесу израде извођачог пројекта, што често доводи до губитка времена и значајног одступања од оригиналног концепта архитектонског пројекта. Решење треба тражити у математичком и геометријском аспекту комплексне геометрије одабраних програма, прецизности података у односу на изабрани метод фабрикации, као и потенцијалу програмских додатака (*plug-in-ова*). Проблеми постају сложенији када се узме у обзир чињеница да за ову врсту стаклених омотача не постоје одговарајући стандарди, нарочито у погледу примене закривљеног стакла, тако да сваки нови нестандартни стаклени омотач представља јединствен пројекат за који увек изнова треба тражити нове везе и решења за израду појединачних елемената.

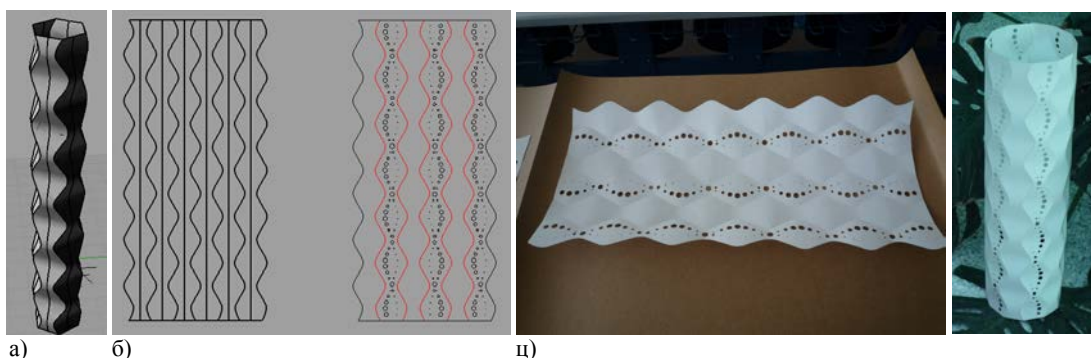
***CAD-CAM* фабрикација стаклених конструкција**

Дигитална фабрикација је феномен који се појавио пре нешто мање од 20 година и постао је значајна дисциплина у оквиру професионалне праксе и образовања. У суштини, дигитална фабрикација представља подкатегорију пројектовања (енг. *computer aided design*) и производње (енг. *computer aided manufacturing*) помоћу рачунара (*CAD-CAM*) с обзиром на то да користи компјутерски контролисане машине као алате уз помоћ којих се секу или праве

елементи. Иако је релативно нов процес у архитектури, *CAD-CAM* процес се користи у инжењерингу и индустријском дизајну више од 50 година у производњи аутомобила, авиона и робе широке потрошње и овај процес је у непрестаном развоју. Развијен је првенствено у ваздухопловној индустрији ради обликовања и сечења компликовано закривљених површина и тиме је у потпуности је елиминисао потребу за 2Д цртежима.

Елементи (компоненте) су пројектовани и детаљно дефинисани помоћу софтвера за тродимензионално пројектовање, а затим се производи модел у малој размери коришћењем брзог процеса (енг. *prototyping*) који преводи дигиталне информације у физички објекат - елемент. С обзиром да овако добијен објекат-елемент укључује све податке из рачунарског модела, често је веома детаљан и обезбеђује прецизан опис целокупног пројекта. У овој фази може се кориговати сам дизајн елемента све до момента када се достигне права величина прототипа, било самог елемента који је део једне целини или да би се направио калуп уз помоћ кога ће се касније обликовати елемент. У случају стакла као материјала, посебно закривљеног стакла користе се обе опције у зависности од технике којом ће се стакло касније савити.

Употреба *CAD-CAM* машина у почетку захтева више улагања кроз учење разних протокола и самог процеса конверзије кроз употребу софтвера. Широки спектар технологија (машина) као што су ласер (Слика 1.34), микро-*CNC*, 3Д штампа су присутне да би се одговорило на различите захтеве клијената.



Слика 1.34. Поступак ласерског сечења модела од папира: а) Параметарски модел закривљене наборане структуре; б) Припремљена шема набора за ласерско сечење; и ц) Делимично и потпуно савијен прототип модела; (Извор: Аутор, 2012)

Нове закривљене форме које су постале могуће уз помоћ новог приступа дигиталном пројектовању и фабрикацији (*CAD-CAM*) геометријски комплексних

форми, могуће је укратко представити кроз процес пројектовања и израде закривљене наборане структуре на моделу од папира (Слика 1.34).

Захваљујући облику комплексним формама омотача архитектонских објеката, архитекте су се поново укључиле у процес њихове израде, односно фабрикације његових елемената, првенствено упознајући а затим и пројектујући у складу са могућностима опреме за дигиталну фабрикацију. Последица тога је да архитекте пројектују оно што се може изградити, и граде оно што се може компјутерски моделовати. Прави изазов представљала могућност израде сваког новог комплексног стакленог омотача доводећи истовремено у питање оправданост његове комплексне форме, али како је могућност израде, како каже Бранко Коларевић (Kolarevic, 2003), постала директна функција компјутерског моделовања, више се не поставља питање могућности израде, већ које нове инструменте (алате) у пракси је неопходно применити да би се искористиле све могућности које пружа дигитални начин фабрикације.

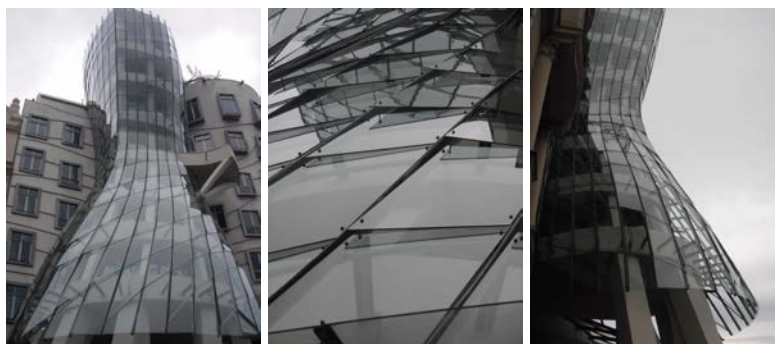
Сам процес *CAD-CAM* фабрикације закривљеног стакленог омотача, који чини део мапираног процеса пројектовања и израде геометријски комплексног стакленог омотача (видети Поглавље 4) обухвата следеће кораке:

- **3Д моделовање** стакленог омотача помоћу једног од софтвера (*3ds Max*, *Google SketchUp*, *Maya*, *Catia*, и *Rhino*),
- **Анализа геометрије** параметричког модела површине закривљеног стакленог омотача с циљем постизања квалитета контуре - глаткоће и рефлексije стаклене површине,
- **Панелизација**, односно подела на мање стаклене елементе водећи рачуна о форми и димензијама панела, кривим линијама по саме поделе, оријентацији, минималном радијусу панела, типу стакла и застакљења, дебљини стакла, типу потконструкције, начину фиксирања и типу спојева,
- **Издајање појединачних панела** и њихово рангирање и груписање према сличности геометрије (димензије и радијус), обележавање панела индивидуалним кодовима и координатама (за монтажу) и њихова припрема за дигиталну фабрикацију према редоследу,
- **Дигитална фабрикација** подразумева: у случају термичког савијања стакла, параметарско позиционирање појединачних панела на дигиталном

калупу; одређивање координата и висина калупа за његову фабрикацију (најчешће од челичних лимова); анализа утрошка материјала и контрола квалитета; припрема нумеричких података за *CNC* сечење панела; у случају термичког савијања стакла, постављање и подешавање калупа у пећи (за подесиве калупе одређивање координата и висина дигиталних панела),

- **Савијање панела** у случају термичког савијања стакла, његово позиционирање над калупом у пећи и његово савијање (за подесиве калупе аутоматско подешавање),
- **Финализација панела** уз проверу тачности и контролу квалитета; завршни третмани као што су хемијско каљење, ламинација, формирање ТИ панела; уградња кодова за монтажу,
- **Савијање формираних панела** у случају хладног савијања стакла, директно на градилишту или у фабрици (на елементе потконструкције).

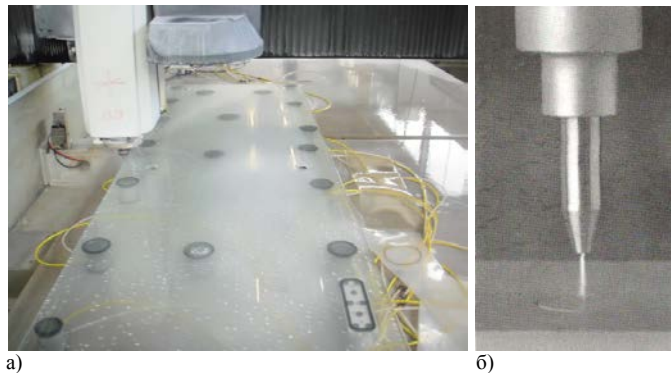
Једноставан пример дигиталне фабрикације комплексног стакленог омотача јесте дводимензионална фабрикација која подразумева *CNC* сечење и бушење. У случају стакла, ово је најчешће коришћена техника, као у случају равних, у потпуности различито обликованих стаклених панела закривљеног двоструког омотача објекта *Nationale-Nederlanden Building* у Прагу (Слика 1.35), који су исечени уз помоћ дигиталних машина за сечење, према геометријским подацима извученим директно из дигиталног модела.



Слика 1.35. Нерегуларна форма равних стаклених панела, исечена уз помоћ дигитално вођених машина за сечење стакла (*CNC*), неомогућава глаткост закривљене стаклене површине двоструког омотача објекта *Nationale-Nederlanden Building* (1996), Френк Гери (Frank Gehry), Праг; (Извор: Аутор, 2012)

Технологија сечења и бушења стакла млазом воде помоћу *CNC water-jet* машина укључује двоосно кретање стаклене плоче у односу на главу за сечење, а

спроводи се покретањем главе за сечење, или покретањем подлоге стаклене плоче или комбинацијом ова два начина. Како сам назив каже, ова технологија подразумева млаз воде под високим притиском, помешан са чврстим абразивним честицама који је пуштен кроз мале млазнице веома фокусираног протока (Слика 1.36б), изазивајући брзу ерозију стакла на својој путањи и производећи веома чисте и тачне резове (Слика 1.36а). На овај начин може се сећи стакло велике дебљине.



Слика 1.36. Процес сечења и формирање отвора стакла: а) помоћу *CNC water-jet* машине типичне конфигурације која користи покретно постоље за кретање главе за сечење стакла, фабрика *SFL*, Грац; б) *water-jet* глава; (Извор: а) Аутор, 2014; б) Kolarevic, 2003: 34)

Непходно је споменути и друге типове фабрикације као што је субстрактивна фабрикација помоћу које се производе калупи за производњу стакла од чврстог материјала као што је бетон (Слика 1.37а). Овај тип фабрикације подразумева вишеосно (троосно, петоосно...) уклањање одређеног волумена материјала из чврстог комада материјала, уз помоћ механички, хемијски, или електрички потпомогнутог процеса (уметнута бушилица). Ипак, најчешћа врста калупа за фабрикацију закривљеног стакла је произведена од челичних лимова које је могуће савити у жељену форму (Слика 1.37б). С обзиром на то да производња слободно закривљеног стакла захтева израду јединственог калупа за сваки стаклени панел, то с једне стране подразумева радно-интензиван и веома сложен процес, а с друге повећање трошкова и времена неопходног за њихову фабрикацију. Из тих разлога, развијен је производни метод, који још увек није у широкој примени, а који се заснива на примени подесивог калупа (Слика 1.37ц) произведеног на основу искуства и обимног истраживања од преко 20 година.



Слика 1.37. Обликовање стакла поступком термичког савијања уз помоћ калупа: а) Бетонски калупи произведени *CNC* бушилицом за фабрикацију двоструко-закривљених панела од акрилног стакла за омотач павиљона *BMW Bubble* Бернарда Франкенса (Bernhard Franken), 1999. год.; б) Метални калуп, фабрика *SFL*, Грац; ц) Подесиви калуп фирме *Biradial Glass*, Амстердам, Холандија; (Извор: а) Kolarevic, 2003: 35; б) Аутор, 2014; ц) Преузето са: www.biradialglass.com, 16. 2. 2016)

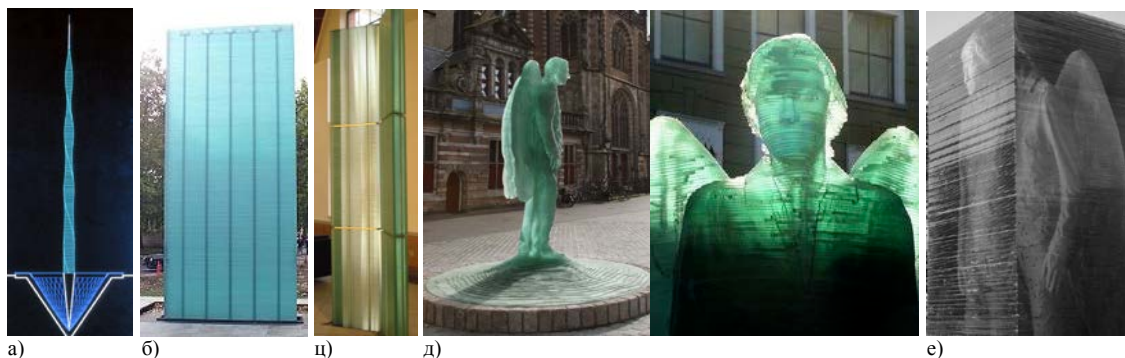
Овим новим методом омогућен је у потпуности компјутерски аутоматизован процес (од фајла до фабрикације), веома тачне димензије панела, минимални ломови стакла, побољшан квалитет стакла, као и знатно смањене трошкове израде калупа који укључују производњу, транспорт, монтажу и време производње.

Други тип, адитивна фабрикација подразумева постепено формирање додавањем материјала слој по слој. Ова технологија подразумева принцип сечења дигиталног модела на дводимензионалне слојеве, где се затим информације о сваком слоју трансферују у производну машину где се физички модел постепено генерише слој по слој. Примена ове технологије је честа у производњи компоненти стаклено-челичних конструкција које се производе у серијама, као што су елементи лаких решеткастих структура (Слика 1.38), где се на овај начин производи прототип који се затим користи за прецизно ливење серијских елемената.



Слика 1.38. Челични елементи израђени уз помоћ прототипа произведеног уз помоћ адитивне фабрикације за *Rose Center for Earth and Sciences*, *Ennead Architects*, Њу Јорк, 2000; (Извор: Преузето са: <http://www.heintges.com/project.php?id=amnh-rose-center>, 17. 2. 2016)

Интересантно је да је слична техника наслаганих стаклених плоча у виду конструкције примењена први пут 2000. године на конкурс за пројекат торња високог 30 m (Слика 1.39а). Кулу су чиниле 2000 стаклених плоча дебљине 15 mm које изложене сили притиска могу да издрже велика оптерећења. Сprovedени су тестови који су требало да утврде могућност лома стаклених плоча на великој висини. Структура је била робусна и издржљива и могла је да издржи чак и лом неколико комада стаклених плоча. Ипак, по први пут овај концепт је изведен у виду стаклених скулптура – стуба за меморијални споменик у Лондону и статуе анђела у Zwolle, Холандија (Слика 1.39б, д и е), након чега је постао предмет даљих истраживања за различите варијанте масивних стаклених скулптура (Bos et al., 2012). Претходно поменуте скулптуре показују два различита метода којима је постигнута њихова стабилност. Меморијални стуб се ослања на 5 вертикалних челичних преднапрегнутих шипки, док је 370 стаклених плоча дебљине 8 mm статуе анђела повезано акрилном *3M VHB* самолепљивом фолијом као погоднијом варијантом у случају геометријски неправилних форми (исечена тачна форма из правоугаоне стаклене плоче уз помоћ компјутерски генерисане форме анђела и пресека на сваком слоју стакла). Нова истраживања за потенцијалне проблеме као што су трајност, прљање, ломљење фолије, капиларна вода (смрзавање воде доводи до лома стакла), димензионална одступања ивица и дебљине стакла (EN 572-2 дозвољава одступање дебљине од $\pm 0,3$ mm за равно стакло) предлажу решење у виду финалног брушења стакленим прахом који се задржава на лепљивој ивици фолије и штити од влаге уједно избегавајући прљање.



Слика 1.43. Техника слојевитог лепљеног стакла за масивне моделе: а) Пројекат торња високог 30 m; б) Меморијални споменик, Лондон; ц) Детаљ улазног дела објекта, Праг; д) Статуа анђела, Zwolle, Холандија; е) "Негатив" статуе анђела; (Извор: а) Nijssen, 2013: 43; б) Преузето са: https://en.wikipedia.org/wiki/National_Police_Memorial, 30. 4. 2015; ц) Аутор, 2012; д) и е) Преузето са: <http://flickrhivemind.net/Tags/hermanlamers/Timeline>, 30. 4. 2015)

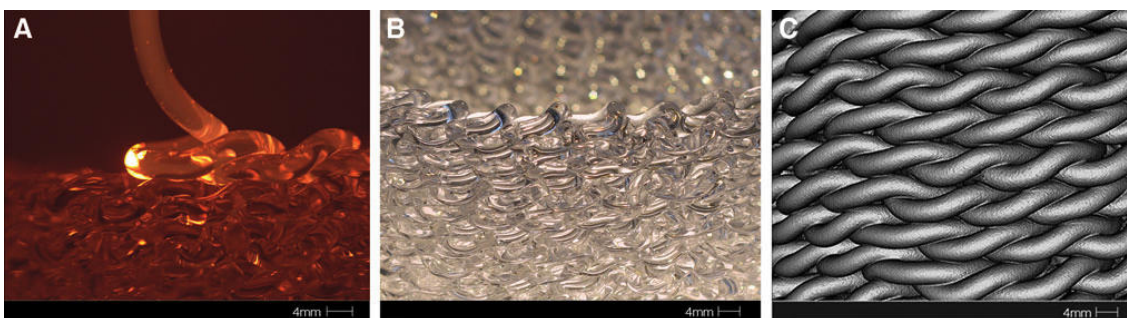
Технике дигиталне фабрикације су увелико прихваћене широм света, а интересовање за ове методе у веома кратком року постало је широко распрострањено и умрежено. Томе доприносе различите иницијативе и доступност ове технологије. Такође, данас је могуће процесом микрофабрикације користећи микромашине постићи минијатурне производе и димензије. Тако је центар са универзитета МИТ развио програм *Fab Lab* који има широку палету алата за машине сложених функција за обраду стакла чиме је могуће постићи минимале димензије од чак 1 микрона (Слика 1.40).



Слика 1.40. Микро сечење и бушење стакла примењено за све врсте стакла: а) сечење стакленог диска пречника 500 микрона - 0,5 mm, б) бушење рупа пречника 150 микрона по обиму стаклене цеви, и ц) ласерско бушење канала величине 2 микрона,

(Извор: Преузето са <http://www.potomac-laser.com/services/materials/glass/>, 12. 6. 2015)

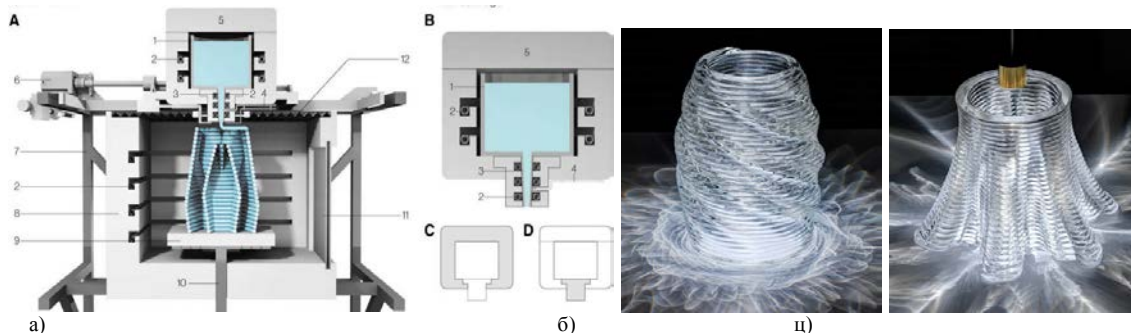
Нановију технику за ливење транспарентног стакла помоћу 3Д штампе (Слика 1.41) развили су научници из лабораторије са МИТ Института, отварајући могућност креирања архитектонских компоненти од стакла, као и целих стаклених фасада (омотача) из једног комада, отварајући пут за префабрикацију у стаклу.



Слика 1.41. Процес ливења транспарентног стакла помоћу 3Д штампе: а) Пад флуидне масе са млазнице, б) Детаљ штампаног објекта, ц) 3Д увећање помоћу микрокомпјутерских томографских података; (Извор: Klein et al., 2015: 100)

3Д штампач (Слика 1.42) има две изоловане коморе, једну изнад друге. Горња комора служи као пећ у којој се налази ливено стакло загрејано до температуре од 1000°C, и која има улогу кетрица за штампање крећући се континуирано одговарајућом задатом путањом, истовремено испуштајући течно

стакло преко млазнице направљене од алуминијум-силицијум-циркона (хемијско једињење отпорно на топлоту). Доња комора служи као подлога за штампање и постепено хлађење (стакло се гради слој по слој). Постепено хлађење спречава лом стакла до којег долази услед температурних промена или утицаја.



Слика 1.42. 3Д штампач: а) Пресек кроз штампач; б) и ц) Различите могућности закривљених форми 3Д штампаног стакленог модела, (Извор: Klein et al., 2015: 95, 98)

Процес може да омогући бесконачан број различитих форми, као што је то могуће помоћу традиционалног 3Д принтера. Ова нова техника производње стакла омогућава да се генеришу структуре које су геометријски одговарајуће и оптички прилагодљиве са великим могућностима у производњи. Такође, истражују се начини на које различит колорит стакла утиче на еколошке перформансе, посебно пријем сунчевог зрачења. За разлику од класичног дувања стакла, овом техником могуће је предвидети и штампати, независно, унутрашњу и спољашњу површину текстуре стакла с циљем контроле сунчеве трансмисије. Све ово говори да је овим процесом могуће произвести аеродинамичке фасаде које су оптимизирание за соларне добитке, али исто тако и геометријски прилагодљиве и променљиве у односу на дебљину с циљем постизања различитог интензитета дневног осветљаја као и бољих енергетских перформанси омотача (Klein et al., 2015).

Све већи број успешно израђених геометријски комплексних стаклених омотача, који варирају у погледу величине и буџета, показују да дигитална фабрикација може да понуди разноврсне производне могућности који су на свој начин увек изузетни.

1.2.4 Панелизација и оптимизација стаклених површина геометријски комплексних форми

Процес пројектовања и реализације геометријски комплексног стакленог омотача обухвата различите геометријске проблеме који првенствено захтевају рационализацију процеса пројектовања и процену изводљивости стакленог омотача слободне форме. Такође, формирање мреже са равним или закривљеним стакленим елементима, најчешће троугаоне или четвороугаоне форме, као и мреже које омогућавају вишеслојне конструкције, као и проналажење решења за проблеме самих стаклених панела, захтевају добро познавање геометрије у комбинацији са нумеричком оптимизацијом.

Данас доступни комерцијални алати за пројектовање геометријски комплексних форми стаклених конструкција имају своја ограничења, што захтева један систематичан приступ и потпуно разумевање могућности и ограничења саме геометрије жељене форме. С циљем постизања одговарајућег решења и унапређења знања, као и померања граница постојећег знања сваким наредним пројектом, од суштинског значаја је сарадња са привредом која може да омогући потребне податке о актуелним проблемима, најновијим реализованим објектима и њиховој евалуацији. Показало се значајно што је примена познатих математичких теорија (у оквиру геометрије, диференцијалне геометрије и геометријских алгоритама) на практичне проблеме допринела поновном истраживању математичких елемената (Wallner and Pottmann, 2011). У том смислу као водеће фирме у Европи које су сарађивале на иновативним решењима стаклених конструкција геометријски комплексних форми, могу се издвојити *RFR* (Париз), *Evolute* (Беч), *Waagner-Biro Stahlbau* (Беч) и сличне.

За постизање успешне оптимизације, поред додатног геометријског знања потребно је дефинисање свих параметара оптимизације, као и дефинисање жељеног циља, посебно у оквиру сваког параметра.

Типови панелизације

Технологија моделовања архитектонских објеката је протекле две деценије унапредовала на начин да је могуће произвести изузетно сложене геометријске форме омотача уз минимално ангажовање пројектанта. Иако је, без сумње, овим дата слобода пројектантима за креирање различитих форми (Слика 1.43), такође је

проширен јаз између оригиналне пројектантске идеје и форме омотача која се разумно може изградити. Тако уз све већу и значајнију улогу индустрије стакла и стаклених фасада, првобитно истраживачко питање: "Може ли се изградити ова форма?", замењено је питањем: "Да ли треба изградити ову форму?"



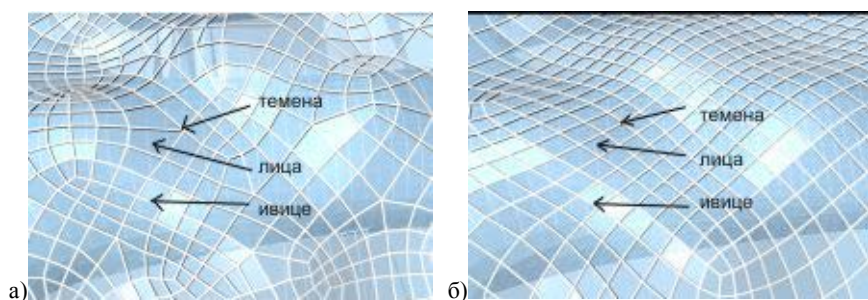
а) **Слика 1.43.** Различита панелизација стакленог омотача: а) Троугаона мрежа, објекат аудиторијума института Каролинска, Стокхолм, Шведска; б) Троугаона мрежа, објекат дистрибуционог центра *BMW Welt*, Минхен; и ц) Четвороугаона мрежа, објекат шопинг центра Емпорија, Малмо, Шведска (Извор: Преузето са: а) <http://www.dezeen.com/2014/07/03/wingardhs-designs-an-auditorium-with-a-slanted-glass-facade/>, б) <http://www.dezeen.com/2007/10/03/bmw-welt-by-coop-himmelblau-2/> и ц) <http://www.dezeen.com/2013/09/27/emporia-shopping-centre-in-malmo-by-wingardhs/>, 12. 6. 2015)

Поступак панелизације који подразумева формирање мреже, као основног параметра геометријски комплексног омотача, укључује неколико интерактивних корака који подразумевају:

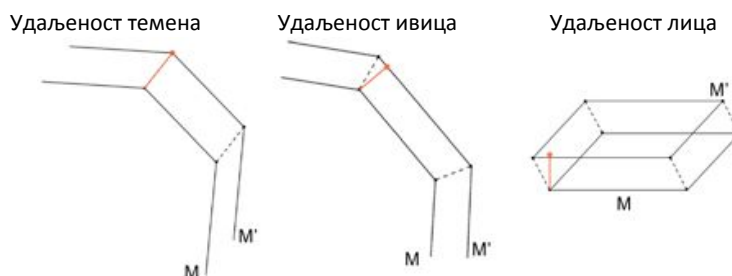
- процес поделе (одређивање форме и димензија појединачних сегмената),
- усвајање технике формирања мреже (триангулација, транслација и ротација, дискретизација помоћу мреже конјугованих кривих, моделовање развојне површи помоћу трака и слично),
- постављање дијагонала (евентуално),
- оптимизацију саме мреже која прати првобитно архитектонско решење, у зависности од тога да ли су елементи потконструкције равни (полилиније) или закривљени (криве линије), са циљем постизања мреже чије чворне тачке (место пресека елемената потконструкције) су без сила напрезања.

Неопходно је објаснити да је геометријска теорија мреже значајно другачија од теорије глатке површине. Ова разлика је често узрок многих проблема који се јављају приликом процеса панелизације. То је неопходно појаснити из разлога што је у случају конструктивног стакла примењено неколико слојева стаклених плоча. Сама мрежа представља скуп тачака које су повезане на

неки унапред одређени начин (Слика 1.44). Парови повезаних темена се називају ивицама, а групе од три или више ивица се називају "лицима" мреже (Слика 1.44). Мрежа се сматра дискретном аналогојом глатке закривљене површи и представља основ за шему панелизације. Основни резултат панелизације је да мрежа која се сматра најпогоднијом за примену на стакленим омотачима (имјући у виду спојеве панеле) јесте таква да може да одржи константну удаљеност једне од друге мреже (једног стакла од другог) на бар један од три начина: а) удаљеност темена, б) удаљеност ивица, и ц) удаљеност лица (Слика 1.45). Таква мрежа се назива паралелна (енгл. *offset*) мрежа.



Слика 1.44. Темена, лица и ивице као основни елементи различитих типова четвороугаоне мреже: а) креиране помоћу мреже главних кривих; б) креиране помоћу конјугованих кривих (Извор: Liu et al., 2011: 1)

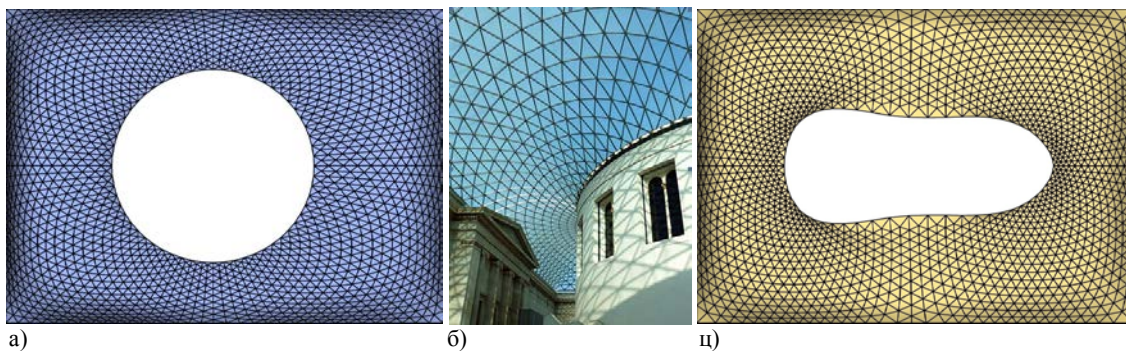


Слика 1.45. Три различита начина формирања удаљености између два слоја мреже који су погодни у случају примене вишеслојних стаклених елемената (Извор: Hambleton et al., 2009: 240)

За реализацију стаклених омотача геометријски комплексних форми најчешће се, из економских разлога, примењују равни стаклени елементи. Сама мрежа је најчешће троугаоне или четвороугаоне форме, а ређе вишеугаоне (петоугаоне, шестоугаоне).

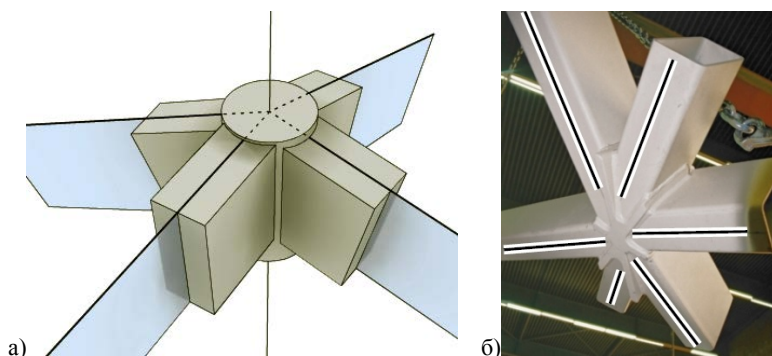
Прва техника панелизације која представља најстарији али и даље популаран начин јесте апроксимација глатке површине помоћу троугаоних елемената (триангулација). Посебно је добро прилагођена за панелизацију стакленог омотача, с обзиром на то да је увек могуће три тачке повезати равним елементом. Међутим дискретизација (свођење закривљене површи на равне

елементе) троугаоним елементима има низ озбиљних недостатака. Таква шема поделе, без обзира на форму елемената (једнакостранични, правоугли троуглови), резултира највећим бројем сечења стаклених елемената. Такође, троугаона подела подразумева шест ивица које се спајају у једном чвору што узрокује велику комплексност чворне тачке и, у зависности од величине елемената, нижи степен транспарентности саме површи. Упркос њиховој флексибилности, односно могућности да се спајају под различитим угловима, постоје одређени геометријски услови који имају значајан утицај на форму троугаоне мреже а условљени су закривљеношћу саме површи. Веома често, процес оптимизације подразумева проналажење најбоље шеме регуларне троугаоне мреже (Слика 1.46).



Слика 1.46. Троугаона мрежа стакленог крова Британског музеја у Лондону: а) Модел; б) Изглед реализованог кровног омотача постигнут геометријском оптимизацијом и ц) Апроксимација еквивалентне мреже са својством регуларних (једнакостраничних) троуглова чија унутрашња гранична ивица је променљива, и унутрашњим отвором нерегуларне форме; (Извор: а) и ц) Wallner and Pottmann, 2011: 7; б) Преузето са <http://wikimapia.org/6243584/British-Museum>)

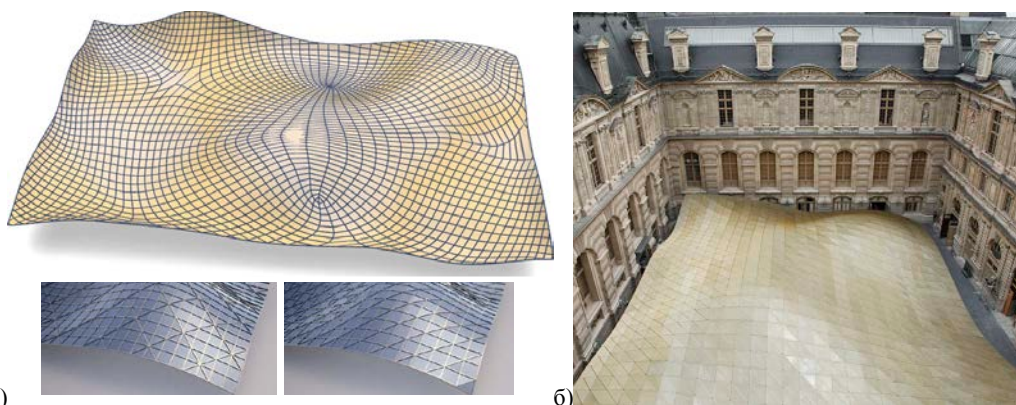
Генерално говорећи, у случају када се симетрале елемената потконструкције секу у једној тачки (заједничка оса), то подразумева чворове који су ослобођени силе торзије и чија је конструкција поједностављена. За разлику од четвороугаоне мреже где је могуће пројектовати такав чвор, у случају троугаоне мреже, с обзиром на недовољан степен слободе, то није могуће (Слика 1.47).



Слика 1.47. Различите чворне везе: а) Чворна веза четвороугаоне мреже без силе торзије; и б) Чворна веза троугаоне мреже са укљученом торзионом силом (начин фабрикације чворног елемента у случају када се симетрале елемената челичне конструкције неправилно секу); (Извор: Wallner and Pottmann, 2011: 2)

У случају троугаоне мреже лакше је постићи услов равних стаклених елемената, али са постојањем торзионе силе у чворним тачкама, за разлику од четвороугаоне мреже која је из тих разлога, као и разлога веће транспарентности омотача, атрактивнија са обликовног аспекта.

У том смислу другу, али не мање интересантну технику панелизације представља мрежа са четвороугаоним равним елементима чија "лица" садрже четири темена, и чије су чворне тачке мање комплексне. У том погледу, геометрија омотача која се најчешће примењује подразумева једноставну конструкцију мреже, попут паралелне транслације једне полилиније дуж друге полилиније (Слика 1.48). Такође, производња четвороугаоних елемената ефикаснија је у погледу количине материјала који отпада приликом сечења стаклених плоча стандардних димензија. Иако сама четвороугаона мрежа поседује много пожељних карактеристика, имајући у виду да четири тачке скоро никад не припадају једној равни у случају слободно закривљених површи, њена примена представља довољан изазов.

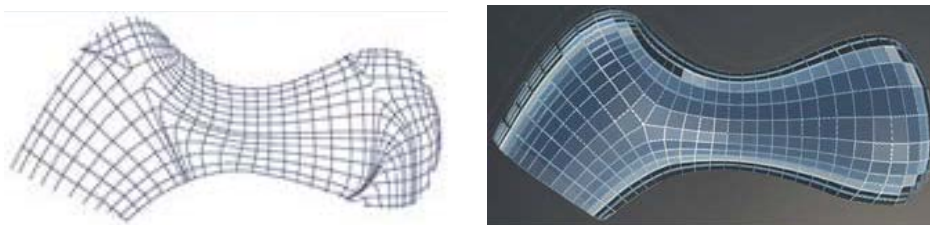


Слика 1.48. Стаклена површина крова Музеја исламске уметности у Лувру, Париз: а) Анализа предложених решења претежно квадратне мреже и хибридне троугаоно-квадратне мреже; б) Реализована троугаона мрежа са троугаоним засторима-поклопцима; (Извор: а) Wallner and Pottmann, 2011: 4; б) Преузето са: <http://www.dezeen.com/2012/09/24/department-of-islamic-arts-at-louvre-by-mario-bellini-and-rudy-ricciotti/>, 24. 4. 2016)

У случају када се ради о апроксимацији једне површи традиционалним површима као што су цилиндар и конус, панелизација четвороугаоном мрежом најчешће се препоручује. Такође, апроксимација слободно закривљених површи уз помоћ ротационих површи које су генерисане ротацијом једне криве око друге криве, представља погодну технику за уклапање, иако је као и у претходно поменутом случају, одступање од оригиналне архитектонске идеје најчешће велико. У сваком случају примена транслационих и ротационих мрежа (површи)

има велики број предности као што је креирање веће сличности између панела што може допринети смањењу трошкова њихове производње. Такође, са овим типом мреже намећу се уобичајена ограничења за пројектанте и захтева се мање интуитиван процес пројектовања.

Последњих година развијена је техника мреже главних кривих, која подразумева параметризацију површине дуж одређених класа мреже кривих које се зову мреже конјугованих (спрегнутих) кривих. С обзиром на то да добро распоређене конјуговане криве које су аналогне глаткој површи, формирају четвороуглове који су скоро равни, минималним померањем темена могуће је добити потпуно равне панеле (Слика 1.49).



Слика 1.49. Мрежа главних (конјугованих) кривих и панелизација уз помоћ главних кривих (Извор: Hambleton et al., 2009: 241)

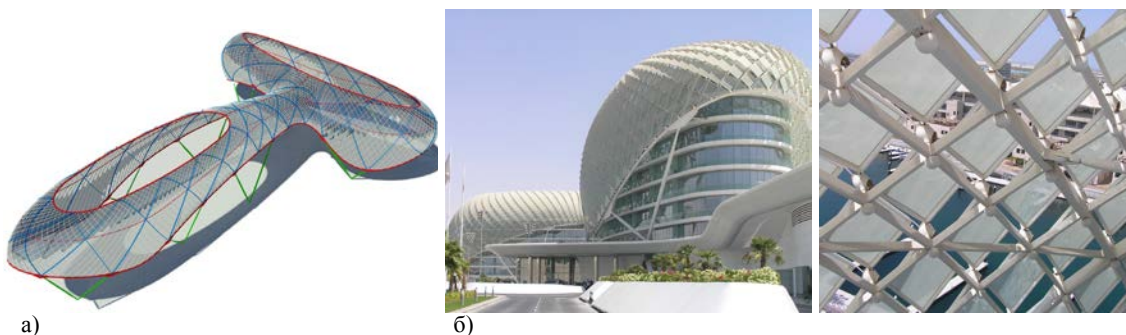
Показало се да овај начин креирања мреже обезбеђује најбоље карактеристике у погледу једноставности чворне везе, структуралне транспарентности (мање елемената потконструкције), ефикасности материјала и могућности реализације форме која је најприближнија оригиналној. Овај тип се назива још и доминантна четвороугаона мрежа са равним елементима (*Planar Quadrilateral Meshes - PQ meshes*) због карактеристике да визуелно подсећа на глатку површ. Са становишта оптимизације, планарност четвороугаоних елемената се најбоље постиже када се за циљ постави панелизација четвороугловима чије се дијагонале не секу (панелизација елементима који одступају од референтне површи). Важно је напоменути да с обзиром на то да се геометријски комплексан стаклени омотач може ускладити помоћу горе поменутог типа мреже, и то већ у фази пројектовања помоћу додатака (*plugins*) које данас користи најчешће примењиван софтвер *Rhino*, неопходно је обратити пажњу на ивице које су овим поступком декомпозиције визуелно наглашене и уочљиве. Оптимизација овог типа мреже може се успешно постићи само у случају када полилиније мреже прате параметарске линије конјуговане параметризоване површи (Слика 1.49).

На овај начин је, такође, могуће постићи паралелну мрежу на константном удаљењу од оригиналне која резултује призматичним елементима када се ради о вишеслојном стаклу. Постојање спољашњег и унутрашњег слоја базираног на паралелним мрежама полиедарске површине подразумева њихово константно удаљење (пример двоструког омотача). Важно је напоменути да су равни које повезују одговарајуће ивице, равни симетрије самих елемената потконструкције и њихова пресечна линија је оса чворова која повезује одговарајућа темена - чворне тачке (Слика 1.50). Провером оба збира супротних углова одговарајућих ивица сваког слоја паралелне мреже, може се утврдити њихова паралелност. Само на овај начин креирана паралелна мрежа је ослобођена торзионе силе у чворовима



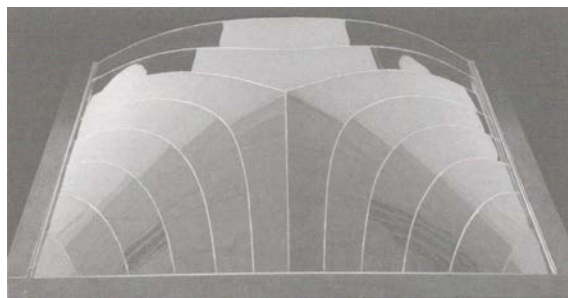
Слика 1.50. Двослојна структура полиедарских површи базирана на паралелној мрежи (Извор: Wallner and Pottmann, 2011: 4)

Тakoђе, могуће је формирање четвороугаоне мреже вишеслојне структуре која није паралелна, али чије чворне тачке су без постојања силе торзије (Слика 1.51). Начин формирања такве геометрије подразумева вишеслојну структуру (полиедарске површи) са равним елементима који су дистанцирани под одређеним углом у односу на површину система потконструкције, на начин да су равни стаклени елементи постављени увек на истом одстојању у односу на чворне тачке мреже потконструкције омотача.



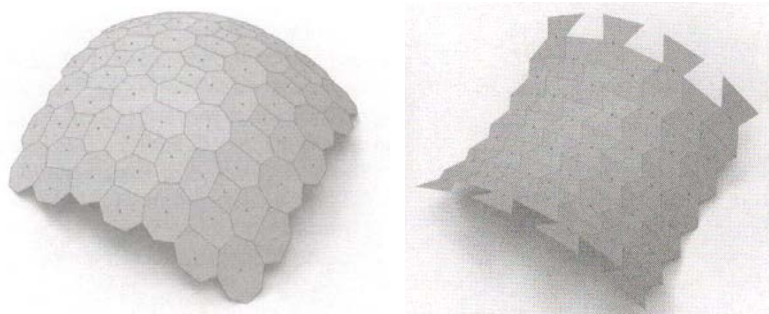
Слика 1.51. Двоструки, не-термички и водо-неотпорни омотач објекта хотела "Yas Island", Абу Даби, 2009. год: а) Геометријски модел као основа за генерисање мреже; и б) Изглед реализованог вишеслојног омотача са равним стакленим пескареним елементима дистанцираним у односу на чворне везе потконструкције; (Извор: а) Wallner and Pottmann, 2011: 3; и б) Аутор, 2010)

Као следећи могући начин редефинисања равних четвороугаоних елемената, може се сматрати интерполација развојних (једноструко закривљених) површи у виду трака које повезују једну "фамилију" параметарских линија (Слика 1.52). С обзиром на то да су ове развојне површи једноструко закривљене, добијена шема панелизације слободно закривљених површи биће приближнија оригиналној закривљеној форми него у случају равних елемената. Ова техника осмишљена је од стране професора Хелмута Потмана (Helmut Pottman). С друге стране једноструко закривљени елементи имају знатно већу економску цену у односу на равне, али ни приближно као што је економска цена двоструко закривљених стаклених елемената. Нема сумње да овај тип мреже (конусне или цилиндричне) омогућава успешну панелизацију слободно закривљеног стакленог омотача упркос проблемима узрокованим геометријским карактеристикама.



Слика 1.52. Нови технички принципи панелизације, односно полу-дискретизације, двоструко закривљене површи уз помоћ трака од развојних једноструко-закривљених површи – истраживачки модел; (Извор: Rapnaud, 2014: 65)

Иако неке површи овог типа производе паралелне мреже које нису погодне за изградњу услед својих специфичности, превеликих димензија и слично, може се рећи да је тренутно највећи изазов свођење двоструко закривљених површи на једноструко закривљене, односно формирање двоструко закривљених форми стаклених омотача помоћу једноструко закривљених елемената малог закривљења.



Слика 1.53. Дискретизација слободно закривљених површи базирана на пресецима тангентних равни које формирају вишеугаоне равне елементе, (Извор: Stavić et al., 2014: 135, 136)

Дискретизација двоструко закривљених површи могућа је и формирањем вишеугаоних мрежа које се базирају на пресецима тангентних равни (Stavrić et al., 2014). За разлику од других, претходно поменутих техника дискретизације (формирање мреже са равним елементима) као што су триангулација и четвороугаоне мреже, закривљене форме креиране на овај начин могу се састојати од елемената са различитим бројем ивица (Слика 1.53). Поред потпуно равних елемената, мрежа формирана на овај начин може креирати чворне тачке у којима се секу само три ивице под различитим угловима. За разлику од троугаоне мреже и њене комплексне чворне везе где се секу шест ивица, на овај начин могуће је остварити мање комплексан чвор. Међутим, поставља се питање стабилности односно крутости система конструкције, посебно када се ради о великим површинама.

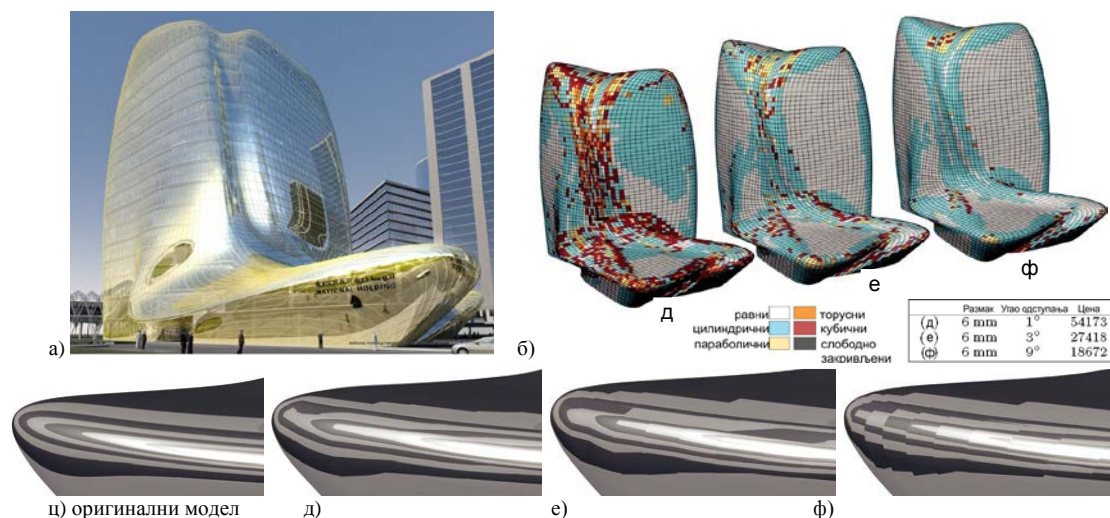
Параметри оптимизације

Важан део реализације геометријски комплексног стакленог омотача је процес декомпозиције на мање делове (панеле), назван панелизација, с циљем да укупни трошкови производње и монтаже буду што је могуће мањи, као и да многобројни обликовни (димензија, укупна глаткоћа), функционални и конструктивни захтеви буду задовољени. Поред тога, образац по коме је извршена подела не би требало да одступа визуелно од првобитне архитектонске идеје.

Оптимизација геометрије стакленог омотача обухвата различите поступке, који су од суштинског значаја за решавање проблема панелизације, односно рационализације геометријски комплексне форме стакленог омотача путем декомпозиције у геометријски једноставне елементе који се могу понављати.

Примена једноставне декомпозиције геометријски комплексног стакленог омотача најчешће доводи до потпуне различитости појединачних стаклених елемената чија производња понекад захтева такође производњу јединствених калупа за сваки панел. С циљем смањења укупних трошкова сама процедура генералне оптимизације панела подразумева континуални процес комбиноване оптимизације која се базира на концепту вишеструког (поновног) коришћења истих калупа.

Главни циљ је декомпозиција стакленог омотача на мање елементе који се лако могу произвести. Мрежа кривих, која је у потпуности видљива на изведеном омотачу, представљена на моделу даје могућност архитектама да приликом процеса пројектовања у различитим фазама оптимизације, могу да сагледају саму форму. Производни процес обухвата различите начине обликовања стаклених елемената који у неким случајевима могу и сви бити примењени у оквиру једног пројекта. Тако се равни стаклени елементи лако производе сечењем и даљом обрадом лакодоступних стаклених плоча; цилиндрични и у неким случајевима конусни елементи савијају се уз помоћ машина које као и сам процес нису економичне; геометријски комплексни елементи (слободних форми) морају се обликовати термичким поступком уз помоћ калупа који се специјално производе за одређени пројекат по цени која нимало није економична; нови процес хладног савијања стакла, о коме ће више бити речено у даљем тексту, омогућава обликовање стаклених панела (једноструко и двоструко закривљених) великог радијуса закривљења, односно малог закривљења уз знатно мање трошкове.



Слика 1.54. Геометријски комплексна форма модела седишта националне компаније у Абу Дабију, Заха Хаид: а) Модел омотача; б) Оптимална декомпозиција површине омотача на панеле различите форме дуж дате мреже кривих; ц)-ф) Континуитет линија рефлексије (угао одступања) указује на визуелни квалитет површине; (Извор: Eigensatz et al., 2010: 7)

У случају неопходне примене калупа где трошкови подразумевају обезбеђивање одређеног типа калупа као и производњу стаклених панела помоћу датих калупа, у процесу оптимизације неопходно је размотрити могућност да одређени број панела буде замењен другим који се могу произвести на други економичнији начин или уз помоћ мањег укупног броја калупа (Слика 1.54а, ц-ф).

На тај начин се минимизирају трошкови производње под условом минималног одступања од првобитне мреже кривих и минималних одступајућих углова, као и постојаности визуелних карактеристика (глаткоћа и рефлексија) целокупне површине омотача.

Основни закључак самог процеса оптимизације форме целокупног омотача и појединачних панела, као и њихове производње јесте да је неопходно применити што јефтиније производне процесе као и саме калупе. Уколико је неопходно обезбедити један скупљи калуп требало би га применити за производњу више панела. Генерално, може се рећи да се оптимизација састоји из два дела: једноставнијег који дефинише поделу панела према типу калупа; и другог дела који дефинише саму форму калупа, а који заједно представљају један континуални процес. Овај поступак постаје веома комплексан када се ради о великом броју панела, и када је неопходно удружити панеле који се у оквиру мреже налазе на различитим местима, а биће произведени истим типом калупа (Слика 1.54б). Такође, овај поступак подразумева додатне захтеве, као што је способност инжењера-дизајнера да брзо процени колико просторни елемент одступа, односно одговара предложеном типу калупа.

С друге стране, у случају примене равних стаклених елемената може се рећи да иако троугласте форме панела могу описати било коју слободну форму омотача објекта, оне су са економског аспекта неповољније у односу на исту површину израђену помоћу четвороугаоних елемената (елементи са четири ивице). Четвороугаона мрежа подразумева мање машинских операција приликом производње стаклених елемената, као и количински мање елемената потконструкције, самим елеминисањем дијагонала. Међутим, на овај начин постигнуто решење, може се сматрати одрживим са економског аспекта само уколико су четвороугаони елементи равни. Насупрот томе, примена једноструко и двоструко закривљеног стакла може у потпуности да анулира предност решења панелизације постигнутог применом четвороугаоних елемената. Међутим, геометријски принципи, као што је представљени принцип транслационих површина, који могу да гарантују геометријски равне панеле у четвороугаоном мрежном систему, пружају могућност значајне оптимизације посебно када су у питању велике површине слободно закривљених површи.

У овом поглављу показано је да је архитектонска пракса континуално пратила развој геометрије, те да су многи архитектонски правци били инспирисани најновијим достигнућима у овој области. Конструисање све комплекснијих закривљених форми, тумачено је са архитектонске стране као израз слободe и динамичности архитектонског израза и најчешће везивано за изражавање модерних тенденција у датом историјском тренутку.

Данас је развој рачунарских апликација омогућио да се комплексне геометријске форме генеришу једноставније, захваљујући могућностима рачунара да брзо изводе бројне комплексне прорачуне, чиме су у руке архитеката стављени алати који омогућавају једноставније конструисање и извођење ових форми. Међутим, већ на геометријском нивоу постоје проблеми у практичном извођењу геометријски комплексних облика, јер за разлику од апстрактних геометријских форми, грађевински елементи имају физичке карактеристике које онемогућавају формирање било које геометрије у одређеном материјалу. Ово је посебно изражено на примеру стакла који је крт и лако ломљив материјал и који се због тога не може производити у свим облицима и величинама. Због тога, код моделовања геометријски комплексних форми од стакла потребно је узети у обзир да се свака већа површина мора израдити од већег броја појединачних елемената и да је неопходно предвидети конструкцију која ће те елементе држати. Овај проблем познат је под именом "панелизација" и представља посебан геометријски задатак, карактеристичан за моделовање геометријски комплексних форми у стаклу за који постоје специјализовани рачунарски програми.

Међутим, поред геометријских аспеката, пројектовање и извођење закривљених површина, обухвата многе аспекте карактеристичне за сам материјал који се односе, како на особине стакла као материјала, тако и на технике производње, обликовања и завршне обраде стаклених панела, као и на ефекте које стакло као материјал уноси у завршени архитектонски објекат, што ће бити тема следећих поглавља. Све ово чини да процес пројектовања и конструкције геометријски комплексних стаклених омотача архитектонских објеката, буде изузетно сложен. Као што ће у четвртном поглављу показати спроведене анкете, до данас није постојао дефинисани процес пројектовања. Сходно томе, део ове дисертације - мапирање процеса - представља значајан допринос професији.

2. Анализа примера/студије случаја геометријски комплексних форми стаклених омотача архитектонских објеката

У овом поглављу детаљно се дефинише предмет истраживања. Анализирају се примери/студије случаја геометријски комплексних форми стаклених омотача, њихове генералне техничко технолошке карактеристике, примењени системи конструкције, начини материјализације и специфичности. Студије случаја су сврстане у категорије према геометрији стаклених елемената и једној од основних функција – термичкој заштити.

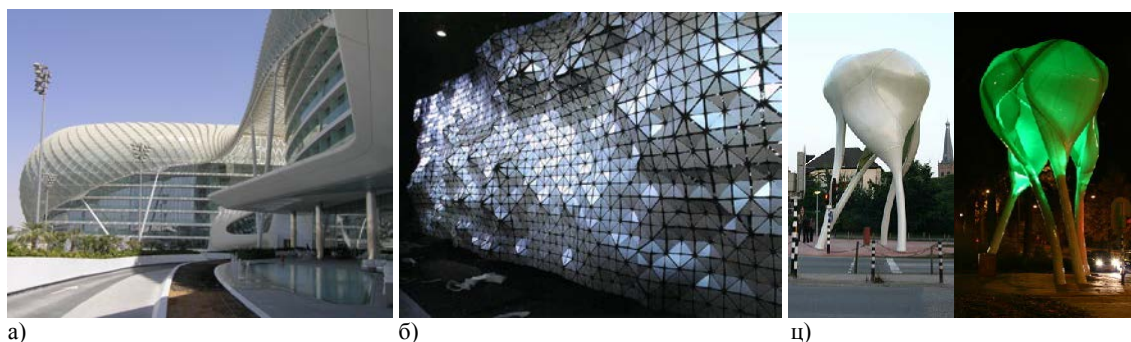
2.1 Анализа примера примене геометријски комплексних форми стаклених омотача архитектонских објеката изведених у свету и Србији

Током последњих деценија архитекте су јасно усмериле своја истраживања на површину омотача као једном од главних предмета свог рада. Иницијална пажња усмерена на саму "кожу", односно непрозирни омотач, еволуирала је у правцу транспарентности што је допринело све већем интересу за стакленим омотачем. Таква промена парадигме подигла је ниво захтева, нарочито техничких

изазова, с обзиром на то да је геометријски комплексна форма сада постала повезана како са ефикасном структуром, тако и са светлошћу. Архитектура Антонија Гаудија (Antonio Gaudi) чије слободне форме су у великој мери биле под утицајем природе (Слика 2.1а), Фреи Ота (Frei Otto) чији су закривљени облици viseћих мембрана подржаних челичном мрежом и кабловима били инспирисани облицима шатора, мехура и кишобрана, (Слика 2.1б) бетонске љуске Феликса Канделе (Felix Candela) и Хајнца Ислера (Heinz Isler) (Слика 2.1ц и д), као и скорашњи радови Френка Герија (Frank Gehry) и даље су неисцрпна инспирација последње генерације архитеката као што су бирои Асимптот (Asymptote), Декои (Decoi) и Нокс (Nox) која се може сагледати у њиховим радовима (Слика 2.2).



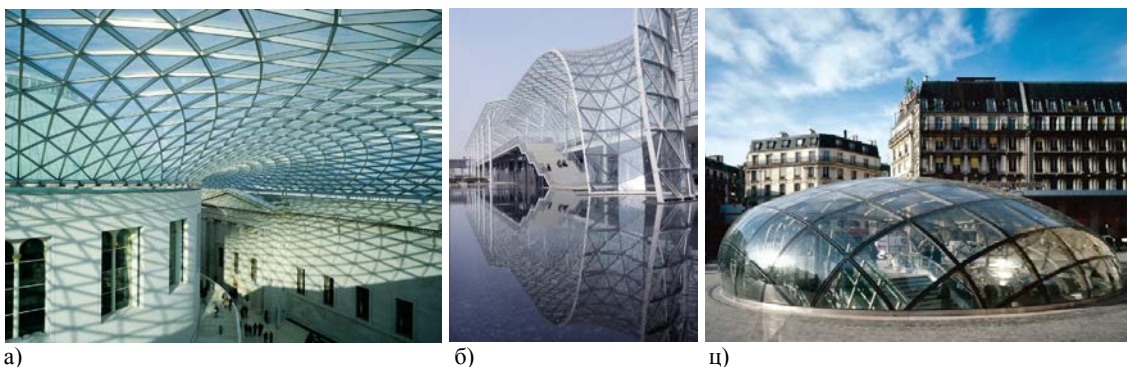
Слика 2.1. Архитектура закривљених форми, 20. век: а) *Sagrada Familia*, Антонио Гуди, Барселона; б) Немачки павиљон, Фреи Ото, Монреал, 1967. год.; ц) Океанаријум, Феликс Кандела, Валенсија, 2002. год.; д) Затворен тениски терен, Хајнца Ислер, Берн, 1972. год.; (Извор: а) Аутор, 2014; б) <http://foundObjects.blogspot.rs/2015/03/frei-otto-rip.html>, 28. 4. 2016; ц) <http://viaggiverdeacido.com/wp-content/uploads/2015/11/acuario-valencia-museo-oceanografico.jpg>, 28. 4. 2016; д) <http://www.subtilitas.site/image/14634666488>, 28. 4. 2016)



Слика 2.2. Архитектура закривљених форми, 21. век: а) Хотел *Yas Island Marina*, Абу Даби, Биро *Asymptote*, 2010.год; б) Хипо-површ, физички динамичан дисплеј, интерактиван са звуком и покретом, Биро *Decoi*, 2011.год; ц) Кула *D-tower* висока 12м, "веома слична готичком своду, где површине и ослонци представљају бесконачност" део је интерактивног система односа - повезује простор и осећања својих суграђана, *Doetinchem*, Холандија, Биро *Nox*, 2004. год. (Извор: а) Аутор, 2010; б) https://coulourblind.files.wordpress.com/2013/01/hyposurface-by-decoi-architects-mit_1.jpg, 28. 4. 2016; ц) <http://www.nox-art-architecture.com/D-tower/>, 28. 4. 2016)

Заједничка карактеристика свих пројеката је да је добра стратегија геометрије омотача основ за постизање форме која је уједно архитектонска,

структурална и одржива у смислу процеса његове израде. Међутим, техничка одрживост транспарентне комплексне форме тек је у потпуности омогућена са постизањем глаткости стаклене површи (стаклени кров Британског музеја и Миланског сајма, и надстршница метро станице *St. Lazare* у Паризу) што је у овим случајевима подразумевало додатно регулисање геометрије омотача, односно креирање четвороугаоне или троугаоне мреже уз помоћ ротационе и/или транслационе геометрије (Слика 2.3).



а) **Слика 2.3.** Глаткост површине стакленог омотача постигнута додатним регулисањем геометрије:
 а) Стаклени кров Британског музеја, Биро *Happold* и *Wagner*, Лондон, 2000. год.;
 б) Објекат сајма, Студио Фуксас, Милано, 2005. год.; ц) Метро станица *St. Lazare*, Биро *Arte-Charpentier*, Париз, 2003. год.; (Извор: а) <http://www.fosterandpartners.com/projects/great-court-at-the-british-museum/>, 29. 4. 2016; б) <http://www.arch2o.com/wp-content/uploads/2012/08/Arch2O-Milan-Trade-Fair-Studio-Fuksas-3.jpg>, 29. 4. 2016; ц) http://www.arte-charpentier.com/en/projects/1279-meteor_station.html, 29. 4. 2016)

2.2 Критеријуми за анализу

Приликом пројектовања геометријски комплексних форми омотача, највећа пажња се посвећује техникама којима се дефинише сама површина. То подразумева дефинисање геометрије укупне површине омотача, типа панелизације, као и геометрије појединачних елемената. С друге стране, приликом пројектовања транспарентних стаклених површина неопходно је узети у обзир и техничке параметре као што су механичке карактеристике самог материјала, понашање структуре након лома стакла, технике обликовања (производње) закривљеног стакла, различите типове међуслојева (фолија) за ламинирање, као и еколошке карактеристике које подразумевају различите типове застакљења и премаза. Важно је напоменути да се за дефинисање еколошких карактеристика застакљења, анализа не сме ограничити само на омотач, већ се морају узети у обзир карактеристике целе зграде.

У погледу конструктивних карактеристика, познато је коришћење равних стаклених елемената као примарних и секундарних елемената конструкције, док примена закривљеног стакла, чија сама форма показује боље конструктивне карактеристике, представља концепт који се у последњих десет година све више примењује и истражује. То наравно подразумева да конструктивна примена не сме да умањи сигурносне карактеристике као и понашање структуре омотача након евентуалног лома стакла, које су дефинисане самим карактеристикама стакла и међуслојева. Такође, нове технике производње су постале значајан фактор економске одрживости у погледу све чешће примењиваних двоструко закривљених, а посебно једноструко закривљених површи стаклених омотача.

Било је потребно више од једног века да би се стакла потребна знања и овладао свим горе поменутих параметрима нове примене стакла. Ова знања, у комбинацији са данашњим технологијама омогућила су пројектовање најновије генерације стаклених омотача који су у потпуности прилагођени савременим потребама корисника.

С циљем дефинисања потенцијала и ограничења примене стакла у материјализацији геометријски комплексног омотача у погледу обликовних, енергетских и технолошко-производних карактеристика, неопходно је било упознати карактеристике скоро изведених објеката. Из тих разлога, анализа студија случаја у којима је примењено стакло у материјализацији геометријски комплексних форми омотача спроведена је према следећим одабраним критеријумима:

- **Контекст** из кога се "чита", произилази геометријски комплексна форма стакленог омотача (објекта), дефинисан је конкретним условима локације на којој се објекат налази и у чије је целокупно окружење уклопљен. Из тих разлога, правилно сагледавање физичких услова саме локације, односно обликовно и техничко прилагођавање терену уз поштовање урбанистичких услова и захтева инвеститора, представља важан аспект успешне материјализације стакленог омотача. Анализа студија случаја оригиналних форми геометријски комплексних стаклених омотача треба да покаже различите начине коришћења услова локације проистекле из контекста окружења, односа облика у простору и примењене врсте стакла.

- **Геометрија**, с обзиром на то да анализа геометрије треба да укаже на однос између геометрије, конструкције и површине омотача. У зависности да ли се ради о равној набораној, или једноструко или двоструко закривљеној површини омотача, различит је и тип геометрије (видети прво поглавље, део 1.2.1 Типологија геометријски комплексних форми стаклених омотача/конструкција) помоћу које је генерисана површ омотача, и који захтева одређену контролу геометрије. Геометријски комплексне форме су један од најупечатљивијих трендова у савременој архитектури који, за разлику технологија у областима у којима су првобитно настале (аутомобилска и авионска индустрија), подразумевају разматрање различитих карактеристика као што су обликовне, конструктивне, димензије, и технологије производње. Док је моделовање комплексних форми са актуелним алатима добро познато, сама производња праве размере стакленог омотача и технике његове израде представљају прави изазов. Дефинисање геометрије једноструко закривљене површи прилично је једноставно и захтева само стандардне алате. Насупрот томе, геометријски комплексна форма, посебно у погледу сечења и обликовања стакла комплексно закривљене форме и позиционирања елемената везе, толико је комплексна да *CAD* алати не пружају подршку. Да би се овладало таквом комплексношћу, за већину пројеката, неопходно је да се геометрија генерише коришћењем нумеричких алгоритама који се развијају посебно за сваки пројекат. Најзначајније карактеристике су подела омотача на мање елементе – панелизација која према Потману (Pottman, 2007) представља веома важан параметар површи, одабир одговарајућег конструктивног система, проналажење решења за многа ограничења и на крају, али не мање битно, обезбеђивање прихватљивих трошкова. С обзиром на то да су све ове важне карактеристике геометријске природе (Архитектонска геометрија), управо из тих разлога анализа примера треба да прикаже начине на које је различита геометрија примењена, односно начине на које је извршена апроксимација креиране слободно закривљене површи (најчешће од елемената генерисаних од правоизводних површи) у погледу изградљивости, производње и трошкова. Овај поступак представља

рационализацију, односно оптимизацију и често је комплекснији од самог моделовања.

- **Визуелни/обликовни потенцијали**, с обзиром на то да је основна визуелна карактеристика стакленог омотача његова транспарентност, која често подразумева различито значење и концептуални приступ сваком пројекту. Такође, важно је нагласити да у сваком пројекту интересовање и приступ визуелним карактеристикама одликује се другачијим коришћењем стакла и у смислу технологије обликовања и израде самог омотача. Наравно, мора се признати да је транспарентност релативна вредност која се мора јасније дефинисати у случају закривљених омотача, с обзиром на то да може имати различите форме тј. метафоре у архитектонском изразу. Што је омотач више транспарентан и без оквира, теже је постићи перцепцију његове форме. Поред тога, начин функционисања конструктивног система постаје мање очигледан. С обзиром да је однос између транспарентности и геометрије, са аспекта конструкције и форме омотача, у константном развоју, анализа примера треба да прикаже нове начине на које савремени пројекти користе овај однос.
- **Конструктивни систем и везе** су у функцији геометрије и димензије елемената омотача и треба да прикажу начин на који конструкција подржава комплексну геометрију стаклене поврине. С обзиром да конструкција често није видљива, интересантно је видети начин на који су закривљено и конструктивно стакло нашли своју примену у већини одабраних примера. Како су архитекте усмерене на прилагођавање комплексних форми, огроман напор се улаже у решавање питања повезаних са различитим аспектима конструкције омотача, чему у прилог иде ефикасност једноструко и двоструко закривљеног стакла у погледу њихових конструктивних карактеристика ако се правилно искористе.
- **Димензије стаклених елемената**, с обзиром да је све већа тежња ка повећању њихове димензије и ослобађању површине омотача од елемената конструкције. Нови типови стаклених омотача треба да омогуће, пре свега ефикасног конструктивне примене стакла у конструкцијама вишим од

једне етажне где све чешће распон стаклених панела износи једну спратну висину.

- **Тип застакљења**, из разлога што је избор врсте стакла полазни параметар за извођење целог пројекта. Поред тога, као типични омотач треба да обезбеди одређен ниво различитих функционалности, као што су топлотна и звучна изолација, хидроизолација, могућност заштите од сунца и одређени ниво сигурности. Анализа студија случаја геометријски комплексних стаклених омотача треба да покаже различите структуре застакљења, односно типове стаклених панела, као и врсту примењеног стакла.
- **Техника обликовања стала**, иако примена равних елемената представља и даље актуелно решење за материјализацију двоструко закривљеног транспарентног омотача, у циљу постизања веће глаткости истих површи, технологија обликовања и производње једноструко и двоструко закривљеног стакла постаје важан параметар реализације омотача који треба да задовољи архитектонске (обликовне) и економске захтеве. Анализа примера треба да покаже могућа алтернативна решења за материјализацију геометријски комплексног (двоструко закривљеног) стакленог омотача. Такође, с обзиром да савремене технике обликовања укључују техничко-технолошка ограничења у погледу форме, димензија, чврстоће стакла, као и могућих премаза, анализа примера ће указати на карактеристике које су релевантне за одабир одговарајуће технике обликовања.
- **Специфичности** треба да укажу на карактеристике које су специфичне за појединачне пројекте, и које се односе на стаклени омотач. У том смислу, то могу бити карактеристике у погледу енергетске ефикасности, начина коришћења дневног осветљења, вентилације, визура и слично.

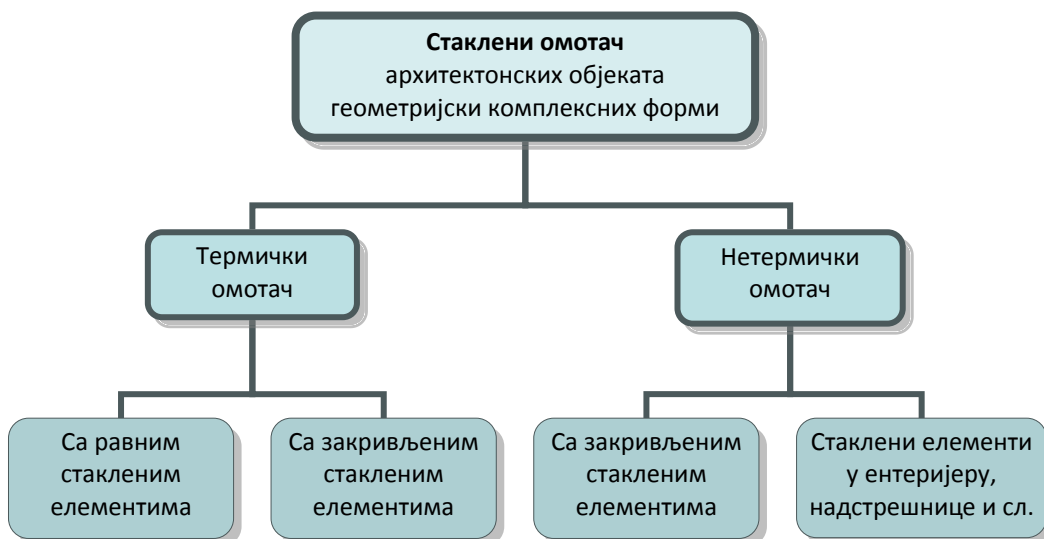
2.3 Приказ анализираних примера/студија случаја

Примери стакленог омотача су представљени као студије случаја с циљем објашњења различитих приступа материјализацији геометријски комплексних форми стаклених омотача. Појединачни примери рефлектују иновативне примене

стакла значајне за дефинисање како могућности тако и ограничења његове примене, али исто тако и начина његове производње у односу на различиту геометрију. Уочене карактеристике и фотографије забележене на лицу места, као и подаци из литературе представљају примарне изворе информација коришћених у овом поглављу. Цртежи и фотографије су коришћени да прикажу различита геометријска решења и начине на која су различите геометрије стаклених омотача материјализоване.

У раду је представљено 14 пројеката - студија случаја којима је заједнички приступ и тема геометријски комплексних форми стакленог омотача, док је сваки од њих решен на мало другачији начин и истиче посебне и себи својствене карактеристике. То указује да је сваки од њих јединствени пројекат, посебно прилагођен сопственом контексту. Препознати су пројекти у којима је геометријски аспект имао важну улогу, а одабрана решења за настале проблеме представљају значајан корак за даљи развој како теорије, тако и праксе примене стакла у материјализацији геометријски комплексних форми стакленог омотача.

Студије случаја сврстане су у категорије према геометрији стаклених елемената и једној од основних функција - термичкој заштити, као што приказује Дијаграм 2.1.



Дијаграм 2.1. Категорије анализираних примера/студија случаја стакленог омотача





Детаљна анализа примера/студија случаја према претходно утврђеним критеријумима дата је у Прилогу 1.

У Табелама 2.1, 2.2, 2.3 и 2.4 дат је сажет приказ основних карактеристика одабраних примера/студија случаја према утврђеним критеријумима с циљем лакше упоредне анализе. У Табели 2.1 приказане су основне карактеристике одабраних примера геометријски комплексних форми термичког омотача са равним стакленим елементима, док Табела 2.2 приказује основне карактеристике одабраних примера геометријски комплексних форми термичког омотача са закривљеним стакленим елементима. У Табели 2.3 приказане су основне карактеристике одабраних примера геометријски комплексних форми нетермичког омотача са закривљеним стакленим елементима, док Табела 2.4 приказује основне карактеристике одабраних примера геометријски комплексних форми нетермичког омотача који обухвата стаклене елементе у ентеријеру и надстрешнице.





Табела 2.1. Приказ основних карактеристика одабраних примера/студије случаја геометријски комплексних форми стаклених омотача архитектонских објеката – термички омотач са равним стакленим елементима (Извор: Табела аутора)

| Објекат | Назив објекта и локација | Архитекта и година изградње | Геометрија стакленог омотача | Тип, врста и димензија стаклених панела | Техника обликовања (закривљеног) стакла | Детаљи конструкције (носећа конструкција, везе и спојеви панела) | Врста премаза и фолија | Терм. карактер. U -ф. (W/m^2K) | g -ф. | Специфичности и напомене |
|---|--|--|---|--|---|---|---|------------------------------------|---------|---|
|  | Институт за јеврејске Студије <i>Spertus</i> , Чикаго, САД | Архитектонски биро- <i>Krueck+Sexton Architects</i> , 2007. год. | Наборана стаклена структура са равним стакленим елементима у облику троугаоних и чрвороугаоних панела | Термоизолациони стаклени панел – 35 mm (10+13+2x6); димензије 1,32 x 2,13 m; спољашње стакло је са малим процентом ферооксида | Стандардна производња равног стакла | Структурална фасада: - Вертикална алуминијумска потконструкција заобљене Y форме са држачима (профилима) за прихватање рамовске конструкције стаклених панела под различитим угловима - Силиконски заптивач 25 mm | На позицији 2 (унутрашња површина спољашњег стакла) - нискоемисиони премаз, као и 40% керамичка штампа (тачкице беле боје величине 6,5 mm) | -- | -- | "LEED" сребрна сертификација |
|  | Цитроенов салон аутомобила, Париз | Manuelle Gautrand, 2010. год. | Наборана стаклена структура са равним стакленим елементима у облику троуглова и ромбоида | Термоизолациони стаклени панел – 44 mm (2x6+20+2x6), испуна ваздух; различите димензије троугаоних и ромбоидних панела | Стандардна производња равног стакла | - Челична потконструкција у виду ромбова и ромбоида је "разапета" између ивичних челичних носача; - Силиконски спој стаклених панела са носећим профилем и покривна лајсна | Филтер за смањење топлотних добитака и црвени и бели прозрачни филм (фолија) за наглашавање Цитроеновог симбола | -- | -- | Скулптурална континуална стаклена фасада |
|  | Небодер <i>Shard</i> , Лондон | Ренцо Пиано (Renzo Piano), 2012. год. | Осам косих равни које се не додирују, чак ни на самом врху дају лакоћу самој структури | 11.000 модуларних елемената двоструке фасаде, односно 22.000 појединачних панела димензија 3,80 x 1,50 m. Спољашње сигурносно стакло је са малим процентом ферооксида. | Стандардна производња равног стакла | Конструкција објекта високог 300 m је укрупњена бетонским језгром. Преднапрегнута плоча (20 cm) омогућила је већи број спратова. Ободни стубови су од челичних шупљих профила чија тежина, пресек и размак се смањују ка вишим спратовима (распон од 6 m до 1,5 m на врху). | Специјални премаз са ефектом рефлектујуће површине преко 24% | 1,1 | 0,12 | Интегрисани високо-ефикасни систем климатизације; прецизирани сценарији коришћења дневног и вештачког осветљења |



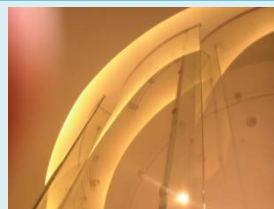


Табела 2.2. Приказ основних карактеристика одабраних примера/студије случаја геометријски комплексних форми стаклених омотача архитектонских објеката – термички омотач са закривљеним стакленим елементима (Извор: Табела аутора)

| Објект | Назив објекта и локација | Архитекта и година изградње | Геометрија стакленог омотача | Тип, врста и димензија стаклених панела | Техника обликовања (закривљеног) стакла | Детаљи конструкције (носећа конструкција, везе и спојеви панела) | Врста премаза и фолија | Терм. карактер. U -ф. (W/m ² K) | g -ф. | Специфичности и напомене |
|---|--|--|--|---|--|---|---|--|---------|--|
|  | Музеј <i>Victoria & Albert</i> , Лондон | Студио <i>MUMA – Mclnnes Usher McKnight Architects</i> , 2009. год. | 'Хипар' површина - геометрија стаклених панела трапезне форме настала увртањем (три угла леже на заједничкој равни док је један угао изван ње) | Термоизолациони стаклени панел – 28 mm (6+12+2x5), каљено сигурносно стакло; димензије панела око 1,2 x 4 m; | Поступак хладног савијања стакла на градилишту | - Конструкцију чине 73 сигурносне ламиниране делимично каљене стаклене греде висине око 450 mm, дебљине 12mm постављене радијално; панели су причвршћени за греде и међусобно 'конекторима' од нерђајучег челика; - Силиконска заптивка 20 mm | Бела <i>PVB</i> фолија примењена на ламинираним гредама | -- | -- | Истраживања о структуралном понашању увртнутих стаклених панела су спроведена и дефинисана као 'Стаксов закон' |
|  | Музејски кварт <i>Joanneumsviertel</i> , Грац | Архитектонски биро- <i>Nieto Sobejano Arquitectos</i> , Мадрид, 2011. год. | Стаклени конуси нагнати под углом од 15° у односу на вертикалну осу што резултира нагибом панела од 0°-30° у односу на вертикалну осу | Термоизолациони стаклени панел – 44 mm (12+16+2x8), димензије око 1,5 x 3,2 m; стаклена ограда – 24 mm (2x12), димензије око 1,5 x 3,2 m; | Поступак термичког савијања стакла помоћу калупа | Стаклени панели ограде су ослоњени на ТИ панеле доњег нивоа; на доњој и горњој ивици ТИ панела, као и доњој ивици и средини ограде, за прихватање оптерећења стаклених панела, формирана је челична конзола монтирана на армирано-бетонску плочу. | Штампа на позицији 4 (унутрашња површина унутрашњег ламинираног стакла) | -- | -- | Постигнути континуитет штампе стаклених панела |
|  | Модни центар <i>Vakko</i> , Истанбул | Студио- <i>Rex</i> , Њујорк, 2010. год. | Испупчена X форма стаклених панела доприноси већој чврстоћи, мањој дебљини и елиминисању потребе за оквирним носачима | Термоизолациони стаклени панел – 44-68 mm (12+16-40 + 6+10), димензије 3,35 x 1,50 m; испуна ваздух | Поступак термичког савијања стакла помоћу калупа | ТИ панели су тачкасто фиксирани за бетонску међуспратну конструкцију уз помоћ кружног држача уметнутог у слој ламинираног стакла - Силиконски заптивач | -- | 2,0 | 0,67 | Испупчена форма стакла обезбеђује термички бенефит (већи ваздушни простор између панела) |
|  | Реконструкција првог спрата <i>Ајфеловог торња</i> , Париз | Студио- <i>Moatti-Riviere Architects</i> , 2014. год. | Двоструко закривљена нагнута фасада висине 8m; апроксимација стаклених елемената којом су постигнуте четвороугаоне цилиндричне форме панела | Термоизолациони стаклени панел – спољашње каљено, ламинирано, (сигурносно) стакло, и унутрашње једноструко каљено стакло | Поступак термичког савијања стакла на производној линији | - Геометрија вертикалних носача правоугаоног облика формираних од плочастих елемената (сечење равних челичних панела, савијање без торзије, и склапање помоћу заваривања) је прилагођена кривим линијама одабраног решења; - Покривни профил | -- | -- | -- | Сагледавање изводљивости застакљења и конструктивних елемената у раној фази пројекта, уз истовремену контролу трошкова |

Табела 2.3. Приказ основних карактеристика одабраних примера/студије случаја геометријски комплексних форми стаклених омотача архитектонских објеката – нетермички омотач са закривљеним стакленим елементима (Извор: Табела аутора)

| Објект | Назив објекта и локација | Архитекта и година изградње | Геометрија стакленог омотача | Тип, врста и димензија стаклених панела | Процес израде (закривљеног) стакла | Детаљи конструкције (носећа конструкција, везе и спојеве панела) | Врста премаза и фолија | Терм. карактер. U-ф. (W/m ² K) | g-ф. | Специфичности и напомене |
|---|--|---|--|---|--|---|---|---|--|--|
|  | Стамбено-пословни објект <i>Infinity</i> , Београд | Архитектонски биро- Арс Региа доо и проф. М. Мирковић, Београд, 2011. год | Комплексна геометрија- "слободна форма" је изведена претварањем двоструко закривљене површи у правоизводну површ | Стаклени панел – једноструко застакљење 12 mm (2x6), димензије 111,4 x 94,4 cm; | Поступак термичког савијања стакла уз помоћ калуца | Вертикална подконструкција која није континуална, већ се састоји од вертикалних носача I пресека, висине једног стакленог панела, који се каче за бетонску плочу изнад и испод ње - Без заптивача | Стоп сол супер силвер премаз | -- | -- | Економичније решење коначне варијанте обликовно је у складу са оригиналном архитектонском идејом |
|  | Телевизијски студио Channel 4, Лондон | <i>Richard Rogers Partnership</i> , 1994. год. | Стаклена фасада, конкавна, једноструко закривљена (цилиндрична), 20 m висока | Стаклени панел – Једноструко закривљено ламинирано сигурносно стакло 12 mm (2x6) | -- | - Стаклена фасада је обешена са препуштених челичних греда на крову; унутрашња мрежа преднапрегнутих челичних инокс каблова стабилизује конструкцију услед хоризонталног оптерећења од ветра - Силиконски заптивач | -- | -- | Попут карика ланца, сваки панел носи тежину осталих панела испод себе. | |
|  | Улазни павиљон <i>St. Martins in the Fields</i> , Трафалгар Трг, Лондон | Студио <i>Eric Parry Architects</i> , Лондон | Осам закривљених стаклених панела постављених тако да описују у основи два круга пречника око 3,60 m који се преклапају | Стаклени панел – закривљено ламинирано сигурносно стакло 34 mm (2x12+10); димензија 2,20 x 4,59 m | Поступак термичког савијања стакла помоћу калуца | - Бетонска база носи греду у виду челичног прстена T-пресека за прихватање стаклених панела; конструкција инокс крова је фиксирана за горњи челични прстен који носе стаклени панели - Конструктивни силикон на доњим и вертикалним спојевима панела | Тврди премаз на унутрашњој страни стакла дебљине 10 mm (позиција 5) смањује соларне добитке | -- | -- | Конструктивна примена стакла; структура довољно чврста да може да издржи губитак 2 панела |
|  | Улазни хол железничке станице <i>Strasbourg TGV</i> , Страсбург, Француска | <i>RFR Group</i> , Париз, 2007. год. | Хол 120 x 25 m; геометрија изведена из једне ротационе фигуре сличне накривљеном торусу; пресек формиран од лучних сегмената | Стаклени панел – закривљено ламинирано сигурносно стакло; димензија 1,5 x 4,5 m | Поступак хладног савијања стакла | - Челична подконструкција се састоји од примарних, секундарних и терцијалних носача који су сви закривљени у облику лукова и који прате форму омотача; стабилност конструкције обезбеђена је затегама | Нискоемисиони премаз на унутрашњој страни панела; керамички премаз на панелима на врху 'стаклене љуске' | -- | -- | Природна вентилација-увлачење ваздуха из станице метроа и извлачење на врху атријума |

Табела 2.4. Приказ основних карактеристика одабраних примера/студије случаја геометријски комплексних форми стаклених омотача архитектонских објеката – нетермички омотач, надстрешнице и стаклени елементи у ентеријеру (Табела аутора)

| Објект | Назив објекта и локација | Архитекта и година изградње | Геометрија стакленог омотача | Тип, врста и димензија стаклених панела | Процес израде (закривљеног) стакла | Детаљи конструкције (носећа конструкција, везе и спојеви панела) | Врста премаза и фолија | Терм. карактер. U-ф. (W/m ² K) | g-ф. | Специфичности и напомене |
|---|--|--|---|--|--|---|--|---|------|---|
|  | Железничке станице <i>Nordpark</i> , Инсбрук, Аустрија | Заха Хадид (Zaha Hadid) и Патрик Шумахер (Patrik Schumacher), 2007.год | Комплексна геометрија- "слободна форма" како целе структуре, тако и појединачно сваког стакленог панела | Стаклени панел – закривљено, ламинирано стакло 20 mm (8+12), ширине 1,25 m | Поступак термичког савијања стакла помоћу калуца | Систем конструкције подсећа на конструкцију авионских крила с обзиром да је стаклени омотач умотан око челичних ребара који су постављени на размаку од 1,25 m - Црни силиконски заптивач 25 mm | Стакло је ламинирано слојем беле полиуретанске смоле доприносећи да стакло остане на месту као и изражајној боји | -- | -- | Свака станица има свој контекст, топографију, висину и циркулацију |
|  | Надстрешница аутобуске станице <i>Zuidpoort</i> , Делфт, Холандија | Мик Екаут (Mick Eekhout), 2006.год. | Континуално извитоперена (таласаста) форма стаклене надстрешнице | Стаклени панел – закривљено, каљено, ламинирано, сигурносно стакло 12 mm (6+6); димензија 1,5 x 3,0 m | Поступак хладног савијања стакла | Конструкцију надстрешнице димензија 12 x 80 m и висине 6 m чине цевасте челични поцинковани носачи обешени са 7 конусних челичних стубова-"јарбола" | -- | -- | -- | Максимална могућност деформације- торзије услед хладног савијања одредила је форму таласате надстрешнице |
|    | Излог шопинг-центра <i>Westfield</i> , Лондон Кафе-ресторан <i>Conde Nast Cafe</i> , Њу Јорк Степениште у продајном објекту <i>Apple Coven Garden</i> , Лондон | <i>Gabellini/Sheppard</i> Френк Гери (Frank Gehry) | Цилиндрично закривљено стакло Слободно закривљено стакло Цилиндрично закривљено стакло | Ламинирани стаклени панел висине 8 m Ламинирани стаклени панел димензије 3,65 x 1,2 m, дебљине 22 mm Ламинирано трослојно стакло | Поступак термичког савијања стакла помоћу калуца | У потпуности стаклене конструкције (стубови, греде за укрућење, образни носачи), осим везних елемената од нерђајучег челика | -- | -- | -- | Примена закривљеног стакла у функцији бољих конструктивних карактеристика (већи распон, већа кругост структуре) |

2.4 Опште карактеристике и специфичности анализираних примера – сумирање резултата

Циљ анализе студија случаја је био да се да преглед недавно изграђених објеката са геометријски комплексним стакленим омотачима, да се идентификују кључни проблеми и дата решења која су илустрована примерима стаклених омотача и која треба да укажу на неке од будућих праваца истраживања и развоја геометрије и нових технологија производње закривљеног стакла.

Један од закључака који се намеће је да могућности и начини обликовања геометријски комплексних површи омотача умногоме зависе од система (алата) за моделовање геометрије који треба да буду што једноставнији и на располагању на начин који подржава процес пројектовања, пре него што пружају готова решења. Један од начина да се то постигне је да се у системе за моделовање интегришу и ограничења везана за кључне аспекте функције, производње и могућности примене.

Анализа примера је показала да је све већа заступљеност стакла у материјализацији геометријски комплексних форми омотача, чија специфичност примене произилази пре свега из саме геометријске форме, а затим и захтева у погледу обликовних, конструктивних, енергетских и економских карактеристика. С обзиром на могућности које пружају нове технологије обликовања стакла, попут хладног савијања и термичког обликовања на производној линији, све је већа и примена закривљеног стакла, посебно једноструко закривљеног.

Анализирани примери су указали на неке заједничке карактеристике, али исто тако и на специфичности које се могу представити као:

- Закривљена форма стаклених омотача проистекла је или из контекста и форме суседних објеката или из функционалних и конструктивних захтева.
- Стаклени панели великих димензија (спратне висине) су углавном равни или једноструко закривљени, док су двоструко закривљени мањих димензија; у случају веће једне димензије (дужина), друга димензија (ширина) је знатно мања.
- Наборана форма стаклене фасаде објекта Института за јеврејске студије подсећа по форми (постојање набора-испупчења) и пропорцијама на

стаклену фасаду стамбено-пословног објекта *Infinity* у Београду, која је даље у раду коришћена као референтни модел за различите анализе, иако су на првом примеру примењени равни панели за разлику од закривљених у случају објекта у Београду, што указује на могућност различите материјализације исте или сличне форме.

- Поступком хладног савијања може се постићи мала закривљеност панела (максимална одступања од равни могу бити до 20 cm за стакло дебљине 6 mm),
- Принцип свођења двоструко закривљених површи на једноструко-закривљене панеле представља, данас, један од главних изазова.
- Не постоје подаци о термичким карактеристикама у случају закривљених термоизолационих панела; постојећи подаци (дате вредности коефицијента пролаза топлоте, U -вредности) односе се на панеле чије ивице су равне а средишњи део панела је испупчен (претпоставка је да је U -вредност дата за раван панел истих карактеристика, с обзиром на то да су у случају омотача објекта модног центра Прада, примењене три врсте панела истих димензија и карактеристика а различитих форми: равни, конкавни и конвексни),
- Не постоје подаци о примени закривљеног стакленог омотача са троструким застакљењем.
- Највећа димензија закривљених стаклених панела износи 11 m (2 x 5,5) у случају једноструко закривљених фасадних панела (набора) МАС музеја (валовити панели S -форме) у Антверпену, и 12 m у случају једноструко закривљених стаклених панела улаза у подземни објекат *Apple* у Шангају.
- Највећа закривљеност, односно мали полупречник закривљености подразумева угао од 180° (надстрешнице железничких станица, Заха Хадид).
- Потконструкција представља костур стакленог омотача, што је посебно наглашено код закривљених форми.
- Стаклени панели који имају примарну конструктивну улогу су углавном вертикални (за пријем вертикалних сила) или постављени под одређеним нагибом (за пријем додатног хоризонталног оптерећења).

- Не постоје застори на геометријски комплексним стакленим омотачима, осим у случајевима са применом равних панела; заштита од сунца и сунчевог зрачења постиже се уз помоћ одређених премаза и фолија,
- Примери код којих је доминантна глатка површина и визуелна динамичност показују да примењена геометријска правила увелико превазилазе рационалну геометрију. Осим тога показују да одређени начини дискретизације двоструко закривљене површине могу допринети скоро неkontинуалној површини која се доживљава као глатка.
- Техника хладног савијања, која подразумева коришћење еластично савијених стаклених панела (гурањем у одређену позицију) с циљем прилагођавања њихове форме геометрији потконструкције, представљају одговарајуће оптимално решење за двоструко закривљени стаклени омотач.

3. Закривљено vs. равно стакло примењено на архитектонским објектима

Ово поглавље даје кратак увод у основне аспекте коришћења и карактеристике равног и закривљеног стакла као грађевинског материјала. Иако је исцрпно, пружа неопходне информације за разумевање наредних поглавља. Главни фокус представља преглед и описивање основних карактеристика стакла, различитих метода обликовања закривљеног стакла, као и анализа основних принципа за пројектовање компоненти од конструктивног (закривљеног) стакла. Анализа спроведена у овом поглављу служи за идентификацију неких, до сада непознатих информација (у Србији), како би се обезбедио фокус за истраживање у следећим поглављима.

3.1 Карактеристике равног и закривљеног стакла

Стакло представља један од најатрактивнијих грађевинских материјала, узимајући у обзир чињеницу да повезује различите просторе, истовремено раздвајајући их. Различити типови стакла обухватају опсег од потпуно транспарентног до рефлектујућег стакла које пружа потпуну херметичку затвореност. Ова разноврсност чини стакло јединственим материјалом у архитектури.

Стакло у свом чистом облику јесте материјал који треба пажљиво узети у разматрање. Оно је веома осетљиво на механичка напрезања, тако да до његовог лома долази веома брзо и често неочекивано. Међутим, захваљујући различитим истраживањима, ниједан други материјал не пружа тако велики потенцијал за развој и тако разнолики спектар могуће примене, укључујући носеће конструкције у потпуности од стакла или непробојно стакло.

Основна функционална улога стаклених елемената у омотачу, вековима је подразумевала три основна захтева: дневно осветљење, директан поглед на окружење и заштиту од атмосферских утицаја. Савремена примена стакла у материјализацији омотача архитектонских објеката проширила је листу захтева, посебно наглашавајући следеће карактеристике:

- велику транспарентност (значај светлости),
- крутост стакленог структуре, и
- енергетску ефикасност.

Као неколико других материјала, стакло поседује симболизам који превазилази саму функцију и испољава посебну фасцинацију. Још у готском периоду, стаклени прозори су смишљено представљали игру са светлом да би се произвео осећај променљивости. У архитектонској визији модерне, овај транспарентан материјал је имао централни значај, иако је у погледу теоријског приступа, имао различиту улогу. Замах који је индустријска производња равног стакла заједно са новим конструктивним материјалима, бетоном и челиком, дала архитектури прве половине 20. века може се упоредити са изазовом који пред данашње пројектанте и извођаче постављају могућности отворене развојем индустрије стакла последњих година. Стакло је цењено не само због своје транспарентности, која омогућава креирање потпуно "дематеријализоване љуске", и самим тим отворени простор који тече, већи и због својих грациозних, угластих и сјајних карактеристика. Развој стакла од његове улоге испуне на релативно малим прозорима до скоро потпуно аутономног стакленог елемента доказује скоро увек присутну визију - поглед у будућност. Проблеми у смислу очувања енергије и непоштовања физичких захтева изградње поставили су, крајем прошлог века, привремени крај еуфорији примене овог материјала.

Данас, захваљујући новим истраживањима, којима се дошло до решења у погледу очувања енергије, као и развоја стакла које омогућава ефективну изолацију и соларну контролу, стакло је још једном постало материјал високих перформанси. Са таквим карактеристикама, стакло у потпуности испуњава функционалне и обликовне захтеве и отвара нова подручја своје примене.

Сва истраживања и коришћење стакла у омотачу архитектонских објеката на подручју Европе примењују се у оквирима која су још увек недовољно

дефинисана, али се константно развијају (нарочито у погледу примене закривљеног стакленог омотача), а односе се на европске стандарде за примену стакла у грађевинарству, као и локалне грађевинске прописе; европску директиву о енергетским перформансама зграда (*EPBD – Energy Performance of Building Directive of EU, Recast, 2010*) која укључује и перформансе омотача; и прописима за коришћење грађевинских материјала и система (*Guidance Note on the Construction Products Regulation – CPR, 2014*). Од 1. јула 2013. године обавезна је примена *CE* сертификације грађевинских производа која подразумева декларацију произвођача да је производ у складу основних захтева и/или нивоа перформанси према усаглашеним европским стандардима, односно техничким спецификацијама.

Коришћење стакла као грађевинског материјала захтева увек добро познавање његових техничких карактеристика и могућности. Само поседовање великог знања о својствима различите врсте стакла, компоненти и елемената стаклених омотача, као и свих ограничења самог материјала, може помоћи архитектама да пројектују креативна решења омотача коришћењем стакла, истовремено превазилазећи границе изнова сваком новом применом.

3.1.1 Састав и хемијске карактеристике стакла

Под стаклом подразумевамо неоргански производ добијен фузијом групе аморфних материјала који је охлађен до чврстог стања без кристализације. Појам се стога односи на све некристалне чврсте материје које показују прелазна стања стакла. За стакло не постоји одређена тачка топљења, већ приликом загревања, стакло прелази из чврстог стања у вискозно, и коначно у течност. По аморфној структури, стакло одговара течности, док по својим физичким особинама одговара чврстом телу.

Најзаступљенија врста стакла, која се користи у архитектури и грађевинарству за производњу пливајућег (*float*) стакла, је кречно стакло (енгл. *soda lime silica glass - SLS*). За посебне примене као што су противпожарно застакљење, застакљење отпорно на термички шок, као и посебни елементи конструкције (стаклене цеви), а из разлога веће цене производа, користи се боросиликатно стакло (енгл. *borosilicate glass – BSG*). Ова врста стакла пружа

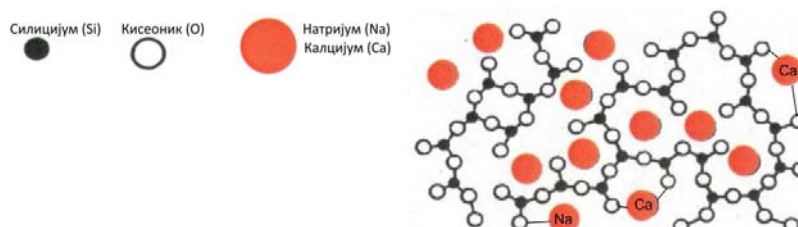
веома високу отпорност на температурне промене, као и на корозију узроковану водом и киселинама.

Табела 3.1. Хемијски састав кречног и боросиликатног стакла; индикатор (маса %); овај састав представља европски стандард према EN 572, Део 1&2; (Извор: Према Schittich, 2007: 60)

| Састав стакла према стандарду EN 572, Део 1&2 | | | |
|---|--------------------------------|---------------|----------------------|
| | | Кречно стакло | Боросиликатно стакло |
| Силицијум-диоксид | SiO ₂ | 69 – 74% | 70 – 87% |
| Натријум-оксид | Na ₂ O | 10 – 16% | 0 – 8% |
| Калцијум-оксид | CaO | 5 – 14% | -- |
| Бор-оксид | B ₂ O ₃ | -- | 7 – 15% |
| Магнезијум-оксид | MgO | 0 – 6% | -- |
| Алуминијум-оксид | Al ₂ O ₃ | 0 – 3% | 0 – 8% |
| Друго | -- | 0 – 5% | 0 – 8% |

Табела 3.1 приказује хемијски састав ове две врсте стакла према европском стандарду. Хемијски састав стакла и његове физичке карактеристике су резултат присуства и комбиновања различитих материјала минералног порекла. Најпознатија сировина која улази у састав стакла је силицијум-диоксид (SiO₂), односно кварцни песак који је истовремено најзаступљенија сировина Земљине коре (27% силицијума у поређењу са 5% гвожђа или 0,8% алуминијума) (Wigginton, 2002).

За разлику од већине других материјала, распоред молекула код стакла је случајан тако да не долази до формирања геометријски правилне кристалне решетке, већ неправилне мреже молекула силицијума и кисеоника са алкалним елементима између (Слика 3.1). Управо овај феномен даје стаклу транспарентност.



Слика 3.1. Шематски приказ геометријски неправилне кристалне решетке кречног стакла; присуство натријума (Na) смањује температуру топљења; (Извор: Према Belis et al., 2013: 12)

Хемијски састав има значајан утицај на вискозност, температуру топљења, и коефицијент топлотног ширења (α_T) стакла. Додавањем алкалних једињења као што су натријум-оксид (Na_2O), калијум оксид (K_2O) и бор-оксид (B_2O_3), температура топљења чистог силицијум-диоксид, која износи око 1710°C , се смањује до вредности од 1300°C - 1600°C што омогућава рад на нижим температурама и економичнију производњу. Боља конзистенција стакла и спречавање појаве ваздушних балона, постиже се додавањем једињења као што су натријум-сулфат (Na_2SO_4), натријум-нитрат (NaNO_3), натријум-хлорид (NaCl), калцијум-флуорид (CaF_2), и угљеник (C), док побољшање хемијске отпорности стакла могуће је постићи додавањем једињења попут калцијум-оксида (CaO), алуминијум-оксида (Al_2O_3), магнезијум-оксида (MgO), цинк-оксида (ZnO), и бор-оксида (B_2O_3).

Током хлађења течнoг стакла, његова вискозност се стално повећава до тачке очвршћавања на око 10^{14} Pas (паскалсекунди). Температура очвршћавања се зове температура трансформације (T_g) и износи око 530°C за кварцно (силикатно) стакло, односно око 600°C за кречно стакло (Belis et al., 2013). Такође, додавањем једињења алуминијум-оксида (Al_2O_3), могуће је повећати вискозност хлађењем течности, односно спречити кристализацију стакла. Насупрот кристалним материјалима, прелаз из течнoг у чврсто стање не одвија се на прецизно утврђеној температури, већ у одређеном опсегу температура. То омогућава да се својства стакла постепено мењају. Стакло се заправо замрзава без одвијања кристализације. У тако охлађеном стаклу, за разлику од већине других чврстих материја, молекули не могу мењати различита стања помоћу апсорпције зрачења у опсегу видљивог и инфрацрвеног спектра. То подразумева да не апсорбују овај вид енергије зрачења. Уместо тога, енергија пролази кроз молекуле као да не постоје. Међутим, због неизбежних нечистоћа у кречном миксу, типично прозорско стакло ипак апсорбује одређену количину зрачења.

Бојено стакло се производи додавањем оксида различитих метала, који представљају модификаторе спектралне пропустљивости стакла чија је улога да обоје стакло. Ова једињења утичу на трансмисију светлости кроз стакло, како у оквиру, тако и ван видљивог спектра, и могуће је идентификовати их у односу на боју коју производе. Типична једињења и боје које производе су оксиди гвожђа

(Fe²⁺: плаво-зелена, Fe³⁺: жуто-браон), хрома (зелена), кобалта (плава), бакра (црвена), урана (жута), никла (зелена, плава, љубичаста, жута, браон) и селена (ружичаста). Тако, мале количине оксида гвожђа одговорне су за карактеристичну зеленкасту боја кречног стакла. Најпознатија једињења која чине стакло млечним јесу калцијум-флуорид за кречно стакло, и калцијум-фосфат за боросиликатно стакло. Како је боја веома осетљива на мале промене састава стакла, тешко је постићи идентичну боју у различитим серијама производног процеса.

3.1.2 Особине стакла

Познавање физичких особина стакла јесте основ за његову правилну примену на омотачу зграда. Како је овај рад усмерен ка утврђивању могућности примене стакла у материјализацији геометријски комплексних форми омотача, у наредном делу биће истакнуте основне физичке карактеристике стакла, да би поједина својства била детаљније објашњена касније у раду (у оквиру петог поглавља), када буду дефинисани потенцијали и ограничења примене закривљеног стакла. Физичке особине стакла, које су најзначајније за примену овог материјала у архитектури, јесу транспарентност и трајност. Остале карактеристике добијају значај у зависности од функције и начина примене стакла у зградама. Међутим, треба имати у виду да се скоро све карактеристике могу појавити у различитим формама, са различитим степеном изражености и у различитим комбинацијама, што омогућава добијање изузетно великог броја најразличитијих производа специфичних физичких особина. То је посебно изражено када се још додају различите геометријске карактеристике, у случају закривљеног стакла.

Једна од најважнијих особина стакла јесте његова одлична отпорност на многе агресивне супстанце, што чини стакло једним од најтрајнијих материјала у грађевинарству.

Основне карактеристике стакла које су од значаја за његову примену у грађевинарству, а првенствено се односе на стакло примењено у материјализацији омотача архитектонских објеката, јесу следеће:

- Изглед,
- Механичке особине,

- Термичке особине,
- Оптичке особине,
- Акустичке особине, и
- Хемијске особине.

Најважније физичке особине стакала, који се најчешће користе у грађевинарству (кречно и боросиликатно стакло), представљене су у Табели 3.2.

Табела 3.2. Основне физичке карактеристике кречног и боросиликатног стакла (европ. стандард EN 572-1 и EN 1748-1-1); (Извор: Проширена Табела према Velis et al., 2013: 13)

| Основне физичке карактеристике стакла | | | | |
|--|-------------------|---------------------|-------------------|--|
| | | | Кречно стакло | Боросиликатно стакло |
| Густина (специф. запреминска маса) | ρ | kg/m ³ | 2.500 | 2.200-2.500 |
| Модул еластичности (<i>Youngov modul</i>) | E | МПа | 70.000 | 60.000-70.000 |
| Поасонов (<i>Poisson</i>) коефицијент | ν | -- | 0,23* | 0,2 |
| Модул смицања | G | МПа | 26.000-28.000 | -- |
| Тврдоћа (Мосова скала) | $HK_{0,1/20}$ | GPa | 6 | 4,5-6 |
| Чврстоћа на затезање | -- | МПа | 30-80 | -- |
| Чврстоћа на притисак | -- | МПа | 800 | -- |
| Коефицијент топлотног ширења ⁺ | α_T | 10 ⁻⁶ /K | 9 | Класа 1: 3,1-4,0 Класа 2: 4,1-5,0 Класа 3: 5,1-6,0 |
| Специфични топлотни капацитет | C | J/(kgK) | 720 | 800 |
| Топлотна проводљивост | $\lambda \approx$ | W/(mK) | 1 | 1 |
| Просечан индекс преламања у оквиру видљивог спектра [‡] | n | -- | 1,52 [#] | 1,5 |
| Емисивност [¶] | ϵ | -- | 0,837 | 0,837 |

*Према стандарду вредност је 0,2, али у различитим истраживањима користи се вредност између 0,22 и 0,24.

⁺ Средња вредност између 20°C и 300°C.

[‡] Индекс преламања је константа за дату врсту стакла, али зависи од таласне дужине, (мале варијације у оквиру видљивог спектра).

[#] Стандард даје заокружену вредност од 1,50.

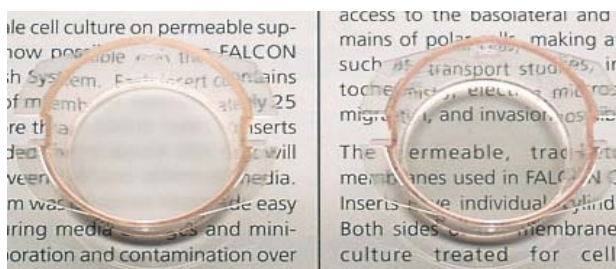
[¶] За детаљне информације о одређивању ове вредности, видети стандард EN 673.

- **Густина (ρ)** – Стакло са својом густином (специфична запреминска маса) од 2,500 kg/m³ спада у материјале веће густине. Без шупљина и пора, има степен компактности 1, што значи да практично не упија и не пропушта гасове ни течности. Ова карактеристика служи за израчунавање тежине стаклених елемената. Тако стаклени панел дебљине 1 mm и површине од 1 m² има тежину од 2,5 kg.

Изглед

- *Прозирност и боја*

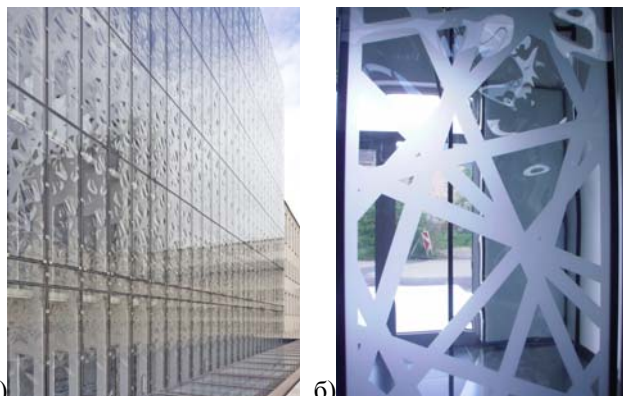
Од многобројних карактеристика изгледа стакла, првенствено треба истаћи његову транспарентност која му, као и неким пластичним материјалима, даје изузетан значај за примену у архитектонским објектима са аспекта визуелног комфора. Међутим, ова особина се може мењати. Тако се одређеним поступцима прераде може добити стакло које није транспарентно, већ само прозрано, али које пропушта довољну количину светлости (Слика 3.2). Најпрозирнија безбојна стакла су стакла са малом количином феро-оксида (Fe_2O_3). Такође, како је претходно објашњено, у погледу боје могуће је постићи да обично безбојно стакло уз задржавање провидности добије и извесну обојеност (додавањем различитих једињења), било из декоративних разлога, било ради добијања специфичних карактеристика у погледу пропуштања видљивог или инфрацрвеног дела спектра сунчевог зрачења. У случају примене керамичке боје, могуће је постићи било коју боју у широком дијапазону најразличитијих боја и нијанси. Ове карактеристике се подједнако односе и на равно и на закривљено стакло.



Слика 3.2. Разлика између транспарентног и прозраног стакла (Извор: Преузето са <http://www.minecraftforum.net/forums/mapping-and-modding/minecraft-mods/mods-discussion/1345167-translucent-texture>, 23. 4. 2014)

- *Површинске карактеристике*

У погледу површинских карактеристика, површине стакла код обичног стакла, као и у случају примене закривљеног стакла, глатке су и сјајне. Додатном обрадом стакла могуће је постићи површине измењеног изгледа, без сјаја, са различитом рељефном фактуром и малим испупчењима која су могућа применом термичког обликовања стакла (Слика 3.3). Додатна обрада подразумева механички (матирање пескарењем) и хемијски (различит степен рефлексије - флуороводонична киселина за постизање антирефлексије) површински третман. Промена површинског карактера утиче на степен прозирности.



Слика 3.3. Рељефно испупчена површина стаклених елемената постигнута термичим обликовањем: а) Стаклена фасада државне библиотеке у Берлину; б) Стаклени панел у фабрици *SFL*, Аустрија, која је произвела панеле; (Извор: а) Преузето са <http://www.wernersobek.de/en/projects/material/glass/state-library-berlin/>, 15. 6. 2016; б) Аутор)

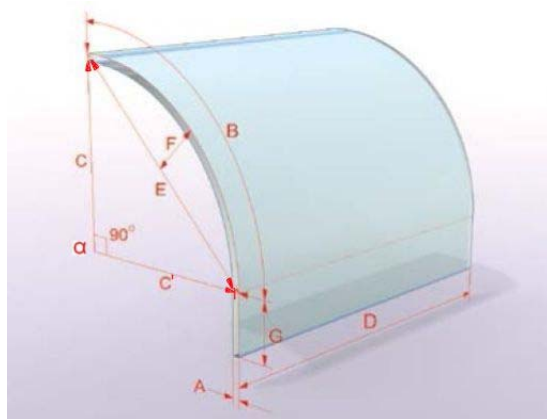
- *Обликовно-димензионалне карактеристике*

Обликовно-димензионалне карактеристике закривљеног стакла знатно се разликују у односу на равно стакло, код кога димензије подразумевају његову ширину, дужину и дебљину. Основне карактеристике које се разматрају приликом примене закривљеног стакла јесу форма и димензије. Геометријске карактеристике закривљеног стакла, као и основне форме закривљених стаклених панела дефинисане су и приказане у оквиру првог поглавља.

Да би се произвело задовољавајуће закривљено стакло, неопходно је прорачунати тачне мере и навести његове тачне димензионалне карактеристике, с обзиром на то да се од равног стакла различитим техникама обликовања производи закривљено стакло. То подразумева да се форма и димензије закривљеног стакла морају "развити" на једну равну (видети прво поглавље, стр. 38, Слика 1.14). У случају примене цилиндрично закривљеног стакла, неопходно је дефинисати параметре као што су полупречник криве, обим криве, висина лука, угао (неопходна су најмање два параметра), с циљем проналажења одговарајућег решења које је технички изводљиво, али и економски прихватљиво. Слика 3.4 описује димензионалне параметре који су дефинисани у немачком Водичу за термички закривљено стакло у грађевинарству (Bundesverband Flachglas, 2011).

Форма и димензије елемената условљене су производним процесом произвођача и зависе од врсте и дебљине стакла, и закривљења, односно полупречника закривљености. Ограничења постоје за све врсте стакла, а произвођачи исказују вредности кроз могуће минималне и максималне вредности у mm и допуштена одступања (толеранције). Свако разматрање одступања

(толеранције) и димензионалних ограничења захтева добро познавање геометрије неопходне за дефинисање закривљеног стакла.



- A – Дебљина стакла
- B – Спољашњи обим лука
- C – Унутрашњи полупречник
- C' – Средишњи полупречник
- D – Висина или дужина
- E – Унутрашња тетива лука
- F – Висина лука (спољашња или унутрашња)
- α – Угао
- G – Тангента (раван део панела)

Слика 3.4. Димензионални параметри који дефинишу геометрију једноструко закривљеног цилиндричног стакла према немачком Водичу за термички закривљено стакло у грађевинарству (Извор: Према илустрацији са <http://glasshape.co.nz/wp-content/uploads/2013/02/Curved-Glass-Tolerances.pdf>, 23. 7. 2014)

Механичке особине

Механичке особине стакла карактеришу понашање стакла при дејству различитих врста оптерећења, приликом којих долази до одређених напонских стања (напрезања), док не дође до значајних промена у самом материјалу, односно лома стакла.

Сама чињеница да стакло може да се произведе на више различитих начина, чини прорачун за одређивање његове чврстоће веома сложеним. Такође, могуће је да два стаклена елемента, произведена од истих састојака и истим процесом, имају различите особине због недостатака у унутрашњости и/или на површини стакла. Неке организације, као што је Америчко друштво за испитивање материјала (*ASTM - American Society for Testing Materials*), поставиле су вредности одређених параметара (као што је запреминска маса) у односу на граничне вредности чврстоће стакла (Green, 2013).

Стакло је крт материјал, који под дејством оптерећења показује скоро савршено линеарно еластично понашање до тачке када долази до изненадног и потпуног лома, без претходних знакова упозорења (Слика 3.5). Стакло нема могућност пластичне деформације, као што је случај са другим конструктивним материјалима попут челика (Слика 3.5), из разлога што локалне концентрације напона у врховима насталих пукотина нису умањене самом прерасподелом напона, услед немогућности истезања самог стакла.



Слика 3.5. Однос напона и деформација за стакло и челик (Извор: Према Belis et al., 2013: 14)

У зависности од врсте стакла (Табела 3.2) разликују се и његове механичке особине:

- **Модул еластичности (E)** – показује способност стакла да се након деформације поново врати у првобитни облик, и приближно је једнак модулу еластичности алуминијума. Познат као Јунгов модул (E), даје нумеричку апроксимацију односа напона и деформација, под дејством оптерећења на затезање (White, 2007):

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (3.1)$$

где је:

E – Модул еластичности,

σ – напон (напрезање),

ϵ – деформација.

Експериманталним испитивањима утврђено је да термичка обрада стакла смањује вредности модула еластичности, али само у одређеним границама. Испитивања су показала да је највећа разлика модула еластичности између термички обрађеног и термички необрађеног стакла, и износи око 7% (White, 2007). Повећање еластичности стакла је веома значајно за његову примену као грађевинског материјала. Један од начина да се то постигне јесте повећање количине креча. Ова карактеристика је, посебно, значајна за примену хладног савијања стакла, о чему ће касније бити више речи.

- **Поасонов коефицијент (ν)** – представља математички израз промене облика, односно коефицијент попречне деформације. Појава попречне деформације се може демонстрирати на примеру стакленог штапа који се

аксијално затеже по уздужној x-оси. Као што се очекује, штап се издужује али се истовремено скраћује (скупља) у правцу у-осе и z-осе. Однос између деформације истезања у правцу уздужне осе x и деформације скраћивања у правцу оса у и z представља Поасанов коефицијент.

- **Модул смицања (G)** – један је од параметара за мерење крутости материјала, и подразумева однос између деформације и силе паралелне у односу на једну од површина стакла (сила смицања), док је супротна површина оптерећена супростављеном силом (као што је треће) (White, 2007):

$$G = \frac{\tau}{\lambda} \quad (3.2)$$

где је:

G – Модул смицања (износи ≈ 30.000 за већину врста стакала),

τ – напон (напрезање) на смицање,

λ – деформација услед смицајуће силе.

Неки научници верују да овај модул има веома мали утицај на носивост стакла, док други имају супротан став. Тако да, научници који верују да је овај модул ирелевантан, полазе од чињенице да је стакло ломљив материјал који првенствено попушта под дејством напона затезања, пре него под дејством силе смицања (Overend et al., 2013).

- **Тврдоћа по Мосовој скали** представља особину која се односи на отпорност према локалном дејству силе, и подразумева отпорност стакла према гребању и продирању одређеног минерала (са Мосове скале). У случају да одређени минерал може да огребе површину узорка материјала и обрнуто, узорак ће биће класификован његовом тврдоћом. Мосова скала је начин за добијење квалитативне процене отпора на оштећење површине, с обзиром на то да се тврдоћа - отпор на оштећење површине не може квантитативно мерити. Чврстоћа површине стакла одређује какво ће оштећење настати током његове производње, уградње и коришћења. У односу на вредност тврдоће (6 – према Мосовој скали) (Belis et al., 2013), кречно стакло има тврдоћу која одговара чврстоћи минерала ортокласа (KAlSi_3O_8) који представља минерал из групе силиката (алкални фелдспат)

са делимично уређеном кристалном решетком, док боросиликатно стакло има нешто мању тврдоћу.




- *Чврстоћа на затезање*, теоријски је велика (засновано на молекуларној снази) и може достићи вредности од 6.000 МПа до 10.000 МПа, али ове вредности нису релевантне за његову конструктивну примену (Overend, 2013). Стварна чврстоћа на затезање је знатно мања. Разлог томе је што површина стаклених панела садржи велики број механичких недостатака (пукотина) различитих величина, који нису нужно видљиви голим оком. Као и код других кртих материјала, стварна чврстоћа на затезање, која се креће у вредностима од 30 МПа до 80 МПа (Feldmann, 2014), у многоме зависи од ових површинских недостатака у којима долази до високе концентрације напрезања која се не могу прерасподелити због недостатка истегљивости стакла. До лома стакла долази када интензитет напона затезања у врху пукотине достигне критичне вредности. Услед оптерећења пукотина временом расте.
- *Чврстоћа на притисак*, с друге стране, у односу на чврстоћу на затезање вишеструко је већа, и може достићи вредности до 800 МПа, па и до 1000 МПа за пливајуће (*float*) стакло (Overend, 2013), из разлога што се површински недостаци (пукотине) не повећавају када је стакло напрегнуто силом притиска. Међутим, то је, такође, ирелевантно за његову конструктивну примену. Треба напоменути да су се тестови који су рађени за добијање граничне отпорности на притисак стакла, увек завршавали појавом напона затезања, који изазивају лом стакла пре исцрпљења капацитета носивости на притисак.

Генерално, под чврстоћом се подразумева чврстоћа на савијање стакла, која није константна, већ зависи од много различитих аспеката, посебно стања површине, величине панела, интензитета и трајања оптерећења, величине пукотине, заосталих напона и њихове позиције у панелу (средина, ивица, угао, рупа), као и еколошких услова окружења (Feldmann et al., 2014).

Наиме, разлика у чврстоћи стакла настаје још у процесу производње пливајућег (*float*) стакла, када доња површина стакла, која је у контакту са течномашћу има мању чврстоћу на савијање, за разлику од горње површине која је у

додиру са ваздухом. Ипак, ова разлика у чврстоћи две површине стаклених панела нестаје веома брзо, након њихове уградње, односно током периода коришћења. Такође, стакла добијена различитим техникама ојачања, којима се добијају сигурносна стакла, имају повећану чврстоћу на савијање у односу на обично пливајуће стакло (*floating glass*). За побољшање механичких карактеристика стакла, у процесу термичког ојчања – каљења, од посебног значаја је трансформациона температура од око 650°C, када стакло поприма вискоеластичне карактеристике, које се користе за уношење допунских напона у стаклу путем загревања и затим брзог хлађења. Ефекти оваквог преднапрезања стакла су, поред повећања чврстоће на савијање, повећана постојаност на термичке шокове (до око 200°C) и високе температуре (до око 300°C), као и промена начина понашања у случају лома стакла. Тако, каљено стакло се ломи на мале заобљене комаде, док делимично каљено на веће, за разлику од обичног пливајућег (*float*) стакла које се ломи у великим комадима (Табела 3.3).

Табела 3.3. Типична затезна чврстоћа на савијање закривљеног стакла и повезаност облика пукотине са степеном преднапрезања; (Извор: Према Feldmann et al., 2014: 22; и Bundesverband Flachglas, 2013:14)

| Типична чврстоћа на савијање закривљеног стакла и повезаност облика пукотине са степеном преднапрезања | | | |
|--|---|--|---|
| | Обично пливајуће закривљено стакло | Делимично каљено закривљено стакло | Каљено закривљено стакло |
| Начин лома стакла близу ивице |  |  |  |
| Чврстоћа на савијање/површина стакла | 40 N/mm ² | 55 N/mm ² | 105 N/mm ² |
| Чврстоћа на савијање/ивица стакла | 32 N/mm ² | 55 N/mm ² | 105 N/mm ² |
| Степен преднапрезања стакла | 0 МПа | 30-50 МПа | > 90 МПа |

У зависности од несавршености површине, чврстоћа на савијање је ограничена почетком отварања критичне пукотине, и с обзиром на немогућност постизања пластичне деформације, то резултира наглим ломом стакла. Што је дуже трајање оптерећења, већи напон и дубља почетна пукотина, то је мања ефективна чврстоћа. С друге стране, потенцијалне пукотине настају и због напрезања услед корозије од воде и влаге у комбинацији са дуготрајним оптерећењем. То је разлог због чега је чврстоћа на савијање услед утицаја трајног оптерећења мања него код оптерећења које кратко траје.

Из разлога екстремно високе динамичке вискозности стакла на собној температури која износи 1.020 Pas (у односу на вискозност воде од 10^{-1} Pas и меда од 105 Pas), неопходно је доста времена да ефекти малих механичких несавршености (пукотина) буду видљиви голим оком (Overend, 2013). Разлози лошијег квалитета саме површине могу бити узроковани лошим квалитетом производње као и корозијом површине услед акумулиране кондензоване воде. При стандардним експериментима, несавршености површине узорка стакла, одређују његову укупну носивост, а не отпорност на затезање, из разлога што прво почиње попуштање стакла на површини, које се затим помера према унутрашњости, док не дође до потпуног лома.

Код одређивања вероватноће лома, треба узети у обзир различита оптерећења која делују на стакло. Најважније је понашање стакла и његова отпорност у односу на дејство сила затезања и савијања. Може се рећи да отпорност на затезање представља фактор ограничења за све врсте стакла. Након затезања насталог услед дејства оптерећења на савијање, у стаклу настаје одвајање веза на нивоу атома. Величина силе, односно напона, који узрокују лом је једнака енергији потребној за постизање деформације која доводи до кртог лома (Слика 3.5). Овај ефекат услед оптерећења, односно напон на савијање може се приказати следећом једначином (White, 2007):

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{E \cdot \gamma}{r_o}} \quad (3.3)$$

где је:

σ_m – напон (напрезање) при лому стакла,

E – Модул еластичности стакла,

τ – потребна енергија за појаву пукотине,

λ – деформисано растојање између атома.

Такође, чврстоћа на затезање зависи од молекуларне кохезије, односно од састава стакла. Према овој теорији, претпоставка је да сваки оксид у саставу стакла има своју чврстоћу која учествује у укупној чврстоћи на затезање (процент сваког оксида помножен одређеним фактором). Калцијум-оксид и цинк-оксид највише доприносе укупној чврстоћи на затезање стакла. Такође, формирање силицијум-диоксида од силицијума и кисеоника, ствара врло јаку

атомску везу, што доводи до теоријски високе отпорности на затезање, чак двоструко веће од отпорности на затезање најбољих челика. Поред тога, каљењем се повећава отпорност на затезање, али негативне последице које се јављају у процесу наглог и постепеног хлађења, изазивају значајан пад реалне отпорности на затезање. Отпорност на затезање је кључни параметар за примену стакла у функцији елемента носеће конструкције.

Сила којом је могуће оптеретити стакло на савијање пре појаве пукотина, представља коефицијент носивости (R), који је могуће одредити при оптерећењу у трајању од 60 секунди. Пливајуће (*float*) стакло може да издржи напон на савијање од око 40 МПа. Каљено стакло показује четири пута боље карактеристике у односу на пливајуће стакло.

Познато је да, током времена, под нормалним условима примене, стакло губи својства носивости. У одређеним условима окружења и сталног оптерећења, долази до смањења чврстоће стакла, што подразумева појаву статичког замора материјала. Други облик замора, који настаје када је стакло подвргнуто променљивом оптерећењу, подразумева динамички замор. Величина примењеног оптерећења директно утиче на брзину ове појаве. Вода такође може да допринесе појави замора у стаклу, и у том смислу представља најчешћи узрок појаве замора у стаклу (Wigginton, 2002).

Још једна важна карактеристика коју треба узети у обзир у случају примене ламинираног стакла јесте преостала отпорност, која код појаве пукотина у ламинираном стаклу, може омогућити спречавање потпуног лома стакла. То је веома значајно за хоризонталне плочасте елементе конструкције као што су стаклени кровови и носеће подне конструкције. На заосталу отпорност стакла утиче неколико фактора, као што су врста стакла, врста међуслоја, начин формирања, оптерећење и распоред и облик пукотина у стаклу. Неповољне комбинације ових фактора, могу допринети изостанку заостале отпорности што ће допринети лому стакла.

Сви поменути параметри могу објаснити природу чврстоће стакла, али ипак, не пружају тачне податке о носивости стакла у реалним условима његовог коришћења. Такође, током процеса монтаже и коришћења, могућа је појава различитих мана и недостатака, који знатно могу смањити носивост стакла.

Термичке особине

Термичке особине стакла значајне за примену стакла у омотачу зграда, подразумевају максималну радну температуру, коефицијент топлотног ширења специфични топлотни капацитет, и топлотну проводљивост. Претходно објашњене механичке особине стакла, у великој мери зависе од његових термичких карактеристика:

- **Максимална радна температура** – подразумева температуру коју стакло као материјал може да поднесе без промена у перформансама. С обзиром на то да њена вредност за кречно стакло износи око 520°C, а за боросиликатно око 515°C, ова карактеристика има већи значај када се стакло употребљава под високим температурама.
- **Коефицијент топлотног ширења (α_T)** – представља врло значајну величину за стакло као материјал омотача. Ова карактеристика одређује понашање стакла при температурним променама, што је од великог значаја, за контакт са другим материјалима који чине један функционални склоп. Вредности коефицијента топлотног ширења, који зависи од хемијског састава стакла, су у распону од $3,1 \times 10^{-6}/\text{K}$ за боросиликатно до $9 \times 10^{-6}/\text{K}$ за кречно стакло (Табела 3.2), за разлику од вредности осталих термичких карактеристика које врло мало варирају. Генерално, стакла са малим вредностима коефицијента топлотног ширења су отпорнија на топлоту. Како су вредности овог коефицијента за бетон $9-11 \times 10^{-6}/\text{K}$, и за челик $11-12 \times 10^{-6}/\text{K}$, комбинација са овим материјалима се лако остварује, док се проблеми веза стакла са материјалима чији се коефицијенти топлотног ширења знатно разликују (за алуминијум, $\alpha_T = 23 \times 10^{-6}/\text{K}$) решавају на нивоу детаља.
- **Специфични топлотни капацитет (C)** – подразумева количину топлоте која је потребна да се повиси температура материјала за један келвин по јединици мере. Тачније, то је мера која означава колика количина топлоте се може складиштити у материјалу. Вредности коефицијента специфичне топлоте за стакло су релативно константне, и према Белису (Belis et al., 2013) износе $720 \text{ J}/(\text{kgK})$ за кречно, односно $800 \text{ J}/(\text{kgK})$ за боросиликатно стакло (Табела 3.2). Према српском Правилнику о енергетској ефикасности

зграда коефицијент специфичне топлоте за прозорско стакло износи 840 J/(kgK). С обзиром на релативно високе вредности овог коефицијента, стакло у омотачу архитектонских објеката неће бити материјал који ће акумулирати топлоту.

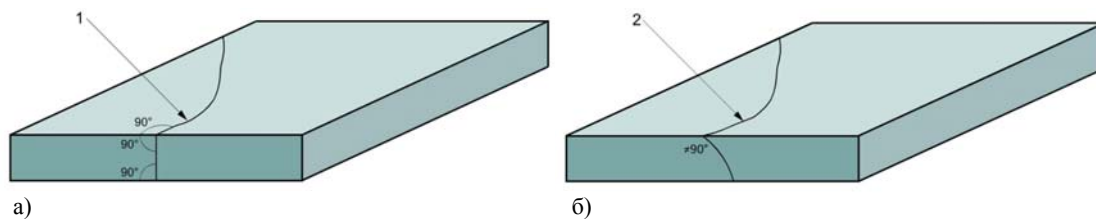
- *Топлотна проводљивост* (λ) – представља количину топлоте која прође у јединици времена кроз слој стакла дебљине од 1,0 m, управно на његову површину, уколико температурна разлика његових граничних површина износи 1°K. Према Белису (Belis et al., 2013) коефицијент топлотне проводљивости за кречно и силикатно стакло износи 1 W/(mK) (Табела 3.2), док према српском Правилнику о енергетској ефикасности зграда коефицијент топлотне проводљивости за прозорско стакло износи 0,81 W/(mK), што показује да је стакло релативно добар проводник топлоте. Како се оно у омотачу архитектонских објеката користи у различитим компонентама малих дебљина, последица овога је да ће стаклене површине често бити критична места у погледу топлотних добитака и губитака. Проблем стакла као највећег "примаоца" и "губитника" топлоте у архитектонским објектима, решава се увођењем нових типова стакала и стакло-пакета, о чему ће бити више речи касније у раду.

Топлотна издржљивост је способност стакла да издржи нагле температурне промене без појаве лома, и укључује неколико елемената, који подразумевају модул еластичности, топлотну проводљивост и коефицијент топлотног ширења, као и чврстоћу на затезање и притисак. Изложеност променама температуре у дужем временском периоду узрокује појаву термичког замора и смањује време потребно за појаву лома стакла. На температурама нижим од 100°C, нема замора, али у реалном опсегу вредности температуре, замор расте са порастом температуре. Ако је стакло изложено собној температури, са повећањем влажности, време појаве лома се смањује (Belis et al., 2013).

За прорачун механичких карактеристика, неопходно је узети у обзир температурне утицаје, с обзиром на то да изложеност различитим температурама узрокује појаву различитих напрезања. Термички обрађено стакло поседује већу отпорност на температурне промене у односу на пливајуће (*float*) стакло, односно показује отпорност за температуре у опсегу од 300°C до -70°C (White, 2007). Ове

вредности могуће је достићи постепеном променом температуре, с обзиром на то да брзе промене температуре, такође, могу допринети лому. То укључује и брзо хлађење загрејане површине које изазива напоне затезања. Треба напоменути да је хлађење штетније у односу на брзо загревање, с обзиром на то да, за разлику од хлађења, топлота изазива напоне притиска који заправо спречавају ломљење.

Неравномерно загревање, такође, може изазвати опасна напрезања. При загревању само једног дела стакленог елемента, доћи ће до његовог ширења, док ће остали део остати непромењен. Неравномерно ширење стакленог елемента ће узроковати напоне затезања унутар стакла. У случају лома, могуће је одредити његов узрок, односно да ли је лом настао као последица температурне промене. Слика 3.6. показује разлику између термичког и нетермичког лома, односно термички лом узрокује пукотине које формирају прави угао у односу на ивицу стакла.



Слика 3.6. Лом стакла: а) термички; б) нетермички;
(Извор: Према Belis et al., 2013: 14; и White, 2007: 23)

Уз помоћ коефицијента топлотног ширења стакла могуће је одредити промену димензија стакленог елемента. Промена дужине стакленог елемента изложеног температурним променама може се изразити следећом формулом:

$$\Delta L = \alpha_T \times \Delta T \times L \quad (3.4)$$

где је:

ΔL - промена у дужини,

α_T - коефицијент топлотног ширења,

L - првобитна дужина,

ΔT - температурна промена.

У погледу температурних промена, посебну пажњу треба обратити у случају примене ламинираног стакла. При температурама између 40°C и 50°C, ламинирано стакло се понаша као слојевито стакло, а не као монолитни елемент. Значајни проблеми јављају се на температурама изнад 75°C, када веза између

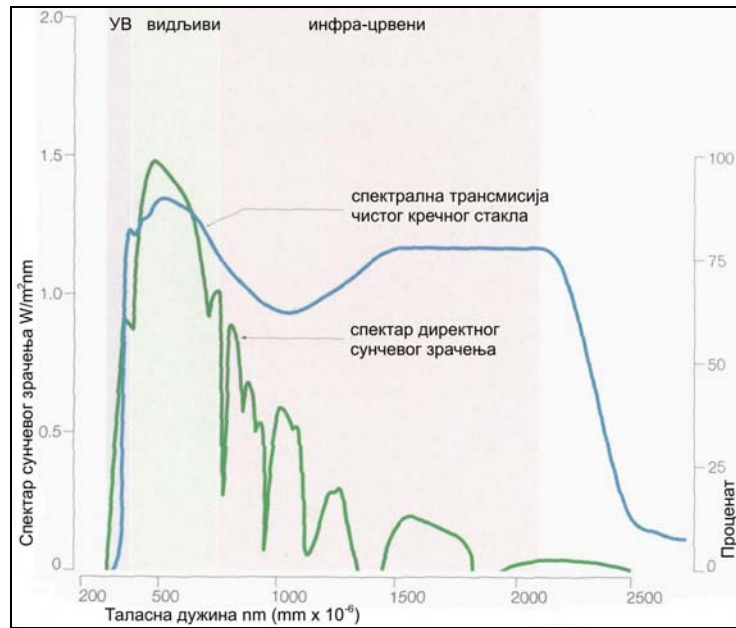
слојева у ламинираном стаклу постаје бескорисна и када се слојеви стакла понашају потпуно независно један од другог (White, 2007).

Оптичке особине

Оптичке особине стакла, које подразумевају количину и квалитет светлости зависе од врсте и дебљине стакла, хемијског састава и примењеног премаза. Оптичке карактеристике стакла произилазе управо из његове транспарентности и дефинишу се у односу на сунчево зрачење. Најочигледнија карактеристика стакла - веома висока транспарентност, која се креће у оквиру таласних дужина видљивог спектра ($\lambda \approx 380 \text{ nm} - 750 \text{ nm}$), долази од његове течне грађе. Појам транспарентности захтева разматрање овог феномена на нивоу честица и њихове интеракције са атомском структуром самог материјала, односно њиховог путовања кроз стакло и ослобађања или задржавања енергије у зависности од таласне дужине.

Теорија електромагнетног зрачења на нивоу честица указује да светлост чине фотони различитих нивоа енергије, а да нивои одговарају бојама које видимо. Енергија фотона је обрнуто пропорционална таласној дужини, односно већа енергија фотона одговара мањој таласној дужини. Феномени трансмисије и апсорпције сунчеве енергије се упрavo односе на утицај који фотони имају на електроне атома и молекула материјала које сусрећу.

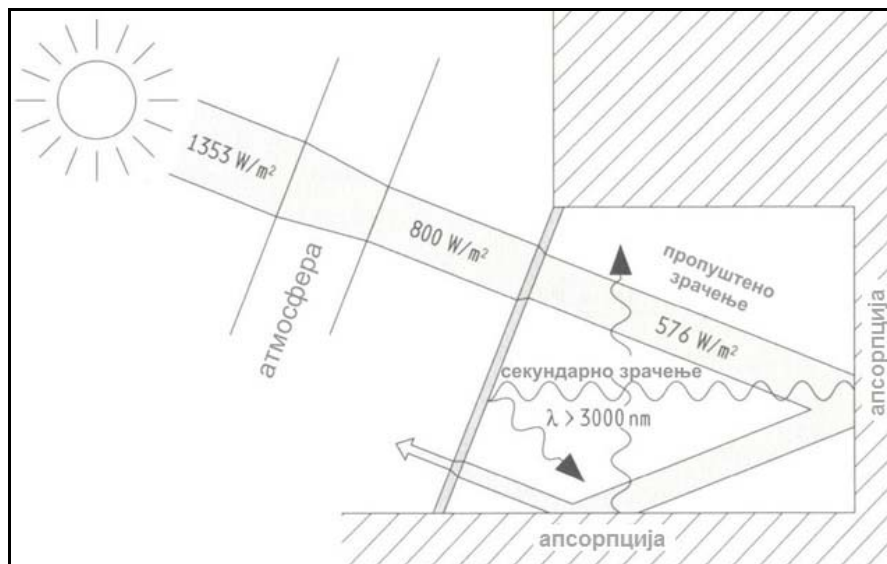
Атомска структура материјала омогућава интеракцију између негативно наелектрисаних електрона са различитим нивоима енергије у материјалу (налазе се око позитивно наелектрисаних језгара) и фотона видљивог, ултраљубичастог или инфрацрвеног светла који бивају апсорбовани уз одговарајућу апсорпцију боје светла коју носе. Када их материјал апсорбује, фотони су у могућности да ослободе вишак енергије, што доводи до раста температуре самог материјала који ту топлоту емитује у виду дуготаласног зрачења. Специфична карактеристика стакла јесте што не апсорбује фотоне из видљивог дела сунчевог спектра на које је људско око осетљиво (јер електрони у стаклу одговарају његовом ултраљубичастом делу), већ их пропушта (Слика 3.7).



Слика 3.7. Трансмисија зрачења кречног стакла у односу на спектар сунчевог зрачења (Извор: Wigginton, 2002)

Од укупног електромагнетног зрачења, сунчева енергија која стиже до површине земље обухвата део спектра, таласних дужина од 290 до 3.000 nm. У оквиру тога: 3% чини део спектра ултравиолетног зрачења (таласне дужине од 290 и 380 nm), 44% видљиви – светлосни део спектра (380 до 750 nm), и 53% део инфрацрвеног дела спектра, односно мање таласне дужине инфрацрвеног дела спектра (750 до 3.000 nm). Иако тачан спектар нетрансмитованог оптичког зрачења (односно апсорбованог и рефлектованог) варира између различитих врста стакала (обојено, нискоемисионо), обично се налази у оквиру таласних дужина изван опсега видљивог и инфрацрвеног спектра зрачења. Обично стакло апсорбује велики проценат ултраљубичастог дела спектра (и то онај биолошки највреднији), због његове интеракције са јонима кисеоника у стаклу; пропушта нешто преко 90% (91% до 93%) видљивог дела спектра и највећи део (око 85% до 90%) инфрацрвеног зрачења. То значи да у унутрашњост објекта стакло пропушта таласне дужине од 290 до 2.500 nm, док је за таласне дужине веће од 3.000 nm скоро непропустљиво. Унутрашње површине просторија и опрема, могу упијати, рефлектовати или проводити светлосно односно топлотно зрачење. Пропуштена топлотна енергија загрева материјале у унутрашњем простору, који су је апсорбовали, и повећава њихову температуру, тако да они сами почињу да излучују топлотну енергију. Ово електромагнетно зрачење, са својим таласним

дужинама из подручја дуготаласног инфрацрвеног зрачења, таласних дужина већих од 3.000 nm, слабо поново пролази кроз стакло, те долази до ефекта стаклене баште (Слика 3.8)



Слика 3.8. Ефекат стаклене баште
(Извор: Према Achilles & Navratil, 2009: 25)

Са индексом преламања од око 1,5, рефлексија светлости обичног незапрљаног равног стакла износи 4% по површини што даје укупно 8% за једноструки стаклени панел. Ово смањује транспарентност, али се може избећи применом посебних премаза. Један од елемената у саставу стакла који је одговаран за апсорпцију сунчевог зрачења, односно умањену трансмисију, јесте фери-оксид, који стаклу даје зелену нијансу и умањује трансмисију зрачења до 1.000 nm (Wigginton, 2002). Смањењем количине фери-оксида у саставу стакла, смањује се и степен апсорпције зрачења, дакле повећава се трансмисија. Трансмисија светлости ће такође бити умањена повећањем броја стаклених панела у оквиру компоненте застакљења.

Акустичке особине

Као саставна компонента омотача зграда, стакло мора да испуни захтеве за звучном изолацијом. Велика густина стакла повољно се одражава на акустичке особине, али као једнострука компонента је врло ограничавајућих перформанси. Вишеслојна стакла могу обезбедити одређени ниво слабљења звука, као и термоизолациона стакла, која повећањем дебљине (међупростора између стакала) постижу добре резултате у смањивању нивоа буке, као и у отклањању

евентуалних пропуста приликом уградње који могу знатно да умање њихове изолационе способности.

Хемијске особине

Отпорност стакла на хемијске утицаје, још један је разлог његове широке примене у грађевинарству. Ова особина се односи на његову отпорност на корозију узроковану дејством воде, водених раствора киселина, база и соли, као и атмосферских утицаја (кише и сумпорне кише).

Сировине које се користе у производњи стакла, у великој мери утичу на његову хемијску отпорност. Тако, боросиликатна стакла су нарочито отпорна на алкалне растворе, али већина стакала (кречно стакло) је ипак подложна утицајима натријумских, фосфорних и хлороводоничних киселина, с обзиром на то да садрже елементе који могу изазвати оштећења. Концентрисане киселине имају мање утицаја на стакло, за разлику од разблажених због присуства воде. Када се присуство воде на површини стакла комбинује са натријумовим јонима, настаје натријум хидроксид, што представља алкални раствор, који узрокује оштећења, поготово ако већ постоје мањи површински недостаци (Wigginton, 2002). Ово резултира пукотинама, које се даље шире под утицајем различитог оптерећења. Поред оштећења на површини, вода може да узрокује оштећења у унутрашњости стакла.

3.2 Савремене технологије производње и обликовања стакла

3.2.1 Приказ историјског развоја технологије производње стакла

Стакло постоји од давнина, пре него што је човек почео његову вештачку – индустријску производњу. Такав облик стакла, који потиче из природе, представља вулканска стена (Слика 3.9), која је веома ретко у потпуности транспарентна, односно прозирна, већ обично провидна што значи да пропушта део светлости. Претпоставља се да је ова врста стена коришћена код становника каменог доба за различите намене, као што је прављење оруђа различитих величина и облика, које су могли да израде резбарењем уз мало вештине. Прва употреба стакла, произведеног људском руком примењена је као глазура за украшавање кухињског посуђа и тањира, који су били направљени од другог материјала. Судови су били потопљени у течно, отопљено стакло и на тај начин се добијала потребна глазура на њиховој спољашној страни. Након тога, судови су се поново загревали и на њима су утискивани различити украсни мотиви и шаре. Такве посуде које су пронађене археолошким ископавањем потичу из 12.000 године п.н.е. (Wigginton, 2002).



Слика 3.9. Вулканска стена (Извор: Преузето са <http://hudsonvalleygeologist.blogspot.rs/2012/06/obsidian.html>, 24. 9. 2015)

Постоје различита веровања стручњака да примена стакла као вештачког материјала потиче из Египта, односно Месопотамије. Први запис који даје "рецепт" за стакло пронађен је на средњем истоку, 668-626. године п.н.е., и гласи: "Узети 60 делова песка, 180 делова пепела морских биљака, 5 делова креде – и добићете стакло" (Belis et.al, 2013).

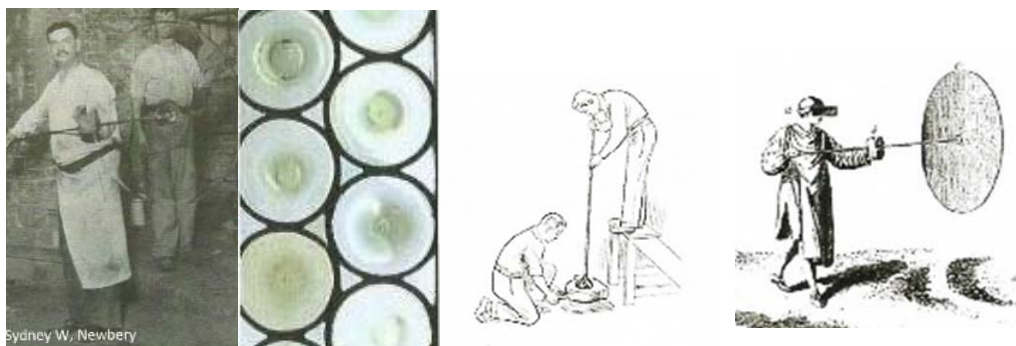
У раном периоду производње стакла, добијање потпуно транспарентног стакла је било веома ретко. Врло мало се знало о хемији стакла и због тога је било

веома тешко манипулисати његовим природним бојама. Током овог периода, транспарентност није била од кључног значаја као што је данас, а из разлога што се стакло тешко налазило, углавном, користило се за израду личних украса. Због недоступности, стакло је постало вредно скоро као и друге врсте природног камена. Тако је било све до индустријске револуције између 300. и 200. године п.н.е када је производња стакла постала широко распрострањена, претварајући га у неопходан материјал. Проналасци из Вавилона из периода 200. године п.н.е. имали су значајну улогу за револуцију у производњи стакла. Први најпознатији начин производње је био дувањем кроз гвоздене шупље цеви (Слика 3.10). Дувањем у цев отопљено стакло се обликује у форму цилиндра дужине од око 2 m и ширине од 0,30 m, коме се затим секу крајеви, и затим се сече дуж цилиндра. Још једном се загрева у пећи, после чега се стакло одмотава и исправља. Овај процес производње се задржао до краја 19. века (Belis et.al., 2013).



Слика 3.10. Технологија производње стакла - дувањем (Извор: Belis et al., 2013: 17)

Слично овој производној технологији био је и поступак помоћу гвоздених цеви, које су на другачији начин коришћене у сврху обликовања стакла. Разлика је била у томе што је дувањем кроз цев формирана шупља сфера од истопљеног стакла која се затим увртањем, уз помоћ центрифугалне силе, стањивала. На тај начин се стварао раван диск пречника 1,5-1,8 m, који се затим кројио и секао на жељену величину, при чему се стакло максимално искоришћавало (Слика 3.11).



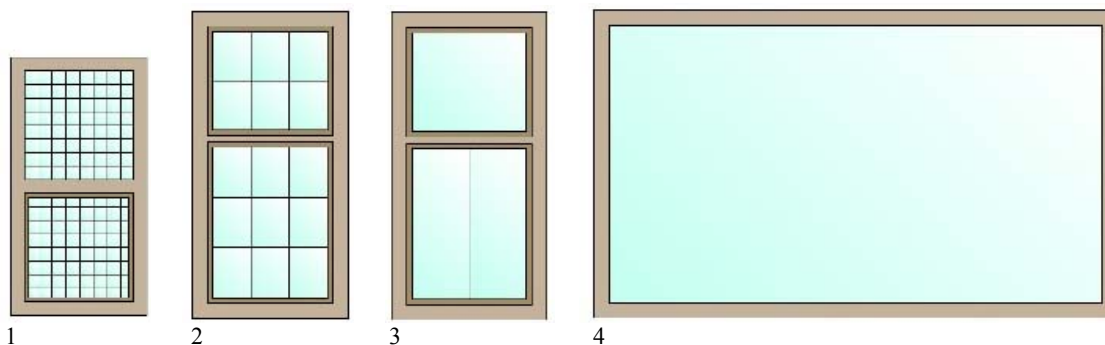
Слика 3.11. Технологија производње стакла – увртањем (Извор: Belis et al., 2013: 17)

Чак и средњи део диска, који је имао већу дебљину, налазио је примену као декоративни елемент. Наиме, стакло добијено овим методом имало је неједнаку дебљину (дебље у центру и тање према ивицама). То је значајно утицало на квалитет стакла. Овај процес производње се, такође, задржао до краја 19. века. Нажалост, не постоји довољно информација о пореклу и периоду открића ова два поступка за добијање стакла (Belis et al., 2013).

Неки стручњаци верују да је период успона хришћанства био прво златно доба употребе стакла. Један од разлога за ову тврдњу је то што је технологија производње стакла постала једноставнија, захваљујући стабилности Римског царства, што је омогућило његову прву примену на омотачу зграда. У рушевинама градова Помпеје и Херкуланеума налазе се многобројни комадићи стакла, највероватније коришћени на прозорима јавних купатила и објеката високог стандарда. Технологија производње стакла почела је убрзано да се шири у земљама Римске Империје. Предности достигнућа постигнутих у индустрији стакла су се изгубиле падом Римског царства. Неколико стотина година касније, стакло се производило у западној Европи, али његов квалитет је био знатно лошији у односу на квалитет стакла произведеног у старом Египту и у Римском Царству. Коначно око 970 н.е. Византијци су открили производњу обојеног стакла. Тако су првобитни произвођачи стакла додавањем металних оксида у стаклену мешавину добијали одређену боју (бакар се додавао да би се добила црвена боја, а оксид гвожђа да би се добила зелена, браон или црна боја). Прва употреба затамњеног стакла у виду витража уведена је у Средњем веку, када је почела његова примена на прозорима цркава и катедрала. Иако су се прозорски отвори почели примењивати од краја 3. века н.е., витраж је почео да се користи на прозорским отворима крајем 10. века. Мада на изглед једноставна, производња равног стакла је била компликован процес, због чега су прозори кућа обично били мали и скупи. До краја 19. века, равно стакло се производило само на два горе наведена начина дувањем или увртањем.

Скоро четири века након Крсташких ратова, главни центар за примену стакла је била Венеција. За то време, сва открића старих Римљана су поново откривена и примењивана. Неке од старих техника су и даље развијане и разрађиване. Најзначајније откриће овог времена је било увођење првог апсолутно

безбојног и транспарентног стакла. Овакво стакло је названо *Cristallo*, одакле потиче данашња реч кристал. Особине овог стакла дозволиле су производњу стакла мање дебљине, као и креирање разноврсних форми поступком дувања. До 15. века примена стакла је постала широко распрострањена. У готово свакој европској земљи је основана индустрија производње стакла. Ширењем примене стакла као материјала у изградњи зграда, све је мањи био број кућа изграђених без стаклених прозора (Слика 3.12). Од краја 16. века, примена нових сазнања је допринела савременијој производњи стакла. Иновације као што су коришћење угља у пећима су допринеле постизању високих температура које су омогућиле скраћивање времена потребног за топљење стакла. Неопходно је било достићи температуре од 500°C до 1500°C с циљем добијања вискозности потребне за израду стаклених елемената.



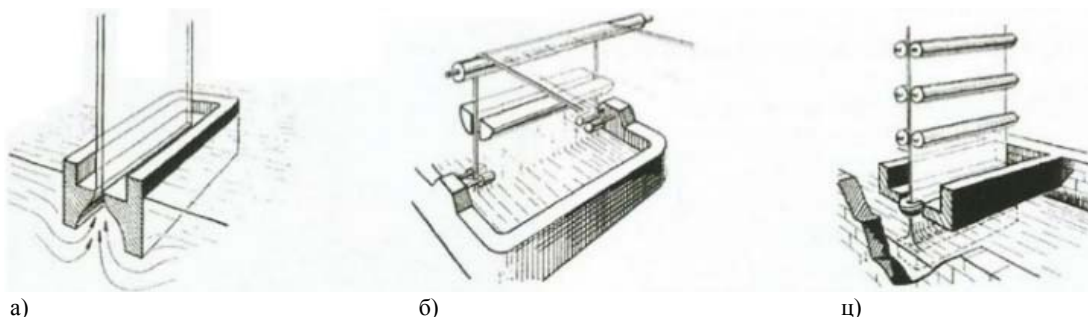
Слика 3.12. Развој обликовања прозорских отвора од Средњег века до 20. века: 1- 14. век; 2- 17. век; 3- 19. век; 4- 20. век; (Извор: Belis et al., 2013: 16)

Процес савременог обликовања стакла започео је у првих неколико деценија 17. века, што је допринело лакшој производњи већих глатких стаклених плоча. Енглески проналазач Џорџ Равенскрофт (*Georg Ravenscroft*) је 1765. године открио да се применом оловног оксида у производњи стакла добија његова мекоћа, која је омогућила његову лакшу обраду. Ово стакло, названо "*Flint glass*" имало је сјај, тежину, трајност и висок квалитет. Након овог открића, крајем 18. века, већина произвођача производи углавном само ову врсту стакла. Друго важније откриће, 1790. године, је било усвајање технологије производње оптичког стакла. Оптичко стакло се разликовало по физичкој хомогености и одсуству физичких недостатака. Али ипак, једно од највећих достигнућа у протеклих 200 година било је откриће нових расположивих супстанци које се додају у смесу стакла приликом његове производње. До 1880. године, само пет или шест различитих једињења се користило за добијање стакла. Два најчешћа

типа стакла били су *Flint glass*, у којем се олово оксид користило као основа у процесу производње, као и *Crown Glass*, у којем се креч користио као главни елемент. Након вишегодишњег истраживања, број елемената који се користи у процесу добијања стаклених плоча је повећан за најмање 25 (Belis et al, 2013).

Иако је порекло стакла чврсто укоренењено у Европи и Азији, може се рећи да стакло има историјски развој и у САД-у. Одмах након доласка првих досељеника, у Вирџинији је уведена производња стакла. Прва фабрика у Америци је била фабрика стакла. Почетком 17. века, стакло је постало један од првих производа који се извозио у колоније. Почетком 20. века, многи произвођачи су користили исте процесе производње стакла који су развијени током претходних 500 година. У то време још увек су доминирале индустријске тајне које су се чувале у оквиру породица и преносиле на нове генерације. Иако су већину достигнућа у индустрији стакла постигли Европљани, ипак су и Американци имали удела у усавршавању процеса производње. Тако су Американци дизајнирали стаклене сијалице Едисон 1879. године, открили стакло отпорно на ватру 1904. године и измислили сигурносно стакло 1926. године. Такође, стакло у облику блокова произведено је у раним 30-тим годинама 20. века.

Производња стакла почетком 20. века била је заснована на идеји извлачења стакла коју је патентирао још 1857. године Вилиам Пицбург (William Clark of Pittsburg), али која није била успешна због немогућности да се добије одређена дебелина стакла. Различити начини технике извлачења стакла (Слика 3.13), развијени почетком 20. века, омогућили су да се обједине њихове предности у трећи најуспешнији процес чија производња је започета 1921. године.



Слика 3.13. Производња равног стакла у 20. веку –идеја извлачења стакла патентирана 1857. год. није била успешна у спречавању стакла да се стањи: а) Белгијски патент (Emile Fourcault, 1901.) за вертикално извлачење стакла из течног материјала. Прва фабрика основана је 1912-14. год. у Дампремију; б) Метода (Libby Owens, 1903-05.) вертикалног извлачења стакла које се преводи у хоризонтално, касније патентирана од стране Ирвинг Колбурн (Irving Colburn) из САД-а Производња је започела 1916-17.год; ц) Трећи процес извлачења стакла (Pittsburg) комбиновао је предности оба претходна процеса и производња је започета 1921.год; (Извор: Belis et.al, 2013: 19)

Познавање историје и развоја технологије производње стакла је важно за разумевање његовог порекла, али и за сагледавање савременог развоја и савремених техника обликовања. Савремена технологија се развија великом брзином и данас се на различите начине производе различите врсте стакла квалитетних особина.

3.2.2 Савремени процес производње стакла

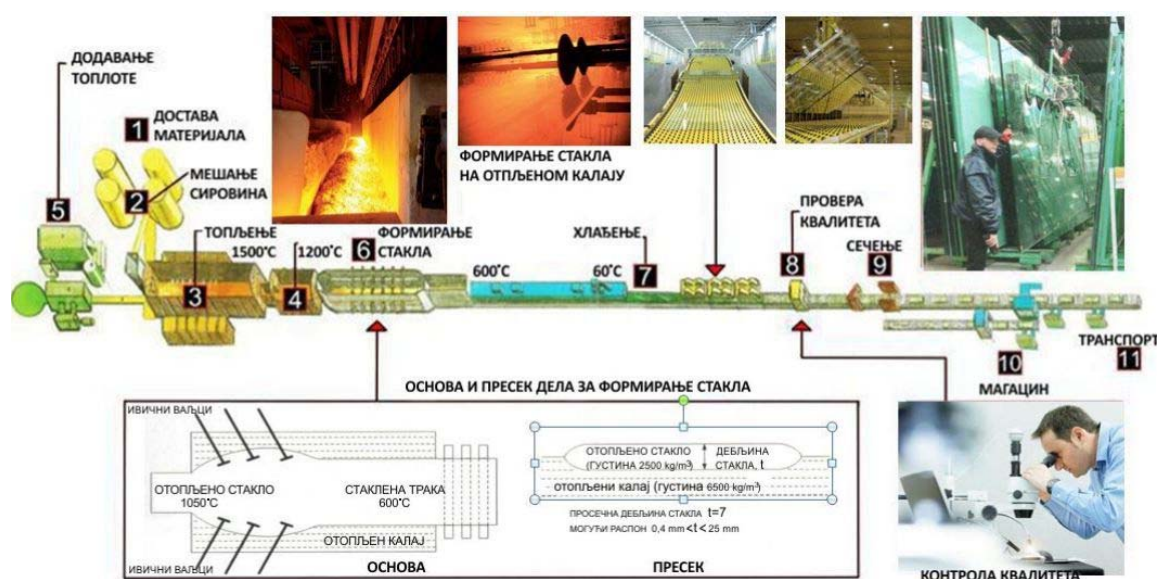
Током година, производња стакла је еволуирала на много начина. У почетку, како нису били познати начини његове обраде, тако је природно нађено стакло било једино решење. Данас се производе различите врсте стакла за различите намене и у различитим облицима. Начин производње одређује место примене стакла. Сваки део производног процеса утиче на крајњи производ, полазећи од компоненти у смеси, поступка формирања стакла и његове дораде. У процесу производње стакла, најважнија је комбинација најквалитетнијих састојака и њихових размера. Под стаклом подразумевамо групу аморфних материјала неорганског порекла добијених топљењем и хлађењем, па затим даљим различитим облицима прераде кварцног песка (SiO_2) као основне сировине и других материјала, компонената и додатака. Ови други састојци стакла, најчешће присутни у облику оксида, дају одређене специфичне карактеристике у циљу добијања различите врсте квалитетног стакла. Чак и најмање разлике у смеси могу променити карактеристике финалног производа, као и механичко понашање стакла под оптерећењем.

На особине и специфичности финалног производа утичу поред састава и следећи поступци:

- Поступак добијања,
- Поступак прераде,
- Поступак обраде, и
- Поступак дораде.

Све компоненте се мере и мешају према тачно одређеној формули. Тако помешане компоненте се стављају у посебне пећи великих димензија (дужине 30 до 60 метара), израђене од печене цигле и ватросталног челика, где се врши

топљење на тачно одређеној температури (Слика 3.14). У зависности од врсте стакла која се производи, температура у пећима се креће од 1300 до 1500°C. Све компоненте које се стављају у пећ су у чврстом агрегатном стању, али прелаз сваке компоненте у течно стање не настаје у исто време, тако да се, термин "топљење" у процесу добијања стакла, може погрешно тумачити. Заправо, чврсте компоненте под утицајем високе температуре реагују тако да формирају нова једињења. То је неопходан процес пре настанка фузије свих једињења под утицајем високих температура. Хемијске реакције и даље настављају да се дешавају и током фазе рафинирања, односно прераде, у којој треба обратити пажњу да евентуални гасови, односно мехурићи, буду уклоњени из смеше, с обзиром да то има утицаја на хомогеност стакла и његов квалитет. Најбољи начин да се то постигне је брзо топљење стакла и одржавање константне температуре пећи.



Слика 3.14. Дијаграм технологије производње равнoг пливајућег (*float*) стакла;
(Извор: Према Belis et al., 2013: 19, 20; и Euroglas, 2013: 15,19,27, 29-32)

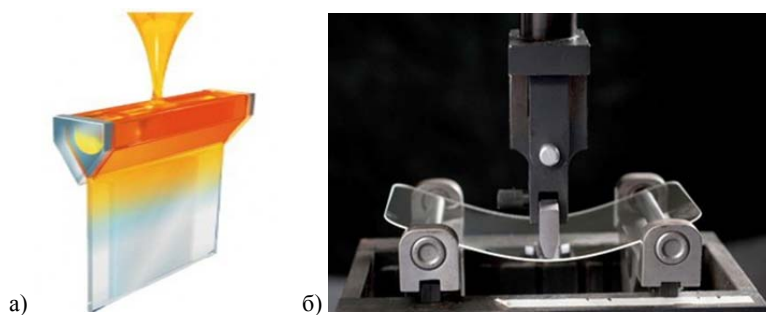
Постоје различите врсте пећи које се користе у зависности од врсте стакла која се производи и његове примене. За проиводњу пливајућег (*float*) стакла које се користи у грађевинарству, пећи су обично израђене од печене цигле и ватросталног челика. Основна сврха ових пећи је способност одржавања високе температуре с циљем одржавања стакла у течном стању. Данас се користе континуалне пећи, где се сировине додају на једном крају, а стакло се извлачи на супротном крају (Слика 3.14). Ово омогућава континуирани процес производње

стакла. Са сваке стране пећи постоје отвори, кроз које циркулише природни гас. Правац пламена ватре се, сваких 20 минута, мења са једне на другу страну у циљу уштеде енергије. Унутрашњост пећи је неопходно обезбедити од појаве корозије. Отопљено – ливено стакло је веома ерозивно, па употребљивост пећи за топљење је око три до четири године (Warmglass, 2014).

Када се заврши процес топљења стакла и уклоне мехурићи, стакло излази из пећи након што је охлађено до температуре од око 1200°C која омогућава неопходну вискозност потребну за процес његовог формирања (Warmglass, 2014). Након изласка из пећи, стакло улази у каду са истопљеним калајем која се простире у дужем појасу (Слика 3.14). С обзиром на то да има већу густину од калаја, стакло лебди, односно плута на површини растопљеног метала. Овим је омогућено да стакло добије савршено глатку површину. Дебљина и ширина стакла се контролишу посебним ваљцима (точковима) којима се развлачи меко стакло. На тај начин се добијају различите дебљине. Стакло без примене ваљака има дебљину од 6 (7) mm. За добијање мање дебљине, неопходно је развлачити стакло ваљцима према спољашној страни, док за већу дебљину треба гурати стакло према унутрашњој страни. На тај начин се добијају различите дебљине стакла од 0,4 mm до 25 mm (Euroglas, 2013).

Након обликовања смесе почиње процес хлађења, који настаје у дугом тунелу (100 метара), где се стакло хлади од температуре од 600°C до температуре од 60°C (Слика 3.14). Пажљиво и контролисано хлађење омогућава да се у стаклу појаве минимални унутрашњи напони, који су равномерно распоређени (*annealed glass*), што дозвољава сечење стакла без тешкоћа (Rogan, 2014). Охлађено стакло је предмет низа тестова за проверу његовог квалитета. Тако се, помоћу ласера проверавају оптички недостаци. Места таквих недостатака се аутоматски обележавају на рачунару, а делови који садрже недостатке аутоматски се секу и одбацују као отпад, који се затим враћа на почетак производног процеса заједно са другим сировинама за нови циклус производње. С циљем утврђивања оптичког квалитета, континуирано се узимају узорци са производне линије и односе на лабораторијска испитивања. Истовремено се врши провера дебљине стакла и величина његових унутрашњих напона.

Поред стандардне технологије производње пливајућег (*float*) стакла, у примени је најновија технологија производње стакла која подразумева вертикални процес ливења у коме стакло нема никаквог контакта са истопљеним оловом. Отопљено стакло тече на обе стране специјалне машине и спаја се у доњем делу (тако настаје фузија). Овај поступак се користи за производњу изузетно танког стакла, скоро без неравнина и недостатака, с обзиром на то да се његово формирање јавља у ваздуху без контакта са другим елементом. Дакле, нема потребе за полирањем и другим третманима за постизање глаткости. Такав тип стакла је *Gorilla® glass* (Слика 3.15), који се добија овим процесом и хемијским каљењем, а има препознатљиву чврстоћу од 600 МПа (Rogan, 2014). Максималне димензије стаклених плоча, за сада, износе 2 x 1,5 m, док су стандардне дебљине од 0,7 и 1 mm. Ово стакло се користи у индустрији електронских уређаја, док су у току истраживања његове примене у грађевинарству.



Слика 3.15. Нови процес производње стакла: а) Вертикални процес где се отопљено стакло спаја у доњем делу; б) Стакло *Gorilla® glass* добијено фузијом; (Извор: Belis et al., 2013: 21)

Дебљина стакла које се производи износи 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 15, 19 и 25 mm, у зависности од намене. Стандардне димензије стаклених плоча су 6 x 3,21 m. Веће димензије панела могу да се произведу (Слика 3.16), али њихов транспорт је отежан, тако да је њихова производња, за сада, заиста ретка.



Слика 3.16. Стакло дужине 25 m произведено у Кини, захтева посебну опрему за транспорт и монтажу; (Извор: Belis et al., 2013: 20)

На карактеристике стакла, поред хемијског састава, квалитета и квантитета сировина које се користе, утичу облик, као и начин на који је добијена одређена форма стакла. Финални процес обликовања стакла има огроман утицај на његове механичке особине. Дакле, његова даља употреба - примена стаклених елемената одређује начин на који ће бити обликовани. Тако, постоје неколико начина за побољшање физичко-механичких карактеристика стакла које се користи у грађевинарству, као што су полирање, каљење и ламинирање.

Производни процес стакла је континуиран процес без прекида. Са економског аспекта, веома је неповољно прекинути и поново успоставити процес производње из разлога потребног времена за постизање високе температуре пећи. Тако, фабрика *Lerobel* из Белгије, сваког часа, произведе 900 m равног стакла дебљине 4 mm, што подразумева 700 тона дневно, односно 70.000 m², или 35 пуних камиона ("*Lerobel, Strong in Glass*", 2014). Не постоји отпадни материјал који се одлаже, али исечени и поломљени комади стакла, који су добијени током процеса производње и даље обраде, се чувају и поново употребљавају, односно мешају заједно са новим материјалом за нову серију производње. Употребљени остаци стакла помажу убрзаном процесу топљења, с обзиром на то да се ови комади топе брже од других сировина чиме утичу на укупно смањење температуре топљења (Wigginton, 2002).

3.2.3 Завршна обрада и дорада

Након производње, равно стакло се може користити као коначан производ за застакљивање у грађевинарству, уз механичку обраду која треба да омогући његову уградњу, лакше руковање или испуни одређене захтеве у погледу изгледа. Такође, равно стакло као полупроизвод се даље обрађује с циљем добијања читавог низа стаклених производа различитог облика и перформанси који су неопходни да пруже могућности најразноврсније примене. У том смислу завршна обрада и дорада обухвата поступке као што су:

- Сечење, да би се уклониле оштећене ивице и произвео жељени облик и величина панела,
- Обрада ивица (брушење, и полирање), и израда отвора,

- Обрада стаклених површина у циљу декорације, засенчења и приватности (гравирање, пескарење и дезенирање стаклених површина),
- Наношење превлака,
- Обликовање (савијање) стакла,
- Термичка обрада с циљем добијања полукаљеног и каљеног стакла,
- Третман топлотом за смањење потенцијала лома индукованог присуством никл-сулфида,
- Ламинирање, с циљем побољшања перформанси након лома, сигурности у односу на спољашње утицаје, отпорности на муницију и пожар, као и звучне изолације,
- Формирање термоизолационог панела у циљу смањења губитака топлоте, и ако је конфигурисан на одговарајући начин, у циљу смањења соларних добитака и побољшања акустичких перформанси.

Сечење, обрада ивица и формирање отвора представљају, генерално, механичке процесе, односно механичку обраду. С обзиром на то да је стакло на крају производног процеса исечено на траке стандардних димензија (600 x 321 cm), у финалном процесу добија жељени финални облик који се обично постиже одређеним машинама. Тако, комплексне форме је могуће, прецизно, добити путем *CNC water-jet* технологије. Сечење се врши уз помоћ млаза воде под високим притиском (до 6.000 бари), који је пуштен кроз мале млазнице веома фокусираног протока, помешан са чврстим абразивним честицама, изазива брзу ерозију стакла на својој путањи и производи веома чисте и тачне резове (видети прво поглавље, стр. 64, Слика 1.36).

С обзиром на то да су ивице након сечења још увек оштре, неопходно је обратити их како из разлога могућих повреда, тако и из разлога који се односе на сам процес производње и даљу примену стакла¹.

¹ Обрада ивица не утиче само на оптички квалитет стакленог панела, већ и на његову стабилност. Нехомогена или оштра ивица повећава могућност оштећења стакла (напрслине, љуспе), што нарочито може бити изражено код закривљеног стакла. Из наведених разлога, начин обраде ивица неопходно је утврдити са извођачем, а у неким случајевима и према датом узорку ивица закривљеног стакла.

3.2.4 Савремене технике обликовања (закривљеног) стакла

С обзиром на то да је коришћење закривљеног стакла постало све популарније омогућавајући креирање закривљених контура, органских форми, смелих лукова и сводних конструкција неопходно је детаљно описати и објаснити различите технике обликовања. Технике обликовања које подразумевају савијање стакла могу значајно утицати на могућност формирања жељеног облика, променљивост конструктивних карактеристика стакла, а самим тим и на пројектовање стаклених омотача, као и на производна ограничења која се у поређењу са равним стаклом знатно разликују.

Два основна приступа/технике обликовања су развијена:

- Поступак хладног савијања стакла, и
- Поступак термичког савијања стакла.

Сваки од ових процеса као и њихове варијанте првенствено утичу на механичке карактеристике финалног производа – стакленог елемента, али исто тако одређују минималне као и максималне производне карактеристике, визуелни квалитет и могућност примене даљих процеса и обраде. С циљем максималног искоришћења предности различитих технологија савијања стакла, архитекте и инжењери треба да буду упознати са свим ограничењима у погледу форме, чврстоће, димензија и могућностима примене различитих третмана и финалне обраде стаклене површине, а који су наметнути различитим процесом производње. За закривљени стаклени омотач могу се користити следеће врсте стакла:

- Флот стакла,
- Полукаљена стакла,
- Каљена стакла – сигурносна,
- Ламинирана стакла – сигурносна,
- Каљена и ламинирана стакла – сигурносна, и
- Термоизолациона стакла.

као и њихове комбинације. Са аспекта геометрије стакла могу бити равна, једноструко закривљена, двоструко закривљена и комплексно закривљена.

Погрешан одабир процеса обликовања или грешке током производног процеса могу веома лако довести до оштећења или чак лома стакла због заосталих напона

изазваних силом затезања на самој стакленој површини. Ови напони услед силе затезања могу довести до изненадног лома стакла које може бити изазвано и најмањом огреботином на стакленој површини.

3.2.4 а) Поступак термичког обликовања стакла

Поступак термичког савијања стакла представља најстарији начин обликовања и добијања закривљеног стакла. Сам поступак се разликује од нове технике хладног савијања стакла првенствено зато што се у процесу користи својство стакла за повратном променом стања (енгл. *reversible phase transitions*). Увођењем топлоте, стакло може повратно променити чврсто стање флот стакла, креирајући полутечни материјал, који се затим може обликовати у разне форме. До недавно, комплексан процес производње термички обликованог стакла спречио је његово коришћење у пројектима великих размера. Нове аутоматизоване технологије производње допринеле су да термички обликовано стакло постане све више доступна опција умањујући потребно време и радну снагу потребну за израду једног елемента. У зависности од захтева самог пројекта и жељене форме, још увек се мануалном процесу даје предност.

Стакло које се данас најчешће примењује у архитектонским објектима је пливајуће (*float*) стакло добијено најсавременијим процесом производње којим се добија равно стакло потпуно паралелних и равних површина. Током производног процеса, као што је претходно објашњено, његове основне компоненте се мешају и загревају у пећи до температуре од 1.600°C. Течност затим из пећи тече у ката од истопљеног калаја и потом се појављује као континуална трака од стакла која пролази кроз процес "одгревања" где се лагано хлади до финалног чврстог стања. Термички обликовано стакло се добија обрнутим процесом од процеса добијања пливајућег стакла, тачније поновном применом топлоте на већ формиран раван стаклени панел. Процес савијања одвија се тако што се стакло поново загрева до температуре од око 600°C где поново постаје полутечан вискозан материјал и може се савити. Да би се олакшао процес обликовања могуће је применити два различита начина:

1. Термичко обликовање уз помоћ калуца (Слика 3.17а), и
2. Термичко обликовање на производној линији (Слика 3.17б).



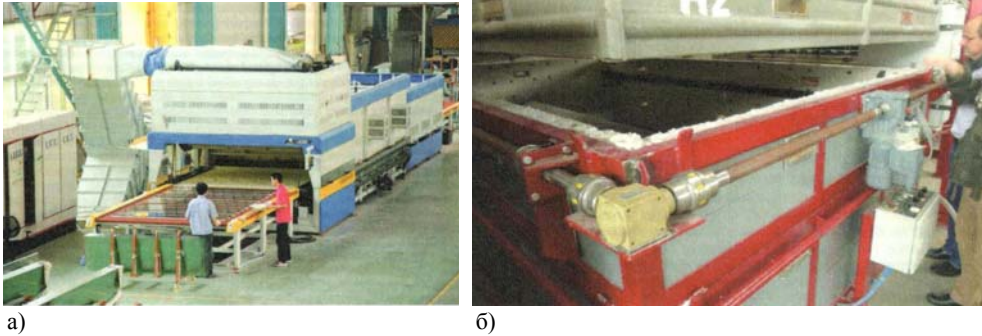
Слика 3.17. Примери термички савијеног стакла примењеног на омотачу архитектонских објеката: а) *Nardini Grappa Distillery*, Вићенца, Италија, Масимилијано Фуксас (Massimiliano Fuksas), (обликовано уз помоћ калупа); и б) *Al Hamra Tower*, Кувајт, Скидмор, Овингс и Мерил (*Skidmore, Owings and Merrill*), (обликовано на производној линији) (Извор: Преузето са а) http://www.archdaily.com/233532/nardini-grappa-distillery-bolle-massimiliano-and-doriana-fuksas/maurizio-marcato_nardini_fuksas_003-copy/, 12. 4. 2014; и б) <http://www.archdaily.com/196714/al-hamra-firdous-tower-som/>, 12. 4. 2014)

Ови начини се знатно разликују, како по карактеристикама добијеног производа (Дијаграм 3.1), тако и по различитој опреми која се користи за њихову производњу (Слика 3.18). Термичко савијање на производној линији подразумева аутоматизован процес који савија стакло у неколико минута, док термичко савијање уз помоћ калупа је процес који захтева време и радну снагу.

Дефинисани поступци у процесу термичког обликовања стакла, приказани на Дијаграму 3.1, коришћени су у мапирању целокупног процеса пројектовања и конструкције геометријски комплексног стакленог омотача (видети Поглавље 4).

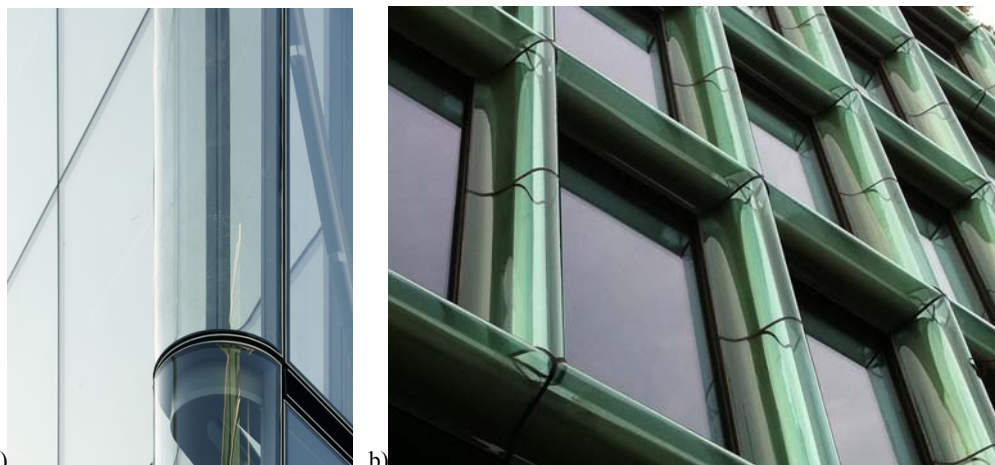


Дијаграм 3.1. Поступци/кораци у производном процесу термичког обликовања закривљеног стакла



Слика 3.18. Опрема за термичко савијање стакла: а) Опрема за термичко савијање на производној линији; б) Опрема за термичко савијање уз помоћ калупа; (Извор: Timm & Chase, 2014: 142)

Примена термички савијеног стакла у архитектонским објектима, често подразумева и примену термичке обраде (каљење и полукаљење) ради обезбеђивања додатне чврстоће и сигурности. С обзиром на то да термичко савијање и термичка обрада подразумевају увођење топлоте, неопходно их је спровести истовремено у циљу спречавања међусобног поништавања (један процес поништава други). Термичка обрада која подразумева каљење стакла је обично недоступна у случају савијања стакла уз помоћ калупа (Дијаграм 3.1), с обзиром да коришћење калупа спречава коришћење стандардизоване опреме за хлађење. Уколико форма захтева савијање уз помоћ калупа, процеси ламинирања и хемијског каљења представљају опције за постизање додатне сигурности и чврстоће. С друге стране, процес термичког савијања на производној линији омогућава термичку обраду (каљење и полукаљење) која се спроводи истовремено са процесом производње (Дијаграм 3.1).

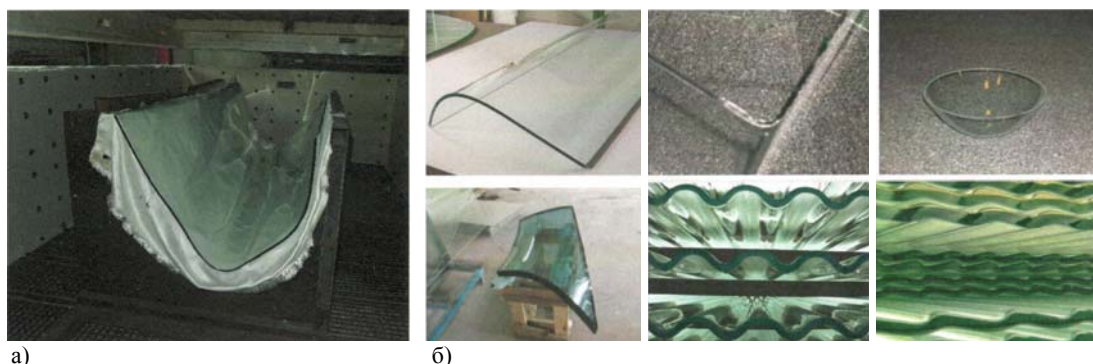


Слика 3.19. Примери малог полупречника закривљених стаклених елемената: а) *4 More London Riverside*, Лондон, Фостер и Партнери (*Foster+Partners*), 2007. год., најгора "ноћна мора" сваког извођача - стакло савијено у радијусу од 250 mm формира угао обезбеђујући визуелни континуитет стакленог омотача са изванредном финоћом; и б) *40 Bond Street*, Њу Јорк, Хецог и де Мерон (*Herzog & de Meuron*), 2006. год., савијено флот ламинирано стакло са соларном контролом и керамичким премазом (Извор: Преузето са а) <http://facadesign.us/blog/2012/02/page/4/>, 12. 4. 2014; и б) <http://www.architectsjournal.co.uk/news/the-decade-in-detail/5212323.article>, 12. 4. 2014)

Генерално, овим поступком могуће је добити широк опсег различитих облика, попут сферичних, двоструко закривљених, као и геометријски комплексних форми са великим угибима, кривама малог полупречника (Слика 3.19); минималан полупречник закривљења панела произведеног на овај начин износи 100 mm. Ипак, овај процес је тешко упоредити са процесом производње равног стакла, посебно у погледу поузданости каљења стакла (преднапрезања). С друге стране, даља дорада која подразумева ламинирање и формирање термоизолационих панела уобичајена је. Такође, квалитет термички закривљеног стакла, посебно стакла обликованог уз помоћ калупа, није сасвим упоредив са квалитетом равног стакла, не само у погледу дозвољених (геометријских) одступања, већ и у погледу вредности чврстоће стакла. Из тих разлога, неопходна је већа контрола квалитета закривљеног стакла, него у случају равног стакла.

Термичко обликовање стакла уз помоћ калупа

Основни процес термичког савијања стакла није се променио још од 19. века када је први пут примењен у архитектури. Традиционални процес, познат у свету као "слегање" (енгл. *slumping*), подразумева постављање равне стаклене плоче изнад калупа која се затим загрева до температуре између 550°C и 620°C. На овој, већ довољно високој, температури долази до промене вискозности која је у вези са смањењем Јунговим модулом еластичности (*Young's modulus*) (Neugebauer, 2013). Тако омекшало стакло уз помоћ силе гравитације пада преко калупа (понекад и у калуп) који се налази испод стакла (Слика 3.20а). С обзиром на то да стакло добија облик калупа, овај процес даје велике могућности за обликовање.



а) Челични, конкавни калуп произведен од стране искусних занатлија; б) Стаклени елементи произведени савијањем уз помоћ калупа; (Извор: а) Timm & Chase, 2014: 143; б) Neugebauer et al., 2013: 93)

На овај начин се могу добити цилиндрични, конични, сферични, параболоични и хиперпараболоични облици стаклених елемената. У данашње време овај процес се углавном одвија мануелно и може да траје од 8-10 часова да би се добио жељени облик панела у пећи. Такође, подразумева појединачно прилагођене калупе за различите геометрије стакла који се ручно израђују.

Процес деформација равних стаклених плоча је процес који настаје на високим температурама. У том смислу, стари поступак дувања стакла (како је претходно објашњено), подразумева изнова враћање стакла у пећ на температуру преко 600°C, у циљу формирања цилиндара дувањем. Температура трансформације стакла износи око 550°C. Овај поступак обликовања је могуће физички описати уз помоћ карактеристичне вискозности стакла (Слика 3.21). Вискозност (коэффициент унутрашњег трења) представља отпор којим се поједини слојеви флуида супростављају кретању једног у односу на други, односно то је врста унутрашњег трења која доводи до протока флуида константном брзином. У том смислу, значење вискозности се може препознати у процесу формирања закривљеног стакла. Растопина стакла је течна и разликује се од чврстог стања, самом чињеницом да се везе између молекулских честица услед њиховог кретања прекидају. Потребна енергија за тај процес добија се из топлоте, што подразумева да већа температура доводи до већег броја прекинутих веза (Neugebauer, 2013), односно опадању вискозности. Овај ефекат резултује већим закривљењем стакла, односно мањим радијусом закривљења. На температури од око 800°C, могуће је добити веома закривљено стакло као што је таласасто, трапезоидно и сличне форме (Слика 3.20б).



Слика 3.21. Вискозност стакла на високим температурама; (Извор: Neugebauer, 2013: 70)

Према *Warmglass*-у овај процес се одвија кроз пет подједнако важних фаза ("Warmglass, The Basic Fusing and Slumping Process", 2014):

- Фаза загревања (постепено повећање температуре од собне до температуре на којој започиње процес слегања),
- Фаза упијања/обливања (температура се одржава на одређеном нивоу за одређени временски период),
- Фаза хлађења (температура пада од највише тачке до непосредно изнад опсега хлађења/одгревања),
- Фаза хлађења/одгревања (критичан корак који ослобађа напоне у стаклу).
- Фаза хлађења до собне температуре (стакло постепено постаје довољно хладно на додир).

Фаза загревања, која се одвија између собне температуре и температуре око 650°C јесте фаза где стакло прелази из чврстог стања у полутечну форму. Како се стакло постепено загрева у овој фази, оно пролази кроз три одвојена стања. У првом, до температуре од 540°C, стакло остаје круто и крто, али још увек може доћи до пукотина или лома ако се температура нагло повећа. Ова врста температуре која изазива лом стакла назива се термичким шоком (енгл. *thermal shock*). Растом температуре, постепено, изнад 540°C, било који лепак, влага или површински загађивач сагоревају. Стакло почиње незнатно да мекша док површина стакла постаје сјајна. Термички шок се не дешава на овој температури.

У другом кораку, када температура достигне око 705°C to 760°C, стакло постепено постаје довољно меко да се укалупи. Оно почиње да сија јарко црвеном бојом. Ивице стакла могу да омекшају и да се заобле, а два комада стакла који се додирну почињу да се држе заједно. У овом опсегу температуре започиње слегање. Ако се загревање настави изнад температуре 720°C ка температури од 820°C, боја стакла се појачава и постаје све више црвена. Стакло у овом опсегу се потпуно слегло, па чак и почиње да се протеже ван форме калупа. Комплетно спајање два или више комада стакла у једно, одвија се на око 815°C. Изнад те температуре, стакло постаје све течније. Вештачко ливење (*pate de verre*) се одвија у овом опсегу температуре.

У трећем кораку, како температура креће изнад 815°C, стакло почиње да светли јарко црвеном бојом. Мехурићи могу да се покрену ка површини стакла.

До тренутка када температура достигне око 925°C, стакло постаје "путерасто" и може се померати уз помоћ алата. Техника манипулације растопљеног стакла са алатом се назива чешљање или грабуљање. Ова техника манипулације се мора примењивати веома пажљиво и само након извесног искуства у коришћењу калупа за термичко савијање стакла.

Фаза упијања се дешава на највишој температури у целокупном поступку. Ова температура је око 650°C-705°C за слегање, али она може бити већа или мања за различите процесе као што су полирање, чешљање, или ливење.

Током процеса термичког слегања, дужи период упијања узрокује да се стакло боље прилагоди калупу. Време упијања такође зависи од других фактора као што су тип стакла, дебљина, жељена финална форма, као и врста пећи у којој се одвија овај процес. Упијање може трајати како кратко око једног минута тако и дуже око један сат или више.

Такође, неопходно је истаћи да важна карактеристика процеса термичког обликовања стакла уз помоћ калупа подразумева да сва накнадна обрада (наношење превлака/премаза и слично) која се изводи уз помоћ топлоте је практички непримењива на стаклене панеле добијене овим поступком јер свако накнадно загревање би допринело промени оригиналане форме. Сама форма спречава употребу стандардизоване опреме. Према европским "Смерницама за пројектовање конструкција од стаклених компоненти" (Feldmann et al., 2014) закривљено пливајуће стакло показује сличне карактеристике у погледу чврстоће као и равно пливајуће стакло. Дакле, важна чињеница је да ако форма панела захтева термички поступак производње уз помоћ калупа, онда могуће опције за добијање сигурносног стакла и његове веће чврстоће су следеће:

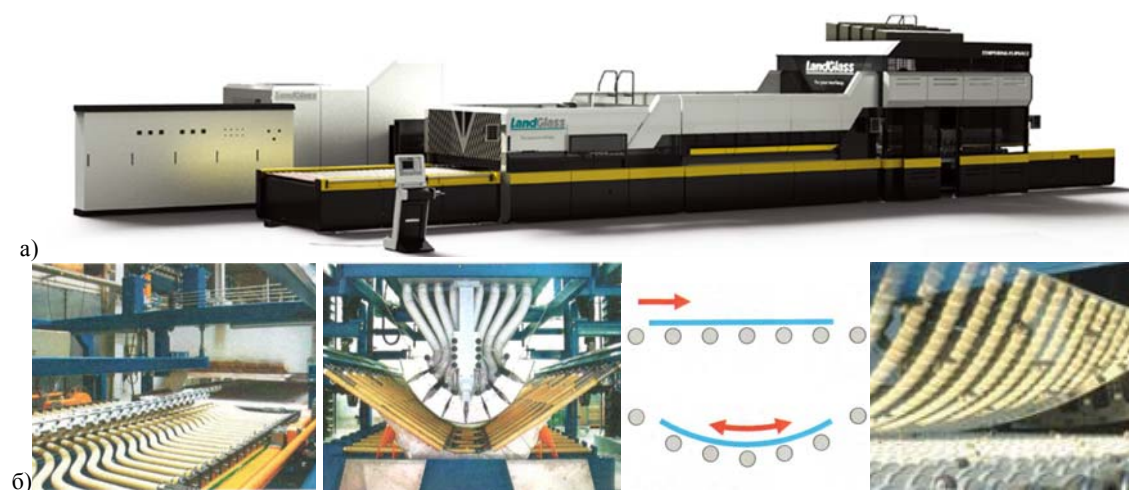
- Процес ламинирања, или
- Хемијски процес ојачања стакла.

Термичко обликовање стакла на производној линији

Економска и временска ограничења пројеката великих размера као и високих објеката намећу виши ниво стандардизације при примени закривљеног стакла, него што је то омогућено традиционалним начином обликовања помоћу калупа. Најновији технолошки развој аутоматизованог савијања стакла омогућио

је да савијено стакла буде економски ефикаснија и бржа опција уколико је форму панела могуће прилагодити постојећим ограничењима. Процес познат као савијање на производној линији или уз помоћ ролера (eng. *online bending*) користи роботски притисак за брзо добијање жељене форме стакла као и истовремено третирање топлотом - каљење у току неколико минута на производној линији. То се дешава у машини за савијање након што стакло изађе из пећи и пре него што буде подвргнуто процесу преднапрезања испуштањем хладног ваздуха. Ролери су прилагођени конкавном облику стаклене плоче чија оса је оријентисана паралелно или дијагонално у правцу ваљака. У циљу избегавања заосталих напона у панелу који могу настати због неравномерног хлађења, неопходно је да се стаклена плоча константно креће током процеса хлађења с обзиром да напони затезања на њеној површини могу довести до изненадног оштећења стакла.

Савремена машина за савијање (Слика 3.22) састоји се из пећи и програмиране пресе кроз коју стакло пролази. У пећи се стакло загрева до жељене температуре, док се у преси савија и кали. Преса је подељена на индивидуалне делове померљиве помоћу жица, чији саставни део чине и млазнице које омогућавају произвођачу да индивидуално одреди угао између појединачних делова, посебно повећавајући, односно смањујући полупречник савијања сваког стакленог панела. Овим упоредним поступком превазилазе се потешкоће каљења савијеног стакла добијеног уз помоћ калуца.



Слика 3.22. а) Производна линија; и б) Преса и ролери за производњу термички савијеног каљеног стакла - могуће "С" и "В" форме; (Извор: а) Преузето са http://www.alibaba.com/product-detail/LandGlass-Glass-Forced-Convection-Bending-Tempering_1780173459.html?s=p, 13. 4. 2014; б) Neugebauer et al., 2013: 94)

Неопходно је нагласити да се сви значајни параметри разликују од форме до форме, тако да је, ради добијања добрих резултата, неопходно да компаније које се баве обрадом и савијањем стакла претходно стекну довољно искуства. Две главне мане овог процеса савијања јесу те да је могуће обликовати само цилиндричне форме, као и да се појединачне стаклене плоче за ламинирано сигурносно стакло морају произвести у одвојеним фазама. Тако, због дозвољених толеранција појединачних савијених стаклених плоча, за добијање ламинираног (вишеслојног) стакла морају се применити дебљи међуслојеви.

Најчешће, примена стакла у омотачу зграде захтева поступак каљења (термичке обраде) у циљу побољшања механичких својстава, односно повећања његове чврстоће у циљу постизања жељене димензије панела, трајности и сигурности. Док је код обичног равног стакла циљ да се равномерним одгревањем и хлађењем добије стакло у коме нема напона (*annealed glass*), процес каљења има за циљ стварање равномерно распоређених напона у стаклу.

Највећу предност овог поступка представља, управо, могућност истовременог процеса каљења (полукаљења) и савијања, с обзиром на то да се оба процеса заснивају на истој опреми неопходној за загревање стакла скоро до температуре омекшавања од око 650°C на којој се стакло кали и савија, а затим и равномерног али наглог хлађења. С обзиром да је стакло релативно лош проводник топлоте, површина, већ савијене, стаклене плоче хлади се брже од унутрашњег слоја. На тај начин, током процеса хлађења (енгл. *quenching*), у површинским слојевима стварају се напони притиска, а у унутрашњем делу напони затезања. Каљено стакло се веома брзо хлади, што резултује његовом чврстоћом на притисак која је 4-5 пута већа у односу на пливајуће (*float*) стакло. Полукаљено стакло се хлади спорије, што доприноси његовој чврстоћи на притисак која је 2 пута већа у односу на пливајуће стакло.

Многи прописи захтевају примену каљеног или делимично каљеног стакла, што подразумева да је приликом примене закривљеног стакла неопходно испунити захтеве за одређеном чврстоћом стакла. На тржишту, тренутно постоји велики број уређаја за савијање стакла који су опремљени алатом који омогућава савијање стакла како по једној оси, тако и комплексније геометрије. Међутим, грађевинска индустрија, у овом тренутку, углавном користи машине које савијају

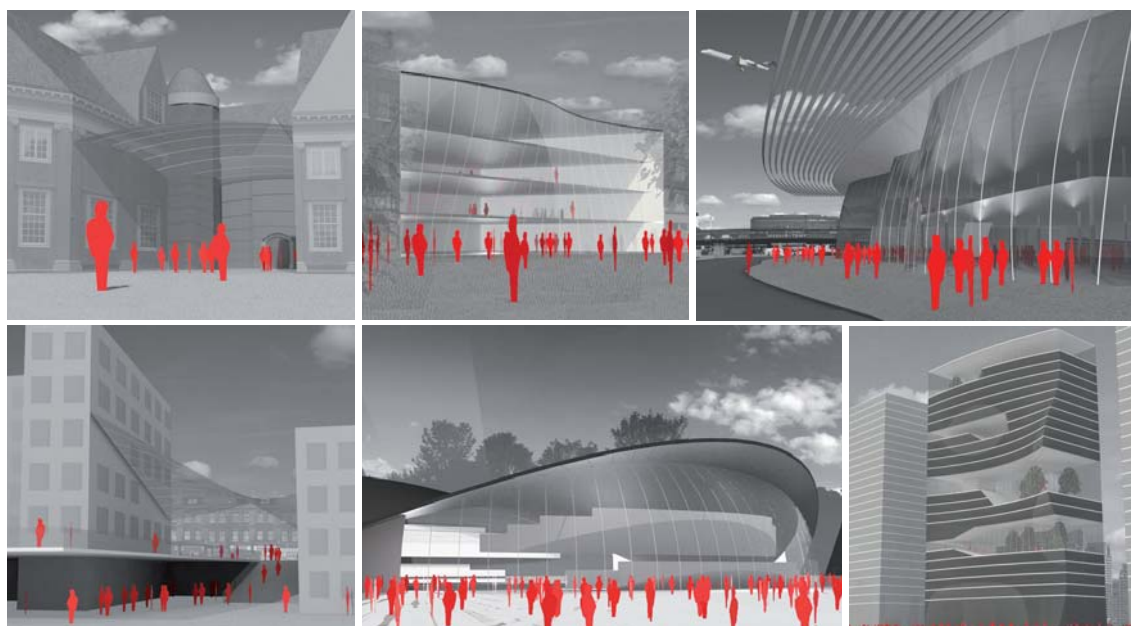
једноструко закривљено стакло. Машине које производе двоструко закривљено стакло још увек подразумевају појединачну, ручну израду калупа по наруџбини. Резултат тога је да технологија израде двоструко закривљеног стакла још увек није заступљена у великој мери, примењујући се углавном у ауто-индустрији и индустријском дизајну, где цена бива компензована економичношћу обима производње закривљеног стакла.

Такође, неопходно је истаћи да иако према већини аутора (Timm & Chase, 2014; и Neugebauer, 2013) постоје ограничења у погледу производње термички савијеног и каљеног стакла уз помоћ калупа, као и двоструко закривљеног стакла произведеног на производној линији уз помоћ пресе (притиска), европске "Смернице за пројектовање конструкција од стаклених компоненти" (Feldmann, 2014) дефинишу ове производе, односно методе њиховог обликовања као један од могућих начина за добијање закривљеног стакла.

3.2.4 б) Поступак хладног савијања стакла

Савремена грађевинска индустрија је данас у константном успону пружајући одговоре на све постављене захтеве. С једне стране, архитекте својим идејама гурају индустрију напред с циљем развијања техника и материјала који могу да материјализују њихове напредне идеје и дигитално креиране форме. С друге стране, занимљиви материјали и технологије су генерисани да помогну креирању одговарајућих техника. У процесу пројектовања геометријски стандардних форми, креирање форме представља почетну фазу, након чега следи њена материјализација. У случају геометријски комплексних, слободних форми, с циљем постизања одговарајућих резултата, овакав приступ укључује архитекте и инжењере са великим искуством. Међутим, често у недостатку одговарајућих информација, крајњи резултат се може знатно разликовати од почетне форме, односно идеје. Из тих разлога, другачији приступ који подразумева индустрију спремну да пружи пројектно оријентисане информације и архитекте који добро познају различите карактеристике материјала и геометријске параметре, пружа веће могућности за успешну материјализацију. Пример за то представља и нова техника обликовања стакла хладним савијањем.

Недавни примери примене нове технике хладног савијања отварају могућности за примену двоструко закривљених стаклених ламинираних панела у циљу реализације закривљених стаклених омотача у виду љуски, с обзиром на то да њихови оптички и технички квалитети испуњавају захтеве за глатко закривљеним и транспарентним површинама у архитектонским објектима (Fildhuth & Knippers, 2011). Форме стаклених површи које је могуће реализовати на овај начин, базиране су на геометријским карактеристикама љуски које би биле састављене од ових елемената (Слика 3.23). Основне криве ($k_1 = \frac{1}{R_1}; k_2 = \frac{1}{R_2}$) и Гаусова крива ($K = \frac{1}{R_1} \cdot \frac{1}{R_2}$), како је приказано у Поглављу 1 (стр. 34, Слика 1.9б), заједно са дефинисаном површином хладно савијених стаклених панела представљају важне параметре за обликовање хладним савијањем. Овом техником отворена је могућност примене стаклених површи у виду љуски (Bagger, 2010) на архитектонским објектима, како на вертикалним површима (фасадама) тако и на хоризонталним (крововима), као и на комбинованим. Други важни параметри, односно ограничења представљају (линеарни) ивични ослонци панела, као и панелизација стакленог омотача на закривљене стаклене елементе чије димензије су изводљиве. Начин ношења (конструктивне везе), као и шема панелизације су одлучујући параметар за финалне, обликовне и конструктивне карактеристике.



Слика 3.23. Могуће форме (позитивне и негативне Гаусове криве) стаклених омотача – љуски, чије елементе је могуће обликовати поступком хладног савијања;
(Извор: Fildhuth & Knippers, 2011: 316, 318)

Концепт хладног савијања равних панела познат је концепт у индустрији материјала као што су пластика, дрво и метал. И поред великог броја изграђених објеката и изведених експеримената у научним истраживањима у протеклих 20 година у којима је стакло примењено као елемент конструкције, стакло се у широј јавности још увек сматра материјалом који је ломљив и са малом могућношћу за постизање веће чврстоће. Из тих разлога, је тешко било претпоставити да обликовање хладним савијањем може бити прави избор у случају закривљених стаклених омотача. Међутим, данас, ова техника све више бива заступљена у обликовању закривљеног стакла. У Србији, до сада, ова техника није била позната.

Техника хладног савијања стакла настала је у Европи, где је, већ неко време неколико компанија за пројектовање и инжењеринг истражују. Компанија *RFR* из Париза је међу првима уочила могућности новог начина обликовања као алтернативну методу за креирање закривљених стаклених површи још од раних деведесетих година прошлог века. За разлику од традиционалних техника (термичко савијање стакла), нови начин обликовања стакла може знатно да обезбеди естетски квалитет, умањи укупне трошкове примене закривљеног стакла, али исто тако и да омогући примену како каљеног и полукаљеног стакла карактеристичне чврстоће, тако и скоро свих премаза и превлака. Главна предност технике хладног савијања је елиминација визуелних дисторзија које настају поступком термичког савијања стакла. Овом техником могуће је постићи глатку, скоро без изобличења, закривљену стаклену површину. Такође, значајна карактеристика је непромењеност физичких особина стаклених плоча, јер за разлику од термичког савијања, хладно савијање не ствара промене у структури, већ само промену у форми. Ово омогућава сигурност планирања конструктивних карактеристика стакла чак и у случају веома необичних форми. Из тих разлога, хладно савијена стакла су погодна за примену у функцији конструктивних елемената услед преузимања спољашњег оптерећења својим примарно мембранским деловањем. Међутим, иако хладно савијање доприноси глаткој стакленој површини, карактеристике материјала и форме хладно савијеног стакла ограничавају опсег одговарајуће двоструко закривљене геометрије. Главно

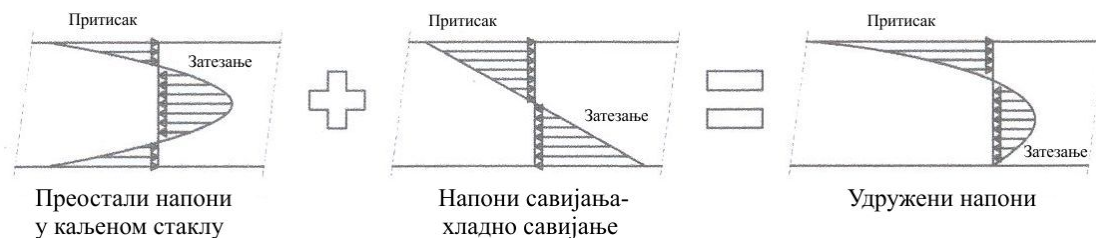
ограничење самог процеса је дозвољена закривљеност, коју је неопходно претходно размотрити посебно за сваки пројекат.

У случају када реализација сложене геометрије стаклене фасаде укључује технологију хладног савијања стаклених панела, одлуку о њиховом начину обликовања треба донети у раној фази пројекта и у сарадњи са консултантом фасаде. У том смислу, неопходно је следити 5 основних поступака/корака (Дијаграм 3.2), без обзира да ли се ради о тачкастој или линијској вези стаклених елемената са подконструкцијом.



Дијаграм 3.2. Поступци/кораци у производном процесу хладног савијања закривљеног стакла; (Извор: Према Rogers, 2014: 7)

Ова техника користи предности линеарно еластичне деформације стакла. Сам поступак хладног савијања базиран је на преднапрегнутом стању каљеног стакла. Напони савијања се суперпонирају са заосталим напонима преднапрегнутог стања (Слика 3.24). Теоретски, напони који настају при процесу хладног савијања могу компензовати напоне затезања каљеног стакла у потпуности. Међутим, савијање до ове границе не омогућава додатно оптерећење као што је то неопходно предвидети према стандардима (Feijen et al., 2012).



Слика 3.24. Суперпонирање заосталих напона преднапрезања и напона савијања при хладном савијању стакла (Извор: Feijen et al., 2012: 831)

Према Фејну (Feijen et al., 2012) напони услед хладног савијања могу се прорачунати према формули:

$$\sigma = \frac{E \cdot t}{2 \cdot R} \quad (3.5)$$

где је:

σ - напони савијања,

E - модул еластичности стакла,

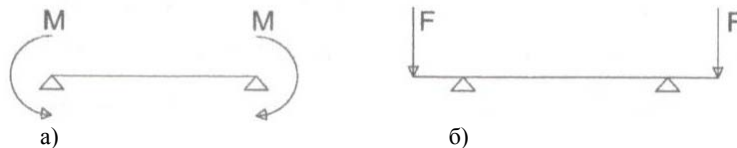
t - дебљина стакленог панела,

R - полупречник савијања.

Такође, према параметарском истраживању (Feijen et al., 2012), базираном на нелинарној методи коначних елемената, а према статичкој шеми конзолне греде са оптерећењем на крају конзоле, резултати напона и деформација у односу на варијације дебљине и полупречника савијања показали су очекиване вредности према датој формули (3.5). Хладно савијање је симулирано помоћу контактне симулације да би се боље објаснила расподела напона током и након савијања. Мање предвиљиви су резултати напона услед варијације ширине панела, али с обзиром на постојање корелације између максималног напона и очекиваног напона при хладном савијању добијеног помоћу формуле (3.5), могуће је предвидети максималне напоне за одређену ширину панела. Средина панела код веће ширине панела је слободна и има тенденцију да се исправи. Овај ефекат, након одређене вредности односа дужине и ширине панела постаје видљив одражавајући се у рефлексији стакла, мада је тешко одредити границу до које је ово прихватљива деформација. Оквирно, може се рећи да је то однос ширине/дужине од 1:2 (Feijen et al., 2012).

Двоструко закривљена стаклена површина може бити креирана помоћу једноструко закривљених елемената што резултује спајањем по једном од два правца главних кривих, док је стакло закривљено у другом правцу. У овом случају, чак и мала угаона одступања могу бити видљива услед светлосне рефлексије стаклене површине (видети Поглавље 1, Слика 1.58). Применом двоструко закривљених панела омогућен је оптички квалитет који одговара захтевима транспарентног двоструко закривљеног омотача савремених архитектонских објеката.

Геометријски, могуће је креирати радијус применом истог момента савијања на две супротне стране хладно савијеног стакленог панела, као што приказује статичка шема (Слика 3.25а).



Слика 3.25. Статичка шема: а) за постизање перфектног радијуса; б) апроксимативног радијуса; (Извор: Feijen et al., 2012: 831)

У пракси је тешко применити константан моменат савијања на стаклени панел. Креирањем препуста и применом силе на оба краја (Слика 3.25б), средњи део стакленог панела може формирати савршен радијус, с обзиром на то да крајеви статички представљају греде са препустом и оптерећењем на крајевима.

Хладним савијањем стакла могуће је постићи минималну закривљеност од 0.5° по метру у зависности од дебљине стакла (Слика 3.26). Што је већа дебљина и крутост стакленог елемента, то је већа вредност минималног полупречника савијања с обзиром да процес хладног савијања узрокује повећање трајних напона затезања у стаклу. Ови напони најчешће чине/учествују са до 60% од укупног капацитета носивости стакленог елемента, због чега се обично користи каљено стакло са високом чврстоћом (Weber, 2009). Може се рећи да су у току различита истраживања ефикасних метода прорачуна различитих врста хладно савијеног стакла у циљу дефинисања јасних ограничења и услова закривљења као и тестирања различитих техника савијања.



Слика 3.26. Минимална закривљеност стакла од 0.5° по метру дужном (тешко уочљива у односу на контролну праву линију) коју је могуће постићи процесом хладног савијања стакла дебљине 15 mm

Тако, могући минимални полупречник, изводљив за једноструко-закривљено стакло добијено хладним савијањем је приближно дат односом момента савијања (M) и криве (κ) према једначинама (Fildhuth & Knippers, 2011):

$$k = \frac{1}{R} = \frac{M}{E \cdot I} \quad (3.6)$$

$$k = \frac{1}{R} = \frac{\sigma_o}{E \cdot z_o} = -\frac{\sigma_u}{E \cdot z_u} \quad (3.7)$$

где је:

M - моменат савијања,

R - полупречник савијања,

k - крива,

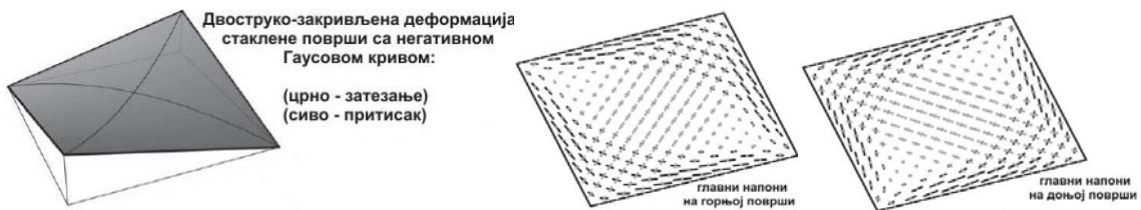
E - модул еластичности стакла,

I - моменат инерције,

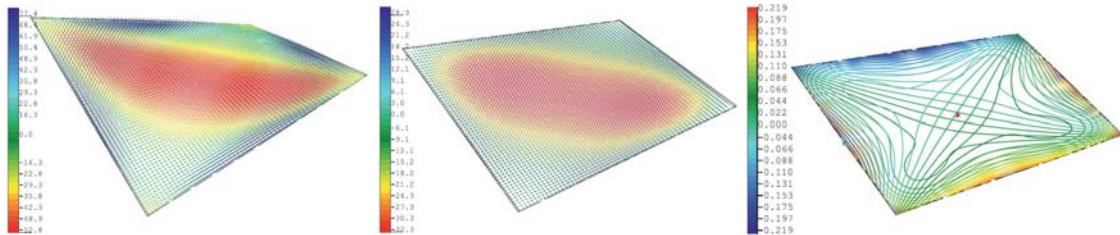
σ_o и σ_u - напони савијања на горњој и доњој површи стакленог панела,

z_o и z_u - удаљеност горње и доње површи панела од неутралне равни (оса).

То подразумева да закривљеност зависи од дебљине стакла и могуће вредности напона затезања на површини стакла. Тако, гранична вредност напона од 25 МПа омогућава радијус савијања од 5 m за дебљину стакла од 3 mm, односно радијус око 9 m за дебљину стакла од 6 mm (Fildhuth & Knippers, 2011). Насупрот томе, дебљина стакла није одлучујућа за постизање одговарајуће деформације, с обзиром на то да двоструко закривљена форма се може једино постићи истовременом применом силе на што већи број тачака с обе стране панела, јер, у супротном, стаклени панел тежи да се врати у једнострукто-закривљену форму. Двоструко закривљена деформација стакла са негативном Гаусовом кривом резултује малим, једнаким моментима савијања и значајним силама кроз стакло које показују карактеристике мембране – силе затезања дуж ивица и силе притиска око центра закривљене површи (Слика 3.27). У том смислу, крутост стаклене плоче и тиме његове димензије, као и однос дебљине и модула еластичности представљају главне елементе процеса деформације двоструко-закривљених, не-развијених форми и резултујућих напона. То подразумева да су деформације стакла које је могуће постићи ограничене максималним дозвољеним напонима у стаклу (Слика 3.28).



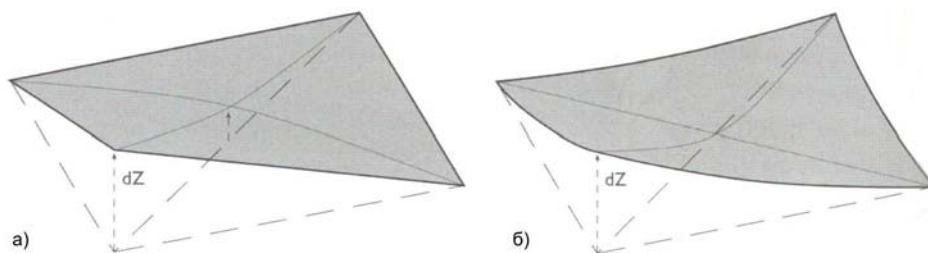
Слика 3.27. Двоструко-закривљена деформација стакла са негативном Гаусовом кривом резултује малим, једнаким моментима савијања и значајним силама кроз стакло које показују карактеристике мембрана – силе затезања дуж ивица и силе притиска око центра закривљене површи; (Извор: Fildhuth & Knippers, 2011: 317)



Слика 3.28. Напони услед двоструко-закривљене деформације стакла са негативном Гаусовом кривом, ламинираног стакленог панела димензија 3,0 x 3,0 m од 2 x 10 mm каљеног стакла и 3 mm међуслоја (SGP): а) главни напони при максималној сили постигнутој хладним савијањем; б) главни напони након еластичног спајања и опуштања стакла и међуслоја; ц) напони смицања у међуслоју (SGP) након еластичног спајања и опуштања; (Извор: Fildhuth & Knippers, 2011: 317)

С друге стране, примена четвороугаоних панела на геометријски комплексној (слободно закривљеној) форми има естетске и економске предности. С друге стране, то најчешће подразумева да је један од четири угла сваког четвороугаоног панела изван равни, узрокујући уврнуту деформацију стакленог панела. У одређеној мери, панели су у стању да поднесу овај тип деформације узимајући у обзир сопствено оптерећење, као и оптерећење од ветра и снега. С обзиром на то да је овај приступ обликовању био у потпуности нов, самим тим није био заснован на теоретским основама. Прва примена хладно уврнутих панела (уједно двоструких и ламинираних) била је на стакленом омотачу градске куће у *Alphen aan den Rijn*, у Холандији (видети Прилог 1, Слика П1.79), као својеврстан експеримент. Термоизолациони панели максималних димензија 90 x 200 cm, који се састоје од спољашњег каљеног стакла дебљине 8 mm и унутрашњег ламинираног каљеног стакла дебљине 2 x 4 + 2 mm, уврнути су ван своје равни за максимално 40 mm (Eekhout & Staaks, 2012). На овом пројекту приказана је практична примена хладног увртања, али истовремено је постављено низ питања која се односе на законитости и ограничења његове примене. Тако, значајно је у случају тачкасто ношених панела задржати првобитно постигнуту деформацију (форму), с циљем глатког повезивања суседних панела чије ивице су равне.

Истраживање законитости хладног увртања стаклених елемената, спроведено је 2003. године од стране Дри Стакса (Dries Staaks), студента техничког универзитета у Ајндховену. У лабораторији компаније *Ostatube*, он је установио да се стаклени панели могу уврнути еластично, на начин да се деформишу симетрично креирајући хипар површ (видети Поглавље 1, стр. 50, Табела 1.2), све док принудна деформација (одступање једног угла од равни) је мања од $16(x)$ дебљина панела (Слика 3.29а). Веће увртање од ове границе, проузроковаће деформације које ће резултовати у једносмерном савијању дуж краће дијагоналне осе. Како је претходно поменуто, двоструко закривљен, уврнути панел узрокује (мембранска) напрезања која подразумевају притисак у средини, и затезање по ивици панела. У случају линеарног повећања увртања, долази до значајног повећања напрезања све док притисак не узрокује извијање панела и тиме промену деформације (Слика 3.29б). Износ увртања у којем долази до нестабилности линеарно се односи на дебљину панела, материјал, и димензије, осим за однос дужина/ширина. За мало увртање, напони су равномерно расподељени и линеарно се повећавају у односу на дебљину панела. Са повећањем увртања, долази до повећања напона (већем од линеарног) услед повећања утицаја мембранског напрезања. Генерално, уврнута геометрија панела са деформацијом до $50\text{-}100\text{ mm/m}^2$ ширине панела је могућа применом каљеног стакла (Eekhout & Staaks, 2012).



Слика 3.29. Шема могућих деформација стакленог панела: а) симетрична деформација коју стаклени панели могу да поднесу до утврђене границе (dZ_{nst}); б) промена у начину деформације (једносмерна деформација) која настаје изнад утврђене границе нестабилности (dZ_{nst}); (Извор: Eekhout & Staaks, 2012: 218)

Главни циљ истраживања је био могућност утврђивања тачке нестабилности са изненадним променама у начину деформације. Тако је, комбинацијом емпиријске, нумеричке и аналитичке анализе, креирана теорија названа Стаксова теорија. Теорија је омогућила предвиђање нестабилности деформација имајући у виду различиту врсту материјала, дебљину, димензије, као

и однос дужине/ширине стакленог панела, и може се исказати следећим закључцима:

1. Нестабилност величине dZ_{nst} у великој мери зависи од материјала,
2. Величина dZ_{nst} и дебљина панела (t) су линеарно повезани: за квадратну геометрију величина $dZ_{nst} = 16,8 \times t$,
3. За однос Дужина/Ширина > 1 , величина dZ_{nst} се повећава; за однос Дужина/Ширина = 2, величина $dZ_{nst} = 1,3 \times 16,8 \times t$,
4. Нестабилност величине dZ_{nst} у великој мери зависи од величине панела (подразумевајући одсуство оптерећења ван равни),
5. Напони су, приближно, линеарно повезани у односу на величину dZ за $dZ_{nst} < t$ (главни напони),
6. Напони за $dZ = dZ_{nst}$ су, приближно 165% већи у поређењу са проценом главних напона.

Европске "Смернице за пројектовање конструкција од стаклених компоненти" (Feldmann et al., 2014) дефинишу ову технику обликовања, узимајући у обзир приличну флексибилност стакла захваљујући ниском модулу еластичности (око 70.000 МПа), што даје могућност његовог значајног савијања без лома. То се посебно односи на веће стаклене панеле који се лакше савијају. Ипак, према датим препорукама, у току примене технике хладног савијања неопходно је водити рачуна о следећем:

- Хладно савијање изазива стално напрезање, а самим тим и сталне напоне у стакленом панелу, који се морају узети у обзир приликом процене његове чврстоће и у комбинацији са додатним (спољашњим) оптерећењем с обзиром да је стакло осетљиво на трајање оптерећења,
- Приликом хладног савијања термоизолационих панела, посебну пажњу треба обратити на изазване напоне у заптивачима (полимери за заптивање), полимерском међуслоју и дистанцеру. Прекорачени напони могу да доведу до губитка својства непропустљивости влаге термоизолационог панела,
- Без обзира на систем ослањања стакла на подконструкцију (силиконска веза, покривни профил, тачкасто ослањање), та веза треба да подржи не-занемарљиво оптерећење настало услед хладног савијања, због чега је неопходно проверити њену чврстоћу и деформације,

- Када се ради о савијању ламинираног стакла, неопходно је узети у обзир индиковане напоне у међуслоју и неусклађеност стаклених слојева на његовим ивицама-ободу, који могу допринети ефекту деламинарања (одвајања међуслоја) на ивицама. Међутим, такође треба узети у обзир да ће након померања међуслоја, који је изложен перманентном напрезању, доћи до његове "релаксације", што за последицу има слабљење напона у међуслоју и повећање напона у стакленом панелу у целости. Разлог томе је губитак смичуче везе између стаклених слојева. Због овог ефекта, за савијање ламинираног стакла, потребно је узети у разматрање две фазе:
 1. прва, фаза монтаже када је оптерећење услед деформације примењено у веома кратком времену (неколико минута), што резултује ламинираним стаклом које постаје круће; у овој фази треба узети у обзир и утицај температуре на начин смицања самог међуслоја;
 2. друга, дуготрајна фаза, када је полимерски међуслој већ померен што резултује мање крутим стакленим панелом.

Поред тога, неопходно је разумети и бити упознат са свим ограничењима ове технике обликовања. На овај начин могуће је савити стакло само до одређеног полупречника пре него што се сломи. Према Панвицу (Maic Pannwitz), менаџеру фирме *Seele Sedak* из Немачке, високо квалитетно хладно савијено стакло може достићи димензију од 3,30 x 15 m са максималним радијусом савијања око $r > 9$ m (Rogers, 2014). Такође, у односу на традиционалне технике (термичко савијање стакла) не постоје непосредне промене у стаклу из разлога што је стакло једноставно механички приморано у жељену форму. Неопходно је да примењена дебљина и постигнута форма резултују насталим напонима који су испод дозвољене границе. Ипак, треба узети у обзир да су неке перформансе стакла након дужег временског периода слабије изражене (Neugebauer, 2014).

С друге стране, такође, треба имати у виду да стакло представља само део система застакљења, с обзиром на то да хладно савијање утиче на напоне различитих компоненти. Иако се говори о хладном савијању стакла, мора се узети у обзир да се, такође, савијају и силикон, заптивачи постављени по ивици термоизолационих панела, оквир, ваздух и слично. У том смислу, неопходно је сагледати сваку компоненту приликом процеса савијања.

Према Рубису (Ken Rubis), инжењеру у фирми *Dow Corning*, уобичајено произвођачи захтевају да сопствено оптерећење стакленог панела на структурални силикон и секундарну силиконску заптивку буде испод 0,0069 МРа. У том случају, сопствено оптерећење подразумева и силу унутар стакла која покушава да врати стакло у првобитно стање (раван панел). Тако, у случају полисобутилена (*polyisobutylene-PIB*), структуралног силикона и заптивача неопходно је пажљиво спровести савијање, с обзиром на то да поменута унутрашња сила у стаклу деформише овај силикон, потенцијално отварајући могућност за истицање гаса и улазак влаге унутар ТИ панела. Према Кимберлину (Jon Kimberlain), инжењеру у фирми *Dow Corning*, поступак савијања стакла ће проузроковати оптерећење у секундарном силиконском заптивачу које треба укључити у прорачун оптерећења заједно са сопственим оптерећењем и оптерећењем од ветра. Неопходно је имати у виду да се деформације стаклених панела могу десити на неочекивани начин. Тачније, у зависности од момента савијања могу изазвати извијање, притисак и затезање стакла што ће изазвати померање заптивача. Из тих разлога, препорука је да се спроведу инжењерске анализе с циљем обезбеђивања интегритета како унутрашњег ваздуха, тако и секундарног силиконског и структуралног силиконског заптивача. У томе може да помогне анализа методом коначних елемената (Rogers, 2014).

И поред различитих истраживања и тестирања која се спроводе, за примену технике хладног савијања није потребно посебно тестирање. Међутим, неке компаније су установиле своје процедуре за спровођење ове технике који подразумевају свеобухватне тестове квалитета које спроводе у својим лабораторијама и полигонима. Поред теоријских верификација које се односе на особине стакла подвргнутог разним типовима оптерећења (сопствено, ветар, снег и корисно), израђује се модел фасаде с циљем експерименталног утврђивања капацитета носивости и отпорности на ветар и друге утицаје, као и испитивање заостале носивости. Такође, осим мерења деформација током структуралног и динамичког тестирања, неопходно је утврђивање заптивености омотача у односу на инфилтрацију ваздуха и водонепропустљивост. То подразумева испитивање помоћу вакуум коморе и динамичких тестова на оптерећење од ветра, као и клима коморе за дугорочно тестирање и симулацију утицаја промене временских услова.

С циљем обезбеђивања јединствене естетике и уштеда омогућених овим поступком обликовања, две основне технике хладног савијања стакла се користе:

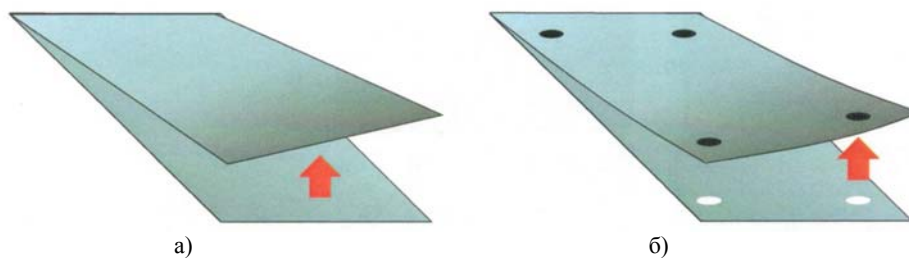
1. савијање механичким путем, директно на градилишту или у фабрици, и
2. савијање у току процеса ламинирања (у аутоклаву или вакумској кеси).

Хладно савијање механичким путем

Произведено равно стакло се савија на градилишту током процеса монтаже. Услед употребљене снаге и у зависности од отпорности, стакло се механички савија помоћу спољашњег контактеног притиска, гурањем или повлачењем његове ивице или угла у циљу постизања жељеног испупчења или закривљења. Задржавање стакла у жељеној форми постиже се причвршћивањем, односно механичким фиксирањем за подконструкцију, које подразумева додатне елементе носеће конструкције (линеарне или тачкасте), у виду покривних елемената.

Две врсте закривљења се могу разликовати:

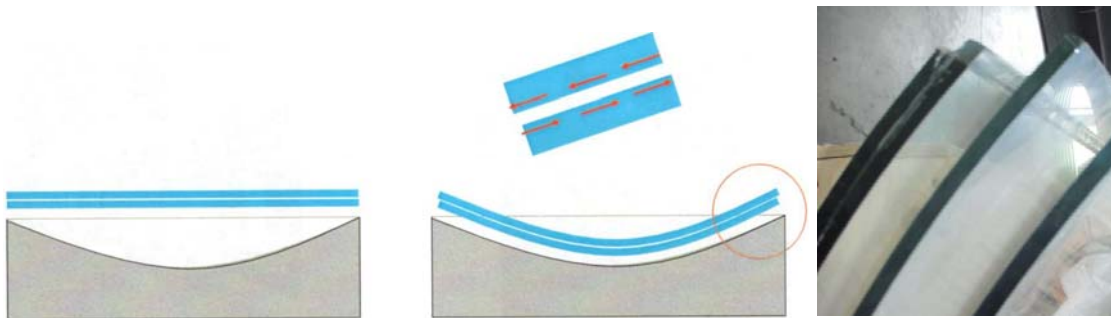
- Савијање у цилиндричну форму (једноструко закривљење), када суседне ивице остају паралелне а две закривљене (Слика 3.30а),
- Извијање у двоструко закривљену форму, када је један угао померен из равни док странице остају равне али не и паралелне (Слика 3.30б).



Слика 3.30. Механичко савијање стакленог панела помоћу спољашњег контактеног притиска, које захтева држање закривљеног стакла у жељеној форми и његово причвршћивање помоћу линеарних или тачкастих елемената носеће конструкције: а) симетричан спољашњи контактени притисак за постизање једноструке закривљености; б) асиметричан спољашњи контактени притисак за постизање двоструке закривљености; (Извор: Neugebauer et al., 2013: 91)

Хладно савијање поступком ламинирања

Други начин задржавања постигнуте форме могуће је постићи помоћу истовременог процеса савијања и ламинирања стаклених плоча са крутим међуслојем (Слика 3.31), без додатних елемената носеће конструкције.



Слика 3.31. Хладно савијање стакленог панела помоћу поступка ламинирања, који подразумева постизање круте везе (на смицање) између стакла и међуслоја, и могућност добијања неравномерних ивица овим поступком; (Извор: Neugebauer, 2013: 92, и Аутор)

Компанија *Seele* имала је пресудну улогу у развоју ове нове технологије савијања стакла процесом ламинирања (Neugebauer, 2014), која подразумева постизање круте везе (на смицање) између стакла и међуслоја, у циљу могућности производње екстремно великих, закривљених стаклених панела.

У том смислу, у случају двоструког закривљења, неопходно је применити деформацију посебно на стаклене плоче од каљеног стакла и међуслој уз помоћ одговарајуће потконструкције (калупа) (Слика 3.24), која ће задржати дату форму током процеса ламинирања. Након ламинирања, које подразумева топлоту и притисак у аутоклаву, ламинирано стакло се скида са потконструкције. Након почетног спајања, финално стање деформације ће бити постигнуто у зависности од својства отпорности на смицање самог међуслоја. Материјал који има висок степен краткорочне и дугорочне отпорности на смицање у поређењу са најчешће коришћеном - *PVB*² фолијом је *SentryGlas®Plus 5000 (SGP)*³. Такође, унутрашњи напони (до око 20–35 МПа) који настају у међуслоју услед хладног савијања се морају узети у обзир за димензионисање целокупне структуре.

² *PVB* - пластична поливинилбутирал (енгл. *Poly Vinyl Butyral*) фолија омогућава креирање ламинираног стакла које се одликује изврсном дуготрајношћу, сталном прозирношћу и извршним сигурносним карактеристикама пружајући могућност разноврсне архитектонске примене. Његова чврстоћа је посебно наглашена када је у питању сигурност и заштита од незгода, јаких ветрова, потреса и експлозија. Поред тога ламинирано стакло штити простор од прегревања и омогућава филтрирање штетних УВ зрака доприносећи уштеди енергије и очувању предмета. Такође, представља изврстан контролор звука. *PVB* фолија је изразито флексибилна. Дебљина једног слоја фолије износи 0,38mm.

³ СентриГлас® - јонопласт фолија (енгл. *SentryGlas® ionoplast*) омогућава креирање лакшег, сигурнијег ламинираног стакла које пружа нови ниво перформанси. Ламинирана стакла са овом врстом фолије су пет пута јача и до 100 пута чвршћа од конвенционалних материјала, што омогућава бољу заштиту од олује, удара и моћних експлозија. Поред своје снаге, СентриГлас® задржава изванредну јасноћу, чак и након неколико година, обезбеђујући истовремено трајну лепоту ламинираног стакла без обзира на место његове апликације – стаклени подови и степенице, минимално ослоњене балконске ограде и стаклене надстрешнице.

Хладно савијање постигнуто поступком ламинирања који доприноси стабилизацији саме форме, подразумева индустријски поступак који укључује следеће кораке (Слика 3.32):

- Постављање редом стаклених плоча и међуслоја,
- Хладно савијање физичким притиском (или под пресом) сложених стаклених плоча и међуслоја на подконструкцији (калупу),
- Ламинирање у аутоклаву (одговарајућа температура и притисак од 12 bara, односно 1,2 МПа), или у вакумској кеси (притисак од 0,7- 0,9 bara, односно 0,07-0,09 МПа),
- Хлађење, очвршћавање међуслоја и успостављање отпорности на смицање,
- Транспортивање у собу за тестирање (заједно са подконструкцијом),
- Скидање са подконструкције: Ламинирано стакло почиње да делује као композитни склоп. Активирање отпорности на смицање у међуслоју. Тренутно еластично спајање. Почетак дугорочног опуштања (вискоеластично дејство међуслоја).

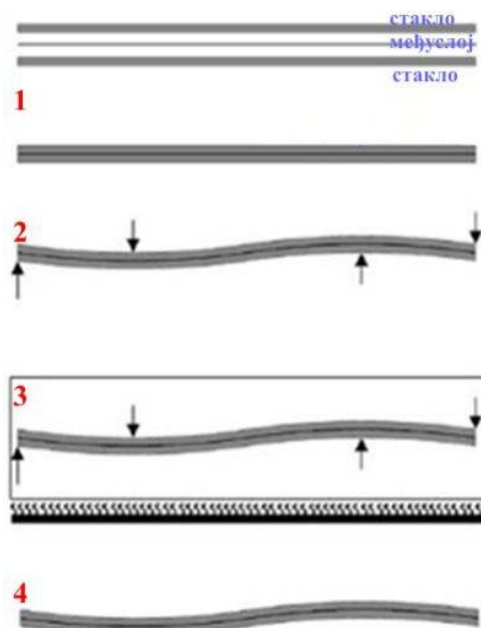
Неопходно је узети у обзир да је потребно повећати закривљеност панела приликом физичког притиска да би се након процеса ламинирања и његовог опуштања добио тачан жељени облик.

1. Постављање заједно међуслоја и равнoг стакла, најчешће каљеног. Стакло такође може бити флот, полукаљено, са керамичком бојом или премазима, иако то може понекад да представља ограничење.

2. Сложени слојеви се формирају у жељени облик физичким притиском (или под пресом), док се њихово стезање постиже у процесу ламинирања на лицу места.

3. Процес ламинирања одвија се у аутоклаву или вакумској кеси, након чега "композитно стакло" (стаклене плоче и међуслој) трајно задржавају геометријску форму. Циљ процеса ламинирања је да се постигне висока отпорност на смицање између међуслоја и стакла.

4. Процес опуштања стакла. За време и након процеса ламинације неопходна је висока контрола квалитета и напона у појединачним панелима због ефекта "наглог враћања". Потребно је повећати закривљеност панела приликом физичког притиска да би се добио тачан жељени облик након процеса ламинирања и његовог опуштања.



Слика 3.32. Шематски приказ процеса производње хладно савијеног стакла поступком ламинирања (Извор:Преузето са <http://facadesign.us/blog/2012/02/page/4/>, 23.09.2014)

Овим поступком могуће је обликовати двоструко закривљене форме чији полупречници износе од 17 m до 40 m у зависности од димензије панела, форме и примењене технике. Мање димензије омогућавају веће закривљење. Максималне могуће димензије панела износе 14,00 m x 2,80 m (Fildhuth & Knippers, 2011).

Ова интересантна техника производње закривљених ламинираних панела од више слојева термички или хемијски каљеног стакла даје могућност преклапања спојева стаклених плоча с циљем креирања већих стаклених панела. У овом случају најзначајније су механичке карактеристике међуслоја – фолије, с обзиром на то да је крутост/отпор при савијању панела директно везана за крутост/отпор на смицање. Ово је посебно важно када се узме у обзир висока температура панела узрокована соларним добицима, с обзиром на то да неки материјали који се користе за међуслојеве нагло губе своју чврстоћу на температурама изнад 60°C (*PVB* и *SGP*) (Weber, 2009).

На крају, израда успешног стакленог омотача, чији закривљени елементи су добијени поступком хладног савијања, мора да укључи комуникацију и сарадњу између свих учесника, укључујући архитекте, инжењере, произвођаче и монтере. Такође, треба додати да хладно савијање неће у потпуности заменити термичко савијање, с обзиром на то да је на овај начин могуће постићи само мала закривљења великог радијуса.

3.2.4 ц) Поступак преднапрезања (каљења) закривљеног стакла

У неким случајевима, као што је примена сигурносног стакла, или тачкасто ношеног закривљеног стакла које захтева бушење рупа, неопходна је примена каљеног (преднапрегнутог) стакла. Сам поступак представља процес дораве стакла. Постоје две могућности за постизање каљеног стакла:

- Поступак термичког каљења (преднапрезања), и
- Поступак хемијског каљења.

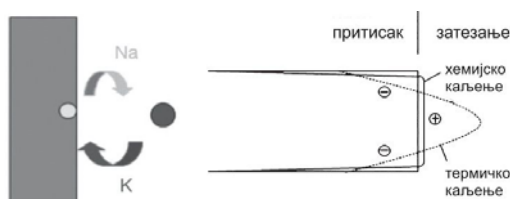
За разлику од могућих различитих форми савијеног стакла добијеног процесом хемијског каљења, у случају термички каљеног стакла постоје геометријска ограничења која подразумевају могућност добијања савијеног термички каљеног стакла само цилиндричне, односно конусне форме.

Термичко каљење (преднапрезање)

Данас, на тржишту постоје машине које у истовременом процесу изводе термичко каљење и савијање стакла. Сам процес каљења је идентичан као у случају равног стакла. На почетку производне линије, стакло се загрева до температуре од око 550°C, а затим се отопљено стакло помера у део машине где се врши његово савијање и преднапрезање. За савијање стакла користи се флексибилна врста ланаца (детално објашњено за термички савијено стакло), који у зависности од постављеног смера у односу на осу машине, могу да дефинишу "B" или "C" форму. Након савијања површина стакла се излаже великом притиску хладног ваздуха, након чега се добија каљено, цилиндрично закривљено стакло.

Хемијско каљење

Хемијски каљено стакло је врста стакла чија већа чврстоћа је резултат хемијског процеса. Стакло се потапа у раствор калијумове соли (обично калијум нитрат) на температури од 300°C до 400°C. То узрокује замену јона натријума (Na) на површини стакла са калијумовим јонима (K) из раствора (Слика 3.33). С обзиром на то да се мањи јони замењују већим јонима, долази до њиховог збијања, што узрокује да површина стакла буде под притиском а језгро под силом затезања (Слика 3.33). Притисак на површини хемијски каљеног стакла може да достигне вредности и до 690 МПа (Neugebauer, 2013). Како се хемијски каљена стакла ломе на сличан начин као обично пливајуће (*float*) стакло, према прописима не могу се сматрати сигурносним стаклима. Из тих разлога, и када је то захтевано, неопходно је његово ламинирање. Међутим, хемијски каљена стакла имају типично 5-6 пута већу чврстоћу на савијање у односу на пливајуће (*float*) стакло. У погледу чврстоће, хемијски каљено стакло је слично термички каљеном стаклу. С обзиром на то да се не користе екстремне промене температуре, хемијски каљено стакло карактеришу минималне деформације, извитопереност и оптичке дисторзије, за разлику од каљеног стакла.



Слика 3.33. Принцип хемијског каљења стакла и поређење напона добијених процесом термичког и хемијског каљења; (Извор: Neugebauer, 2013)

3.3 Конструктивно (закривљено) стакло

Два значајна проналаска у производњи стакла која су се десила средином 20. века, а која подразумевају процес производње флот стакла на производној (континуалној) траци, као и каљење стакла термичким путем, допринела су развоју стакла као конструктивног материјала. Додатно, унапређење технике ламинирања, која је откривена још крајем 19. века, допринело је производњи стакла већих дебљина и значајно унапређених сигурносних перформанси. Ове три технике заједно су допринеле стварању новог архитектонског израза, када је у питању стакло у архитектури, уједно захтевајући свеобухватно разумевање његових конструктивних карактеристика. До средине осамдесетих година 20. века, компанија Пилкингтон (*Pilkington*), која је патентирала процес производње флот стакла на линији и полагала сва права на свој патент, контролисала је и пратила начин на који је стакло примењивано на објектима, тако да произвођачи фасада нису могли изводити фасаде за које стакла нису била у складу са Пилкингтоновим правилима. Тек након истека ових права, појавиле су се нове могућности примене стакла. Ипак, било је немогуће убедити произвођаче да пројектују и израде такве структуре које су архитекти могли да замисле у том тренутку (стаклени подови и слично). Први помак у разумевању конструктивних карактеристика и понашања стакла настао је пројектом једноставних стаклених базилика деведесетих година прошлог века. Од тада, много радикалних идеја и проналазака проширили су "речник" архитектуре од стакла.

За разлику од конструкција и компоненти од осталих врста грађевинског материјала, пројектовање компоненти од стакла (укључујући и закривљено стакло), које имају конструктивну функцију, разликује се због могућности појаве изненадног лома стакла без могућности грешке приликом пројектовања или извођења. Разлог за изненадни лом могу бити оштећења стакла по ивицама и површини, настала у самом процесу производње. Такође, могуће је евентуално оштећење стакла од динамичког оптерећења - удара које није уочено, као и од садржаја штетних материја у структури стакла, које поступно, током времена смањују носивост и трајност стакла. Без обзира на узрок лома, пројектант мора имати у виду да се у сваком елементу од конструктивног стакла може појавити

изненадни лом у било којој фази током његове експлоатације у конструкцији. У таквом случају, укупна носивост читаве конструкције не треба да буде угрожена појавом продуженог прогресивног лома до потпуног колапса стакленог елемента.

3.3.1 Генералне смернице, принципи и основна правила за пројектовање и сигурност компоненти од конструктивног (закривљеног) стакла

Према основном концепту за пројектовање конструкција, предложеном и усвојеном у европском стандарду *EN-Eurocode 0* – Основа за пројектовање конструкције, верификација **граничног стања употребљивости конструкција** врши се преко дозвољених вертикалних и хоризонталних померања и деформација у конструкцијама. Ова ограничења зависе од врсте и комбинације оптерећења, као и од услова ослањања елемената и конструкције. За пројектовање елемената и компоненти од конструктивног стакла, у употреби су национални стандарди европских земаља, које су усвојиле и публиковале стандарде као што су Немачка (DIN 18008), Аустрија (ONORM B 3716), Велика Британија (BS 6262; BS 5516), Холандија (NEN2608) и Чехословачка (ČSN 74 3305).

Верификација **граничног стања носивости** конструкција неопходна је ради обезбеђења сигурности конструкције, уз малу вероватноћу за појаву преоптерећења или недовољног квалитета предвиђене носивости материјала. За конструктивно стакло, гранично стање носивости се може одредити ограничењем величине напона за најнеповољнију комбинацију оптерећења. Ако се јавља неколико вектора напона различитог интензитета, за разлику од других материјала и конструкција, у овом случају треба узети у обзир максималне главне напоне (Feldman et al., 2014).

Одређивање вредности пројектоване носивости (R_d) за компоненте од конструктивног стакла различито је у различитим земљама, и зависи од неколико параметара (Feldman et al., 2014):

- врсте стакла (обично или каљено стакло),
- смера и врсте оптерећења (раванско, просторно),
- фактора сигурности материјала,
- издржљивости ламинираног стакла,

- редукције пројектне носивости због утицаја ефекта углова стакла,
- редукције у зависности од врсте површинске обраде стакла,
- разматрања случајева специјалне примене стакла,
- процеса производње у случају примене термички каљеног стакла.

Примери за прорачун вредности пројектоване носивости конструкције приказани су у стандардима појединих земаља: Немачка (DIN 18008), Аустрија (ON 3716), Холандија (NEN 2608), Америка (ASTM E1300), као и у стандарду prEN16612 – Дефинисање отпорности стаклених панела на оптерећење помоћу прорачуна и тестирања.

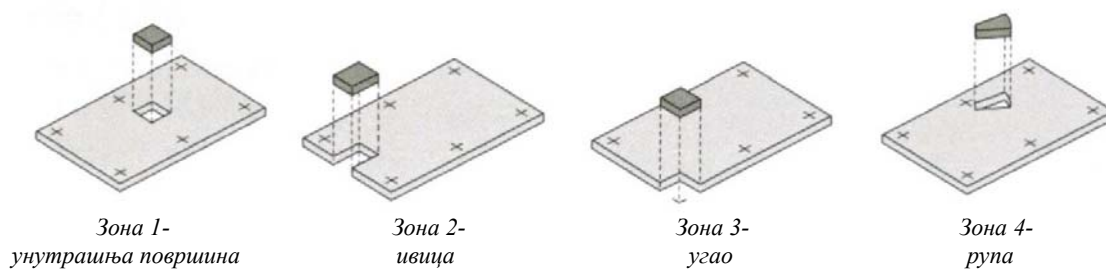
3.3.2 Класификација конструктивних елемената од стакла

Конструктивни елементи од стакла, у зависности од улоге у носећој конструкцији, врсте оптерећења и последица евентуалног лома, могу бити класификовани као секундарни и примарни (главни) елементи.

Карактеристика секундарних елемената јесте таква, да они не примају никакво оптерећење од елемената главне конструкције и обично су оптерећени попречним (трансверзалним) силама. Такви примери су хоризонтално застакљене површине, стаклене баријере и стаклени подови. Ступеништа и сигурносни стаклени панели се такође сматрају секундарним елементима. Међутим, код ових елемената постоји већи ризик од оштећења и лома. Због тога, код ових типова секундарних елемената треба обезбедити већу сигурност и поузданост. Секундарни елементи од стакла даље се могу класификовати у зависности од њихове позиције у конструкцији, односно на елементе:

- "изнад главе",
- "вертикалне".

Због доминантног дејства попречних сила у пресецима стаклених елемената, за линеарно ослоњене панеле, релевантна је носивост на савијање у зонама 1 и 2 стакленог панела (Слика 3.34). За тачкасто ослоњене панеле од важности је и носивост на савијање у зони 4. У постојећим националним стандардима за стакло, ако уопште постоје правила за пројектовање елемената од конструктивног стакла, наводи се да се тренутно односе само на секундарне елементе.



Слика 3.34. Дефиниција зона; (Извор: Feldmann, 2014: 24)

Примарни елементи су такође оптерећени у својој равни, али могу бити оптерећени и од других елемената или од главне носеће конструкције. И поред постојећих резултата добијених експерименталним и нумеричким методама, не постоје национални или интернационални стандарди за пројектовање и прорачун примарних конструктивних елемената од стакла. Због тога, за примарне елементе, за сада треба применити јединствену (засебну) проверу носивости, стабилности и трајности.

Секундарни елементи

Као и за друге материјале, носеће конструкције од стакла треба да испуне потребне услове сигурности и поузданости. Због појаве изненадног лома стакла под дејством оптерећења, код пројектовања и извођења конструкције треба предузети посебне, додатне мере за повећање носивости које ће обезбедити преостали капацитет носивости елемената, као и тзв. сигурни лом, без колапса читаве конструкције. При томе, треба избегавати директне контакте стакла и других тврђих материјала у конструкцији (челик), повећати отпорност на динамичко оптерећење у виду удара, као и смањити могућност за разбијање стакла у комаде за време његове примене у конструкцији. Уз претходно наведене мере предострожности, креира се чврста конструкција која има повећани капацитет носивости и толеранцију на оштећења и која се неће потпуно срушити за време непредвиђених инцидентних ситуација и оптерећења. Преостали капацитет носивости стакла треба да обезбеди извесну дозу сигурности од непредвиђеног лома панела или слојева панела. Преостали капацитет носивости зависи од композиције и чврстоће стакла, услова ослањања и концепта носивости елемената, као и од типа, односно начина лома стакла.

Конструкције од монолитног стакла показују мали капацитет преостале носивости, па се због тога примењују у виду вертикалних елемената, без било каквих додатних услова. Адекватни типови стакла, који испуњавају више критеријуме квалитета и носивости, јесу ламинирано стакло, полукаљено стакло (ојачано загревањем) и каљено стакло (потпуно термички обрађено), у односу на њихову конструктивну намену.

Композиција стакла (ламинирано, полукаљено и каљено) утиче на преосталу носивост. У случају ламинираног стакла, она је у директној зависности од чврстоће међуслоја. Тако на пример, линеарно ослоњен панел од ламинираног стакла са два слоја обичног пливајућег стакла повезаних јаким међуслојем, као што је *PVB*, обезбеђује одличан преостали капацитет носивости. У зони напрслине, попречне силе савијања одступају преко горњег слоја стакла који је под притиском и *PVB*-слоја који је под силом затезања. Услов је да међуслој има капацитет носивости на дејство сила затезања. Такође, важно је напоменути да, било да се ради о два слоја полукаљеног или о комбинацији полукаљеног и каљеног стакла, обезбеђује се сличан преостали капацитет носивости, након лома, као и код два слоја обичног пливајућег стакла. Преостала носивост ламинираног стакла након појаве лома, такође је у директној зависности од услова ослањања носећег елемента. За спречавање потенцијалне опасности од повреда приликом лома, препоручује се обострано линеарно ослањање панела, уколико панел није од ламинираног или каљеног стакла. Тачкасти ослонци заједно са ламинираним стакло се препоручују јер их карактерише повећани преостали капацитет носивости, због тога што тачкасти ослонци могу примити хоризонталне силе у равни стакла које се јављају у међуслоју (фолији), након лома стакла. Уколико нема других, поузданих података, процена преосталог капацитета носивости, након настанка лома треба бити одређена експериментално. Коначно, уколико се деси лом секундарне конструкције због непредвиђених фактора, интегритет и људски животи не смеју бити угрожени.

У Немачкој, за застакљене површине до висине од 4 m изнад земље, као и стаклених башти, кровова и прозора површине мање од 1,6 m, није потребно испунити посебна правила. Разлог за то је што је, у овим случајевима, знатно смањен ризик од оштећења.

Примарни елементи – робусност и толеранција на оштећење стакла

Када се стакло употребљава за примарне (главне) елементе носеће конструкције, постојећи национални стандарди који регулишу њихово пројектовање, не покривају све потребне аспекте правилне процене сигурности, стабилности и трајности ових елемената. Недостају прецизне препоруке за пројектовање стубова, попречних носећих вертикалних панела коришћених за систем укућења (оптерећених силама смицања), решеткасте носаче са стакленим елементима, греда (оптерећених силама савијања) и сл.

Код примарних елемената, осим теоретског прорачуна граничне носивости, степен њихове робусности мора бити доказан посебно. Међутим и поред постојећег научног и техничког сазнања у овој области, правила и стандарди за пројектовање ових елемената нису до сада уведени. Због тога, за примарне носеће елементе, потребна је примена посебне процедуре верификације сваког елемента. При томе, сваки засебни концепт у погледу носивости и непредвиђеног лома треба образложити, пре свега у односу на услове примене конструкције, ризик од лома и последице, као и процене опасности од катастрофалног лома и рушења целе конструкције.

Фактори који дефинишу чврстоћу конструкције и толеранцију на оштећења стакла јесу следећи:

- Повећани капацитет носивости укупне носеће конструкције применом ламинираног стакла, адекватног односа чврстине, величине комада приликом лома, чврстине и растегљивости међуслоја, с циљем обезбеђивања потребног преосталог капацитета носивости у случају лома једног слоја стакла, с обзиром на то да лом целог елемента није дозвољен јер примарни елементи прихватају оптерећење конструкције,
- Заштита против јаког удара. Унутрашњи носећи међуслој стакла мора бити заштићен од било каквог удара. Из тих разлога, унутрашњи слој се мора заштитити спољашњим слојевима у пакету ламинираног стакла. Ивице средишњег стакла треба такође да буду заштићене од јаког удара. За разлику од секундарних елемената, услови за заштиту крајева стакла код примарних носача строжији су,

- Избегавање директног контакта стакла и челика или другог тврдог материјала. Посебну пажњу треба обратити на рамномерну расподелу оптерећења и избегавање концентрације напона у елементима. За ту сврху препоручује се примена слоја солидног малтера или полимера као испуне.

За оцену пожарне отпорности примарних елемената и читаве носеће конструкције, треба размотрити да ли пожар представља пројектно оптерећење у конкретном случају, или не. У случају да га је потребно узети у обзир, примењују се заштитне мере (противпожарно стакло) или се обезбеђује додатна издржљивост конструкције.

3.3.3 Специјална оптерећења конструкција од стакла

Сеизмичко оптерећење и асеизмичке конструкције

За објекте и конструкције, који се пројектују и граде на сеизмички активним подручјима, потребна је посебна анализа сеизмичког дејства на конструкције. Наиме, познато је, из искуства, да рушење секундарних стаклених елемената може да нанесе велику материјалну штету, укључујући повреде и људске жртве. Европски стандард Еурокод 8 (*Eurocode 8*) садржи правила за узимање у обзир сеизмичког оптерећења у комбинацији са другим оптерећењем према стандарду Еурокод 1 (*Eurocode 1*), односно укупно оптерећење може узети у обзир и дејство сеизмичког ефекта на одређени елемент или конструкцију. За сеизмичка подручја, верификација **граничног стања носивости** (Ultimate Limit State – ULS) укључује и верификацију сеизмичког граничног стања носивости. У односу на сеизмичку отпорност зграда, идентификоване су три различите категорије стаклених елемената:

- 1) Сеизмички отпорни конструктивни елементи, потпуно изведени од стакла.
- 2) Конструктивни стаклени елементи изведени од стакла и другог материјала, који имају потребну растегљивост.
- 3) Елементи од стакла, који не припадају категорији сеизмички отпорних елемената, али су безбедни за сигурност корисника објекта. Такви елементи су унутрашњи зидни панели од стакла, или зид-завесе на фасади зграде.

Елементи прве категорије (1), према стандарду (*Eurocode EN 1990 – Basis of Structural Design*) треба да се пројектују и изводе тако да могу да приме сеизмичко дејство без појаве пукотина. Стандард EN 1998 одређује сеизмички фактор понашања $q=1$, који подразумева да конструкција од стакла треба да задржи свој конструктивни интегритет после изложености на сеизмичко оптерећење. За зграде, чија носећа конструкција укључује елементе од стакла и другог материјала који припадају другој категорији (2), пројектовање се изводи на начин да елементи од стакла буду отпорни на пукотине, за комбинацију укупног оптерећења на конструкцију која узима у обзир и сеизмичко дејство. Трећа категорија конструктивних елемената од стакла (3), у конструкцији која није сеизмички отпорна, треба без појаве лома да поднесу укупно оптерећење, укључујући и сеизмичко дејство.

Приликом статичке и динамичке анализе укупне носеће конструкције зграде, носивост и крутост секундарних елемената занемарује се, под условом да лом неког секундарног елемента не угрожава сигурност целе носеће конструкције зграде. Ипак, крутост постигнута помоћу секундарних елемената у њиховој равни може значајно да допринесе повећању међуспратне бочне крутости зграде, под дејством бочних, хоризонталних сеизмичких сила. Додатна крутост постигнута секундарним елементима може имати утицаја код прорачуна граничних напона оштећења, односно граничних стања конструкције, која су релевантнија код пројектовања конструкције. Секундарни елементи од стакла, такође, имају повољан утицај на међуспратно хоризонтално померање зграда, односно, секундарни елементи од стакла и њихове везе треба да буду пројектовани као сеизмички отпорни, без појаве пукотина од сеизмичког дејства. Секундарни елементи морају да прихвате своју сопствену тежину и бочно оптерећење, када су изложени хоризонталном померању изазваном сеизмичким силама. Независно од провере сигурности конструкције, неопходно је, за секундарне елементе, преузети посебне мере за превенцију појаве пукотина, изненадног лома и дезинтеграције стакла услед хоризонталног померања због сеизмичког дејства.

Током изградње, секундарни елементи од стакла се монтирају након стврдњавања бетонске конструкције или монтаже челичне конструкције. Ови

елементи могу да имају контакт са главном носећом конструкцијом, али без међусобних конструктивних веза.

За проверу сеизмичког граничног стања носивости примарних конструктивних елемената од стакла, треба имати у виду да укупан допринос стаклених елемената сеизмичкој отпорности зграда, не укључује растегљивост стакла. Дакле, елементи од стакла су отпорни на дејство бочних и вертикалних сила, али не припадају групи система са капацитетом да расипају енергију, који је потребан код објеката у сеизмичким условима. Консеквентно, провера сеизмичког граничног стања носивости базира се на спровођењу линеарне анализе са фактором енергетског понашања који има вредност 1, односно без расипања енергије и без растегљивости. Примарни елементи и њихове везе се прорачунавају на начин да могу да приме оптерећење у склопу укупне носеће конструкције зграде, као и оптерећење од других (секундарних) елемената, који се директно или индиректно ослањају на примарне елементе. Поред сопствене тежине, ови елементи треба да приме и оптерећења која делују ван њихове равни ношења, (на пример хоризонтално оптерећење од ветра или сеизмичко оптерећење), која узрокују хоризонтално или вертикално померање појединих елемената и читаве конструкције. Везе примарних елемената проверавају се на деловање сеизмичког оптерећења без појаве лома. Потпуна провера ових веза укључује релативна померања и унутрашње силе у вези.

Код пројектовања сеизмички отпорних, хибридних система (као што је комбинација стаклених елемената и елемената од другог материјала - бетон или челик), прорачун конструкције треба да се спроведе према хијерахији носивости сваког система, у зависности од његове улоге у укупној носивости хибридне носеће конструкције. У таквом случају, лом стакла дозвољен је само за померања која надмашују вредности дозвољених померања конструкције, прорачуната за најнеповољнију комбинацију оптерећења, узимањем у обзир и сеизмичког дејства. Дакле, хијерархија носивости се користи за спречавање појаве кртог лома или превремене појаве нестабилног механизма у хибридној носећој конструкцији. С тим циљем, сваки носећи елемент конструкције се прорачунава применом методе димензионисања на бази капацитета носивости (*Capacity based design*),

како би се остварио потребан "пластични механизам" и спречила појава кртог лома.

Тренутно не постоје посебна правила са пројектовање главних и секундарних конструктивних елемената од стакла у сеизмичким областима, па треба користити постојеће генералне препоруке према стандарду *Eurocode 8* (EN 1998). Постоје само националне техничке препоруке за сеизмичко дејство на конструкције од стакла, као што су француске техничке препоруке (CSTB⁴). У сваком случају, рад на европским стандардима за стакло, као и евентуалне засебне одредбе и правила за пројектовање елемената од стакла у сеизмичким условима, требало би да буду усаглашени са одредбама *Eurocode 8* (EN 1998).

Оптерећење од експлозије

Дејство експлозије на стаклене зграде и њихове конструкције, обично узрокује тешка оштећења, лом и одвајање слојева стакла. Потребно је обезбедити такву врсту стакла, која у случају експлозије не би одлетела далеко, ван објекта. То значи да би ламинирано сигурносно стакло могло да се сломи, али да при томе његови слојеви остану везани за међуслој, сигурносну фолију или уколико се слојеви одвоје, не би требало да добију велико убрзање. Убрзање раздвојених слојева стакла се смањује ако се пре лома стакла велики део енергије од експлозије апсорбује. Ово се постиже употребом елемената и веза на класичној фасади који дозвољавају пластичне деформације пре јављања лома или додавањем специјалних елемената за ублажавање последица лома узроковане експлозијом.

Због комплексности предвиђања временске историје експлозије, односно детонације и придружених ефеката, ова врста оптерећења је по први пут усвојена у САД, одакле је начин прорачуна проширен и у земљама Европске Уније (ISO стандарди).

Као резултат детонације експлозивног пуњења, притисак ударног таласа се шири у почетку сферно у свим правцима, док се не одбије о неку површину (објекат, земља). Кроз експлозију, велика количина енергије се ослобађа у року од

⁴ Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

неколико наносекунди. Из тих разлога, за заштиту људи у зградама од озбиљних повреда или жртава, често се примењују фасаде отпорне на експлозије. Више препорука за овај тип фасаде позива се на понашање фасада отпорних на експлозију према одредбама америчких стандарда ASTM F-1642 (експлозије) и ASTM F-1233 (балистички и физички напади) за условне перформансе прозорских система. Према овом стандарду, у зависности од нивоа заштите и ризика, постоји шест различитих класа фасада.

3.3.4 Потенцијална класификација елемената од стакла

Дискусије и мишљења око утицаја типа застакљења према начину лома стакла различита су у различитим земљама. Национални стандарди дају информације у односу на класификацију застакљења, односно најчешће коришћених типова стаклених компоненти и типова оптерећења, као и дозвољених типова стакала за застакљење кровова, без допунских услова као што је начин одржавања.

3.4 Преглед релевантних стандарда

Сектор грађевинарства има стратешку улогу у развоју сваке земље, због своје улоге у оквиру државе у виду изградње индустријских објеката, стамбених и административних зграда, као и објеката инфраструктуре и транспорта. Истовремено претставља јединствену економску активност која запошљава велики број становништва различитих стручних квалификација и професија. У том смислу, сектор грађевинарства има посебну улогу и у званичној политици Европске Уније (ЕУ) у домену урбанизма, архитектуре, грађевинарства и транспорта, преко европских Програма за одрживост, заштиту животне средине и енергију.

У оквиру стратегије земаља ЕУ за одрживо и заједничко тржиште, стандардизација такође има важан удео за подржавање заједничке политике у грађевинској индустрији, у ери глобализације. За побољшање конкуренције на европском тржишту, креирани су и усвојени заједнички стандарди у области грађевинског сектора - Еурокодови (*Eurocodes*), који доприносе убрзању процеса приближавања и хармонизације различитих националних стандарда у овој области.

Европски стандарди - *EN Eurocodes (EC)*, представљају пакет неколико европских стандарда, који садрже заједничка правила за пројектовање и извођење грађевинских конструкција и контролу носивости и стабилности грађевинских објеката под дејством случајних екстремних оптерећења, као што је дејство пожара или земљотреса. Публиковањем свих 58 делова Еурокодова (укључујући анексе) током 2007. године, започета је примена ових стандарда у земљама Европске Уније од 2010. године. Тренутно постоји 10 Еурокодова (ЕС 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9) који су у употреби у земљама ЕУ, како и у земљама које су ЕУ-кандидати.

У мају 2010. године Европска Комисија је донела одлуку о даљем развоју система Еурокодова за конструкције, с циљем развијања нових или делова постојећих стандарда, укључујући нове материјале и развијање одговарајућих напредних метода пројектовања и прорачуна конструкција. Рад на овом програму је компетенција и обавеза европског Комитета за стандардизацију (*European Committee on Standardization - CEN*), у виду сталне активности Техничког комитета (*CEN Technical Committee 250 - CEN/TC250*), узимајући у обзир и захтеве индустрије и крајњих корисника ових препорука и стандарда. Програм рада Техничког комитета на стандардима је предвидео да се прва нацрт верзија ових докумената публикује у виду Извештаја Истраживачког комитета (*Joint Research Committee – JRC, Scientific and Policy Report*)⁵, а пре његовог публиковања као техничке спецификације (*CEN Technical Specifications*). Такође, технички комитет (*CEN/TC250*) одлучује да ли ће ове техничке спецификације бити усвојене као Европске Норме (*European Norms - EN*). Треба напоменути да је задатак европског Комитета за стандардизацију да помогне на приближавању и заједничком раду националних тела за стандардизацију у 33 земаља ЕУ, као и земаља ЕУ кандидата⁶ и Израела.

У склопу ових активности Истраживачки комитет (*Joint Research Committee-JRC*) објавио је нацрт верзију документа у виду Европског водича (препорука) за пројектовање конструкција од стаклених компоненти (*Guidance*

⁵ Видети [www.http://ec.europa.eu/jrc](http://ec.europa.eu/jrc).

⁶ Видети www.cen.eu.

for European Structural Design of Glass Components) припремљен од стране радне групе 3 Техничког комитета (*CEN/TC250, Working Group 3*), са компетенцијом и задатком за рад на конструктивном стаклу. Овај документ укључује предлоге процедура и правила за пројектовање компонената од конструктивног стакла, као корак даље према усвајању новог Еурокода за пројектовање елемената и конструкција од конструктивног стакла – Еурокода 10. Нацрт верзије овог документа налази се на сајту под називом Еурокодови: Изградња будућности (*Eurocodes: Building the future*)⁷.

Важно је напоменути да европски стандарди (EN) као и немачки (DIN) не дефинишу примену закривљеног стакла у архитектонским објектима. Једини документ у коме се дефинише закривљено стакло је немачки Водич за термички закривљено стакло у грађевинској индустрији (*Guidelines for thermally-curved glass in the building industry*) који попут америчког стандарда ASTM-1464 (незнатно се разликују у терминима који дефинишу форму) даје корисницима (архитектама, инжењерима, извођачима) одређене информације и препоруке за примену закривљеног стакла како у фази идејног пројекта, тако и у фази актуелног извођења, али такође даје смернице и одговоре на важна питања која се постављају у току целокупног процеса. Водич даље даје опис основних процедура за примену закривљеног стакла у изградњи и смернице које се односе на димензионисање стакла као и његове основне карактеристике. Додатно, основни принципи оцене визуелног квалитета закривљеног стакла су објашњени и дата су дозвољена одступања. Такође, дате су смернице везане за транспорт и монтажу.

Постојећи интернационални стандард Савијено стакло (ISO 11485-1, 2 и ISO 11485-3) дефинише стакло као производ, његов квалитет и даје услове класификације закривљеног каљеног и ламинираног стакла као сигурносног стакла примењеног у грађевинарству. У трећем делу овог стандарда дата је класификација у односу на повећање сигурности и смањење повреда, карактеристике лома закривљеног стакла, као и његове физичке и механичке карактеристике за примену у зградама. Овим стандардом нису дефинисане вредности у погледу његове чврстоће.

⁷ Видети www.cen.eu.

3.4.1 Успостављање Еурокода за пројектовање конструкција од стаклених компоненти

У савременој архитектури и грађевинарству конструктивно стакло добија све више на свом значају због своје транспарентности, филигранског изгледа и функције осветљавања простора. Последњих деценија, може се уочити велики број различитих објеката на којима је примењено конструктивно стакло, почевши од обичних стаклених баријера до стаклених елемената који имају важну примарну функцију носећих елемената као што су подне конструкције, стубови и вертикални зидови. Постојећи производи од стакла на тржишту, који одговарају за конструктивну примену, дају могућност за пројектовање и извођење иновативних конструкција и објеката.

Међутим, за сада постоје само национални стандарди за пројектовање елемената од конструктивног стакла. Упркос постојању значајних сазнања у области конструктивних карактеристика стакла, постојећи национални стандарди углавном се односе на секундарну примену и веома ретко за примену у функцији главних носећих елемената конструкције.

Рад на успостављању заједничких стандарда за конструктивно стакло на иницијативу Европске Комисије (*European Commission*), има за циљ да (Overend, 2014):

- обезбеди најмодерније технике пројектовања засноване на признатим истраживањима,
- обезбеди заједничка правила за пројектовање, и
- постигне сагласност у вези заједничког критеријума за сигурносне карактеристике стакла, паралелно са успостављањем слободног тржишта за продају префабрикованих елемената од конструктивног стакла.

Претходно поменута нацрт верзија документа радне групе 3 Техничког комитета (*CEN/TC250, Working Group 3*) представља заједнички став земаља ЕУ да у другој фази (након сагласности земаља чланица ЕУ) овај документ буде усвојен као основа за стандардизацију у овој области, као и да се наметне потреба за званично публиковање стандарда за сва поглавља која се разматрају у нацрт-верзији овог документа. Крајњи резултат су нови Еурокодови за пројектовање конструктивног стакла. С друге страна, овај нацрт претставља званични преглед

националних стандарда, као и постојећег степена научног сазнања (*state-of-the-art-report*) на пољу примене конструктивног стакла.

Припрема научног извештаја за успостављање европских стандарда за конструктивно стакло (*Scientific and Policy Report for Structural Glass*), према европској кодификацији у односу на питања из области конструкција, обухвата три дела као задатак:

- спецификација конструктивних материјала и производа,
- правила за пројектовање конструкција, и
- правила за извођење и грађење конструкција.

Овакав стандард прописује услове за примену префабрикованих елемената од конструктивног стакла, за горе наведене услове за кодификацију конструктиваних материјала и конструкција.

Спецификација конструктивних материјала садржи стандардне методе за производњу и тестирање производа, као и карактеристике материјала потребне за пројектовање конструкције које прописују препоруке Европске организације за вредновање техничких карактеристика (*EOTA-European Organization for Technical Approval-Guidelines*). За постизање конзистентности у овој процедури за стандарде, успостављена је сарадња код припреме нацрта верзије овог документа између техничких комитета (CEN/TC 250, CEN/TC 129, CEN/TC 135) и Европске организације за вредновање техничких карактеристика (*EOTA*).

Почетак рада на Европским стандардима за стаклене компоненте започео је 2007. године, након чега је уследила иницијатива Истраживачког Комитета (*Joint Research Committee - JRC*) која је резултовала публикацијом Сврха и оправдање за нове стандарде за пројектовање у погледу примене стаклених производа у грађевинским радовима (*JRC-Report Purpose and justification for new design standards regarding the use of glass products in civil engineering works*).

3.4.2 Еурокодови применљиви за стаклене конструкције

Нови Еурокодови за пројектовање конструктивног стакла треба да буду у складу са постојећим стандардима за прорачун грађевинских конструкција, како би се обезбедио приближно исти ниво сигурности за конструкције направљене од различитих грађевинских материјала. При томе, треба имати у виду пре свега

генералне одредбе и основне принципе за пројектовање (EN1990), као и остале стандарде који се односе на врсте оптерећења и њихове комбинације код прорачуна и контроле носивости носећих елемената и конструкција.

Еурокодovi се састоје од основне нормe (*Eurocode EN 1990 - Basis of Structural Design*), која даје суштинске захтеве у виду принципа и правила за пројектовање, и који обухватају девет других Еурокодова који се односе на конструкције од различитих материјала:

- Еурокод 1 - Оптерећење конструкција (*Actions on Structures*).
- Еурокод 2 - Правила за пројектовање армирано-бетонских конструкција (*Design rules for Concrete structures*).
- Еурокод 3 - Правила за пројектовање челичних конструкција (*Design rules for Steel structures*).
- Еурокод 4 - Правила за пројектовање композитних - хибридниh конструкција (*Design rules for Composite structures*).
- Еурокод 5 - Правила за пројектовање дрвених конструкција (*Design rules for Timber structures*).
- Еурокод 6 - Правила за пројектовање зиданиh конструкција (*Design rules for Masonry structure*).
- Еурокод 7 - Правила за геотехничко пројектовање (*Design rules for Geotechnical Design*).
- Еурокод 8 - Правила за пројектовање у земичким регионима (*Design in seismic areas*).
- Еурокод 9 - Правила за пројектовање алуминијумских конструкција (*Design rules for Aluminium structure*).

Тренутно не постоји Еурокод за конструктивно стакло, али треба нагласити да се основни принципи и правила за пројектовање која садржи (EN 1990) односе и на пројектовање елемена од конструктивног стакла. Примена стаклениh елемената може се каласификовати као конструктивна и неконструктивна. Неконструктивна примена подразумева једноставна прозорска застакљења. Самим усвајањем и успостављањем Еурокода 10 - Правила за пројектовање стаклениh конструкција (*Design rules for Glass structure*) у потпуности ће се озваничити у Европи примена стакла као конструктивног

елемента и дефинисаће се његова примена у погледу конструктивне функције примарних и секундарних стаклених компоненти.

Преглед осталих Еурокодова који се користе за пројектовање конструкција од челика и стакла приказује Табела 3.4.

Табела 3.4: Одговарајући Еурокодови за стаклене и стаклено-челичне конструкције (Извор: Feldmann et al, 2014)

| EN 1990 – Еурокод: Основе за пројектовање конструкције | | | |
|--|--|----------|------------------------------------|
| EN 1991 | Карактеристике конструкције | EN 13474 | Пројектовање стаклених компоненти |
| Део 1-1 | Сопствено оптерећење и оптерећење подова и кровова | EN 1993 | Пројектовање челичних конструкција |
| Део 1-2 | Противпожарне карактеристике | Део 1-1 | Основне карактеристике објеката |
| Део 1-3 | Снег | Део 1-4 | Нерђајући челик |
| Део 1-4 | Ветар | Део 1-8 | Везе и спојеве |
| Део 1-5 | Термичке карактеристике | Део 1-10 | Елементи оптерећени на затезање |
| Део 1-6 | Оптерећење конструкције | Део 2-А | Захтеви за лежишта за конструкције |
| Део 1-7 | Карактеристике лома | EN 1337 | Лежишта за конструкције |

Основна правила и принципи за пројектовање (EN 1990) дају генералну методологију за верификацију граничног стања носивости конструкције (узимајући у обзир њену крутост), граничног стања употребљивости, као и трајности конструкције. Треба имати у виду да код конструктивног стакла, толеранција оштећења за стање граничне носивости представља посебан проблем.

Због специфичности стакла као кртог материјала и због наглашене варијације његове чврстоће, конструкције од стакла захтевају процедуру пројектовања која се разликује од процедура за пројектовање конструкција од традиционалних материјала за грађење.

Досадашња истраживања и рад на стандардима за конструктивно стакло указују на потребу увођења концепта "сигурног лома", према коме лом неколико елемената у конструкцији не треба да угрози укупну носивост и стабилност целе конструкције. У том случају треба проверити да ли постоји могућност за прераспodelу оптерећења, преко осталих могућих праваца за преношење напона у конструкцији. Дакле, у вези са одредбом за консеквенце од лома према EN 1990, предвиђа се разматрање посебне класификације у односу на ризик од лома елемената од конструктивног стакла.

Преглед националних стандарда за пројектовање у конструктивном стаклу показује да они садрже генералне принципе у односу на материјал, посматрајући конструктивно стакло као крт материјал, са додатним одредбама за стандардне ситуације примене стакла. Ипак, национални стандарди дају могућност за пројектовање методом према граничном стању носивости, користећи савремена истраживања у односу на граничну чврстоћу конструктивног стакла. Такође, треба имати у виду разлике у процени чврстоће стакла према стандарду prEN16612, који се односи на примену стакла у објектима – дефинисање отпорности стаклених панела у односу на податке добијене нумеричким и експерименталним путем.

Претходно поменуте европске препоруке за пројектовање компоненти од конструктивног стакла (*Guidance for European Structural Design of Glass Components*), као основне поставке за успостављање Еурокода 10, дефинишу термички савијено стакло и стакло савијено поступком хладног савијања. Разлика између ова два начина обликовања закривљеног стакла јесте та што је термички савијено стакло препознато као производ, односно један од поступака у процесу његове производње, док је хладно савијено стакло (хладно савијање) препознато као метода конструисања и из тих разлога је хладно савијено стакло класификовано као секундарни елемент.

С обзиром на то да метода хладног савијања стакла утиче знатно на чврстоћу стакла, предвиђено је да буде обухваћена новим Еурокодом. То се односи, како на монолитно стакло, тако и на ламинирано. Међутим, неопходно је узети у обзир вискозно понашање међуслоја ламинираног стакла у односу на где, када и како ће стакло бити савијено, као и да то увек треба имати у виду када се примењује ламинирано стакло. Такође, треба узети у обзир да је стабилност и крутост хладно савијеног стакла различита у односу на равно стакло. Посебно, нови Еурокод треба да специфицира начин како да се третирају, односно провере резултујуће силе на потконструкцији.

4. Мапирање процеса пројектовања и конструкције геометријски комплексног стаклених омотача

У овом поглављу идентификовани су најзначајнији поступци/кораци карактеристични за пројектовање и конструкцију геометријски комплексних форми стаклених омотача с циљем креирања мапе процеса (применом начина графичког представљања специфичних процеса у моделу пословног процеса - BuildingSMART's adaptation of Business Process Map Notation, и коришћењем одговарајућег софтвера Visio Professional), а затим су њени елементи проверени кроз спроведене интервјуе са стручњацима у Европи и Србији. Поред тога, применом методе анкете добијени су специфични искуствени подаци. Сама мапа представља основу за развој подржавајућих алата који помажу ефикасном складиштењу, приступу и преносу информација о предложеном моделу закривљеног стакленог омотача.

Пројектовање и изградња стаклених фасада, као релативно нови сектор у грађевинској индустрији, представља веома комплексан сектор чији се мултидисциплинарни карактер огледа у примени нових технологија производње стакла и стаклених фасада, проналажењу решења за различите захтеве перформанси омотача, понекад веома сложене геометрије, као и великом распону различитих примењених стаклених материјала. Све ово подразумева да процес дизајна и конструкције релевантан за геометријски комплексне стаклене омотаче,

укључујући и закривљене, као једне од најкомплекснијих, треба анализирати и описати кроз креирање модела и верификацију мапе процеса која ће представљати подршку у даљем истраживању примене како закривљеног стакла тако и свих других типова стаклених омотача. Мапа процеса је посебно корисна за дефинисање рокова, разумевање улоге различитих актера и активности, као и њихове одговорности и идентификацију различитих захтева током процеса дизајна и конструкције. Такође, може да се користи као основа за даљи развој алата за подршку, као што су БИМ¹ (*BIM - Building information modeling*), и алати за оптимизацију стаклених површина и слично.

Иницијатива овог дела истраживања је потекла од стране аутора ове дисертације, а подржана је од стране Групе за истраживање технологија стакла и фасада² (*Glass & Façade Technology Research Group*) и професора Маура Оверенда (Dr Mauro Overend) на Универзитету у Кембриџу, као и од Европске истраживачке мреже о примени конструктивног стакла³ (*COST Action TU0905. Structural Glass – Novel Design Methods and Next Generation Products*), чији активан члан је и аутор ове дисертације. Мапа процеса пројектовања и изградње нових фасада је креирана (Voss, 2013), и процес њене верификације је завршен.

Циљ овог дела истраживања је да се даље развије и прошири постојећа мапа, односно да се мапирањем процеса пројектовања и израде геометријски комплексног стакленог омотача прикажу главни проблеми и главна питања у примени равног и закривљеног стакла на омотачу архитектонских објеката. За креирање мапе процеса, неопходно је применити и комбиновати постојећа знања из неколико области у оквиру истраживања стаклених фасада базираних на:

¹ Информациони модел објекта (*Building Information Modeling - BIM*) јесте процес који укључује стварање и управљање сетом дигиталних модела који представљају физичке и функционалне карактеристике пројектоване или изграђене зграде, као и процес заједничког рада ових модела у току животног циклуса грађевинског објекта. *BIM* обично садржи скуп 3Д модела и информације о релевантним компонентама система и атрибуте, који их описују и који могу бити размењени или умрежени у циљу подржавања процеса одлучивања о објекту. Повезивање појединачних информационих модела зграде (архитектонски, конструктивни, инсталациони) захтева дефинисање пројектних протокола за размену информација, као и сва ограничења везана за унос и измену података. Моделовање процеса се заснива на животном веку зграде и потреби за утврђивањем односа појединачних инсталационих мрежа (термо-техничких, електро-енергетских и хидро-техничких) у том процесу.

² Погледати www.gft.eu.com.

³ Погледати www.glassnetwork.org.

недавно креираној мапи процеса дизајна и конструкције ново-изграђених фасада, дешавањима у сектору стаклених фасада који су резултат све веће примене нових технологија у индустрији стакла и стаклених фасада, као и "*state of the art*" у истраживању примене стакла и стаклених конструкција. Такође, мапа представља основу за развој подржавајућих алата који помажу ефикасном складиштењу, приступу и преносу информација о предложеном моделу закривљеног стакленог омотача. Поред тога, коришћењем ове базе података и креираних алата, могуће је у раној фази пројектовања, проценити предложени модел закривљеног стакленог омотача у односу на његова обликовна, конструктивна и производна ограничења у циљу одабира коначне варијанте модела геометријски комплексног стакленог омотача која је изводљива и која је у складу са оригиналном архитектонском идејом.

4.1 Процес пројектовања и конструкције геометријски комплексних стаклених омотача

Тренутна фасцинација криволинијским архитектонским формама поставила је нове захтеве за примену како закривљеног тако и равног стакла као елемента геометријски комплексног омотача архитектонских објеката. Недавна технолошка и практична унапређења производње стакла, а посебно закривљеног стакла допринела су повећању броја пројеката са великим површинама стаклених омотача геометријски комплексних форми. На први поглед примена закривљеног стакла омогућава изузетну слободу у пројектовању модерних таласастих облика, али низ ограничења настаје када је у питању аспект конструкције, производње, коришћења, перформанси и економије. Карактеристике као што су радијус закривљене површине, минималне и максималне димензије стаклених панела, локални прописи, доступни премази, оптички квалитет, избор чврстоће (врсте) стакла, значајно утичу на финални производ.

С обзиром на то да употреба стакла укључује много комплексних разматрања у раним фазама процеса пројектовања која укључују концепт стаклене површине, геометрију, естетику, конструктивне и термичке карактеристике, одабир саме форме стаклених елемената и технике израде, компатибилност свих третмана са процесом савијања у случају закривљеног

стакла и слично, неопходно је разјаснити њихов међусобни утицај и зависност с циљем максималног искоришћења потенцијала и могућности које пружа примена закривљеног и равног стакла у геометријски комплексним формама стаклених омотача. Из горе поменутих разлога, креирана мапа процеса представља помоћ и подршку даљем истраживању примене стакла у материјализацији омотача архитектонских објеката. Главни доприноси мапирања процеса укључују разумевање улоге актера и разичитих активности, као и помоћ идентификацији, стратешких, процесних и *IT* захтева, односно формирање базе за *IT* системе. Такође, мапа је корисна за процену да ли су резултати нових истраживања компатибилни са актуелним процесима у индустрији (постепене иновације) или је потребно изменити/унапредити постојеће процесе у индустрији како би се искористиле предности истраживања (револуционарне иновације).

4.2 Израда мапе процеса пројектовање и конструкције геометријски комплексних стаклених омотача

Први део истраживања које се односи на мапирање процеса пројектовања и изградње геометријски комплексног стакленог омотача архитектонских објеката подразумевао је дизајнирање мапе. Мапа је израђена применом начина графичког представљања специфичних процеса у моделу пословног процеса ("BuildingSMART's adaptation of Business Process Map Notation", 2007) који је развијен од стране међународне организације "Паметна грађевина"⁴ (*BuildingSMART*) која има за циљ да унапреди размену информација између софтверских апликација које се користе у грађевинској индустрији. Ова организација је развила индустријске класе ИФЦ (*IFC - Industry Foundation Class*) као неутралну и отворену спецификацију за БИМ. На основу мапирања процеса пројектовања и изградње нових типова фасада, изведеног од стране аутора Елеонор Вос (Voss et al., 2013), креирана је мапа процеса пројектовања и изградње геометријски комплексних форми стаклених омотача. Креирање мапе је показало да неки од главних проблема и питања, приликом примене стакла у архитектонском омотачу геометријски комплексних форми, представљају

⁴ Погледати <http://buildingsmart.org.uk>.

ограничења настала услед карактеристика самог материјала као и процеса његове производње који ограничавају величину/димензије, носивост и могуће закривљење стакленог елемента добијено применом одговарајуће технике обликовања (поступак хладног или термичког савијања), а све у циљу добијања жељене форме.

Целокупан процес је анализиран, дефинисан и представљен кроз следеће фазе:

- Фаза 1: Израда оквирног пројектног решења која обухвата подфазу израде нацрта предлога пројектног решења,
- Фаза 2: Израда детаљног пројектног решења,
- Фаза 3: Израда коначног пројектног решења,
- Фаза 4: Израда тендерске документације и евалуација понуда,
- Фаза 5: Кординација пројектног процеса са процесом производње, и
- Фаза 6: Надзор извођења радова до њиховог завршетка.

Такође, мапирање процеса је изведено како на основу података и информација о приступу пројектовању и изради стаклених фасада у Србији и свету, тако и према британском РИБА Плану радова 2013 ("RIBA Plan of Work", 2013) који су резултат свеобухватног прегледа и преиспитивања свих фаза и радова у процесу пројектовање и изградње објеката. С обзиром на то да је почео да се развија још од 1963. године, РИБА План рада је дефинитивно представљао модел за процес пројектовања и изградње зграда у Великој Британији, али такође је вршио значајан утицај и на међународном плану. Оквир плана рада послужио је како професији архитеката тако и широј грађевинској индустрији, али иако измењен током времена да би рефлектовао развој у организацији различитих тимова и аранжмана набавки током процеса, ове промене су се генерално више постепено него стратешки примењивале. План рада 2013 је понудио могућност да се предузме темељна ревизија РИБА Плана рада, како би се обезбедило усклађивање са најбољом праксом свих специјалности у оквиру интегрисаног тима за изградњу, као и да се обезбеди обновљени оквир радова који ће одговарати и будућим генерацијама. РИБА План рада 2013 организује процес информисања, пројектовања, изградње, одржавања, оперативног рада и коришћења грађевинског/архитектонског објекта у неколико кључних фаза. Он

прописује задатке и резултате које је неопходно испунити у свакој фази, а који могу да варирају или да се преклапају тако да одговарају специфичним захтевима пројекта.

РИБА План рада 2013:

- Делује кроз цео опсег различитих сектора и величина пројеката,
- Обезбеђује јасно мапирање за све облике јавних набавки,
- Интегрише све процесе пројектовања одрживих објеката,
- Мапира БИМ процесе (Моделовање информационог система објеката), и
- Обезбеђује флексибилност у односу на планске процедуре.

РИБА План рада 2013, сам по себи, не представља уговорни документ: он усмерава актере на разне алате и допунске основне документе који се користе од стране пројектног тима, консултанта и извођачког тима укључујући и документе који се односе на професионалне уговоре о услугама, њихов распоред и протоколе самог пројекта, који могу или не морају бити уговорени, као и на различите форме најчешће коришћених грађевинских уговора.

Крајњи циљ мапирања анализираних процеса је да се да преглед целокупног процеса и означе најзначајнији кораци у самом процесу пројектовања и израде стакленог омотача геометријски комплексне форме. Сам процес који, осим тога што је дефинисан, горе поменути, комбиновањем знања из различитих области, је обухватио са посебном пажњом процес *CAD-CAM* фабрикације закривљеног стакленог омотача (видети Поглавље 1), као и различит приступ техници обликовања закривљеног стакла (видети Поглавље 3). Такође, најзначајнији кораци у самом процесу издвојили су се кроз анализу релевантних примера из праксе (видети Поглавље 2).

Други део истраживања које се односи на мапирање процеса је реализован током спровођења 10 интервјуа у којима је мапа верификована и оцењена од стране стручњака у Лондону, Велика Британија (6 интервјуа) и Грацу, Аустрија (1 интервју), као и Београду, Србија (3 интервјуа). Углавном, испитаници су били инжењери и архитекте са великим искуством пројектовања стаклених фасада и структура, а неки од њих су имали и искуство рада на пројектима у којима је примењено закривљено стакло. Интервјуи су спроведени у личном разговору који је подразумевао једночасовни састанак. Саговорници су упитани да прегледају и

коментаришу мапу, корак по корак, како би потврдили или предложили измене у различитим фазама у процесу мапирања. Сви су слободно разговарали о темама које су сматрали најрелевантнијим у вези са пројектовањем и изградњом закривљених стаклених омотача.

4.2.1 Узорак

Интервјуи и анкета су спроведени у сопственом аранжману, у временском интервалу од годину дана и то са две групе испитаника.

Једну групу чинило је девет испитаника из европских земаља. Интервјуи и анкета су спроведени у Лондону, Велика Британија и у Грацу, Аустрија. Особе из анкетираних групе су биле високообразоване и из инжењерске струке. Шест особа су били грађевински инжењери а три особе су били архитекти. Испитаници су били:

- Френсис Еш (Francis Aish), грађевински инжењер, руководилац тима за примењено истраживање и развој и партнер у фирми "Фостер и партнери" (*Foster + Partners*),
- Стефан Веркуилен (Stephan Verkuiljen), архитекта и партнер у фирми "Фостер и партнери" (*Foster + Partners*), у време обављања интервјуа.
- Тим Мекфарлејн (Tim Macfarlane), грађевински инжењер, оснивач фирме "Стаклена светлост и специјалне конструкције" (*Glass Light and Special Structures*),
- Дамјан Роган (Damian Rogan), грађевински инжењер, руководилац тима за инжењеринг фасада у фирми "Екерсли Окалаган" (*Eckersley O'Callaghan*),
- Питер Ленк (Peter Lenk, PhD), грађевински инжењер у фирми "Екерсли Окалаган" (*Eckersley O'Callaghan*),
- Неша Гопал (Neesha Gopal), архитекта, директор сектора за инжењеринг фасада у фирми "Мајнхард технологије фасада" (*Meinhardt Facade Technology*),
- Абикуниа Осунде-Огбебор (Aibiokunla Osunde-Ogbebor), архитекта, консултант фасада у фирми "Мајнхард технологије фасада" (*Meinhardt Facade Technology*),
- Ђенади Василченко-Малишев (Gennady Vasilchenko-Malishev), грађевински инжењер, оснивач фирме "Малишев Вилсон Инжењери –

Креативни инжењеринг и дизајн конструктивног стакла (*Malishev Wilson Engineers - Creative Engineering & Structural Glass Design*) и предавач на Универзитету Источни Лондон (*University of East London*),

- Јурген Нојгебауер (Jürgen Neugebauer, PhD), грађевински инжењер, професор на Одсеку за инжењеринг, Универзитет за примењену науку - *FH Joanneum* у Грацу, Аустрија.

Другу групу чинило је троје испитаника из Београда. Две особе су били грађевински и машински инжењери а једна је била архитекта. Испитаници су били:

- Проф. Миодраг Мирковић, архитекта, професор на Архитектонском факултету Универзитета у Београду,
- Драган Тасковић, машински инжењер у предузећу "Павле" које се бави обрадом стакла, са дугогодишњим искуством у авио индустрији,
- Бојан Стојановић, машински инжењер у предузећу "Конкав Конвекс" које се бави термичком и осталом обрадом стакла.

4.2.2 Анкета

Анкета је садржала девет питања. Цео приказ анкете је дат у Прилогу бр. 2.

Питања су се односила на следеће:

1. Како је ваше искуство са различитим врстама стакла (равна, једноструко-закривљена, двоструко-закривљена) и њиховим карактеристикама (физичким, конструктивним, визуелним, технолошким и економским)?
Примену које врсте стакла сматрате већим изазовом?
2. Како се процес пројектовања и израде закривљеног стакленог омотача примењеног на зградама развијао у последњих неколико година?
3. Која су главна разматрања приликом примене закривљених стаклених елемената?
4. Како се ова разматрања разликују у односу на примену равних стаклених елемената?
5. Који су кораци у процесу пројектовања и конструкције закривљених стаклених омотача архитектонских објеката и како су они повезани ?
6. Који су изазови и могућности за примену и инжењеринг закривљених стаклених омотача?

7. Који конструктивни системи су најпогоднији (челични решеткасти носачи, јарболасте решетке, кабловски решеткасти носачи, носачи великих димензија, стаклени стубови (енгл. *glass fins*), просторни решеткасти системи, тансегрити конструкције, мрежасти системи (од крутих штапова и мреже каблова) за примену закривљених стаклених омотача и зашто?
8. Који системи веза/фиксирања стаклених панела су најпогоднији, односно не одговарају (оквирни системи – класични, полуструктурални и структурални, и безоквирни системи – тачкасто фиксирање бушењем и уз помоћ завртњева или уметнутих држача, тачкасто фиксирање без бушења помоћу спона и тачкасто фиксирање лепљеном везом) за примену закривљених стаклених панела и зашто?
9. Да ли узимате у разматрање термичке перформансе приликом примене закривљених стаклених панела?

Сви анкетирани нису дали одговоре на сва питања. Дистрибуција одговора по питањима је дата у Табели 4.1.

Табела 4.1. Дистрибуција одговора по питањима

| Питање | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| Број одговора | 9 | 9 | 9 | 8 | 4 | 7 | 8 | 8 | 10 |

Даље у тексту дати су сумирани одговори на појединачна питања:

1. Како је ваше искуство са различитим врстама стакла (равна, једноструко-закривљена, двоструко-закривљена) и њиховим карактеристикама (физичким, конструктивним, визуелним, технолошким и економским)?

Примену које врсте стакла сматрате већим изазовом?

Већина анкетираних се сложила да примена закривљеног стакла представља већи изазов. Равно пливајуће стакло представља најјефтиније решење које не поседује визуелну дисторзију. Међутим овај тип стакла је осетљив на термички шок и подложно је лако пуцању. Такође због начина на који се ломи, стварањем великих комада врло оштрих ивица, овај тип стакла не пружа потребну сигурност. Полукаљено стакло подноси већа оптерећења, али се ломи слично пливајућем стаклу. Каљено стакло има још већи степен отпорности и ломи се на начин који обезбеђује да се третира као сигурно стакло. Процес ламинирања стакла такође обезбеђује висок степен сигурности, с обзиром да се стакло не расипа приликом лома. Процесом обликовања закривљеног стакла јављају се

додатни проблеми, из разлога што поново излагање стакла вишим температурама доводи до његовог растезања, а тиме и до настанка визуелних дисторзија и промене димензија и ивица стакла. Хладно савијање стакла не доводи до таквих проблема, али на тај начин није могуће обликовати све форме (геометрије) двоструко закривљеног стакла. Сложене закривљене форме могуће је постићи и применом равног стакла, тако да цео процес пројектовања представља постизање компромиса између жеља архитеката и могућности које пружа примена одређеног типа стакла, као о његове економске цене. Треба узети у обзир да ће се стакло увек поломити, али да треба размислити како ће до тога доћи. Такође, у фази пројектовања треба размотрити различите начине ношења панела јер формирање отвора у стаклу за тачкасто ношење доприноси додатним концентрисаним напрезањима у стаклу и ствара могућности за лом у ослабљеним деловима. Применом закривљеног стакла могуће је постићи већу отпорност структуре у погледу конструктивних карактеристика него применом равног стакла. Закривљене стаклене панеле је тешко произвести да буду идентични и идеално обрађени, а због технологије производње која је присутна у Србији, њихова економска цена је за око 3,5 пута већа у односу на равне стаклене панеле.

Још увек не постоје систематизовани искуствени подаци.

2. Како се процес пројектовања и израде закривљеног стакленог омотача примењеног на зградама развијао у последњих неколико година?

Развој технологија допринео је већим димензијама панела, мањим визуелним дисторзијама и економски повољнијим карактеристикама. Све мање се поставља питање могућности израде панела одређених димензија, већ питање функционалне и економске оправданости њихове примене. Такође цена и могућност монтаже панела великих димензија представља веће ограничење за њихову примену него сама могућност њихове производње. Развој технологија довео је до појаве ултратанког и ултрачврстог Горила (енгл. *Gorilla*) стакла. Ово стакло показује одличне визуелне карактеристике и могуће га је даље обрађивати процесом хладног или термичког савијања. За примену у архитектури, ограничење представљају још увек мале димензије панела у поређењу са

класичним стаклом. Примена закривљених форми омотача је све већа, нарочито у последњих десет година.

С обзиром да је примена закривљених форми омотача све већа, нарочито у последњих десет година, правци развоја су смањење економске цене, укидање оптичких дисторзија на закривљеном стаклу и постизање већих димензија. Може се рећи да се и даље најбоља решења постижу кроз сарадњу пројектаната са консултантима/извођачима фасада и произвођачима стакла.

3. Која су главна разматрања приликом примене закривљених стаклених елемената?

Димензије панела, конструктивни систем, величина напона у стаклу, технике обликовања (савијања) стакла, капацитет издржљивости након лома, визуелни квалитет стакла, перформансе самог стакла, соларни фактор, начини засенчења стаклених панела, тип застакљења (једноструко, двоструко и троструко застакљење - ТИ панели), могућност примене ламинираног стакла и одређених боја, премаза и фолија, визуелна дисторзија, рационализација геометрије, смањење економске цене, могућност замене панела након лома стакла без угрожавања стабилности целокупне конструкције омотача.

Сви аспекти примене закривљеног стакла подједнако су важни, а од самог пројектанта зависи редослед којим он приступа разматрању аспеката.

4. Како се ова разматрања разликују у односу на примену равних стаклених елемената?

Треба обратити пажњу на већу остељивост закривљеног стакла. Већа крутост закривљеног стакла доприноси његовој мањој дебљини. Приликом примене закривљених ТИ панела, неопходно је узети у обзир постојање унутрашњег притиска, односно постојање разлике у климатским условима у којима је панел произведен и склопљен у фабрици, од климатских услова који владају на градилишту односно месту њихове монтаже, а који могу довести до пуцања стакла. Коришћење бољих конструктивних карактеристика закривљеног стакла представља посебан изазов. Формирање отвора у стаклу ради ношења панела, такође представља већи изазов код закривљеног стакла. Захтеви за већим визуелним квалитетом закривљеног стакла неизоставно утичу на повећање његове

цене. Свега неколико типова ниско-емисионих премаза (углавном тврдих) се може применити на закривљена стакла. Ипак, генерално говорећи, највећа разлика се уочава у њиховој економској цени.

Разлика је првенствено у економској цени која је знатно виша за закривљено стакло, док су истовремено све остале техничке катактеристике и прорачуни комплекснији.

5. Који су кораци у процесу пројектовања и конструкције закривљених стаклених омотача архитектонских објеката и како су они повезани?

Конкретни кораци процеса пројектовања и конструкције закривљених стаклених омотача су приказани кроз дијаграме који су дати у овом поглављу, а као додатне примедбе наведени су проблеми оптимизације стаклених панела, укључивање извођача фасаде што раније у процес пројектовања, обезбеђивање узорака на самом почетку пројектовања, као и у каснијој фази.

6. Који су изазови и могућности за примену и инжењеринг закривљених стаклених омотача?

Изазов представљају првенствено нови начини обликовања стакла, као што је могућност обликовања традиционалном техником дувања стакла у обле форме из којих би се исецали панели. Такође нова решења треба тражити у новим материјалима као што су полиетиленске плоче (*ETFT-Ethylene Tetra Fluoro Ethylene*), материјал који је сличан стаклу и који је због те своје особине веома брзо постао један од најинтересантнијих и истовремено "најузбудљивијих" материјала у данашњој индустрији дизајна и изградњи. Такође, посебан изазов представља примена горила стакла (*Corning Gorilla Glass*), чија могућност примене у архитектонским објектима је у фази истраживања. Унапређења је могуће остварити и процесом оптимизације закривљене површине стакленог омотача с циљем панелизације (поделе на панеле) која ће омогућити да већи проценат буду равни и једноструко закривљени панели, а мањи проценат двоструко закривљени панели.

Свака примена представља нови изазов, с обзиром на то да су захтеви архитектата још увек ван техничких услова извођења. Произвођачи се труде да

приближе технику производње захтевима архитеката као и да едукацијом архитектама приближе техничке могућности производње.

7. Који конструктивни системи су најпогоднији (челични решеткасти носачи, јарболасте решетке, кабловски решеткасти носачи, носачи великих димензија, стаклени стубови (енгл. *glass fins*), просторни решеткасти системи, тансегрити конструкције, мрежасте системи (од крутих штапова и мреже каблова) за примену закривљених стаклених панела и зашто?

Значајна одлика примене закривљеног стакла је коришћење његове "геометријске" крутости у циљу постизања већих распона и смањења броја елемената носеће конструкције. Међутим, потпуности стаклене конструкције (стаклени стубови, греде, ребра) или просторне структуре великог распона није могуће остварити у случају великог закривљења. Најмања ограничења примени жакривљеног стакла постављају рамовски системи. Код примене мрежасте кабловске конструкције неопходно је предвидети могућност и одредити максимално извијање.

Стакло је материјал који не трпи велике деформације. Тачније, оно има своје перформансе и дозвољене максималне вредности напрезања у односу на различите статичке утицаје. Основну конструкцију објекта, обично пројектант одређује водећи се другим захтевима. На деловима објекта где је предвиђено застакљење накнадно се проверава и евентуално коригује конструкција, док је ређе обрнуто.

С обзиром на велики број различитих конструктивних система, може се закључити да не постоји систем који би свеобухватно био најбољи за примену на закривљеним стакленим омотачима већ све зависи од захтева и услова примене.

8. Који системи веза/фиксирања стаклених панела су најпогоднији, односно не одговарају (оквирни системи – класични, полуструктурални и структурални и безоквирни системи – тачкасто фиксирање бушењем и помоћу завртња или уметнутим држачем, тачкасто фиксирање помоћу спона и тачкасто фиксирање лепљеном везом) за примену закривљених стаклених панела и зашто?

Рамовски систем се истиче као најбољи, али захтев архитеката за неоптерећеношћу транспарентне површине омотача елементима носеће конструкције и даље поставља изазове пред извођаче. Добро решење представља и стакло залепљено на елементе потконструкције, посебно када се такав панел претходно постави на оквир у фабрици након чега следи његова монтажа на градилишту. Везе и начин фиксирања у случају примене закривљених стаклених панела морају се претходно анализирати и проверити нумерички, с обзиром на то да форма панела доприноси томе да се оптерећење преноси на различите начине. У случају примене закривљених стаклених елемената који су тачкасто ношени помоћу потконструкције, неопходно је узети у обзир редослед активности: 1. Формирање отвора на стакленом панелу; 2. његово савијање уз помоћ неке од техника обликовања; 3. каљење стакленог панела. За тачкасто ношење и фиксирање панела неопходно је да стакло буде каљено (преднапрегнуто).

9. Да ли узимате у разматрање термичке перформансе приликом примене закривљених стаклених панела?

Термичке перформансе се увек разматрају, па и у случају закривљеног стакла. Међутим, могуће је применити само мали број нискоемисионих премаза у линијској производњи и није могуће постићи добар соларни фактор (g -вредност). Термичке перформансе се морају анализирати и ради избегавања термичких шокова у стаклу.

Термичке перформансе се узимају у обзир без могућности добијања тачних резултата. Такође, ради се на истраживању техника за прецизан прорачун термичких карактеристика закривљеног стакла.

4.2.3 Мапа процеса пројектовања и конструкције геометријски комплексних стаклених омотача

Значајно је нагласити да је процес верификације спроведен међу учесницима из А/И пројектантског тима⁵, консултантских фирми за фасаде као и извођачких фирми и произвођача стакла, што је додатно допринело да све фазе,

⁵ Пројектантски тим састављен од архитеката и инжењера

односно нивои мапирања процеса буду довољно детаљни и прецизни у спроведеном истраживању чији резултат је представљена мапа. Неопходно је нагласити да су исте нетачности или допуне идентификоване у више од једног интервјуа узете у обзир у унапређеној верзији мапе, на начин да су црвеном бојом означени сви измењени или допуњени елементи.

Шест фаза и две подфазе целокупног процеса пројектовања и израде геометријски комплексног стакленог омотача архитектонских објеката (Дијаграм 1) су дефинисане, анализирани и представљени на Дијаграмима као: 1. Израда оквирног пројектног решења (Дијаграм 2); 1а. Израда нацрта предлога пројектног решења (Дијаграм 3); 2. Израда детаљног пројектног решења (Дијаграм 4); 3. Израда коначног пројектног решења (Дијаграм 5); 4. Израда тендерске документације и евалуација понуда (Дијаграм 6); 4а. Прибављање информација од извођача о пројектном решењу и тендерској документацији (Дијаграм 7); 5. Кординација пројектног процеса са процесом фабрикации (Дијаграм 8); 6. Надзор извођења радова до њиховог завршетка (Дијаграм 9).

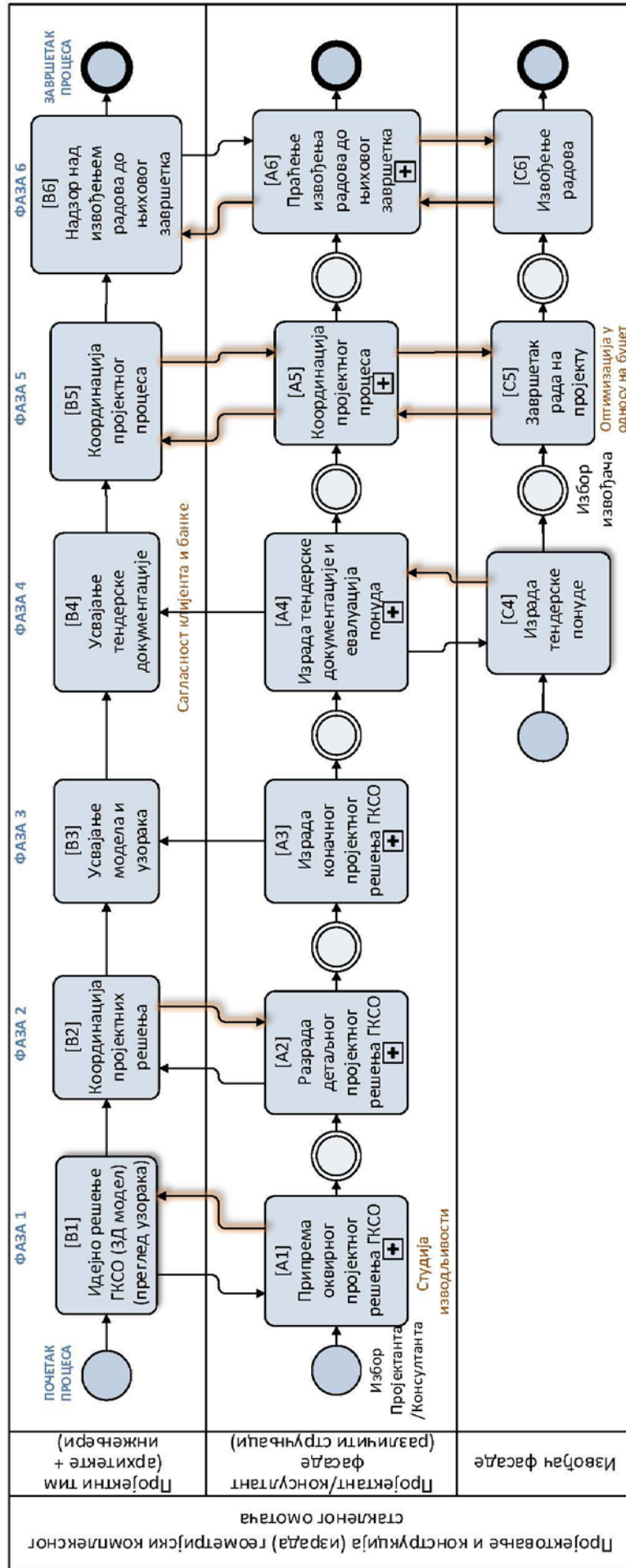
Ознака \oplus представља проширење одређених активности у овом једном Дијаграму које су дате засебним Дијаграмом. Такође, у дигиталној форми (програм *Visio Professional*) ова ознака даје директну везу са Дијаграмом на коме је представљена појединачна фаза самог процеса или проширење активности.

С обзиром на то да су сви актери (учесници) у овом процесу подељени у три основне групе:

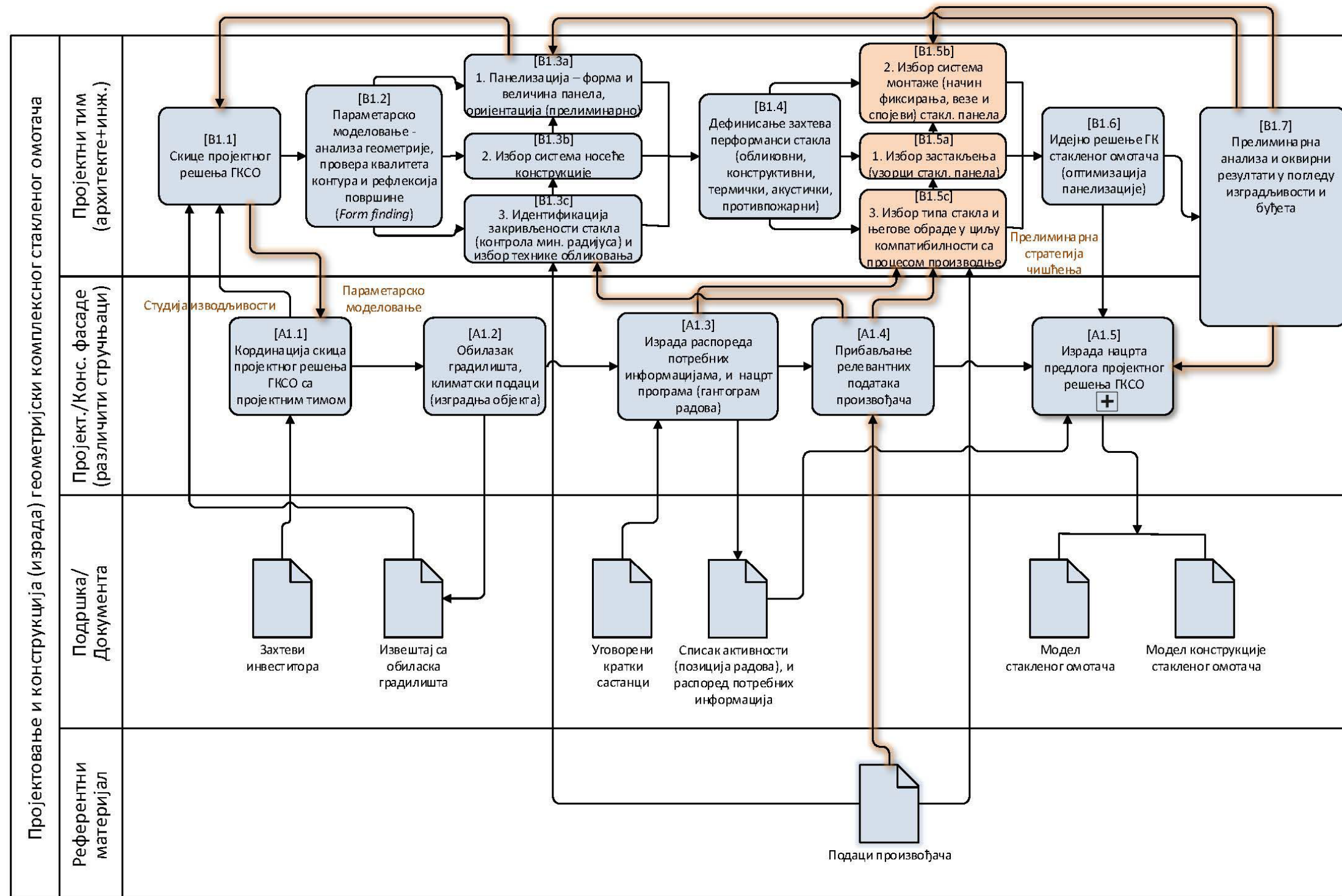
- Пројектни тим (архитекте + инжењери),
- Пројектант/консултант фасаде (различити стручњаци), и
- Извођач фасаде;

тако су и све активности које обавља одређена група актера по фазама означене на процесној мапи на следећи начин:

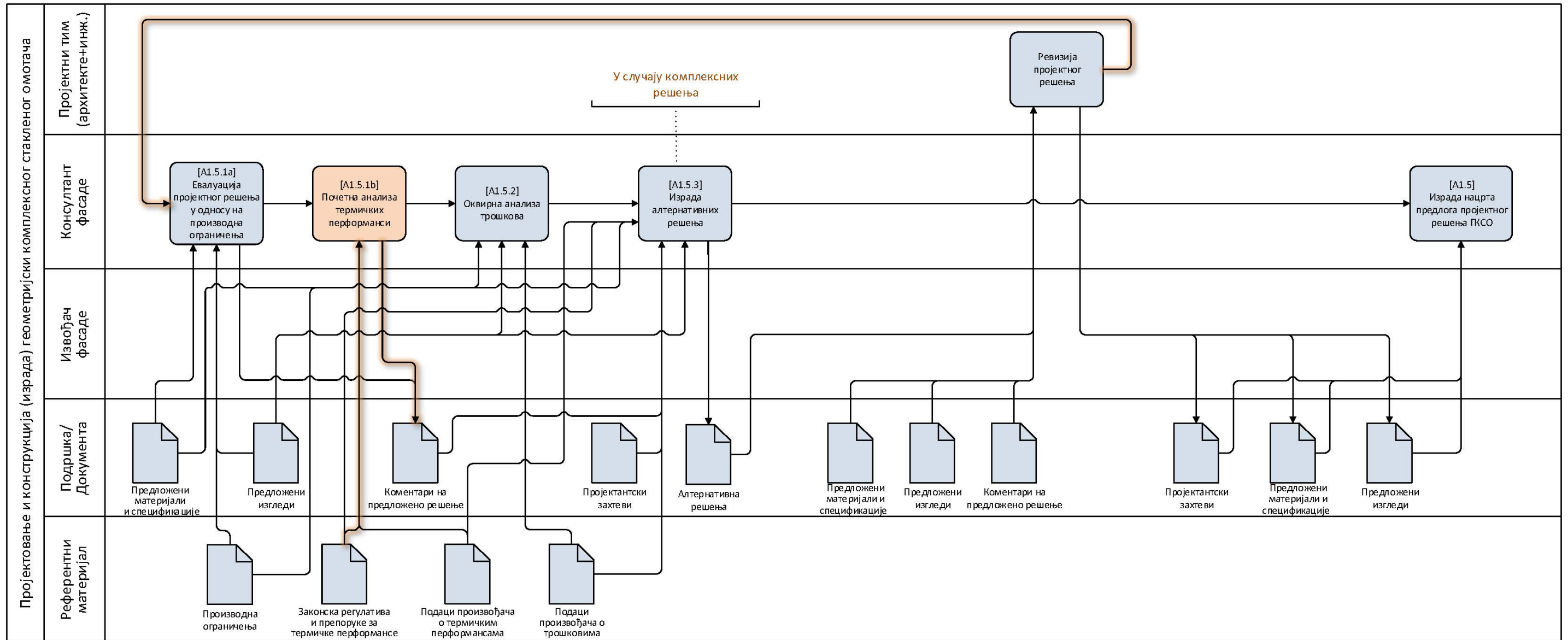
- Пројектни тим – Активности Б1–Б6
- Пројектант/консултант фасаде – Активности А1–А6, и
- Извођач фасаде – Активности С1–С6.



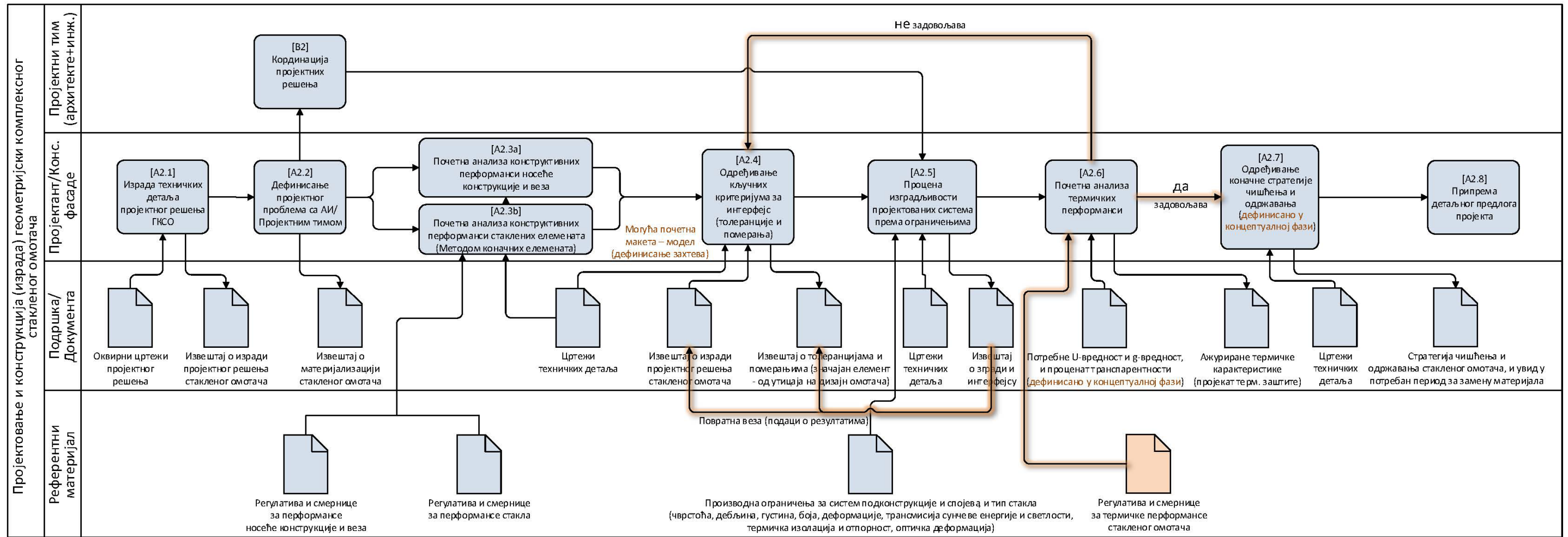
Дијаграм 4.1. Фазе пројектовања и конструкције (израде) геометријски комплексног стакленог омотача архитектонских објеката



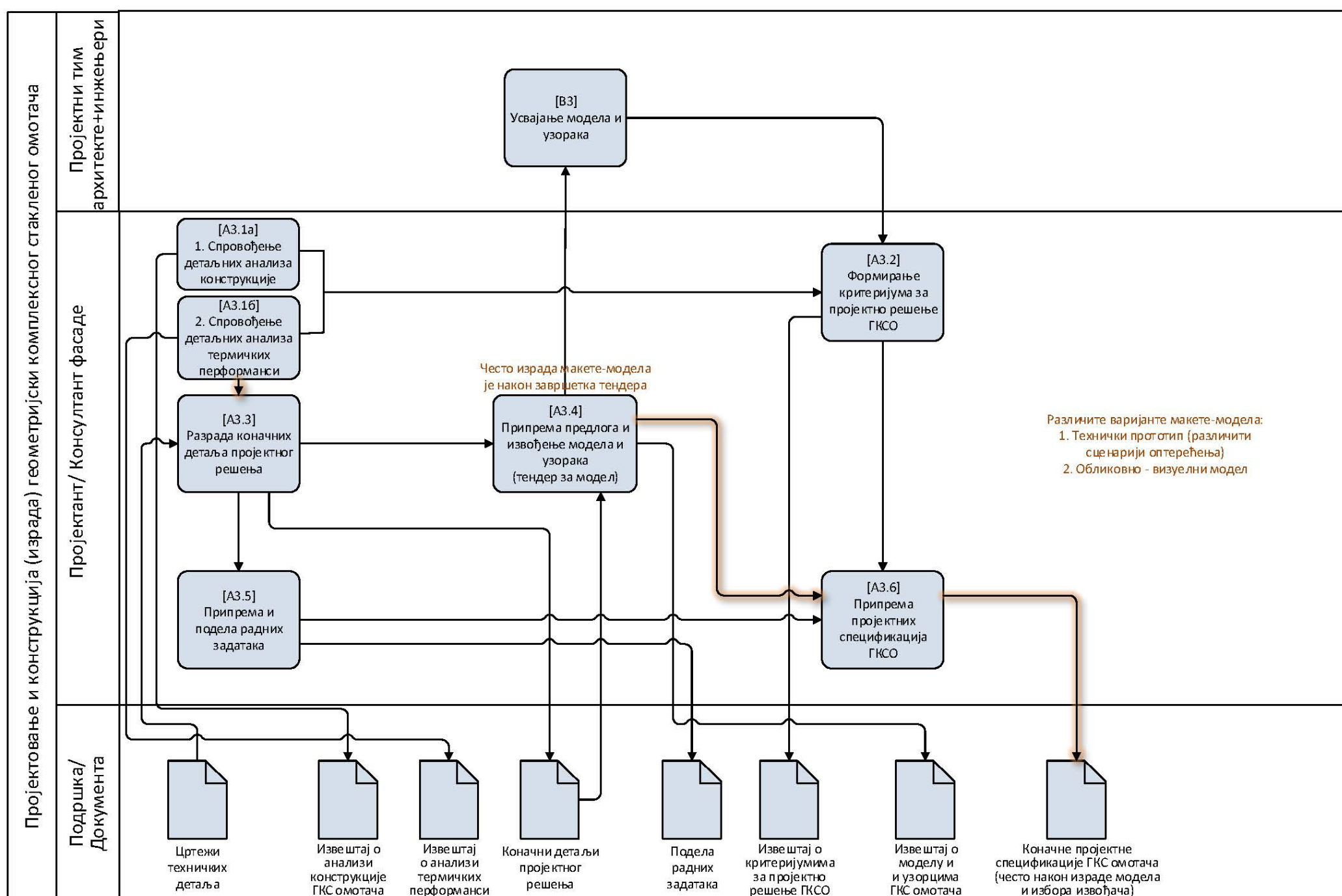
Дијаграм 4.2. Фаза израде оквирног пројектног решења геометријски комплексног стакленог омотача



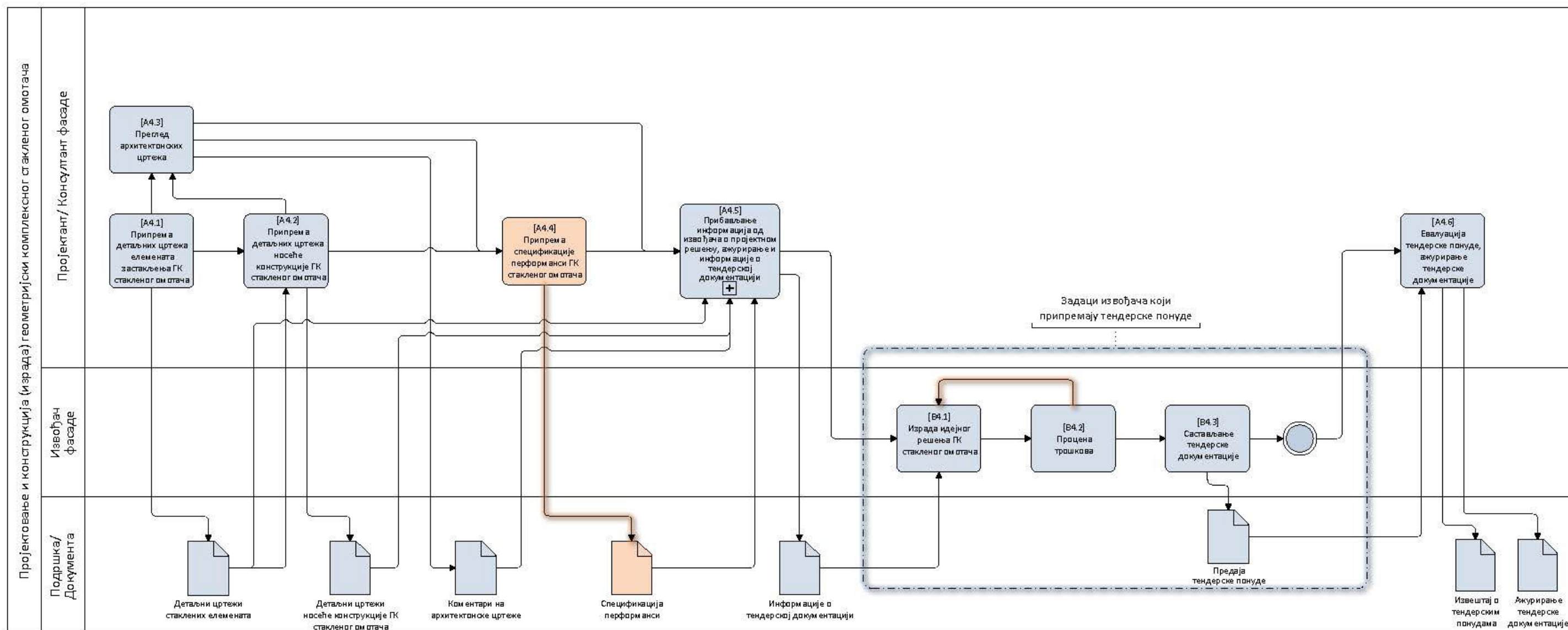
Дијаграм 4.3. Фаза израде нацрта предлога пројектног решења геометријски комплексног стакленог омотача



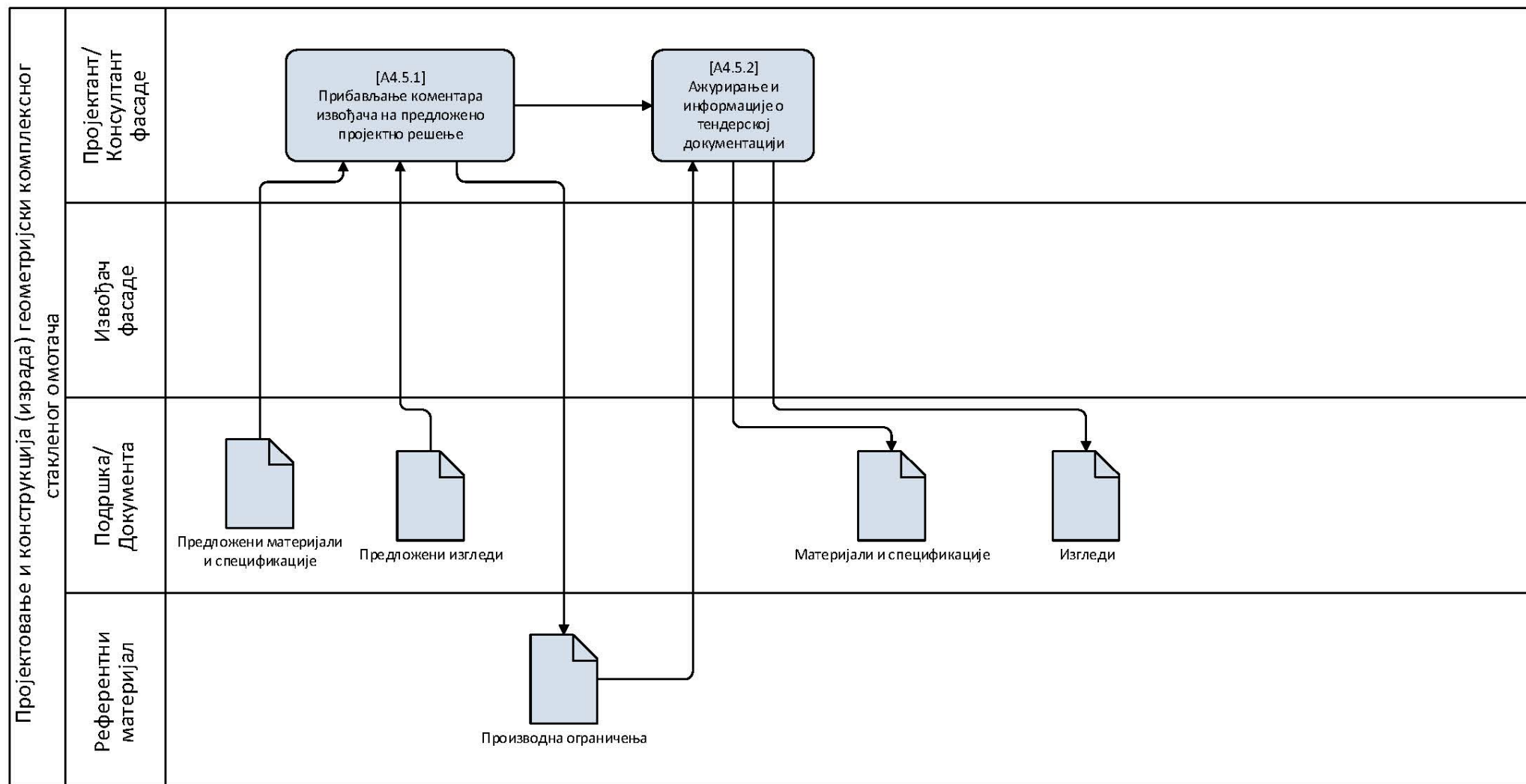
Дијаграм 4.4. Фаза израде детаљног пројектног решења геометријски комплексног стакленог омотача



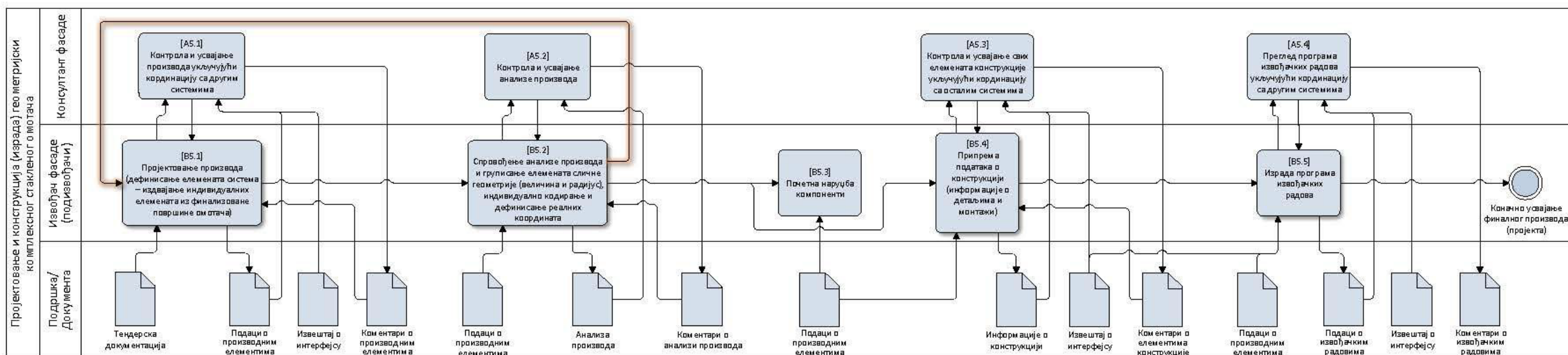
Дијаграм 4.5. Фаза израде коначног пројектног решења геометријски комплексног стакленог омотача



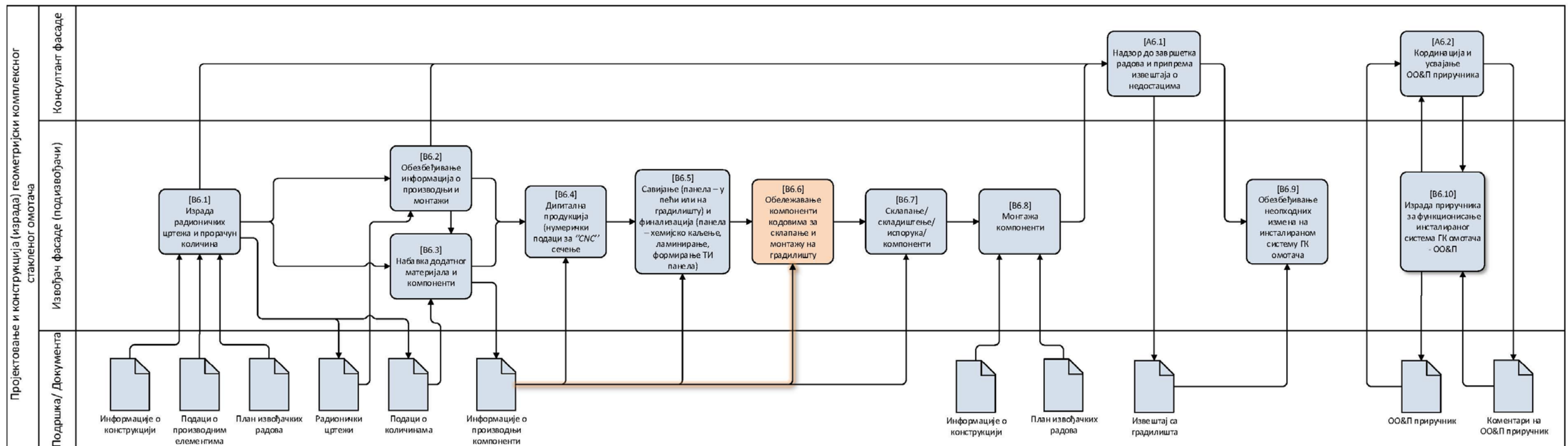
Дијаграм 4.6. Фаза израде тендерске документације и евалуација понуда за израду геометријски комплексног стакленог омотача



Дијаграм 4.7. Фаза прибављања информација од извођача о пројектном решењу и тендерској документацији за израду геометријски комплексног стакленог омотача



Дијаграм 4.8. Фаза координације пројектног процеса са процесом производње компоненти геометријски комплексног стакленог омотача



Дијаграм 4.9. Фаза надзора извођења радова (монтажа компоненти) до њиховог завршетка

Проучавањем расположиве грађе, а нарочито базе података прикупљене током спроведених интервјуа са актерима који укључује инжењере, архитекте, консултанте и произвођаче фасада и стакла, уочена је потреба за дефинисањем процеса пројектовања и конструкције/израде геометријски комплексних форми омотача архитектонских објеката. Током интервјуа добијени су различити подаци/одговори који су указали на чињеницу да није могуће добити утврђене елементе процеса, већ се процес посебно прилагођава сваком пројекту. Имајући у виду концепт стаклене површине, геометрију форме, конструктивне и термичке карактеристике, форму и технику обликовања стаклених елемената, компатибилност свих третмана са процесом савијања, а с циљем креирања мапе процеса кроз дијаграме, идентификовани су фактори који дефинишу примену стакла у материјализацији геометријски комплексних форми омотача. Мапа је израђена применом стандардизованог начина графичког представљања специфичних процеса у моделу пословног процеса (*BuildingSMART's adaptation of Business Process Map Notation*).

У фази припреме оквирног пројектног решења, након пројектантских скица неопходно је спровести параметарско моделовање (анализа геометрије и провера квалитета контура и рефлексије), као и избор панелизације, система носеће потконструкције и технике обликовања стакла пре него што се поставе захтеви за перформансама стакла (обликовни, конструктивни, термички, акустички и противпожарни). Након избора типа застакљења и стакла, као и начина фиксирања, важну активност на крају представља прелиминарна анализа у погледу изградљивости и буџета која ће омогућити израду коначног нацрта предлога пројектног решења или израду алтернативних решења са другачијим избором елемената стакленог омотача. Такође, важно је напоменути да ова фаза подразумева евентуалну почетну анализу термичких перформанси, као и оквирну анализу трошкова.

У фази разраде детаљног пројектног решења која обухвата израду техничких детаља и почетну анализу конструктивних перформанси носеће конструкције и стаклених елемената, као и термичких перформанси, важну карактеристику ове фазе представља одређивање кључних критеријума за дозвољена одступања (толеранције) и померања, након чега следи процена

изградљивости пројектованих система према ограничењима. Такође, важно је напоменути да ова фаза обухвата одређивање коначне стратегије чишћења и одржавања стакленог омотача.

Фаза израде коначног пројектног решења, поред спровођења детаљних анализа конструкције и термичких перформанси, као и разраде коначних детаља пројектног решења обухвата припрему и извођење модела и узорака као услова за формирање критеријума за пројектно решење и припрему пројектних спецификација.

Фаза израде тендерске документације показује да састављању тендерске документације које обухвата првенствено израду идејног решења геометријски комплексног омотача и процену трошкова, претходи припрема детаљних цртежа носеће конструкције и елемената застакљења и спецификације перформанси стакленог омотача, као и прибављање коментара извођача на пројектно решење.

Фаза координације пројектног процеса (активности извођача) подразумева пројектовање појединачних производа и њихову анализу, груписање и кодирање, након чега следи почетна наруџба компоненти и израда програма извођачких радова. Сви елементи ове фазе су контролисани и усвојени од стране консултанта фасаде.

Фаза извођења, специфична у погледу закривљених стаклених елемената, подразумева израду радионичких цртежа на основу којих се приступа дигиталној производњи (сечење) стакла и техници обликовања термичким путем а затим и финализацији, након чега следи склапање компоненти и њихова монтажа. У случају технике хладног савијања, формирање панела (ГИ панела) се изводи у фабрици док монтажа подразумева директно савијање на градилишту на потконструкцију. Могуће је извршити савијање стаклених елемената и у фабрици, али је тада неопходно причврстити их за рам, с обзиром на то да стакло тежи да се врати у првобитан положај.

Као посебан допринос наведен је потребан списак докумената и референтног материјала који је неопходан за спровођење активности (корака) или представља њихов резултат (извештај) у оквиру одређене фазе.

5. Потенцијали и ограничења примене стакла у материјализацији геометријски комплексних форми омотача

Ово поглавље представља део истраживачког процеса у коме су анализирани визуелно-обликовни, енергетски и технолошко-економски потенцијали и ограничења примене, и како они утичу на перформансе самог стакла и целог омотача. На основу анализираних аспеката дефинисани су релевантни критеријуми. Утврђени критеријуми коришћени су при вредновању креираних хипотетичких модела.

Омотач представља елемент зграде који обавија унутрашњи простор и конструкцију зграде, обављајући истовремено различите функције као што су заштита људи и имовине од негативних спољашњих утицаја и опасности, обезбеђивање приватности и одговарајућих просторних и климатских услова за оптимално одвијање различитих активности корисника, као и културолошку функцију у погледу задовољења захтева који се односе на форму и њена симболичка значења, као и економску функцију, доприносећи оптималном односу трошкови – перформансе.

Задовољење захтева у погледу различитих функција омотача одређује његов квалитет. Тако, квалитет стакленог омотача у најширем смислу, сагледава се кроз следеће карактеристике:

- **Функционални квалитет**, у којој мери омотач испуњава све функционалне захтеве, односно одговарајући је за активности које се

одвијају у унутрашњем простору. То се посебно односи на захтеве у погледу топлотне и звучне заштите, и сигурности.

- *Визуелно-обликовни квалитет*, првенствено се односи на форму омотача, његову површину, геометрију, панелизацију, димензије и форму појединачних елемената; затим у којој мери се омотач опажа (перципира) као оригиналан или леп; начин на који се доживљава, да ли је пријатан, узбудљив, ружан или једноставно комерцијалан; у којој мери представља дело културе, односно да ли је представник одређеног стила или времена; у којој мери асоцира другачије значење.
- *Техничко-технолошки квалитет*, у којој мери потконструкција, стакло, материјали испуна и веза задовољавају техничке захтеве који се односе на чврстоћу, крутост, стабилност, одрживост и минималну потребу за одржавањем. Такође, важан аспект су физичке карактеристике застакљења које обезбеђују квалитет унутрашњег комфора у односу на температуру, влажност, природно и вештачко осветљење и звук, доприносећи очувању енергије и окружења.
- *Економски квалитет*, у којој мери су финансијска средства ефикасно и ефективно примењена, односно какав је однос цена у односу на перформансе. Такође, са аспекта инвестиција, економски квалитет зависи од постигнутог нивоа повраћаја средстава.

Оптимални укупни квалитет стакленог омотача подразумева оптималан однос визуелно-обликовних, функционалних, техничко-технолошких и економских карактеристика, као што приказује Слика 5. 1.



Слика 5.1. Оптимални укупни квалитет стакленог омотача подразумева оптималан однос визуелно-обликовних, функционалних, техничко-технолошких и економских карактеристика

У односу на наведене карактеристике које описују укупни квалитет стакленог омотача, за даљу анализу потенцијала и ограничења примене стакла у геометријски комплексним формама омотача и утврђивање критеријума за њихову оцену, одабрани су следећи аспекти:

- Визуелно-обликовни,
- Енергетски,
- Технолошко-економски.

5.1 Визуелно-обликовни аспект

5.1.1 Естетски потенцијали и феномен перцепције архитектуре од стакла (геометријски комплексних форми)

Естетика заузима значајно место у процесу стварања и обликовања, с обзиром на то да сама учествује у том процесу. То подразумева да форма објекта није одређена само њеном функцијом и конструкцијом, као и контекстом у ком се објекат налази, већ и тежњом пројектанта да се постигне лепота и културолошко значење.

У теорији форме значајно место заузима визуелно опажање и његово значење. Наше физичко окружење опажамо и тумачимо уз помоћ психологије, а креирамо га уз помоћ архитектуре. Архитектура јесте једна од визуелних уметности која ствара одређене просторне слике у окружењу, односно архитектура има могућност да обликује нашу перцепцију, с обзиром на то да опажамо облике удружене са њиховим значењем. То указује да је за архитекте перцепција њихових објеката веома важна.

Форме архитектонских објеката, и не само архитектонске форме, посматрамо у еуклидском простору са три просторне димензије дефинисане декартовим правоуглим системом оса: x -дужина, y -ширина, и z -висина. Теоретски, физичка тела се налазе у тродимензионалном простору у коме остварују захтевану (жељену) и намењену функцију, као и садејство са осталим покретним статичним елементима и компонентама, што је у архитектонском смислу довољно за тумачење објеката и простора. Ако се подсетимо првог поглавља (Део 1.2.1 Улога геометрије у архитектури, стр. 33), за шире тумачење простора (космоса) користи се сферичка и хиперболичка геометрија.

Архитектонска форма се може посматрати као производ основних геометријских облика као што су квадрат, круг и троугао, али исто тако може бити компактна и нераздвојива. Заправо, прожимање ових основних облика, понављање истих, ритам понављања, као и утицај других облика (или само делова) који се могу јавити, компонују архитектонску форму у простору. Форма у архитектури се посматра са визуре обичног поматрача, њен склад са околином, њене боје и елементи.

Препознавање архитектонске форме врло је директно повезано са њеном функцијом. Најчешће архитектура живи у том заједништву. Некада форма прати функцију, некада обрнуто, а некада форма прати форму (геометријску). Међутим, овде треба додати још једну чињеницу, а то је да нас наше претходно стечено знање, искуство и доживљаји подсећају да неке архитектонске форме одговарају одређеним функцијама што је, можда, најкарактеристичније за стамбене објекте.

Али анализа неких савремених архитектонских форми реализованих у последњих десетак година, не може увек са сигурношћу одредити њихову функцију. Услед развоја савремених материјала и технологија грађења, не може се са сигурношћу утврдити да ли се ради о опери, спортском објекту, аеродрому или музеју. Преузимање облика из природе (латице цвета, птичије гнездо, покрети водених површина итд.) (Слика 5.2) и техничко-технолошке могућности њихове интерпретације у архитектонско-грађевинском смислу, посматраче и кориснике додатно збуњује, не само у одређивању функције посматране форме, већ ствара дилему да ли се ради о архитектонском објекту или скулптури.



Слика 5.2. Преузимање форме из природе (гнездо) и њена интерпретација на архитектонском објекту, национални стадион у Пекингу
(Извор: <http://homesthetics.net/the-chinese-national-stadium-in-beijing-the-birds-nest-stadium/>)

Примена и особине савремених материјала, као што је стакло, у реализацији архитектонских облика и форми, у садејству са светлошћу, доприносе већем степену опажања таквих објеката у односу на примену традиционалних материјала као што су камен, бетон или опека. Ово се такође може сагледати на примеру пирамида у Египту и стаклене пирамиде у Лувру. Заправо, стаклена пирамидална форма доживљава се као лакша и мање оптерећујућа за амбијент и окружење, него када би на њеном месту стајала слична или иста камена форма. Примена савремених материјала (у овом примеру челичне конструкције и транспарентног стакла), као и њихов колорит, пружају индивидуални осећај веће ширине, провидности и сагледивости архитектонске форме и простора у целини.

За процес опажања, памћења и интерпретације форме, несумњиво је важно значење архитектонске форме које се базира на ранијем искуству, знању и разумевању изграђеног окружења, осећању током процеса опажања у датом тренутку и вези између корисности објекта и његове историјске и културне вредности (Voordt and Wegen, 2005). Када се појаве нови објекти, посебно изражених комплексних форми, потребно је време да "преживе" и постану препознатљиве у нашој свести, иако је њихова оригиналност беспрекорна, могућих значења много, што представља предност, али исто тако око њих лебди много питања "о којој врсти објекта се ради", "како и којом технологијом је изведено", "каква је конструкција омотача" (Alihodžić, 2010).

Чињенице као што су сличност или различитост елемената, (не)постојање симетрије, (дис)континуитет, величина и близина, које су карактеристичне за геометријски комплексну форму, могу да утичу на стварање субјективног става и осећаја (личне емоције и интересовања) у односу на визуелно опажање и памћење архитектонске форме.

Сам визуелни доживљај је динамичан, с обзиром на то да оно што човек опажа јесте међусобно дејство усмерених напетости које су битан састојак сваког опажања као што су облик, величина, место или боја (Arnhaјm, 1987). Углови и криве којима геометријски комплексне форме одступају од равних површина стварају снажну визуелну динамичност и утисак да се равна површина омотача скупила, савила или стиснула. У том смислу, циљ изражених динамичких особина комплексних форми јесте стварање "екцеса" у простору који служи памћењу датог објекта. То указује на пажњу коју привлачи нерегуларна форма објекта.

Објекти геометријски комплексних форми, имају свој пун архитектонски и што је посебно значајно индивидуални израз. Као такви, не трпе утицај околних објеката, јер имају пренаглашену индивидуалност и често изражену асиметрију, због чега изгледају као видљив знак. *"Динамички истискују простор, као што предмет истискује воду у Архимедовој кади и зракасто се шире из средине."* (Arnhaјm, 1990: 86).

Перцепција објекта почиње од његовог спољашњег омотача. Собзиром на то да је архитектура пре свега визуелно искуство, спонтана перцепција га претвара у слику – статичну формацију, док сама форма објекта пружа

одговарајуће просторне конфигурације. Како такав објекат нуди сценарио за одређену акцију, док омотач представља значајан део сценарија јер сам представља изграђену форму. Он открива поруку кориснику који је у спољашњем простору, и обезбеђује комуникацију између изграђеног објекта и његовог окружења. Порука се преноси кроз артикулацију омотача.

Идентитет објекта, изражен кроз његове различите функције, првенствено је материјализован у самом омотачу објекта. *"Обликовање споља према унутра, као и изнутра према споља, ствара нужне напетости, које доприносе настајању архитектуре. Пошто се унутрашњост разликује од спољашњости, зид – то место прелаза – постаје архитектонски догађај. Архитектура се дешава тамо где се срећу унутрашње и спољашње силе примене и простора.... Архитектура, као преградни зид између унутрашњости и спољашњости, постаје просторни докуменат овог решења и његове драме"* (Арнхајм, 1990: 98). Омотач објекта, дељењем простора на спољашњи и унутрашњи, креира његове границе; одређује карактер тензије између унутра и споља, пружајући отвореност и позив или потпуно затварање и одбацивање, што приказује квалитет његове комуникације са окружењем. Дакле, како дефинише карактер изграђеног објекта, омотач објекта такође дефинише карактер окружења.

Генерално, застакљени објекти бришу границе између спољашњости и унутрашњости. Транспарентност задовољава нашу радозналост за сагледавањем унутрашњег садржаја и услова, што је карактеристично у случају јавних објеката, пословних и продајних простора. Променљивост перцепције стакленог омотача представља карактеристику самог материјала. Већа транспарентност може допринети мањој могућности уочавања контура форме. У случају закривљеног стакла, тип закривљености, као и квалитет производа (оптичка дисторзија као резултат производног процеса) могу знатно да измене перцепцију унутрашњег, односно спољашњег простора.

Претходна дефиниција омотача, која подразумева границу између унутрашњости објекта и његовог окружења, указује на то да стаклени омотач у практичном смислу, дефинише вид комуникације са окружењем. Да би се утврдиле главне карактеристике примене и обликовања стакленог омотача, неопходно је проценити доминантне аспекте примене који укључују анализу карактеристика: транспарентности и дематеријализације. Ове карактеристике подразумевају један од најактуелнијих приступа обликовању стакленог омотача у савременој архитектури. У архитектонском смислу, транспарентност и дематеријализација су оптички инструменти обликовања омотача. Оба појма су повезана са материјалношћу; транспарентност се заснива на перцепцији различите врсте материјала (стакла), док се дематеријализација заснива на (не)материјалности стакленог омотача. Такође, оба појма подразумевају различит квалитет комуникације стакленог омотача са окружењем.

Све већа тежња за транспарентним омотачем допринела је развоју технологија конструктивних стаклених фасада, укључујући коришћење стакла као конструктивног материјала и тачкасто ношење стаклених панела. Транспарентност представља најлепшу особину стакла, али највећа транспарентност коју је могуће постићи уз помоћ стакла са ниским садржајем феро-оксида, истовремено подразумева и највећу трансмисију сунчевог зрачења. Генерално, транспарентност је комплексан феномен, настао као ефекат комбиновања различитих параметара. Велики проценат трансмисије представља највећи изазов у односу на контролу сунчавог зрачења.

С друге стране, примена модерних, визуелно транспарентних омотача подразумева да је све што се дешава иза њих, такође транспарентно и доступно. Али према Грејему (Dan Graham) (како је наведено у Hill, 2006), транспарентност модерних објеката је варљива, с обзиром на то да често представља лажну манипулацију реалношћу. С једне стране, стварна функција великих компанија јесте концентрација личне моћи и чување информација, док с друге стране, својим стакленим фасадама дају утисак апсолутне отворености. Транспарентност је само визуелна, јер стакло физички одваја визуелни свет од вербалног, изољујући посматрача од процеса доношења одлука и невидљиве везе која постоји између компанија и друштва.

Неки аутори препознају две врсте транспарентности: буквалну (доследну) и транспарентност као феномен (Asimgil, 2007). Док буквална транспарентност произилази из урођене особине стакла, друга је саставни део организације равни које се простиру у дубину иза стаклене површине. Другим речима, док буквална транспарентност зависи од физичких особина материјала које карактеришу површину омотача, феноменолошка транспарентност се односи на интелектуални акт који произилази из површине стакла иза које су визуелне равни на различитим дубинама и могу се мање или више двосмислено тумачити.

Архитекте данас све више примењују апсолутну транспарентност овог прозачног материјала, искоришћавајући карактеристику стакла да пропушта светлост док спречава пролаз топлоте и звука, За Миса (Mies van der Rohe), као за многе архитекте, пропуштена светлост кроз стакло је средство да се открије и искуси простор, као и да се материјал учини нематеријалним и нематеријално опипљивим. Постоји много разлога зашто архитекте све више примењују објекте са транспарентним стакленим омотачем. Првенствено су у потрази за лакоћом и сензуалношћу, а затим такав омотач им помаже да открију и прикажу унутрашњу структуру простора, као и да обезбеде светао, "небески" простор.

Светлост је одувек имала значајну улогу у дефинисању архитектонске форме. Чак и мало присуство светлости материјализује контуре и дематеријализује простор. Дубина као димензија, било просторна или временска, увек се уочава у односу на површину стакла. Дакле, строго говорећи, површина стакла поседује две вредности: једну коју посматрамо као материјалну, другу коју гледамо у другом, виртуелном свету. У овом другом случају, полазећи од површине, тај свет се шири у дубину (Asimgil, 2007).

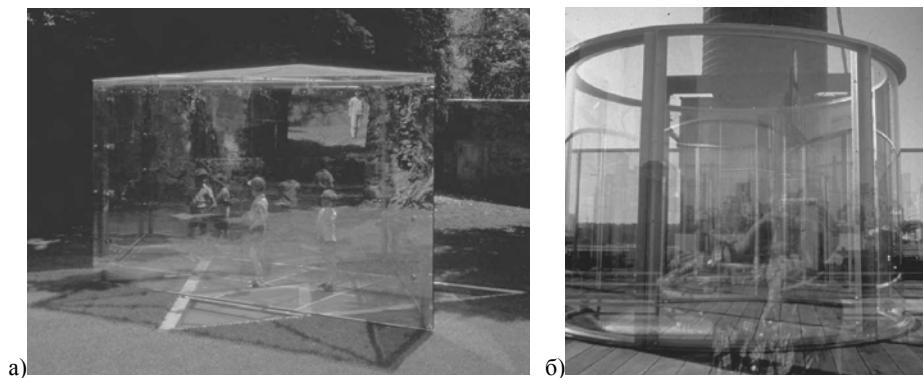
Пропуштањем светлости кроз закривљено стакло, попут оптичке мембране, стакло постаје светлећа опна која распршује светлост. Такође, применом закривљеног стакла, посматрана слика често је нејасна, а тиме стакло постаје заводљиво, у нашем покушају да разумемо шта је иза, стварајући истовремено различите слике са наглашеном рефлексijом у различитим правцима.

Међутим, треба имати у виду и да најпрозрачније стакло може постати потпуно непрозирно услед скривене рефлексije као последице амбијеталних услова осветљења, како спољашњих услед сунчеве светлости, тако и унутрашњих

услед вештачког осветљења. Антирефлексивни премази доприносе да се умањи овај ефекат, повећавајући релативну транспарентност стакла у различитим условима.

То је разлог што транспарентност стакленог омотача директно зависи од рефлексивности стакла. Стакло је само по себи рефлексивно као што је транспарентно, посебно када светлост упада под великим углом. Ефекат се може повећати или умањити применом антирефлексивног или рефлексивног премаза. Једно од значајних достигнућа индустрије стакла представља развој неутралних нискоемисионих премаза где су ефекти боје и рефлексивности ублажени, а истовремено је побољшан *g*-фактор. Међутим, рефлексивност је веома ефикасно средство соларне контроле. Што се више енергије рефлектује, мање се трансмитује у унутрашњи простор, што је посебно значајно када је доминанта потрошња енергије за хлађење. Рефлексивност јасно показује однос између изгледа и перформанси, као и неопходност пажљивог комбиновања различитих карактеристика, с циљем постизања оптималног резултата.

У случају слабијег унутрашњег осветљења у току дана, стакло знатно рефлектује небо и околне објекте стварајући утисак хармоничног односа објекта и његовог окружења. Током ноћи, са вештачким осветљењем, унутрашњост је у потпуности откривена. Тако, стаклене фасаде у различитој мери откривају и скривају своју унутрашњост између ова два гранична стања, јер како је Мис (Mies van der Rohe) уочио, ефекат стакла у омотачу који архитекта жели да постигне, не зависи много од игре светлости и сенке, већ узајамног односа различите рефлексивности светлости са стаклене површине (Hill, 2006). Услед таквог односа, посматрач је често вођен виртуелном сликом - сопственим одразом на стакленој површини, било да се ради о равном или закривљеном стаклу (Слика 5.3). Додатно, временски услови, као што су правац сунчевог зрачења и услови на небу подешавају транспарентност и рефлексивност стаклене површине, а тиме и однос спољашњости и унутрашњости. У том смислу, може се рећи да, зависно од годишњег доба и доба дана, стаклене фасаде говоре различитим језицима.



Слика 5.3. Одроз посматрача на: а) Равном стаклу;
 б) Закривљеном стаклу; (Извор: Hill, 2006: 151, 155)

Иако је архитектура Модерне углавном била заснована на примени обичног равног стакла, савремени архитекти смишљају нове оптичке ефекте уз помоћ техничких решења као што су закривљена стакла, штампана стакла, медија фасаде, стакла под нагибом, двоструке фасаде, трострука застакљења и керамички премази. С друге стране, иронија је да различите технике, попут термичке обраде, ламинирања, различитих превлака и формирања ТИ панела, које су развијене да надоместе недостатке стакла као материјала спољашњег омотача, имају широк спектар нежељених ефеката на визуелне карактеристике, директно утичући на стакло које је постало доминантан материјал у архитектури. Додатно, те визуелне карактеристике нису одређене само површином стакла, већ динамички и често неочекивано, снажно варирају, као одговор на промену спољашњих услова. На крају, резултат све више присутних стаклених фасада јесте градско окружење којим снажно доминира рефлексија светлости. Генерално, карактеристике рефлектоване светлости постају одлучујући фактор великих стаклених површина омотача. Из тих разлога, прави изазов за архитекте јесте тај да предвиде визуелни ефекат и да контролишу примену стакла како би могли да сагледају будући изглед стакленог омотача. Постојећи програми за 3Д презентације тешко могу да представе све нијансе динамичких природних светлосних ефеката таквог материјала. У ствари, изненађења често превазилазе очекивања и визуелне карактеристике стакла заједно са осталим перформансама представљају увек изнова изазов приликом његове примене, што показује да на изглед и перформансе зграда не утиче ништа тако значајно као спољашњи омотач.



Слика 5.4. Разлика у рефлексији стакленог омотача: а) Са закривљеним стакленим панелима; б) Са равним стакленим панелима; (Извор: Saksala, 2005)

У обликовном смислу, уобичајено је да се равно стакло користи за реализацију застакљених закривљених форми које имају већи полупречник закривљења, с циљем смањења трошкова. Међутим, овакав приступ значајно одступа од оригиналне закривљене површи, што се највише уочава у рефлексији стакла, посебно када се посматра са спољашње стране. У случају мањих површина стаклених омотача и геометрије која подразумева мали полупречник закривљења (Слика 5.4), примена закривљеног стакла представља једино решење помоћу којег је могуће постићи жељену глатку закривљену форму.

Самим тим, пред архитекте се данас постављају прилично екстремни изазови, у смислу да је неопходно да тачно предвиде како ће површина стакленог омотача изгледати у урбаном контексту током различитих сезонских услова дневне светлости. Ретко у стварности, изглед одговара очекивањима, а понекад постигнута неподударност веома је проблематична. То указује на чињеницу да избор стакла у погледу визуелних карактеристика увек подразумева значајан ризик. Алати за евалуацију изгледа стакла у изграђеном контексту су веома лоши. Иако постоје програми за визуелизацију, одступања од правог изгледа у изграђеном окружењу су често велика, с обзиром на немогућност програма да представе суптилне, али ипак различите варијације стаклених површина које произилазе из различитог састава стаклених панела. Из тих разлога, индустрија стакла је омогућила да узорци буду доступни свим бироима, широм света. Најчешће, архитекте користе велики број узорака упоређујући их у односу на дневно осветљење, што пружа много веродостојнију евалуацију.

5.1.2 Визуелно-обликовни критеријуми

Иако, геометријски комплексна форма нема званичну дефиницију, може се препознати по глатким кривим линијама јединственог и различитог облика које теку, као и по недостатку својствене симетрије.

С обзиром на значај глаткоће у сагледавању слободно закривљене стаклене површине, за разматрање визуелно-обликовног аспекта различитих модела усваја се доминантни критеријум "глаткости-мекоће" као релевантан. У том смислу, као оригиналан модел или оригинална идеја аутора, усваја се двострука, слободно закривљена површ, која је закривљена у оба правца (криве линије су у оба правца), и која у потпуности задовољава критеријум глаткости. Треба истаћи, да је одабрани модел за студију случаја реализовани пројекат, чија површина је прилагодљиве форме, али и довољно сложена да сам процес панелизације чини прилично комплексним. Такође, реализована форма двоструко закривљеног омотача је прилагођена процесу обликовања појединачних стаклених панела, о чему ће више бити рећи у наредном поглављу.

На основу анализираних примера/студије случаја јасно је да свака апроксимација закривљене површи помоћу равних стаклених елемената не задовољава критеријум "глаткости-мекоће", већ се на тај начин добијају специфичне изломљене површи.

У погледу разлике једноструко и двоструко закривљених стаклених површина, као што ће показати следећи примери, у случају једноструко закривљених код којих је хоризонтална закривљеност доминантна, разлика је скоро не приметна, било у перцепцији саме форме омотача са улице на горе или са стране. Двоструко закривљено стакло има смисла једино код форми код којих су испупчења по вертикали посебно наглашена, као и код блобова. Тако, према Чарлсу Ђенксу (као што је наведено у Voordt & Wegen, 2005) блобови су комплексне сфере, и као такви најприближнији су органским формама, с обзиром на то да су флуидне, савитљиве, аморфне, флексибилне, несавршене више него било које друге форме у архитектури.

За анализу су усвојени следећи визуелно-обликовни критеријуми (визуелно-оптичке карактеристике), сврстани у две групе:

- Визуелно обликовни критеријуми са аспекта геометрије:
 1. Форма – сличност оригиналном моделу (двострука, слободно закривљена површ омотача),
 2. Транспарентност површине (у односу на димензије панела и присуство елемената конструкције), и
 3. Комплексност чворне везе.
- Визуелно обликовни критеријуми са аспекта перцепције (доживљаја/опажања):
 4. Поглед на горе (контуре и глаткоћа површине),
 5. Доживљај изнутра (визуелна дисторзија посматране перспективне слике), и
 6. Утицај закривљености на светлосне ефекте (каустика).

Процена различитих модела према визуелно-обликовним критеријумима (визуелно-оптичким карактеристикама) је вреднована поенима на скали 0-1. Усвојена конвенција подразумева 0 поена за лоше перформансе, и 1 поен за одличне перформансе у погледу усвојених критеријума. Преглед анализираних/процењених карактеристика дефинисаних модела, које су квантификоване, дат је у Табели 6.1 у следећем поглављу.

Основне карактеристике усвојених критеријума и начин вредновања модела у односу на исте, подразумевају:

1. **Форма/Геометрија – сличност оригиналном моделу** (двоструко закривљена површ омотача) – Подразумева подржавање, односно одступање од форме оригиналног модела двоструко закривљене површи, који подразумева панелизацију стакленим панелима чија форма је, такође, двоструко закривљена. Подржавање оригиналног модела је вредновано поенима: 0,25; 0,50; 0,75; и 1. С обзиром на то да је оригиналан модел оцењен 1 поеном, губитак карактеристичне закривљености у једном правцу вреднован је са -0,25 поена у односу на оригинални модел, односно са 0,75 поена. Такође, модели са равним стакленим елементима, с обзиром на веће одступање од оригиналне форме, оцењени су на начин да је модел са већом сличношћу оригиналном моделу оцењен са 0,5 поена, док је модел са највећим одступањем оцењен са 0,25 поена.

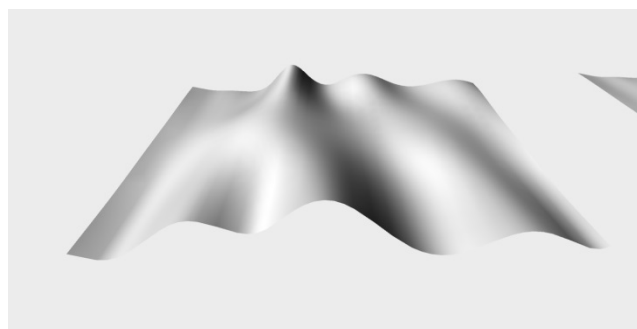
2. **Транспарентност површине** – Директно зависи од панелизације, односно димензија појединачних панела, као и присуства елемената конструкције. У том смислу, претпостављено је да одабран тип панелизације подразумева и линијске елементе потконструкције. Транспарентност површине омотача је вреднована поенима: 0,25; 0,50; 0,75; и 1. С обзиром на све већу тежњу ка атрактивним и флексибилним просторима који подразумевају повећање распона и димензија панела, усвојена димензија панела чија доминантна димензија одговара спратној висини и тиме омогућава максималну транспарентност површине, вреднована је са 1 поеном. Четвороугаона панелизација са, такође, усвојеном доминантном димензијом панела која одговара спратној висини, али чија површина је преломљена у виду великих троугаоних равни, из разлога нешто мање транспарентности оцењена је са 0,75 поена. Четвороугаона панелизација са мањом димензијом панела, која одговара реализованом омотачу, оцењена је са 0,50 поена. Троугаона панелизација чија форма панела подразумева једнакостраничне троуглове, из разлога најмање транспарентности, оцењена је са 0,25 поена.
3. **Комплексност чворне везе** – Подразумева начин на који се линијски елементи конструкције међусобно секу (видети прво поглавље, део 1.2.4, сл. 1.47). Тако, у случају када се симетрале елемената потконструкције секу у једној тачки (заједничка оса), то подразумева чворове који су ослобођени силе торзије и чија конструкција је поједностављена. За разлику од четвороугаоне мреже где је могуће пројектовати такав чвор, у случају троугаоне мреже, с обзиром на недовољан степен слободе, то није могуће. Поред тога, узет је у обзир и број чворних веза. У том смислу, комплексност чворне везе је вреднована поенима: 0,20; 0,40; 0,60; 0,80; и 1. Четвороугаона панелизација са највећом усвојеном димензијом панела хипар површине, чије ивице су равне, оцењена је са 1 поеном. Четвороугаона панелизација са мањом димензијом панела хипар површине, оцењена је са 0,80 поена. Увођење закривљења у сваком правцу умањено је за 0,20 поена, односно у оба правца за 0,40 поена. Четвороугаона панелизација, са већом димензијом панела у виду набора великих

троугаоних површи, која формира мањи број чворова који нису ослобођени силе торзије и већи број четвороугаоних чворова ослобођених од утицаја силе торзије вреднован је са 0,40 поена. Троугаона панелизација чије све чворне везе су комплексне (под утицајем силе торзије) оцењена је са 0,20 поена.

4. **Поглед на горе/одоздо (контуре и глаткоћа површине)** – Односи се на доживљај посматране форме при погледу одоздо. У том смислу, *"основни елемент сваке форме јесте линија (крива или права свеједно). Она је производ сусрета двају површина или је контура сваке форме. Линија има тенденцију простирања правца у оба смера"* (Alihodžić, 2007: 111). Такође, према Алихоџићу, увек, када се расправља о архитектонској композицији, мора се узимати у обзир земљина тежа, с обзиром на то да архитектонска композиција има једну визуелну доминанту која се јавља као последица те условљености, а то је вертикала око које организује своје подцелине. Како се кроз њу, као повратни утицај, манифестују силе теже и силе које "струје" из земљиног средишта, као последица дејства вертикалних сила, снажно се намеће хоризонтална раван на коју делују вертикалне силе. *"Хоризонтала, у психолошком доживљавању, јесте раван егзистенције и дјеловања, раван људског функционисања. Она се преноси и на све етаже објекта, и није везана само за приземље."* (Alihodžić, 2007: 105). У том смислу су хоризонтале доминантне у сагледавању контура и глаткоће.

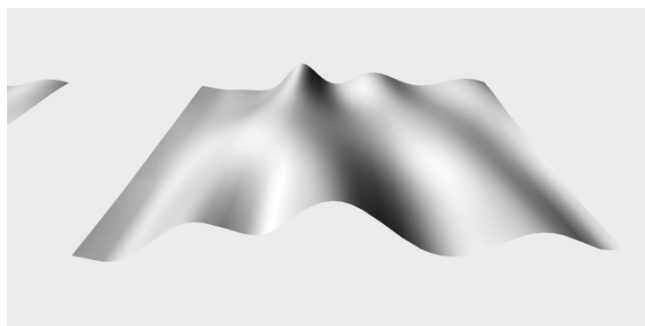
Доживљај при погледу одоздо вреднован је поенима: 0; 0,20; 0,40; 0,60; 0,80; и 1.

Пример за 1 поен је оригинални модел – двоструко закривљена површ омотача (уочава се закривљеност у хоризонталном и вертикалном правцу) (Слика 5.5).



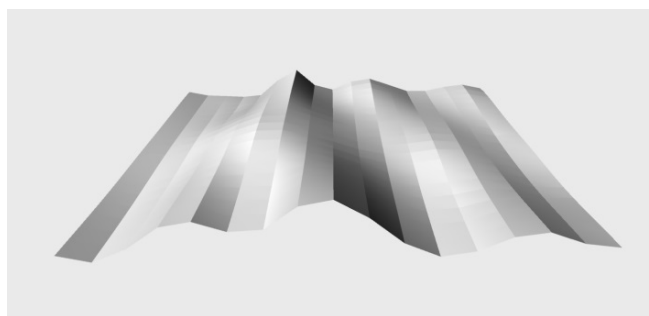
Слика 5.5. Поглед на горе/одоздо на оригиналан модел (двострука закривљеност)

Такође, пример за 1 поен је и модел торза хоризонтална (једнострука закривљеност у хоризонталном правцу) (Слика 5.6), који подразумева хоризонтално континуално закривљење, а вертикално изломљене полилиније. Поглед одоздо на овај модел, у поређењу са претходним примером, доказује да вертикална мала континуална закривљеност нема никаквог утицаја на доживљај глаткоће површине омотача.



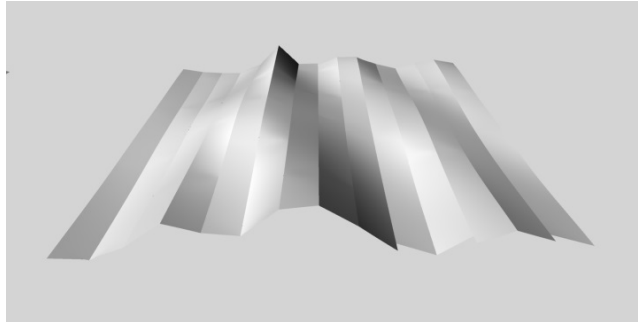
Слика 5.6. Поглед на горе/одоздо на модел торза хоризонтална (једнострука закривљеност у хоризонталном правцу)

Пример за 0,80 поена је модел торза вертикална (једнострука закривљеност у вертикалном правцу) у случају мање поделе, односно мале димензије панела (Слика 5.7).



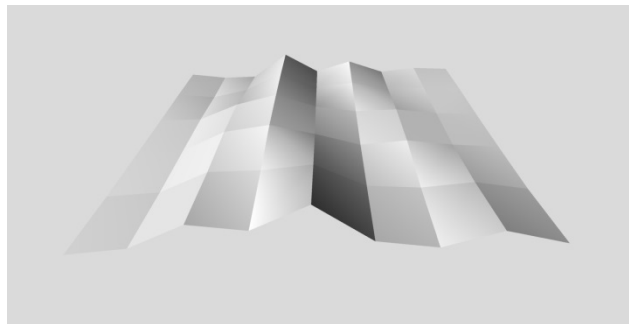
Слика 5.7. Поглед на горе/одоздо на модел торза вертикална - мала подела (једнострука закривљеност у вертикалном правцу)

Такође, пример за 0,80 поена је модел са стакленим панелима мањих димензија хипар површи (Слика 5.8), чије су ивице равне а површине панела закривљене, и где се форма препознаје из разлога мале површине елемената који имају различите али мале закривљености. У поређењу са претходним примером, може се рећи да је доживљај форме скоро идентичан. Односно, постигнути ефекат је исти, али је различита форма појединачних панела, односно њихова закривљеност.



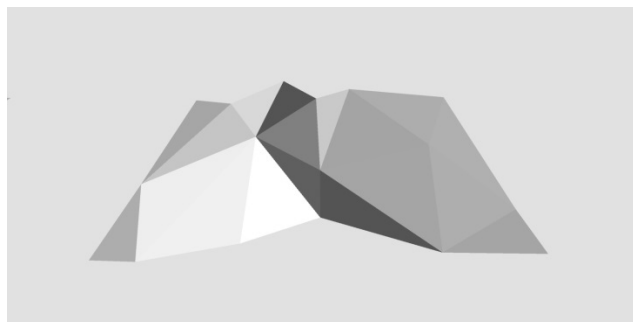
Слика 5.8. Поглед на горе/одоздо на модел са стакленим панелима хипар површи - мала подела (равне ивице и двострука закривљеност панела)

Пример за 0,60 поена је модел са стакленим панелима великих димензија хипар површи (велика подела) (Слика 5.9) чије су ивице равне а површине закривљене, што даје закривљену форму али не довољно из разлога велике поделе и самим тим велике површине елемената који имају различите али мале закривљености.



Слика 5.9. Поглед на горе/одоздо на модел са стакленим панелима хипар површи - велика подела (равне ивице и двострука закривљеност панела)

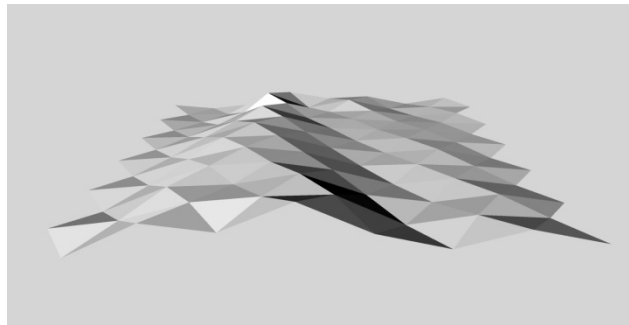
Пример за 0,40 поена је модел са наборима у виду великих троуглова (Слика 5.10), где се може уочити да се форма препознаје, односно да подсећа на оригиналан модел.



Слика 5.10. Поглед на горе/одоздо на модел са наборима у виду великих троуглова

Пример за 0,20 поена је модел са једнакостраничним троугловима (Слика 5.11), где се уочава велики број хоризонталних преломљених линија, као и

одступање у односу на оригинални модел, односно може се закључити да у погледу доживљаја, форма потпуно губи смисао.

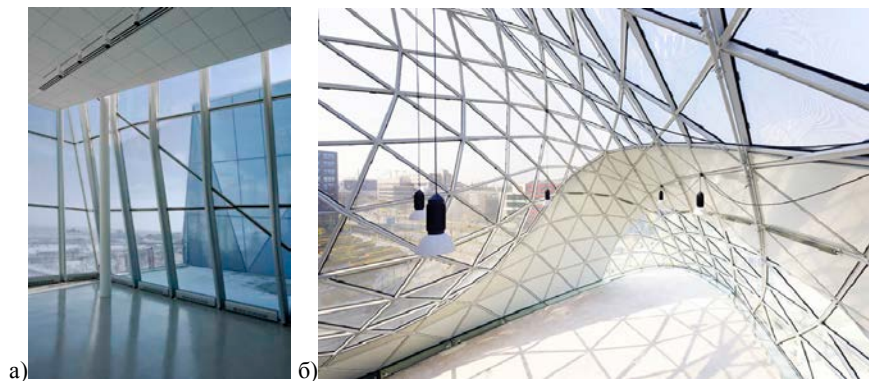


Слика 5.11. Поглед на горе на модел са једнакостраничним троугловима

5. **Доживљај изнутра** – Подразумева визуелни доживљај при посматрању кроз закривљени стаклени омотач, с обзиром на то да закривљено стакло у зависности од врсте закривљења проузрокује сужавања и растезања посматране перспективне слике, односно онога што се посматра кроз стакло услед различитог преламања светлости. Овај ефекат је познат под називом визуелна дисторзија. Генерално, може се рећи да двоструко закривљено стакло веће закривљености даје највеће деформације изнутра, као и да скоро не постоји разлика између насталих деформација посматране перспективне слике кроз двоструко закривљено и једноструко хоризонтално закривљено стакло. Значајне деформације настају само у случају велике закривљености, односно малог полупречника закривљења. Постоји различитост у случају једноструке закривљености постављене у хоризонталном и вертикалном правцу, због уобичајеног начина померања главе приликом посматрања околине, где се углавном посматра лево-десно а ретко долази до померања главе горе-доле. У том смислу ће хоризонтална закривљеност проузроковати већи негативни ефекат – веће деформације посматране перспективне слике кроз стакло, него вертикална закривљеност. Доживљај изнутра (визуелна дисторзија посматране перспективне слике) вреднован је поенима: 0; 0,20; 0,40; 0,60; 0,80; и 1. Због горе наведених карактеристика, усвојено је да не постоји разлика између једноструке хоризонталне и двоструке закривљености, док је разлика од 0,2 поена дефинисана између хоризонталне и вертикалне једноструке закривљености из разлога већих деформација које настају при

посматрању кроз омотач хоризонталне закривљености у односу на вертикалну, због чешћег померања главе лево-десно.

Пример за 1 бод је у потпуности равно стакло које не ствара деформације. Из тих разлога, модел са великим троугаоним преломљеним равнима вреднован је са 1 поеном, с обзиром на то да су четвороугаони панели спратне висине, а преломљене равни, због велике димензије панела, немају скоро никаквог утицаја (Слика 5.12а).



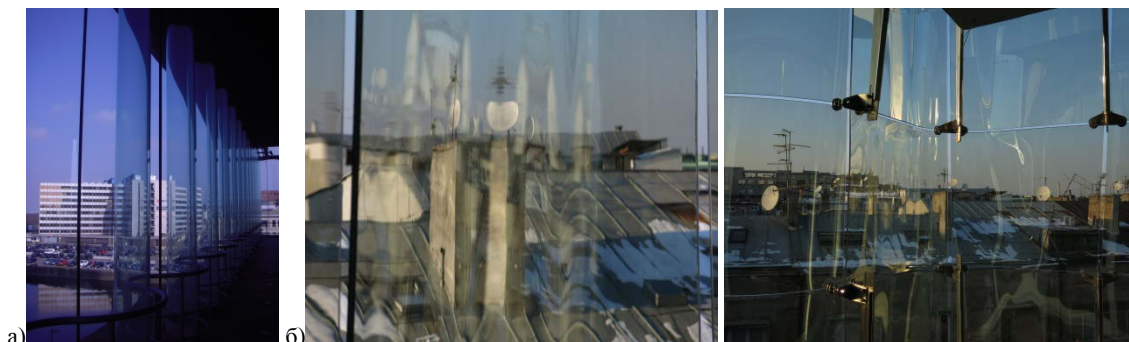
Слика 5.12. Поглед кроз: а) Стаклени омотач са великим троугаоним преломљеним равнима, али са мањом димензијом панела – Спертус институт, Чикаго; б) Стаклени омотач – блов са једнакостраничним троугловима; (Извор: а) <https://www.google.co.uk/search?q=spertus+glass+facade>, 10. 4. 2016; б) <https://www.google.co.uk/search?q=blob+fukus>, 10. 4. 2016)

Пример за 0,80 поена је модел са једнакостраничним троугловима, који из разлога примењених равних панела нема деформација, али услед мале димензија панела који су преломљени под различитим угловима због чега имају незнатан утицај на доживљај посматране перспективне слике, оцењен је са -0,20 поена у односу на претходни пример (Слика 5.12б).

Пример за 0,60 поена је модел хипар, који због равних ивица панела има мању закривљеност површине панела у односу на двоструко закривљене панеле, а самим тим и мању визуелну дисторзију.

Како је претходно објашњено, због постојања разлике између једноструке хоризонталне и једноструке вертикалне закривљености, модел торза вертикална вреднован је са 0,40 поена, док је модел торза хоризонтална оцењен са 0,20 поена. Такође, због непостојања разлике у доживљају посматране перспективне слике између једноструке хоризонталне закривљености и двоструке закривљености, оригиналан модел (двоструко закривљени панели) оцењен је са истим поенима (0,20 поена). То се може

уочити на примеру стакленог омотача објекта МАС музеја у Антверпену – једноструко закривљени, валовити панели (Слика 5.13а), као и стакленог омотача стамбеног објекта Инфинити у Београду код кога је доминантна хоризонтална закривљеност (Слика 5.13б).



а) **Слика 5.13.** а) Једноструко закривљени стаклени омотач објекта МАС музеја у Антверпену; б) Стаклени омотач стамбеног објекта Инфинити у Београду код кога је доминантна хоризонтална закривљеност; (Извор: Аутор)

6. Утицај закривљености на светлосне ефекте (каустика) – Познат као каустика или каустична мрежа (*caustic or caustic network*), подразумева оптички феномен који представља сноп - "омотач" светлосних зрака који је или рефлектован од закривљене стаклене површине или проласком кроз стакло, преломљен и пројектован је на неку другу површину (Слика 5.14). Тачније, каустика је површина или крива чије тангенте представљају светлосне зраке, дефинишући границу снопа као криву концентрисане светлости (Слика 5.14). Из тих разлога, каустике могу бити "праменови" светлости или/и њихове светле ивице.



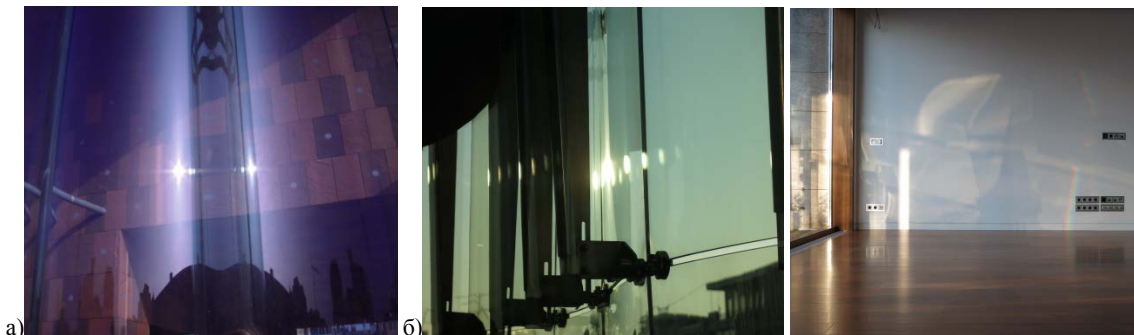
Слика 5.14. Каустика произведена чашом воде; (Извор: Преузето са [https://en.wikipedia.org/wiki/Caustic_\(optics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Caustic_(optics)), 07. 4. 2016)

Утицај закривљености на светлосне ефекте, вреднован је, такође, поенима: 0; 0,20; 0,40; 0,60; 0,80; и 1.

Пример за 1 поен је у потпуности равно стакло код кога не долази до ефекта каустике, тако да су модели са једнакостраничним и великим троугловима оцењени са 1 поеном.

Модел хипар, из разлога равних ивица панела и мале закривљености површине панела вреднован је са 0,60 поена.

За разлику од доживљаја изнутра, не постоји различитост у случају једноструке закривљености постављене у хоризонталном и вертикалном правцу, тако да су модели торза, у односу на претходни пример, због једноструке закривљености оцењени са 0,40 поена. Овај пример може се илустровати таласастом површином (једноструко закривљеном) стаклене фасаде музеја МАС у Антверпену (Слика 5.15а) и једноструко закривљеном површином појединачних панела (добијених апроксимацијом) двоструко закривљене фасаде објекта Инфинити у Београду (Слика 5.15б), где се појављују линије концентрисаног светла по хоризонтали или вертикали.

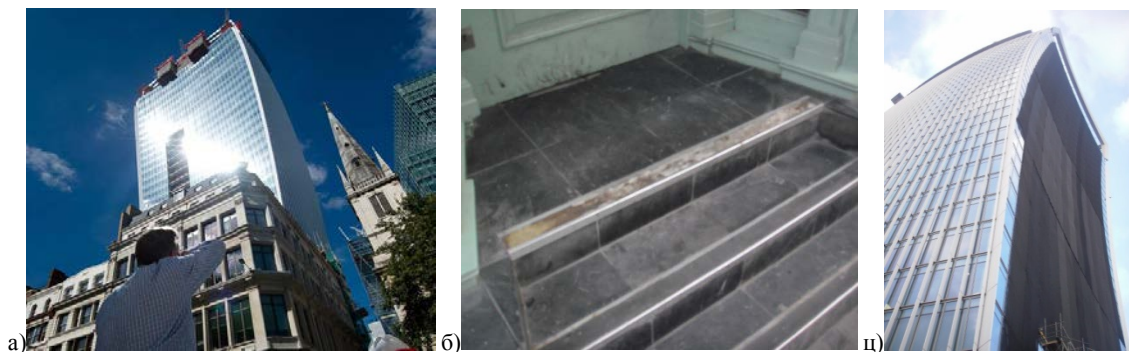


Слика 5.15. Концентрисани светлосни зраци: а) На површини таласастог (једноструко закривљеног) стакленог омотача МАС музеја у Антверпену; б) У унутрашњости стамбеног објекта Ифинити у Београду - на унутрашњој површини једноструко закривљених панела двоструког омотача (застакљене терасе) и линије концентрисаног светла на унутрашњем зиду (у ентеријеру); (Извор: Аутор, 2014, 2016)

Модел са двоструко закривљеним панелима, из разлога не тако велике закривљености оцењен је са 0,20 поена.

Као пример за 0 поена, може се узети двоструко-закривљена, у овом случају конкавна, фасада објекта *Walkie Talkie* у Лондону (Слика 5.16а), где је због конкавне форме стаклене површине дошло до константног концентрованог снопа рефлектоване светлости који је проузроковао оштећења делова објеката (Слика 5.16б) и предмета насупрот дате фасаде (Overend, 2014). Као резултат, фасада незавршеног објекта је покривена до проналажења одговарајућег решења

за настали проблем (Слика 5.16ц). Представљени пример показује да двоструко закривљено стакло конкавне форме прави ефекат сочива (жиже-каустика), односно геометрија конкавног стакла има тенденцију да прикупи и фокусира светлосне зраке и њихову одговарајућу енергију у једну тачку – жижу. Ова склоност конкавног стакла, посебно у случаје двоструке закривљености, представља потенцијалну опасност за његову примену у архитектонским објектима, као што је приказано.



Слика 5.16. а) Интезивни "супер-концентрирани" сунчеви зраци рефлектовани од стаклене конкавне фасаде објекта *Walkie Talkie* у Лондону; б) Оштећени профил газашта на улазу у продајни простор објекта који се налази насупрот зграде *Walkie Talkie*; ц) Покривена фасада у циљу спречавања ефекта сочива (Извор: а) <http://www.mirror.co.uk/news/uk-news/walkie-talkie-second-landmark-skyscraper-2251935>, 06. 4. 2016; б) и ц) Аутор, 2014)

Резултати процене различитих модела према обликовним критеријумима (визуелно-оптичким карактеристикама) приказани су у Поглављу 6.

5.2 Енергетски аспект

5.2.1 Утицаји енергетске ефикасности на примену стакла у материјализацији омотача

Застакљене површине су, данас, у константном развоју нудећи решења која карактеришу повећање контроле коришћења сунчевог зрачења, као и повећање дневног осветљења, истовремено формирајући омотач који одваја унутрашњи простор, и који у случају термичког омотача креира зону задовољавајућег термичког комфора у односу на спољашње климатске услове. С обзиром да су уштеда енергије и смањење емисије CO₂ постали један од приоритета у изградњи објеката, као и да се више од 60% од укупних енергетских губитака кроз омотач зграда односи на прозоре и застакљене површине (Jelle, 2011), неопходно је појаснити њихове основне карактеристике и утицај на енергетску ефикасност зграда. Посебна пажња посвећена је закривљеном стакленом омотачу релевантном за тему овог рада.

Избор типа стакла и самог застакљења игра кључну улогу у одређивању укупних термичких перформанси зграда. Захтеви термичких перформанси самог застакљења морају бити интегрисани у првобитној фази пројектовања система грејања и хлађења у зградама. Како једноструко стакло има лоше термичке перформансе, погодно је само за апликације где су његове термичке перформансе ирелевантне, као што је примена у ентеријеру или апликације где се унутрашње и спољашње температуре значајно не разликују. Из поменутих разлога, већина застакљених површина омотача се састоји од термоизолационих стаклених панела.

Термичке перформансе термоизолационих стаклених панела углавном зависе од проводљивости сунчеве енергије кроз стакла, рефлексије стакла (мерене коефицијентом засенчења који представља однос g -вредности специфичног застакљења и g -вредности обичног прозирног стакла дебљине 3 mm која износи 87%), ширине ваздушног простора, као и материјала и конфигурације дистанцера око ивице панела. Како умањити проток топлоте кроз стакло, а у исто време обезбедити квалитетно дневно осветљење у ентеријеру, је заправо најзначајнији проблем савремених технологија производње и обликовања стакла.

За примену у архитектури једне од најзначајнијих својстава стакла као материјала омотача представљају његове термичке, енергетске и оптичке карактеристике.

Параметри енергетских перформанси стаклених елемената

Постоје бројни параметри који дефинишу енергетске перформансе стакла. Они представљају врло значајне индикаторе квалитета стакла, а њихове вредности и величине су различите код различитих врста стакала. Такође, зависе и од произвођача, чији циљ је да се најбољим понудама позиционирају на тржишту. Познавање вредности и величина ових параметара омогућава процену протока енергије за сваку одређену врсту стакла, као и могућност избора стакла чије вредности енергетских параметара најбоље одговарају одређеној намени. Параметри који одређују енергетске перформансе стакла су због тога један од полазних становишта при избору застакљења. Енергетски параметри који су значајни за процену соларних добитака јесу:

1. Параметри изолационих карактеристика стакла,
 2. Параметри отпорности стакла на топлотне добитке,
 3. Параметри оптичких карактеристика стакла.
1. Параметри изолационих карактеристика стакла показују способност стакла да се одупре протоку топлоте од топлије стране ка хладнијој (путем механизма протока: кондукцијом, конвекцијом и радијацијом), што представља његову изолациону способност.
- **Коефицијент пролаза топлоте - (U -вредност) $[W/(m^2K)]$** , представља уобичајени параметар којим се одређују изолационе способности стакла и одражава количину топлоте која прође кондукцијом, конвекцијом и радијацијом кроз јединичну стаклену површину, у јединици времена (секунди), при разлици температуре од $1^\circ K$. Што је U -вредност мања, ниво протока топлоте кроз стакло је мањи, а самим тим су његове изолационе карактеристике боље.
 - **Укупни отпор пролазу топлоте - ($R_T=1/U$) $[(m^2K)/W]$** , подразумева вредност реципрочну вредности коефицијента пролаза топлоте, и указује на способност стакла да се одупре протоку топлоте.

2. Параметри отпорности стакла на топлотне добитке представљају врло значајне индикаторе у процени и утврђивању енергетских оптерећења за потребе хлађења у периодима прегревања. Топлотни добици представљају комбинацију директно трансмитованог (директног или дифузног) сунчевог зрачења и апсорбованог сунчевог зрачења које се емисијом израчује у унутрашњост.

- **Соларни фактор (g)** – је коефицијент који показује однос количине топлотне енергије која пролази кроз стакло (директно као топлотна и она која је прво апсорбована) и укупне енергије која долази до стакла, при протоку који је управан на површину. Соларни фактор обухвата опсег таласних дужина од 300 – 2800 nm, односно укупан спектар зрачења за које је стакло пропустљиво. Ову вредност чини директно сунчево зрачење трансмитовано кроз стакло, али и део зрачења које стакло апсорбује и које се израчивањем и конвекцијом преноси у ентеријер. Соларни фактор је у функцији различите врсте стакла, односно његових специфичних светлосних и топлотних карактеристика које настају додавањем одређених хемијских састојака и наношењем посебних ниско-емисионих премаза. Услед запрљаности стакла и одступања у односу на упадни угао (различит од 90°), ефективни степен пропустљивости енергије (g_w) се усваја са вредношћу $0,9g$ према Правилнику о енергетској ефикасности зграда.
- **Коефицијент засенчења** (енг. *Shading Coefficient, SC*) – се добија тако што се упоређују особине трансмисије топлотних добитака одређене врсте стакла, са особинама чистог равног стакла дебљине 3-4 mm, чија укупна трансмисија топлотних добитака износи 0,87. Коефицијент засенчења има вредност од 0 до 1, где већа вредност указује на повећане топлотне добитке. Коефицијент засенчења се може сагледати кроз компоненту дуготаласног зрачења и компоненту краткоталасног зрачења, чије се вредности исто тако добијају у поређењу са чистим стаклом дебљине 3-4 mm.
- **Коефицијент топлотних добитака** (*Solar Heat Gain Coefficient, SHGC*) – представља меру количине сунчевог зрачења које прође кроз стакло у унутрашњост у виду топлоте. Вредност овог коефицијента се креће од 0 до 1, где веће вредности указују на већу количину топлотних добитака. Овај

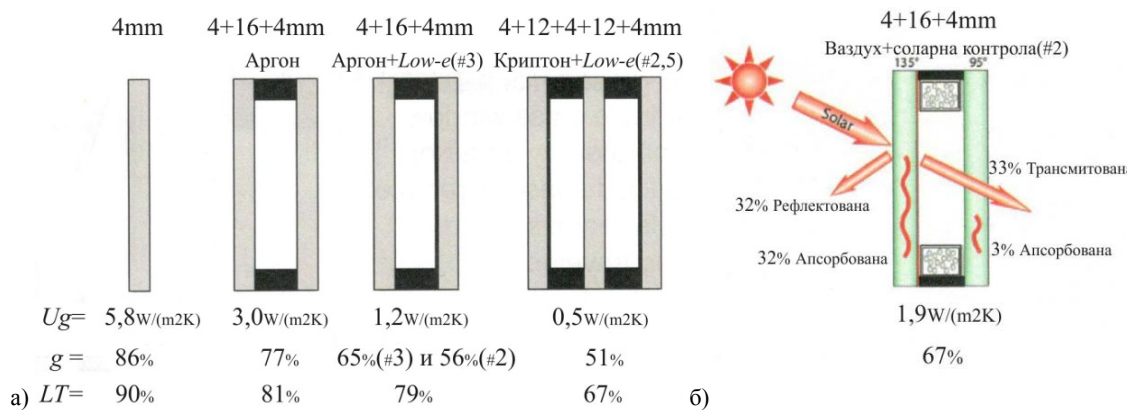
коэффициент се може изразити и преко коефицијента засенчења (коэффициент топлотних добитака = $0,87 \times$ коефицијент засенчења).

- **Коефицијент светлости у односу на топлоту** (енг. *Light to Solar Gain Coefficient, LSG*) - показује однос трансмисије светлости и топлоте у стаклу. Трансмисија топлоте кроз стакло се изражава кроз коефицијент топлотних добитака који представља део зрачења који путем свих механизма кретања енергије прође кроз стакло у виду топлотних добитака. Светлост која прође кроз стакло се изражава кроз коефицијент трансмисије светлости и обухвата сву светлост која из спољашњости прође кроз стакло. Дobar избор застакљења предава онај који има високи степен трансмисије светлости и ниску вредност коефицијента топлотних добитака.

3. Енергетски параметар који описује оптичке карактеристике стакла јесте коефицијент светлосне трансмисије:

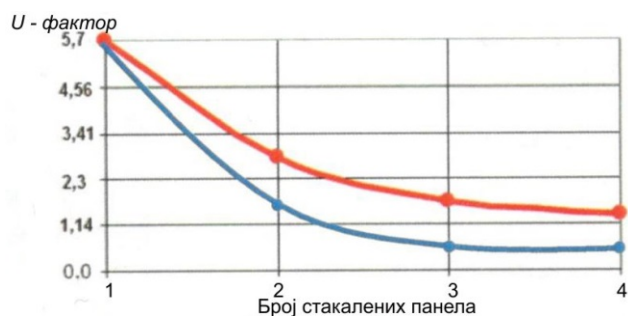
- **Трансмисија светлости** (енг. *Light Transmittance, LT*) [%] - представља параметар који показује количину сунчеве светлости која пролази кроз стакло. Већа вредност указује на то да су потенцијални нивои осветљености просторије већи, и ако је просторија правилно пројектована, оваква стакла могу значајно да допринесу смањењу употребе вештачког осветљења. На трансмисију светлости утицаће врста стакла, број стаклених плоча, као и све врсте стаклених премаза које се могу применити ради контроле прекомерних топлотних добитака. Трансмисија светлости може да има вредност и преко 90% за чисто стакло, али и испод 10% код обојених и високорефлектујућих стакала.

Застакљене површине са ниским коефицијентом пролаза топлоте (*U*-вредност), односно високим отпором пролазу топлоте, могу значајно да допринесу смањењу енергетских губитака и самим тим смањењу потрошње енергије за грејање и хлађење зграда. У ту сврху примењују се термоизолациони панели са двоструким или троструким застакљењем, који у комбинацији различитих врста стакала, премаза (ниско-емисиони-*Low-e*, за соларну контролу) и испуна различитим гасовима омогућавају одабир одговарајућих перформанси застакљења (Слика 5.17).



Слика 5.17. Упоредни приказ топлотних и оптичких својстава различитих типова застакљења; (Извор: а) Neugebauer et al., 2013: 2; б) <http://www.eu.en.sunguardglass.com>, 25.01.2016.)

Применом различитих премаза и испуна могуће је постићи смањење U_g -вредности двоструког застакљења за око 40% и троструког за око 65% у односу на обичан двоструко и троструко застакљени термоизолациони стаклени панел (Слика 5.18).



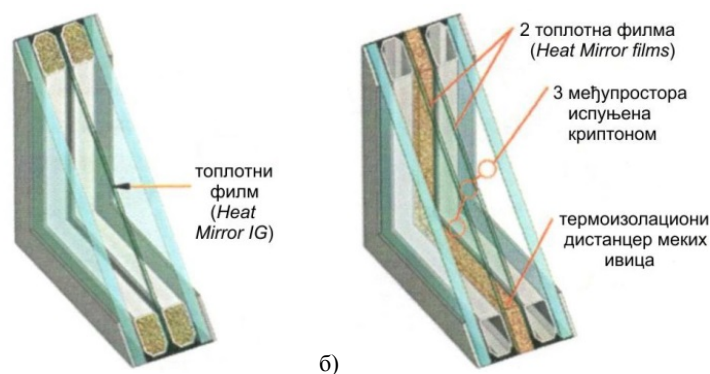
Слика 5.18. Однос броја стаклених панела и U_g -вредности (Извор: Neugebauer et al., 2013: 73)

Према Правилнику о енергетској ефикасности зграда дозвољена максимална U_w -вредност стаклених површина (prozори, балконска врата, застакљени кровови) за нове и за старе објекте, у Србији, је знатно смањена у односу на претходне прописе и износи $1,50 \text{ W/m}^2\text{K}$, али ипак је већа у односу на дозвољену максималну U -вредност застакљења у економски развијеним земљама у Европи ($1 - 1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$).

На тржишту је, данас, могуће наћи производе високих термичких перформанси, као што су троструко застакљење, вакумско застакљење, ниско-емисиони премази и "меки" дистанцери (бутилен), ТИ панели са топлотним филмом, стакла која се сама чисте, соларне ћелије интегрисане у застакљене површине, електрохроматско застакљење, паметни прозори, који свако на свој начин доприносе контроли соларног зрачења. Најниже вредности коефицијента пролаза топлоте до сада изведеног застакљења (U_g) износе око $0,30 \text{ W/m}^2\text{K}$, а рама

(U_f) око $0,60 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Jelle, 2011). На основу различитих истраживања највеће потенцијале за унапређење термичких перформанси показали су нови материјали за дистанцере термоизолационих панела, вакумско застакљење, ТИ панели са уметнутим топлотним филмом, електрохроматски прозори и застакљење са аерогелом.

Технологија која омогућава максимално високе перформансе застакљених површина је технологија термоизолационих панела са топлотним филмом, коју је осмислио тим научника са Института за технологију Универзитета у Масачусетсу (*MIT*). Ова технологија подразумева један или више лаких филмова постављених унутар ваздушног простора једног "стакло-пакета" у циљу формирања "супер-изолационог" стакленог панела (Слика 5.19). Филмови користе нано-премаз метала који рефлектује топлотно зрачење.



Слика 5.19. Технологија термоизолационих панела са уметнутим топлотним филмом: а) једноструки филм; б) двоструки филм;

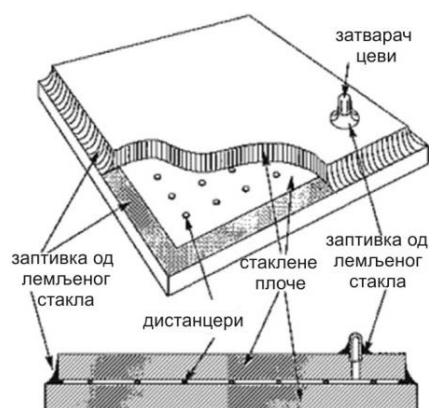
(Извор: <http://www.eastman.com/Brands/HeatMirror/Commercial/Pages/Overview.aspx>, 15. 3. 2016)

Ова технологија омогућава изузетну изолацију зими и максималну соларну контролу која резултира уштедом енергије током целе године, као и унапређењем унутрашњег топлотног комфора. У зависности од броја филмова и врсте инертних гасова постављених унутар међупростора, применом ове технологије могуће је постићи вредности коефицијента пролаза топлоте (U_g) од $0,91$ до $0,28 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ (Табела 5.1), које одговарају U -вредностима добро изолованих зидова. С обзиром на дебљину топлотног филма, не постоје подаци о могућности његове примене у закривљеним термоизолационим панелима.

Табела 5.1. Упоредна топлотна и оптичка својства различитих термоизолационих панела и термоизолационих панела са уметнутим топлотним филмом (технологија "Heat Mirror IG")
(Извор: http://www.eastman.com/Brands/HeatMirror/Residential/Pages/How_It_Works.aspx, 20.2. 2016)

| | Број херметички затворених међупростора (комора) | Термоизолационе перформансе | | Коефицијент солрних добитака | Трансмисија видљиве светлости (%) | Блокирање UV зрачења (%) |
|---------------------------------------|--|---------------------------------|---|------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| | | R-вредност (m ² K/W) | U _g -вредност (W/m ² K) | | | |
| Двоструко застакљење (обично стакло) | 1 | R 0,35 | 2,84 | 0,78 | 82 | 42 |
| Двоструко застакљење (ниско-ем. пре.) | 1 | R 0,70 | 1,42 | 0,27 | 65 | 95 |
| Троструко застакљење (ниско-ем. пре.) | 2 | R 0,88 | 1,08 | 0,25 | 57 | 97 |
| ТИ панел са топлот. филмом | 2 | R 1,06 | 0,91 | 0,24-0,51 | 57-70 | 99,50 |
| ТИ панел са топлот. филмом | 3 | R 1,76 | 0,57 | 0,23-0,44 | 51-62 | 100 |
| ТИ панел са топлот. филмом | 4 | R 3,52 | 0,28 | 0,22-0,38 | 45-55 | 100 |

Технологија која, такође, омогућава максимално високе термичке перформансе застакљених површина, и која је први пут успешно произведена 1989. године, је технологија вакумског застакљења. Ова технологија подразумева два стаклена панела одвојена уским вакумским простором са низом дистанцера који држе два стакла на одређеном одстојању (Слика 5.20).



Слика 5.20. Шема вакумског застакљења, (Извор: Jelle, 2011: 4)

Додатно, могуће је применити још један слој стакла са ниско-емисионим премазом да би се постигла боља U -вредност у односу на U -вредност троструког застакљења. Поред тога, применом ове врсте застакљења могуће је постићи мање дебљине панела. Тако, термоизолациони панел, произвођача Пилкингтон (*Pilkington*), са вакум стаклом и стаклом са ниско-емисионим премазом испуњеним аргоном, који на тај начин формира врсту "хибридног" застакљења постиже U_g -вредност застакљења од 0,70 W/m²K и дебљину од 21 mm (скоро двоструко мање) у односу на троструко застакљен термоизолациони панел

(*Planibel Low-E Tri*) компаније AGC чија укупна дебљина износи 40 mm. Не постоје подаци о примени вакумског застакљења на закривљеним стакленим омотачима.

Како застакљење траба да омогући оптимизацију потрошње енергије за грејање, хлађење и дневно осветљење, примена различитих премаза и боја на стакленим површинама пружа различите ефекте у погледу визуелних карактеристика и пролаза топлоте. Рефлективни премази и боје су ефикасни у смањењу топлотних добитака у летњем периоду, док само мали број премаза доприноси смањењу топлотних губитака у зимском периоду, а примена боја немају ту функцију. Положај премаза зависи од типа премаза. Њихова соларна рефлексија пружа могућност манипулисања у циљу пропуштања специфичних делова видљивог и инфрацрвеног спектра. У том погледу, ниско-емисиони премази постављени у ваздушном простору значајно блокирају количину трансмитованог топлотног зрачења, истовремено утичући на g -вредност и не утичући значајно на U -вредност. Из тих разлога се у доминантно хладним климатима препоручује њихово постављање на позицију #3 (спољашња површина унутрашњег стакла) у циљу максимизирања пасивних соларних добитака зими и њихове контроле у летњем периоду. Насупрот томе, у доминантно топлим климатима препоручује се њихово постављање на позицију #2 (унутрашња површина спољашњег стакла) у циљу најбољег смањења соларних добитака лети и тиме максимизирања енергетске ефикасности. Постављање премаза на позицију #2 у хладним климатима смањује могућност термичког шока. Ниско-емисиони премази (*Low-e*) ограничавају, док рефлектујући премази смањују унутрашње соларне добитке уз помоћ рефлексије стакла. Постоје три типа ниско-емисионих премаза:

- високо-трансмисиони који подразумевају пиролитичке или тврде ниско-емисионе премазе као резултат самог процеса, а чије карактеристике дозвољавају топлотне добитке и смањују топлотне губитке; метални оксиди представљају типичне пиролитичке премазе који су постојани и који се постављају на још топло стакло што пружа могућност постављања при термичком обликовању стакла;

- средње-трансмисиони који подразумевају меке ниско-емисионе премазе као резултат самог процеса, а чије карактеристике дозвољавају умерене топлотне добитке и смањују топлотне губитке; типични меки премази састоје се од углавном три примарна слоја од којих је бар један метални (често сребрни) а његова дебљина износи 1/10.000 дебљине људске косе (Mitchell et al, 2016); како њихово постављање захтева ниже температуре, могуће је поставити их на равне панеле и пластичне филмове, и ако нису постојани могу да трају колико и формирану термоизолациони панели; и
- ниско-трансмисиони који подразумевају меке ниско-емисионе премазе као резултат самог процеса и називају се још и селективним премазима а чије карактеристике смањују топлотне добитке и губитке, истовремено омогућавајући највећи ниво трансмисије светлости у односу на смањење сунчевог зрачења.

Тип и квалитет ниско-емисионих премаза утиче не само на U -вредност већ и на g -вредност и трансмисију светлости, а у погледу примене на закривљеном стаклу неопходно је размотрити могућности, с обзиром да не постоји могућност примене свих врста премаза. Стакла са селективним премазом могу се савити термичким поступком при чему треба водити рачуна да се очувају естетске и физичке карактеристике, а у том погледу премаз који даје прихватљиво и лепо решење јесте трослојни сребрни премаз.

Такође, неопходно је споменути могућност смањења преноса топлоте одабиром одговарајуће дебљине ваздушног простора. Оптималне вредности коефицијента пролаза топлоте се постижу дебљином од 12 cm међупростора испуњеним ваздухом или аргоном. Како се повећањем дебљине, лагано повећава кондукција кроз ваздушни простор а тиме и коефицијент пролаза топлоте, такође се и при мањим ширинама од 9 mm кондукција повећава и коефицијент нагло расте (Mitchell et al, 2016). Оптимална дебљина простора испуњена криптоном износи око 6 mm, што може бити значајно у случају троструког застакљења, иако његова примена представља економски најнеповољније решење. Из тих разлога, комбинација аргона и криптона се сматра погодном у погледу оба захтева.

5.2.2 Параметри прорачуна топлотног оптерећења и топлотних карактеристика (закривљених) стаклених елемената омотача

Топлотна својства застакљених површина имају директан утицај како на топлотне добитке и губитке а тиме и на енергетске перформансе целог објекта, тако и на оптерећење самих елемената застакљења. У том смислу, велики значај има топлотно оптерећење, које заједно са сопственим оптерећењем, оптерећењем од ветра и снега и динамичким оптерећењем (земљотрес, експлозије и други утицаји), представља укупно спољашње оптерећење на основу кога се дефинишу топлотно-механичке карактеристике стаклених елемената.

Топлотно оптерећење је оптерећење које изазива ефекат температурних промена на објектима и обухвата:

- сунчево зрачење,
- спољне температуре ваздуха,
- температуре ваздуха у затвореном простору,
- подземне температуре, и
- изворе топлоте унутар зграда.

Топлотно оптерећење у стакленим панелима узрокује термичка напрезања која доприносе укупном оптерећењу а тим и последично извијању стакла. Из тих разлога, а посебно у случајевима великих површина застакљења, као и примене конструктивног стакла (са значајном конструктивном улогом), неопходно је извршити анализу топлотног оптерећења и његовог утицаја на стаклене елементе. У том погледу, у случају примене термоизолационих стаклених панела различитих карактеристика као што су различити унапређени премази, различите геометрије и оријентације стакла, може се рећи да њихови утицаји на топлотне и механичке карактеристике стаклених елемената још увек нису у потпуности истражени (Penkova and Neugebauer, 2014).

Важећи стандарди који се односе на топлотне и оптичке карактеристике застакљених површина, као и методе њиховог прорачуна:

- SRPS EN 410 – Стакло у зградарству – Одређивање светлосних и соларних карактеристика застакљења (остакљења, стакла),

- SRPS EN 673 – Стакло у грађевинарству – Одређивање топлотне пропустљивости (кофицијента пролаза топлоте – U -вредност) – Метод прорачуна,
- SRPS EN ISO 10077-1 – Топлотне перформансе прозора, врата и заклона – Прорачун коефицијента пролаза топлоте – Део 1: Опште,
- SRPS EN ISO 10077-2 – Топлотне перформансе прозора, врата и заклона – Прорачун коефицијента пролаза топлоте – Део 2: Нумерички метод за оквира,
- SRPS EN 13947 – Топлотне перформансе зид завеса – Прорачун коефицијента пролаза топлоте,
- SRPS EN ISO 12567 - Топлотне перформансе прозора, врата и заклона – Одређивање коефицијента пролаза топлоте методом топле кутије (*hot-box* метод),
- SRPS EN 12412-2 – Топлотне перформансе прозора, врата и заклона – Одређивање коефицијента пролаза топлоте методом топле кутије (*hot-box* метод) – Део 2: Оквири,
- SRPS EN 1026 – Прозори и врата – Пропустљивост ваздуха – Метод испитивања.

Важећим стандардима и Правилником о енергетској ефикасности зграда дефинисане су топлотне перформансе, методе прорачуна и испитивање пропустљивости ваздуха застакљених површина. Интернационални стандард који дефинише детаљан поступак прорачуна термичких перформанси прозора, врата и застора је стандард ISO 15099:2003 (Термичке перформансе прозора, врата и застора – Детаљни прорачуни). За разлику од српских стандарда и интернационалног стандарда ISO 9050 (Стакло у зградама - Одређивање трансмисије светлости, директне соларне проводљивости, укупног степена проводљивости соларне енергије, проводљивости ултраљубичастог зрачења и одговарајућих фактора застакљења), прорачуни дефинисани овим стандардом захтевају примену референтних услова који нису представљени стварним условима. У овом интернационалном стандарду енергетски биланс се прорачунава за сваки слој застакљења, узимајући у обзир соларну апсорпцију и стварне температуре. Из прорачуна енергетског биланса, одређују се температуре

појединих слојева и унутрашњег простора термоизолационих панела. Ово је једини стандард који узима у обзир ове комплексне интеракције. Детаљна анализа и прорачуни урађени у складу са овим стандардом дају резултате топлотне проводљивости а тиме и коефицијента пролаза топлоте, као и g -вредности чије вредности се могу разликовати од резултата једноставнијих модела прорачуна.

Такође, важећим стандардима и Правилником о енергетској ефикасности зграда дефинисане су топлотне перформансе застакљења чија геометрија је раванска. У погледу различите геометрије, дефинисани су само различити нагиби косих равних површина на начин да се прихватају одступања у односу на вертикалну и хоризонталну површину до 15° , док је за остале нагибе у циљу прорачуна добитака топлоте неопходно извршити корекцију вредности средњих сума Сунчевог зрачења. С обзиром да српски стандарди не узимају у обзир ове комплексне интеракције, у даљем тексту ће бити наведени и објашњени основни параметри за прорачун топлотног оптерећења и топлотних карактеристика, као и разлози комплексности њиховог прорачуна у случају закривљених стаклених површина.

Сунчево зрачење

Најзначајнији параметар термичког оптерећења је сунчево зрачење, које представља део спектра кратко-таласног електромагнетног зрачења који стиже до површине земље. Пролазећи кроз атмосферу, под утицајем апсорпција, рефлексија и расипања који се у њој одвијају, сунчево зрачење, поред интензитета, мења и свој спектрални састав. Спектар сунчевог зрачења је приближан спектру зрачења црног тела на температури од 5250°C . Оно достиже земљину атмосферу у виду електромагнетних таласа у опсегу од 290 до 2.100 nm, а спектар зрачења чине:

- **Ултраљубичасто зрачење** које чини најмањи део сунчевог спектра зрачења (3%) и представља електромагнетно зрачење са таласном дужином краћом од видљиве светлости, од 290-400 nm. Највећи део ултраљубичастиг зрачења се апсорбује у озонском омотачу.
- **Видљива светлост** чини готово половину електромагнетног спектра (53%) и представља део спектра који је видљив људским оком. Људско око

детектује таласне дужине од 400-780 nm, а готово 30% тог зрачења се кроз атмосферу, или директно са тла, рефлектује назад у свемир.

- **Инфрацрвено зрачење** чини око 44% сунчеве енергије и представља електромагнетно зрачење које је дуже од видљиве светлости. Распон таласних дужина инфрацрвеног спектра је од 780-2100 nm, и знатан део зрачења се у горњим слојевима атмосфере апсорбује на угљендиоксиду, озону и води која је у атмосфери присутна у течном и гасовитом стању.

Тренутни узајамни положај Земље у односу на Сунце говори о годишњем добу које је присутно у посматраном региону. Услед различитих сезонских промена, сунчеви зраци падају на површину Земље под различитим угловима. Што угао сунчевих зрака више одступа од вертикале, то је њихов пут кроз атмосферу дужи, а зрачење мањег интензитета. Тако висока позиција Сунца у току лета условљава да сунчеви зраци падају управно на хоризонталну раван, с обзиром да пролазе кроз најтањи слој атмосфере, што резултује изузетном јачином зрачења. На сличан начин формирају се дневне промене у јачини и трајности сунчевог зрачења. Ротирањем око своје осе, врши се смена дана и ноћи и тиме јачина зрачења. Сунце има највишу позицију у подне, што зрачење чини најинтензивнијим. При заласку, сунчево зрачење пада под оштријим углом у односу на хоризонталну раван, услед чега пролази кроз знатно дебљи атмосферски слој, а његова снага слаби. Поред тога, географска ширина такође утиче на дебљину атмосферског слоја кроз коју пролази сунчево зрачење. Наиме, географске ширине ближе Екватору примају зрачење највећег интензитета, јер је земљина оса готово управна на раван ротације, што чини Екватор најближим Сунцу. Удаљавањем од Екватора, сунчево зрачење пролазећи кроз све дебље слојеве атмосфере достиже земљину површину знатно ослабљеног интензитета.

Сунчево зрачење које доспева на земљину површину чине две компоненте:

- **Директно зрачење** - подразумева сунчево зрачење које неометано пада на земљину површину и објекте без расипања у атмосфери (I_D). Стање неба при пролазу директног зрачења је ведро, без присуства облака. У летњем периоду, када је позиција Сунца висока, односно када сунчево зрачење управно пада на хоризонталну површину, његова јачина има вредност преко 1.000 W/m^2 . Ова вредност показује да је директно зрачење великог

интензитета и да представља главни извор соларних добитака у објектима. Иако је зрачење најаче у летњим периодима када је Сунце у зениту, било који положај Сунца који ће условити зрачење које је управно на посматрану раван, представља директно зрачење.

- **Дифузно зрачење** – подразумева зрачење које се расипа и рефлектује при проласку кроз атмосферу, тако да на површину Земље долази из свих праваца и у знатно ослабљеном облику (I_s). Степен дифузног зрачења највише зависи од степена облачности неба, али и од бистрине неба и дужине пута кроз атмосферу. Када је небо у потпуности прекривено облацима, сва енергија која долази од Сунца ће бити дифузног порекла. Међутим, без обзира на степен облачности, одређена количина дифузног зрачења је увек присутна, чак и при потпуно ведром небу. Иако слабије од директног, дифузно зрачење је важан топлотни и светлосни извор, нарочито при ниским позицијама Сунца и на великим географским ширинама где је Сунце у близини хоризонта. Дифузно зрачење је најбољи светлосни извор јер се на тај начин избегавају проблеми бљештања и прекомерних топлотних добитака у случају стаклених површина.

Збир ова два зрачења подразумева **укупно (глобално) сунчево зрачење** (I_s) које доспева на произвољно оријентисану површину. Известан део овог зрачења се тренутно рефлектује са земљине површине ка небу, али се део поново враћа услед одбијања сунчевих зрака о облаке. Укупно сунчево зрачење се може изразити:

$$I_s = I_D + I_{dif} \quad (5.1)$$

Дифузно сунчево зрачење се може прихватити као константа без обзира на оријентацију површине. Такође, његова вредност се не разликује у случају вертикалног равног, и вертикалног једноструко закривљеног стакленог омотача за исти упадни угао сунчевог зрачења - висина Сунца, према америчком стандарду ASHRAE-1981 (како је цитирано у Penkova et al., 2014). Дифузно сунчево зрачење се може прорачунати:

$$I_{dif} = \left[\frac{1 + \cos \beta}{2} \right] \cdot I_d + a \cdot \left[\frac{1 - \cos \beta}{2} \right] \cdot (I_{sinh} + I_d) \quad (5.2)$$

$$I = I_{sc} C \cdot A \exp(-B / \sinh) = I_{sc} C \cdot T_D \quad (5.3)$$

$$I_d = I_{sc} C \sin(hT_d) \quad (5.4)$$

$$T_d = 0.271 - 0.2393A \exp(-B / \sinh) \quad (5.5)$$

где је:

I – сунчево зрачење на површини управној на правац зрачења (W/m^2),

I_d – дифузно зрачење на хоризонталну раван (W/m^2),

B – угао између стаклене површине и хоризонталне равни,

a – рефлексија земље (0,2),

I_{sc} – соларна константа (W/m^2),

A и B – коефицијенти у складу са загађењем атмосферског ваздуха:

1. нормално загађење ($A=0,88$ $B=0,26$),

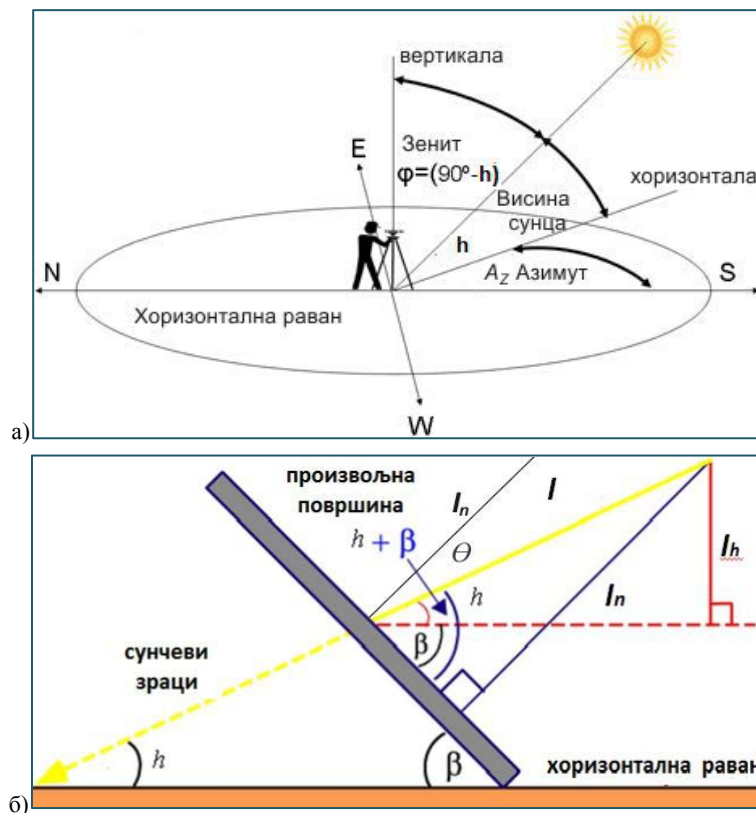
2. чисто небо ($A=0,887$ $B=0,17$),

3. индустријска зона ($A=0,91$ $B=0,43$),

C – коефицијент корекције за раздаљину Сунца и Земље,

($C=1+0,034\cos(30(m-1)+D)$ где је D –дан у месецу и m –месец у години,

T_D – коефицијент преноса директног сунчевог зрачења.



Слика 5.21: а) Азимут– A_z и висина Сунца– h за северну хемисферу; б) Нагнутост површине у односу на хоризонталну раван– β , висина Сунца– h , сунчево зрачење– I , нормална компонента сунчевог зрачења у односу на површину омотача– I_n , нормална компонента сунчевог зрачења у односу на хоризонталну раван– I_h

(Извор: а) http://astronomy21st.blogspot.rs/2010_02_21_archive.html, 20. 2. 2016; б) Penkova, 2013:13)

Директно сунчево зрачење је у функцији доба дана, оријентације и положаја стакленог омотача. Тачније, директно сунчево зрачење на произвољно оријентисаној површини зависи од углова (Слика 5.21а и б): а) висина Сунца - h , б) азимута Сунца - A_Z , ц) азимута површине - ψ (у односу на правац севера – површине на северној хемисфери оријентисане директно ка југу имају угао $\psi = 180$), и д) нагнутости површине у односу на хоризонталну раван – β , и може се изразити (Penkova et al., 2014):

$$I_D = I \left[\cosh \cdot \sin \beta \cdot \cos(\psi - A_Z) + \sinh \cos \beta \right] \quad (5.6)$$

Односно, с обзиром да директно сунчево зрачење (I_D) подразумева нормалну компоненту (I_n) сунчевог зрачења у односу на површину омотача (Слика 5.21б) може се изразити (Penkova et al., 2014):

$$I_D \Rightarrow I_n = I \cdot \cos \theta = I_{sc} \cdot C \cdot A \exp(-B / \sinh) \cos \theta \quad (5.7)$$

где је:

I – сунчево зрачење на површини управној на правац зрачења (W/m^2),

I_{sc} – соларна константа (W/m^2),

θ – угао који захвата нормална компонента са правцем сунчевог зрачења.

Углови висина Сунца– h и азимут Сунца– A_Z се могу прорачунати (Penkova et al., 2014):

$$h = \arcsin(\sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega) \quad (5.8)$$

$$A_Z = \arcsin\left(\frac{\cos \delta \cos \omega}{\cosh}\right) \quad (5.9)$$

где је:

φ – географска ширина,

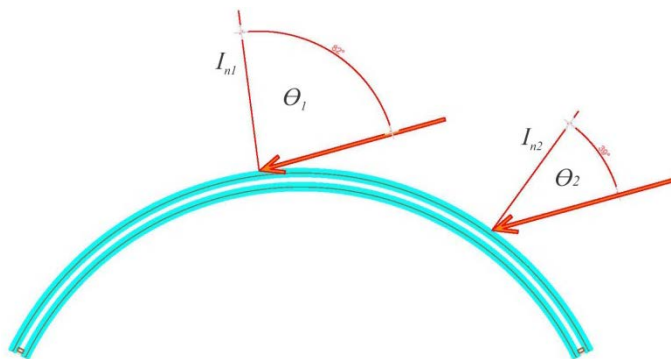
сунчева деклинација $\delta = 22,45 \cos(30m + D - 202)$

где је D –дан у месецу и m –месец у години,

ω –угао часа који претвара локално соларно време у број степени које пређе Сунце, а с обзиром на ротацију Земље од 15° по сату, угао кретања Сунца на небу на сваких сат времена износи 15° што подразумева да је ујутру негативан, у подне је 0° док је поподне позитиван.

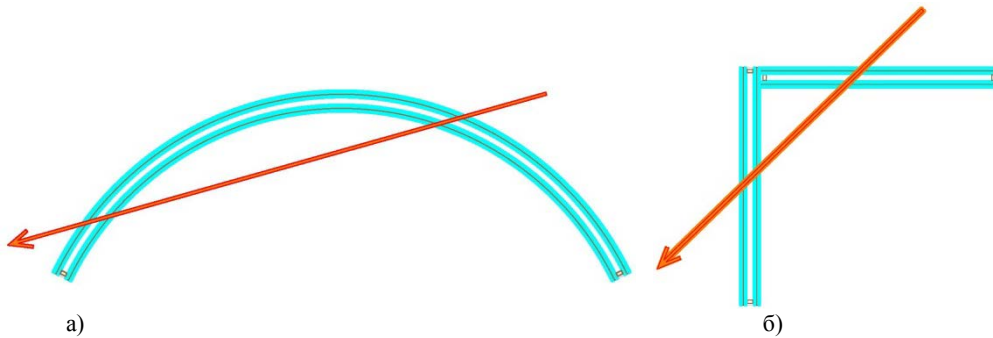
Вредност просечне соларне константе према последњим Насиним подацима (*NASA-National Aeronautics and Space Administration*) износи 1.367 W/m^2 (Florides, 2016). Према европским стандардима, дефинисана је средња сума сунчевог зрачења за сваку регију у Европи и за осам основних оријентација, као и за хоризонталну површину. Према Правилнику о енергетској ефикасности зграда, дефинисана је средња сума сунчевог зрачења за Београд и дата је за четири основне оријентације, као и за хоризонталну површину чија вредност износи $1.351,42 \text{ W/m}^2$. Помоћу софтверског програма *Polisun 4 Version 4.3.0.1*. прорачуната је вредност глобалног сунчевог зрачења за град Београд од стране аутора Krstić-Furundžić и Kosorić (како је цитирано у Kosić et al., 2015), и износи $1.341,80 \text{ W/m}^2$ и $2.123,25$ сунчаних сати годишње.

Нормална компонента (I_n) сунчевог зрачења, у случају закривљеног стакленог омотача, је различита у свакој тачки омотача из разлога различитих упадних углова θ_1 - θ_n (Слика 5.22). Како то подразумева неједнак интензитет директног сунчевог зрачења а тиме и неједнако соларно оптерећење на површини стакленог омотача, то указује на комплексност његовог прорачуна у случају закривљеног стакленог омотача.



Слика 5.22. Различити углови (θ) које прави нормална компонента (I_n) сунчевог зрачења са правцем сунчевог зрачења у различитим тачкама закривљеног стакленог омотача

Генерално говорећи, сунчеви зраци пролазе кроз закривљену стаклену површину једном или два пута, према добу дана, добу године и оријентацији површине. Овај процес је неопходно повезати са компликованим прорачуном путање сунчевих зрака кроз стакло и анализом топлотног оптерећења. Додатно, проблем настаје када сунчеви зраци двоструко пролазе кроз површину омотача (Слика 5.23).



Слика 5.23. Двоструки пролаз сунчевих зрака кроз: а) закривљену, и б) равну површину стакленог омотача

Физика кретања сунчеве енергије кроз стаклене елементе

Следећи значајан параметар термичког оптерећења представља провођење (проток) топлотне енергије кроз стаклени омотач. Стакло као материјал омотача представља кључну компоненту кроз коју се одвија проток топлоте између унутрашње и спољашње средине. Како је дебљина стакла најмања у поређењу са осталим компонентама омотача, и како његова провидност омогућава продор сунчеве светлости, топлотни добици и губици су најдоминантнији у односу на укупни проток топлоте кроз омотач. Енергетски процеси који се одвијају кроз стакло подразумевају:

- Рефлексију, апсорпцију и трансмисију директног и дифузног сунчевог зрачења (светлост),
- Кондукцију и конвекцију апсорбованог зрачења у простор који га окружује (топлота и светлост),
- Кондукцију и конвекцију узроковану температурним разликама између спољашњости и унутрашњости (топлота),
- Емисију (израчивање) топлоте из самог стакла и површина које га окружују (топлота).

Кретање светлости кроз стакло

Када сунчево зрачење падне на површину стакла на омотачу, део зрачења се непосредно рефлектује, део апсорбује у стакленој панелу, док остатак пролази у унутрашњи простор. Сунчево зрачење пролази кроз сваку фазу појединачно, али у различитим пропорцијама у односу на врсту и дебљину стакла, а њихов збир је увек једнак јединици. Контрола сунчевог зрачења применом различитих врста застакљења се управо заснива на овом принципу, с обзиром да се различитим

процесом производње стакла могу остварити ефекти путем којих свака од ових фаза може бити засебно наглашена (рефлектујуће и апсорпционо стакло, стакло са високим степеном трансмисије светлости и слично).

Када светлосни зрак достигне површину стакла, улази у средину веће густине чиме се његова брзина успорава и зрак се прелама. Преламање је промена правца зрачења до које долази услед промене брзине кретања светлости проласком кроз различите медијуме. Преламање светлости се може описати уз помоћ Шнеловог закона који одређује угао под којим се светлосни зрак прелама. Угао преламања је повезан са упадним углом зрачења и индексом преламања (Слика 5.24). Шнелов закон подразумева:

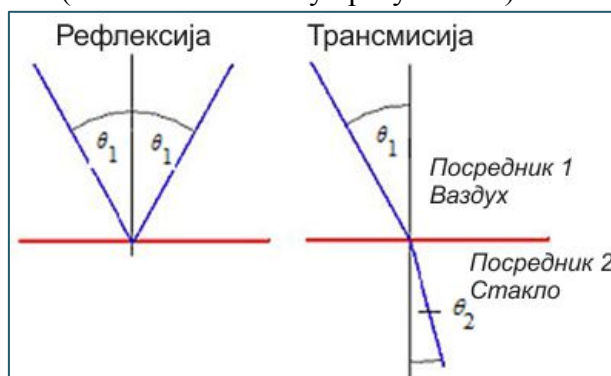
$$\sin \theta_2 = \sin \theta_1 / n \quad (5.10)$$

где је:

θ_1 - упадни угао зрачења и угао рефлексије,

θ_2 - угао преламања,

n - индекс преламања (константа за сваку врсту стакла).



Слика 5.24. Упадни угао зрачења и угао рефлексије, и угао преламања сунчевог зрачења кроз стакло; (Извор: Penkova, 2013: 16)

Дакле, сунчево зрачење које падне на површину стакла пролази кроз три фазе:

- **Рефлексију**, која се одвија према закону рефлексије који гласи да је угао рефлектованог зрака једнак упадном углу зрачења (Слика 5.3). Рефлексија светлости код стакла може бити:
 - спекуларна, у случају директног зрачења, или
 - дифузна, у случају дифузног зрачења, када се светлост одбија о стакло у више различитих правца.

Рефлексија се увек јавља када светлост путује кроз медијуме различитих индекса преламања. То подразумева, да у случају стакла увек постоји део

светлости који ће бити рефлектован на граничној (спољашњој) површини стакла, док ће се остатак светлости јавити преламањем у самој структури стакла. Колика ће се количина директног сунчевог зрачења рефлектовати о стакло зависи од упадног угла зрачења (θ_1) и угла преламања (θ_2).

- **Апсорпцију**, која подразумева део сунчевог зрачења које када падне на стакло се апсорбује. Овако апсорбовану енергију стакло или излучује или се сунчева енергија растура по самом материјалу. Апсорпција сунчевог зрачења представља процес у коме електрони атома стакла преузимају енергију фотона. Тиме се енергија електромагнетног зрачења трансформише у другу врсту енергије – топлоту. Количина апсорбоване енергије зависи од таласне дужине светлости, односно стакло трансмитује онај спектар зрачења који електрони атома стакла игноришу. Колика ће се количина сунчевог зрачења апсорбовати у стаклу зависи од боје стакла и упадног угла зрачења. Ако је зрачење директно, односно нормално на површину стакла, више зрачења бива апсорбовано, а мање рефлектовано. Са оштријим упадним углом, више светлости бива рефлектовано.
- **Трансмисију**, која представља особину пропуштања светлости. У зависности од материјала, праћена је одређеним степеном рефлексије и апсорпције. Пропуштена количина светлости изражава се коефицијентом трансмисије који највише зависи од врсте стакла. Трансмисија светлости или оптичка транспарентност је мера пропорције зрачења из видљивог дела спектра и повезана је са осетљивошћу људског ока.

Кретање топлоте кроз стакло

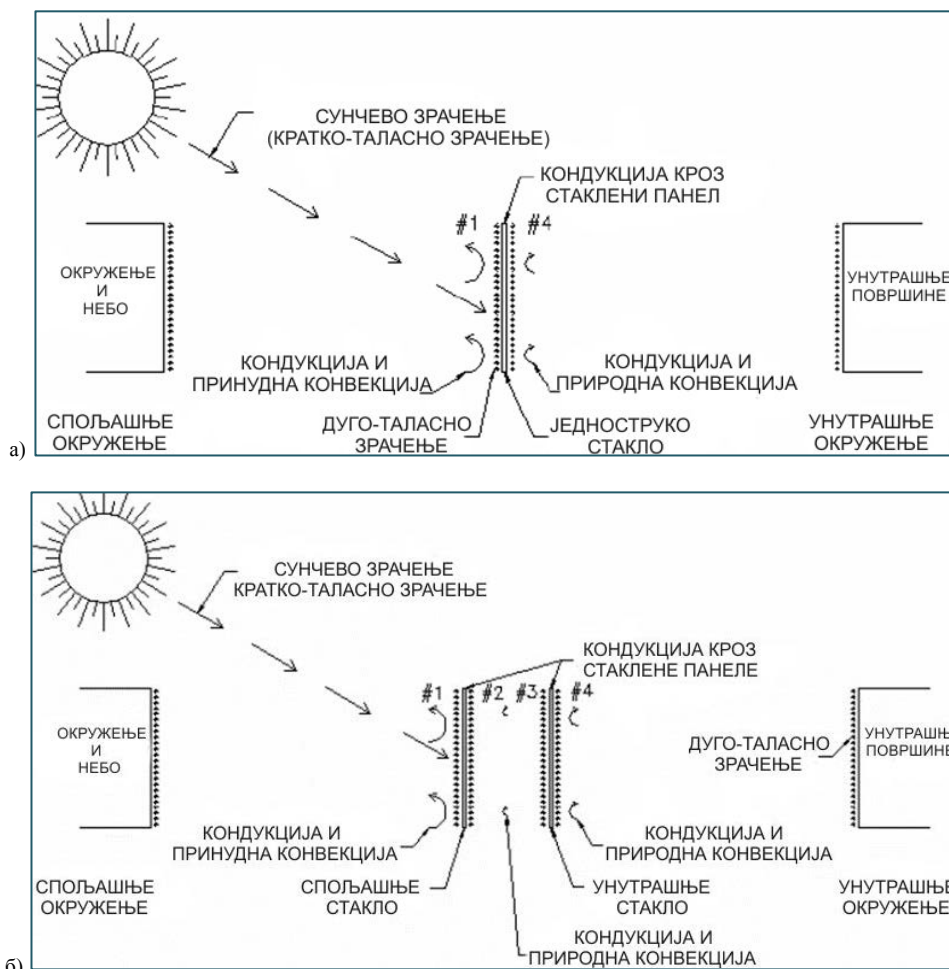
Топлота је облик енергије који представља молекуларно кретање у телима или вид зрачења у простору, и креће се од зоне виших температура ка зонама нижих на три различита начина:

- **Кондукцијом**, која подразумева облик ширења топлоте кроз тело с циљем изједначавања разлике у температурама. Ниво протока топлоте кроз стакло кондукцијом је условљен:
 - његовом површином - A (m^2),
 - дебљином стакла - d ,

- температурном разликом између две крајње тачке - ($\Delta t = t_1 - t_2$),
- топлотном проводљивошћу самог стакла - λ (W/mK).
- **Конвекцијом**, која подразумева проток топлоте са површине стакла ка унутрашњем или спољашњем амбијенту. У периоду прегревања, стакло загрејано од стране сунчевог зрачења путем конвекције загрева ваздух у ентеријеру и тиме доприноси порасту амбијенталне температуре. Ниво протока топлоте конвекцијом зависи од:
 - његове површине - A (m^2),
 - температурне разлике између стакла и унутрашње и спољашње средине- ($\Delta t = t_1 - t_2$),
 - коефицијента конвекције - h_k (W/mK), који зависи од бројних физичких фактора тела и флуида путем којих се одвија конвекција, а у случају конвекције између фасаде објекта и непосредне ваздушне средине његова вредност се узима као константа.
- **Термичком радијацијом**, која подразумева кретање топлоте у виду електромагнетног зрачења у опсегу инфрацрвеног зрачења које може бити краткоталасно и дуготаласно. Краткоталасно инфрацрвено зрачење (780-2300 nm) је зрачење које неометано пролази кроз стакло, и када топлота сунчевог зрачења једном прође у ентеријер загрева објекте унутар простора који затим емитују топлоту у виду дуготаласног зрачења (2300-10000 nm), за чији опсег таласних дужина је стакло непропусно. Ниво протока топлоте радијацијом (израчивањем) зависи од:
 - његове површине - A (m^2),
 - температурне разлике спољашње и унутрашње стране стакла – ($\Delta t = t_1 - t_2$),
 - степена апсорпције стакла (α),
 - степена емисије стакла (ϵ),
 - коефицијента радијације – h_r (W/mK), који варира у односу на геометријску конфигурацију и особине унутрашње и спољашње површине стакла.

Размена топлотне енергије сунчевог зрачења између стакленог панела и спољашњег/унутрашњег простора се разликује у случају једноструког стакленог

панела и двоструког а тим и вишеструког (термоизолационог) панела, као што приказује Слика 5.25.

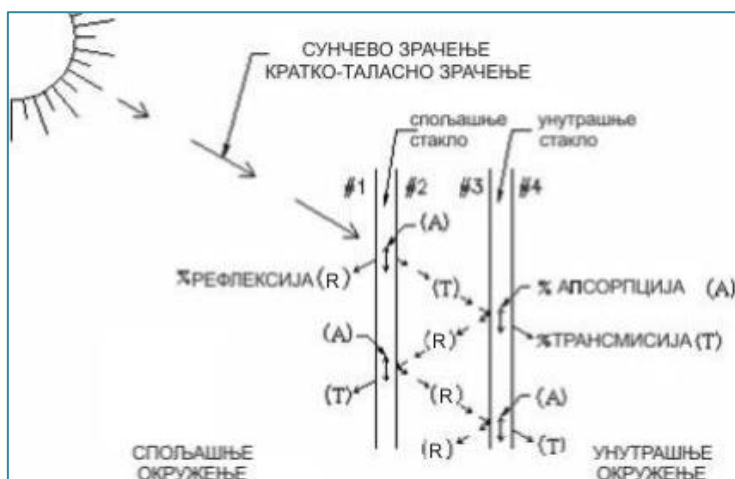


Слика 5.25. Размена енергије сунчевог зрачења између стаклених панела и спољашњег/унутрашњег простора у случају: а) једноструког стакла; б) двоструког (термоизолационог) панела; (Извор: према Penkova, 2013: 4, 5)

Поступак познат као праћење протока сунчевог зрачења се користи за одређивање количине зрачења које се апсорбује, трансмитује, и рефлектује у, кроз и од стакла. Када сунчево зрачење стигне до монолитне стаклене плоче, један део сунчевог зрачења се одбија-рефлектује од површине стакла назад у спољашње окружење, док други део сунчевог зрачења се преноси-трансмитује кроз стакло у унутрашњи простор, а остатак сунчевог зрачења се апсорбује у самом стаклу. Апсорпција, трансмисија и рефлексија зависе од врсте и дебљине стакла, врсте застакљења (једноструко, двоструко или троструко), угла који упадни сунчеви зрак прави са нормалом на дату стаклену површину, као и степена поларизације сунчевог зрачења. Када енергија сунчевог зрачења доспе на површину ваздух-

стакло монолитног стакла, део енергије се рефлектује под истим углом (Слика 5.3). Енергија која није рефлектована на површини ваздух-стакло пролази кроз стакло, под различитим углом (Слика 5.3), где се делимично и апсорбује. Део снопа сунчевог зрачења који доспе на другу површину стакло-ваздух рефлектује се назад у стакло, док се већи део трансмитује у унутрашњи простор. Унутрашње рефлектовано зрачење се поново делимично апсорбује у стакленом панелу пре него што стигне на спољашњу површину стакло-ваздух где се поново делимично рефлектује. Трансмитовани део овог зрачења у спољашњи ваздушни простор се додаје делу зрачења које је првобитно било рефлектовано назад у ваздушни простор са површине ваздух-стакло.

У случају ТИ стаклених панела, када снап сунчевог зрачења падне на панел, један део се рефлектује назад у спољашње окружење од стране стакла, један део зрачења се трансмитује кроз стакло до унутрашњег стакла, и остали део сунчевог зрачења апсорбује стакло (Слика 5.26). Соларно зрачење које се трансмитује до унутрашњег стакла се или апсорбује од стране унутрашњег стакла, или рефлектује на спољашње стакло или трансмитује у унутрашњи простор на основу својстава унутрашњег стакла (Слика 5.26). Унутрашња рефлексија се наставља између спољашњег и унутрашњег стакла све док се сва енергија не апсорбује од стране обе стаклене плоче или трансмитује било у унутрашњи или назад у спољашњи простор (Penkova, 2013).



Слика 5.26. Проток (размена) сунчевог зрачења у циљу одређивања количине сунчевог зрачења које се апсорбује, трансмитује, и рефлектује од стакла у случају ТИ стаклених панела; (Извор: Penkova, 2013: 21)

Део сунчевог зрачења који се трансмитује, рефлектује, и апсорбује је квантификован је помоћу оптичких својстава стакла, која су обично одређена и

публикована од стране произвођача. Ова оптичка својства су означена као соларна рефлексија (R), соларна трансмисија (T), и соларна апсорпција (A), где је:

$$A + R + T = 1 \quad (5.11)$$

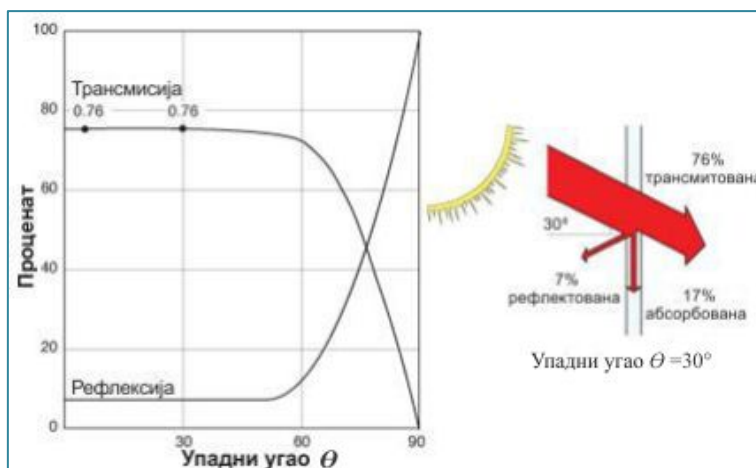
односно

$$\frac{I_{\text{apsorbovana}}}{I} + \frac{I_{\text{transmitovana}}}{I} + \frac{I_{\text{reflektovana}}}{I} = 1 \quad (5.12)$$

где је:

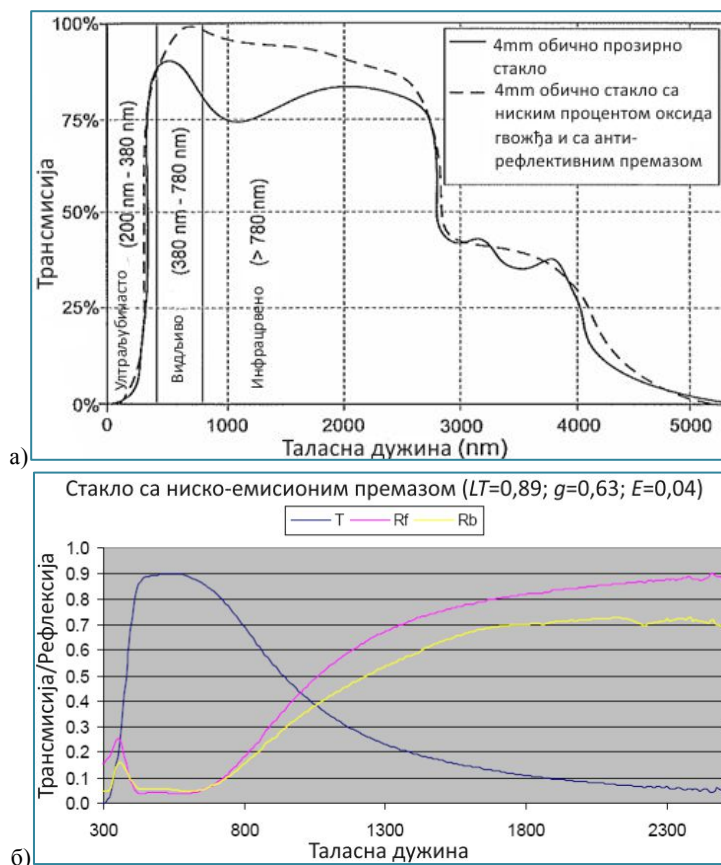
I – укупно сунчево зрачење.

Соларна апсорпција, рефлексија и трансмисија су у функцији таласне дужине зрачења и упадног угла θ_1 , односно доба дана и координата, што поново указује да су због различитог упадног угла у различитим тачкама закривљене површине омотача њихове вредности различите. Међутим, оптичка својства стакла се не мењају значајно у односу на таласну дужину или када је упадни угао мањи од 60° ($T \approx$ константа и $A \approx$ константа $\Rightarrow R \approx$ константа), као што приказује Слика 5.27. Када сунчево зрачење пада под углом већим од 60° у односу на вертикалу, трансмисија нагло опада док апсорпција истовремено нагло расте, а самим тим и рефлексија. Оптичке карактеристике обичног пливајућег равног незапрљаног стакла дебљине 6 mm за упадни угао од 30° у соларном спектру, показују да се 76% зрачења трансмитује, 7% рефлектује и 17% апсорбује (Слика 5.27), за разлику од спектра инфрацрвеног зрачења (изван соларног спектра) где исти тип стакла апсорбује 86% зрачења, рефлектује 11% и трансмитује свега 3% зрачења изван соларног спектра ("Window Technologies", 2015).



Слика 5.27. Трансмисија и рефлексија сунчевог зрачења обичног провидног стакла дебљине 6mm у функцији упадног угла θ_1 , (Извор: <http://www.commercialwindows.org/transmittance.php>, 4. 3. 2015)

Спецификација оптичких карактеристика дата од стране произвођача означава, најчешће, карактеристике у односу на просечни спектар сунчевог зрачења када је упадни угао нормалан (90°) на стаклену површину.



Слика 5.28. Трансмисија и рефлексија сунчевог зрачења кроз: а) обично провидно стакло и стакло са ниским процентом оксида гвожђа и анти-рефлективним премазом; б) стакло са ниско-емисионим премазом (Извор: <http://www.commercialwindows.org/transmittance.php>, 4. 3. 2015)

Оптичке карактеристике стакла показују значајне разлике у вредности у погледу рефлексије, трансмисије, апсорпције и емисије за различите врсте стакла у различитом спектру електромагнетног зрачења (Слика 5.28 и Табела 5.2). Табела 5.2 приказује вредности апсорпције, трансмисије рефлексије и емисивности за обично и нискоемисионо стакло, и стакло са соларном контролом. Вредности $A_f - A_b$, $R_f - R_b$ представљају вредности апсорпције и рефлексије на спољашњој и унутрашњој површини стакла које се незнатно разликују. Висока емисивност (способност материјала да излучује енергију) обичног стакла ($\epsilon=0,84$) показује ниску рефлективност (16% дуготаласне енергије зрачења која падне на површину стакла се рефлектује). Такође, може се рећи да меки премази имају нижу емисивност од тврдох премаза (распона од $\epsilon=0,10$ до $\epsilon=0,02$).

Табела 5.2. Упоредна оптичка својства различите врсте стакла у различитом спектру електромагнетног зрачења

| Врсте стакла и спектра електромагнетног зрачења | | | | |
|---|---|---------------------------------------|---|---|
| | Обично стакло (инфрацвени спектар- изван спектра сунчевог зрачења) | Обично стакло (соларни спектар) | Соларна контрола на површини #2 (соларни спектар) | Ниско-емисиони премаз на површини #3 (соларни спектар) |
| Апсорпција - А | A=0,86 | A=0,08 | Af=0,45; Ab=0,46 | Af=0,25; Ab=0,26 |
| Трансмисија - Т | T=0,03 | T=0,76 | T=0,47 | T=0,68 |
| Рефлексија - Р | R=0,11 | R=0,16 | Rf=0,08; Rb=0,07 | Rf=0,07; Rb=0,06 |
| Емисивност стакла-Е | -- | ε=0,86 | -- | ε=0,03 |

С друге стране, такође, у погледу оптичких својстава важно је напоменути да је за архитектонске објекте, пропуштање светлости од великог значаја, посебно ако се узме у обзир значај светлости као феномена за перцепцију у простору. Својство пропуштања светлости које се односи на видљиви део спектра, зависи као и остале оптичке карактеристике од врсте стакла. У том смислу, када светлост падне на обично пливајуће равно незапрљано стакло дебљине 6 mm, део бива рефлектован (око 4%), део апсорбован (1,6-2,5%), док остатак бива пропуштен (максимално 91-92%) (Кажтазовић и Ризвић, 2013).

Трећа значајна карактеристика топлотног оптерећења је апсорбовани део укупног сунчевог зрачења (S_i) који је такође у функцији доба дана и положаја (координата) стакленог омотача. Соларни фактор (SF) или g -вредност (*engl. Solar Heat Gain Coefficient*) представља удео сунчевог зрачења који је под нормалним углом трансмитован кроз стакло на све начине. Састоји се од дела директног трансмитованог сунчевог зрачења (τ_s), познатог као кратко-таласна компонента и дела апсорбованог сунчевог зрачења (g_{si}) који је прво апсорбован а затим емитован у унутрашњи простор конвекцијом и дуго-таласним зрачењем познатим као дуго-таласна компонента:

$$g = \tau_s + g_{si} \quad (5.13)$$

Део укупног степена пропустљивости апсорбованог зрачења (g_{si}) представља део (N_i) зрачења које је апсорбовано ($S_i \cdot W/m^2$) од стране i -тог слоја стакла и затим емитовано у унутрашњи простор, а зависи од апсорбционих карактеристика (A_i) самог стакла:

$$g_{si} = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{N_i \cdot S_i}{I_s} \right\} \quad S_i = A_i \cdot I_s \quad (5.13)$$

С обзиром да прорачун апсорбованог дела (S_i) сунчевог зрачења директно зависи од укупне суме сунчевог зрачења, односно њене нормалне компоненте (директно сунчево зрачење) може се закључити да је његова вредност у свакој тачки закривљене површи различита, што указује на комплексност прорачуна укупне g -вредности у случају закривљеног стакленог омотача.

Прорачун коефицијента пролаза топлоте застакљења се може одредити симулирањем одређених услова окружења који подразумевају спољашњу/унутрашњу разлику температуре са или без сунчевог зрачења (ISO/DIS 15099), где је коефицијент пролаза топлоте реципрочан топлотној отпорности (17), а топлотна отпорност i -тог међупростора где је први простор спољашњи амбијент а последњи простор унутрашња средина и простори између застакљења (18), као што је приказано:

$$U_g = \frac{1}{R_t} \quad (5.14)$$

$$R_i = \frac{T_{ni} - T_{ne}}{q_i} \quad (5.15)$$

где је:

R_t - збир топлотних отпора спољашњих и унутрашњих граничних услова, свих међупростора и свих стаклених слојева,

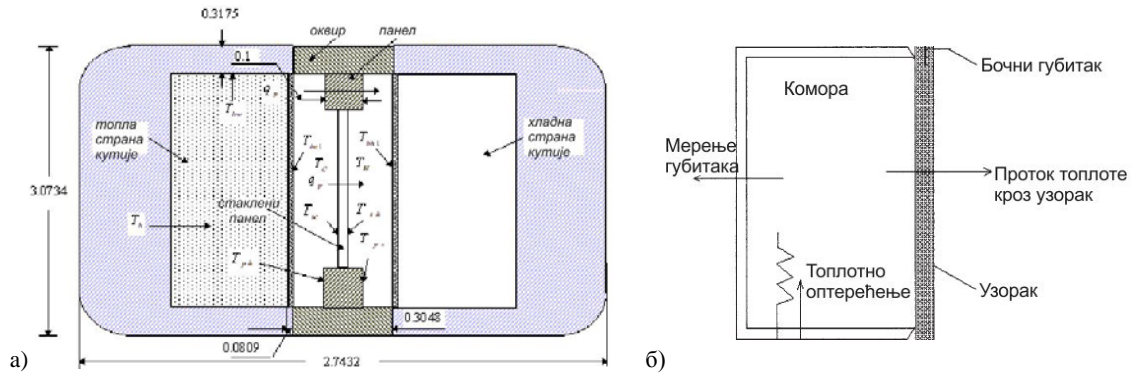
T_{ni} и T_{ne} – температуре унутрашње и спољашње животне средине као пондерисани просек температура ваздуха и средњих температура зрачења у складу са релативним вредностима коефицијената пролаза топлоте h_c (конвекције) и h_r (радијације) који постоји између површина застакљења и окружења.

На основу наведених параметара и прорачуна могло би се закључити да закривљеност форме нема утицаја на вредности коефицијента пролаза топлоте (U -вредност). Са друге стране, може се рећи да стаклени елементи представљају комплексне тродимензионалне склопове где се различити материјали и пресеци мењају на релативно малом размаку. Тако, метални дистанцери термоизолационих панела који имају знатно већи прелаз топлоте од централног дела стакленог панела, што доводи до повећаног губитка топлоте дуж спољне ивице стакла. У том смислу, величина панела, због односа дужине ивица и површине централног дела панела, значајно утиче на повећање односно смањење укупног коефицијента

пролаза топлоте. Панел мањих димензија има већу U -вредност за исту конфигурацију панела. Такође, U -вредност прозора је одређена у односу на вертикалну позицију. Промена позиције (нагиба) утиче на вредност коефицијента пролаза топлоте. Исти елемент монтиран у крову под нагибом од 20° у односу на хоризонталу имаће U -вредност већу за 10–20% него за вертикалну позицију (под зимским условима) (Vigener and Brown, 2009). Додатно, осим топлотних својстава различитих материјала у саставу панела, климатских услова, као што су разлика унутрашње/спољашње температуре и брзина ветра утиче на U -вредност. На основу свега наведеног, може се закључити да у случају закривљених термоизолационих панела чија форма подразумева различите оријентације (положаје) једне закривљене површи, а тиме и изложеност површине једног панела различитим спољашњим утицајима, може се закључити постојање неједнаких вредности коефицијента пролаза топлоте. Томе доприноси и неједнако соларно оптерећење на закривљеном стакленом омотачу (претходно објашњено), које проузрокује различите температуре по површини спољашњег слоја стакла а тиме и неједнаке разлике температура на површинама унутрашњих слојева панела. Ове разлике, затим, доприносе различитим отпорима пролаза топлоте а тиме и коефицијенту пролаза топлоте.

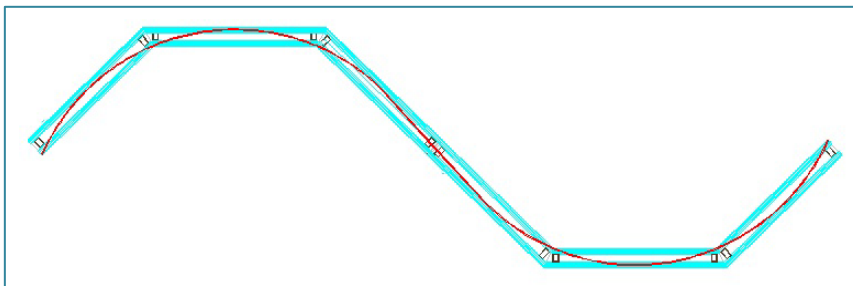
Поред претходно изложених чињеница које се односе на прорачун термичких карактеристика и топлотног оптерећења закривљених стаклених површина и које такође указују на комплексност њиховог прорачуна, неопходно је нагласити да европски стандарди не обухватају стандарде за мерење и прорачун U -вредности и g -вредности закривљеног стакла. То потврђују и анализирани примери (видети Поглавље 2, стр. 95), где не постоје подаци о U -вредностима и g -вредностима закривљеног стакленог омотача за приказане студије случаја. Могући начин одређивања коефицијента пролаза топлоте закривљеног стакла је методом стандардне двокоморне топле кутије (*engl. Hot box*) који је дефинисан и српским стандардима SRPS EN ISO 12567 и SRPS EN 12412-2 (Слика 5.29а). Поред тога, експериментално је спроведено испитивање термичких карактеристика застакљења уз помоћ једнокоморне топле кутије (Слика 5.29б). Овај начин подразумева једну комору која симулира спољашње услове, док се као унутрашњи услови користе услови унутрашњег простора. Низ предности које

обухватају мање материјала и трошкова, поједностављен принцип прорачуна уз мању количину потребне топлоте и коришћење јединственог механизма за одређивање, како коефицијента пролаза топлоте (U -вредност), тако и коефицијента g .



Слика 5.29. Пресек кроз шематски приказ топле кутије помоћу које се експериментално испитује U -вредност стаклене површине: а) двокоморна; б) једнокоморна; (Извор: а) <http://www.ecs.umass.edu/mie/labs/mda/fea/fealib/syuan/freport.htm>, 22. 01. 2016)

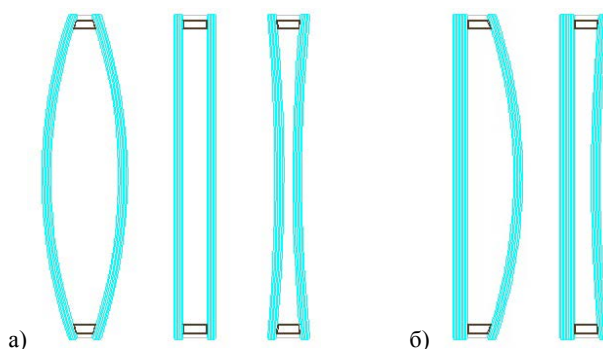
Могућност једноставнијег прорачуна U -вредности и g -вредности закривљене површине стакленог омотача се може спровести помоћу свођења закривљене површине на равне елементе (сегменте) (Слика 5.30). У односу на једноструко закривљену геометрију, може се рећи да већи број мањих елемената који прате закривљену форму може дати приближнији резултат стварне вредности коефицијената, али захтевају комплекснији прорачун због већег броја елемената различитих оријентација. Процес се усложњава у случају двоструко закривљене геометрије где је површину потребно свести на равне елементе дискретизацијом при чему сви елементи имају различите оријентације (блoб форме).



Слика 5.30. Дискретизација једноструко закривљене стаклене површи помоћу равних стаклених елемената у циљу прорачуна термичких карактеристика (U -вредности и g -вредности)

Климатско оптерећење (закривљених) термоизолационих стаклених панела

Још једна важна карактеристика примене закривљеног стакла узрокована климатским условима је проналажење вредности унутрашњег "климатског" оптерећења које посебно може бити значајно у случају закривљених термоизолационих стаклених панела. Ефекат унутрашњег притиска гаса у међупростору између два стакла је значајан елемент у примени закривљеног стакленог омотача, често значајнији од различитих сценарија статичког оптерећења. Његов ефекат директно зависи од могућности деформација самих стаклених панела, односно њихове дебљине и димензија. У односу на оптерећење од ветра и снега, "климатско оптерећење" није доминантно у случају великих стаклених панела, док за пројектовање мањих стаклених панела постаје одлучујући параметар (Feldmann et al., 2014). Додатно, уз то значајна је и расподела спољашњег оптерећења између стаклених елемената који чине термоизолациони панел.



Слика 5.31. Ефекат унутрашњег "климатског" оптерећења: а) Симетричан и б) Асиметричан (са спољашњим дебљим стаклом у оквиру термоизолационог панела)

Са применом термоизолационих панела формираних са закривљеним стаклом, ово "климатско" оптерећење, може имати различите ефекте на термоизолационе панеле, као што приказује Слика 5.31. Ти различити ефекти зависе од крутости стакла која се мења са променом полупречника закривљености. Такође, ефекти се усложњавају када стакло није само једнострано закривљено (цилиндрично) већ је закривљено и другом правцу (сферично).

Анализа топлотног оптерећења термоизолационих панела, обухвата креирање математичког модела и нумеричку анализу температурних поља, преноса топлоте, размене зрачења на површинама ваздух-стакло и стакло-ваздух (рефлексијом, апсорпцијом, преносом, емисијом), природне конвекције у

међупростору термоизолационог стакла, и топлотне отпорности, а све као резултат сунчевог зрачења, амбијенталне температуре и услова локалног ветра.

Ово је посебно важно, зато што промена температуре на површини, било да се ради о конструктивном или неконструктивном стаклу, узрокује топлотно напрезање (напоне σ) стакла које се дефинише као ефекат топлотног оптерећења (Penkova et al., 2013):

$$\sigma = \alpha_T \cdot E \cdot (T_{CGA} - T_{PG}) \quad (5.16)$$

где је:

σ - напони (N/m^2),

α_T – коефицијент топлотне експанзије (10^{-6}K^{-1}),

E – модул еластичности стакла (N/m^2),

T_{CGA} и T_{PG} – разлика температура на површини стакла ($^{\circ}\text{K}$).

Топлотно оптерећење у термоизолационом панелу је разлог нестабилних температура (повећања или смањења) ваздуха или гаса у ваздушном простору термоизолационог панела у односу на почетну температуру (температура формирања термоизолационог панала и његовог херметичког заптивања), и доприноси унутрашњем оптерећењу (Penkova et al., 2013). Промена температуре, метеоролошког притиска и надморске висине у односу на место производње и монтаже панела резултује у разлици притисака између притиска у ваздушном простору између два стакла и ваздушног притиска у окружењу. Генерални метод прорачуна (DIN 18008), прилагођен за све димензије и форме термоизолационих панела, дат је у Препорукама за пројектовање компоненти од конструктивног стакла (Feldmann et al., 2014), с циљем имплементације нових Еурокодова. На основу дефинисана два гранична услова, могуће је прорачунати "климатско" оптерећење које представља разлику притисака. С једне стране то је гранична вредност највећег унутрашњег притиска (*engl. isochoric limit*), док с друге стране то је гранична вредност изобаричног ваздушног притиска (*engl. isobaric limit*). У зависности од крутости (чврстоће на савијање) стакленог панела постигнуте његовим савијањем, реална вредност притиска је између ове две граничне вредности. С обзиром да раван термоизолациони панел има мању крутост (чврстоћу на савијање) и тиме је ближи граничној вредности изобаричног

притиска, то даје могућност да се занемари ефекат "климатског" оптерећења. С друге стране закривљено стакло услед веће крутости је ближе изохорној граничној вредности, и тиме има већи унутрашњи притисак услед веће крутости стаклених панела. Унутрашњи отпор настао услед савијања стаклених панела мора бити једнак унутрашњем притиску.

Због разлике у температури (ΔT), разлике у надморској висини (ΔH) и разлике у изобаричном ваздушном притиску (Δp_{met}) у односу на место производње и место монтаже панела, може се појавити повећани унутрашњи притисак. Унутрашњи "изохорни" притисак може се прорачунати помоћу следеће формуле (Neugebauer et al., 2013):

$$\Delta p_{is} = C_1 \cdot \Delta T - \Delta p_{met} + C_2 \cdot \Delta H \quad (5.17)$$

где је:

ΔH - разлика надморске висине,

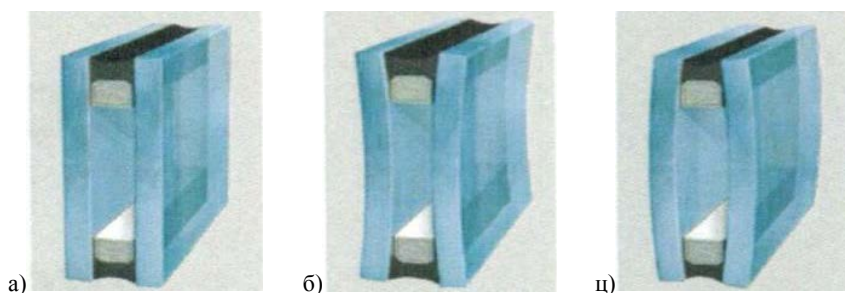
Δp_{met} - разлика метеоролошког ваздушног притиска (кПа),

ΔT - разлика у температури,

C_1 - коефицијент услед промене температуре $C_1=0,34$ кПа/К,

C_2 - коефицијент услед промене надморске висине $C_2=0,012$ кПа/м.

Утицај разлике притиска на термоизолационе панеле приказан је на Слици 5.32.



Слика 5.32. Утицај разлике спољашњег и унутрашњег притиска на термоизолационе панеле:
 а) Стандардна форма ТИ панела; б) Утицај високог ваздушног притиска и ниских температура;
 ц) Утицај ниског ваздушног притиска и високих температура, као и веће надморске висине;
 (Извор: Neugebauer et al., 2013:79)

Тако, деформације термоизолационих панела настале не само услед спољашњег оптерећења, већ и услед унутрашњег "климатског" оптерећења (разлике у притисцима) могу допринети дисторзији површине стакла а тиме и

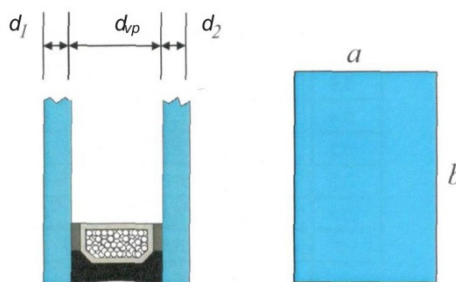
деформацији "сlike у огледалу" (искривљеном одразу) посматраног објекта (Слика 5.33). Из поменутих разлога, неопходно је проверити утицај унутрашњег "климатског" оптерећења.



Слика 5.33. Деформација посматране "сlike у огледалу" услед унутрашњег притиска који је допринео дисторзији површине стаклене фасаде (Извор: Neugebauer, 2009: 244)

У случају термоизолационих панела, чије дебљине стакла су дефинисане као d_1 и d_2 (Слика 5.34), расподела спољашњег оптерећења је одређена крутошћу самих стаклених панела (δ_1 и δ_2), и то (Feldmann et al., 2014):

$$\delta_1 = \frac{d_1^3}{d_1^3 + d_2^3} \quad \delta_2 = \frac{d_2^3}{d_1^3 + d_2^3} = 1 - \delta_1 \quad (5.18)$$



Слика 5.34. Карактеристичне странице (a и b) и дебљине слојева (d_1 , d_2 и d_{vp}) правоугаоног ТИ панела; (Извор: Neugebauer et al., 2013: 81)

За правоугаоне панеле, дужина a представља краћу страницу, док је a^* карактеристична дужина елемента према теорији плочастих елемената (Feldmann et al., 2014) која зависи од дебљине сваког стакленог панела (d_1 и d_2) и дебљине ваздушног простора (d_{vp}), као и форме ТИ панела дефинисане коефицијентом B_V :

$$a^* = 28,9 \cdot \sqrt[4]{\frac{d_1^3 \cdot d_2^3 \cdot d_{vp}}{(d_1^3 + d_2^3) \cdot B_V}} \quad (5.19)$$

Додатно, у циљу правилног пројектовања и прорачуна ТИ панела, расподела спољашњег оптерећења, као и ефекти унутрашњег оптерећења узрокованог

изохорним притиском се умањују услед флексибилности стаклених плоча описане помоћу фактора φ (Слика 5.35) (Neugebauer et al., 2013):

$$\varphi = \frac{1}{1 + \left(\frac{a^*}{a}\right)^4} \quad (5.19)$$



| | Оптерећење стакла 1 | Оптерећење стакла 2 |
|------------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Ефективни унутрашњи притисак p_i | $-\varphi \cdot \Delta p$ | $\varphi \cdot \Delta p$ |

Слика 5.35. Унутрашње "климатско" оптерећење узроковано изохорним притиском умањено флексибилношћу стаклених панела описаном јединичним фактором φ ; (Извор: Neugebauer et al., 2013: 83)

У случају примене закривљених ТИ панела (Neugebauer et al., 2013) јединични фактор φ износи:

$$\varphi = \frac{1}{1 + a + a^+} \quad (5.20)$$

са релативном променом запремине стаклених панела:

$$a = \frac{v_p \cdot p_a}{V_{pr}} \quad a^+ = \frac{v_{p^+} \cdot p_a}{V_{pr}} \quad (5.21)$$

где је:

$p_a = 100 \text{ KN/m}^2$,

V_{pr} - запремина ваздушног простора,

v_p - промена запремине стакленог панела услед притиска од 1 KN/m^2 .

На основу претходног, може се прорачунати оптерећење стаклених елемената (1 и 2) термоизолационих панела (Feldmann et al., 2014):

$$\text{Оптерећење стакленог панела 1: } (1 - \varphi) \cdot \delta_2 \cdot F_1 + p_i \quad (1 - \varphi) \cdot \delta_1 \cdot F_2 - p_i \quad (5.22)$$

$$\text{Оптерећење стакленог панела 2: } (\delta_1 + \varphi \cdot \delta_2) \cdot F_1 + p_i \quad (\varphi \cdot \delta_1 + \delta_2) \cdot F_2 - p_i \quad (5.23)$$

Такође, важно је напоменути да производ ефективног унутрашњег притиска (p_i) и запремине (V_i) термоизолационог панела је константа (Neugebauer et al., 2013), при $T = const.$:

$$p_i V_i = n \cdot R \cdot T = const \quad (5.22)$$

где је:

n - количина материјала,

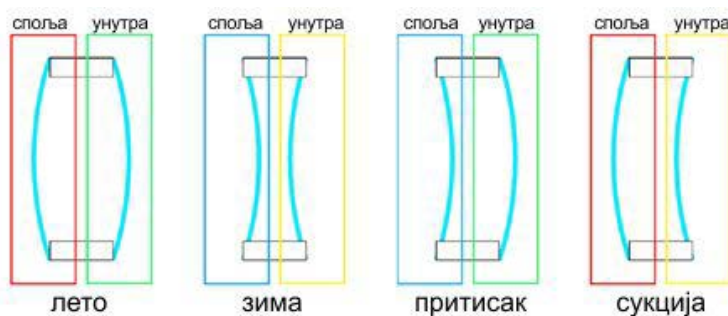
R - константа универзалног гаса,

T - температура.

што указује да повећање вредности температуре утиче на повећање запремине и смањење унутрашњег притиска и супротно.

Из свега наведеног, неопходно је обратити пажњу приликом формирања термоизолационих панела да климатски услови при формирању панела буду слични климатским условима у којима се налази објект на коме ће бити монтирани термоизолациони панели.

С обзиром да унутрашње "климатско" оптерећење представља значајан удео укупног оптерећења које има утицај на примену закривљених термоизолационих панела, неопходно је приликом провере њихових термичко-механичких карактеристика узети у обзир све утицаје. У том погледу, неопходно је извршити суперпоновање унутрашњег и спољашњег оптерећења, при чему су могућа четири сценарија различитих комбинација унутрашњег "климатског" и спољашњег оптерећења, како приказује Слика 5.36.



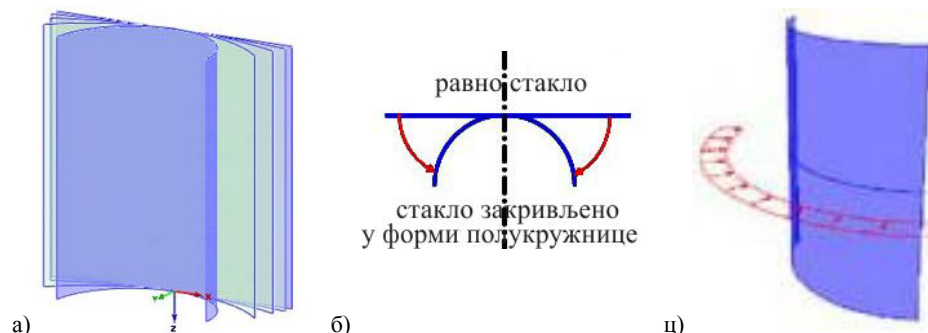
- Сценарио 1: лето + сукција - стакло 1
- Сценарио 2: зима + притисак - стакло 1
- Сценарио 3: лето + притисак - стакло 2
- Сценарио 4: зима + сукција - стакло 2

Слика 5.36. Четири сценарија различитих комбинација суперпоновања унутрашњег "климатског" и спољашњег оптерећења (Извор: Neugebauer et al., 2013: 86)

Сценарио 1 подразумева веће спољашње температуре, нижи ваздушни и виши унутрашњи притисак, а тиме и позитивну вредност разлике притисака која чини унутрашње оптерећење, као и спољашње оптерећење које изазива сукцију. Сценарио 2 се дешава при мањим спољашњим температурама, већем ваздушном и мањем унутрашњем притиску, а тиме и негативној вредности разлике притисака односно унутрашњег оптерећења, као и спољашњем оптерећењу које изазива притисак на панел. Сценарио 3 подразумева веће спољашње температуре, нижи ваздушни и виши унутрашњи притисак, а тиме и позитивну вредност разлике притисака односно унутрашњег оптерећења, као и спољашње оптерећење које изазива притисак. Сценарио 4 се дешава при мањим спољашњим температурама, већем ваздушном и мањем унутрашњем притиску који чини негативну вредност разлике притисака односно унутрашњег оптерећења, као и спољашњем оптерећењу које изазива притисак на панеле.

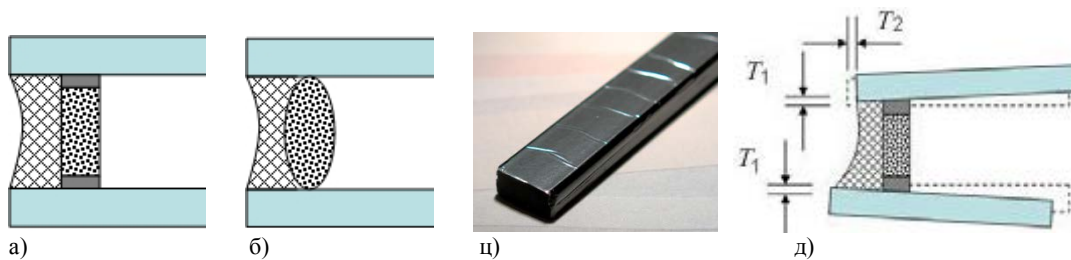
Такође, у погледу пријема оптерећења, у случају примене закривљених термоизолационих панела, неопходно је размотрити расподелу оптерећења између два стакла у панелу. Истраживања су показала да у случају примене оптерећења нормалног на закривљену површину (ветар) вертикалних термоизолационих панела, истих димензија и различитог полупречника закривљености у једном правцу (Слика 5.37), долази до различите расподеле оптерећења на унутрашње и спољашње стакло (Neugebauer, 2009). У случају равног термоизолационог панела, анализа напона је показала да су вредности напона у оба стакла идентичне и да је расподела оптерећења на спољашње и унутрашње стакло подједнака (50% од укупног оптерећења). При повећању полупречника закривљености долази до промене вредности напона у стакленим панелима. У случају закривљености панела при којој панел има форму полукружнице у пресеку (Слика 5.37), напони у унутрашњем стаклу се смањују скоро на минималну вредност (унутрашње стакло прихвата свега око 5% од укупног оптерећења) док су напони у спољашњем стаклу скоро максималне вредности (спољашње стакло прихвата скоро у потпуности целокупно оптерећење, односно око 95% од укупног оптерећења) (Neugebauer, 2009). Ово указује да у циљу ефикасније примене закривљеног стакла је неопходно сагледати и прилагодити дебљине стакла (повећати дебљину спољашњег и смањити

дебљину унутрашњег стакла) термоизолационих панела у погледу постизања њихових бољих статичких, али и економских карактеристика што може бити значајно с обзиром на већу економску цену закривљеног стакла.



Слика 5.37. Утицај закривљености ТИ панела (а и б) на вредности напона у стакленим панелима при примени спољашњег нормалног оптерећења (ц) показује да при форми полукружнице спољашње стакло прихвата скоро целокупно оптерећење – 95%; (Извор: Neugebauer, 2009: 245, 247)

С обзиром да је данас могуће пројектовати математички дефинисане форме било једноструко закривљене (цилиндричне, конусне), двоструко закривљене (сферичне) или геометријски комплексне (слободно закривљене), такође је могуће на свим формама применити термоизолационе стаклене панеле испуњени ваздухом или гасом попут аргона или криптона. Истраживања су показала да се утицаји "климатског" и топлотног оптерећења (као што је било објашњено), као и ефекта спојница на закривљене термоизолационе панеле знатно разликују од њиховог утицаја на равне панеле (Rubel, 2014). Такође, значајан је ефекат саме структуре спојнице у односу на спољашње и унутрашње оптерећење, односно утицај крутости спојнице на вредности напона у ивицама стаклених панела. У том погледу, за формирање закривљених ТИ панела важан елемент представља врста примењеног дистанцера. Тако, алуминијумски дистанцер мора бити унапред обликован и прилагођен датој форми за разлику од "меког" дистанцера који представља флексибилан синтетички материјал и његово обликовање пре формирања ТИ панела није потребно (Слика 5.38а, б и ц). Поред тога примена "меког" дистанцера помоћу кога се формира ТИ панел са "топлим крајем" знатно доприноси бољим термичким карактеристикама целокупног панела и статичким карактеристикама самих ивица стаклених панела.



Слика 5.38. Ивице термоизолационих панела: а) са алуминијумским дистанцером; б) са "меким" дистанцером; ц) изглед "меког" - флексибилног синтетичког дистанцера; и д) деформације ивице ТИ панела у оба правца при спољашњем оптерећењу резултују у промени његове запремине (Извор: а), б), и д) Neugebauer, 2009: 244, 248; ц) Аутор)

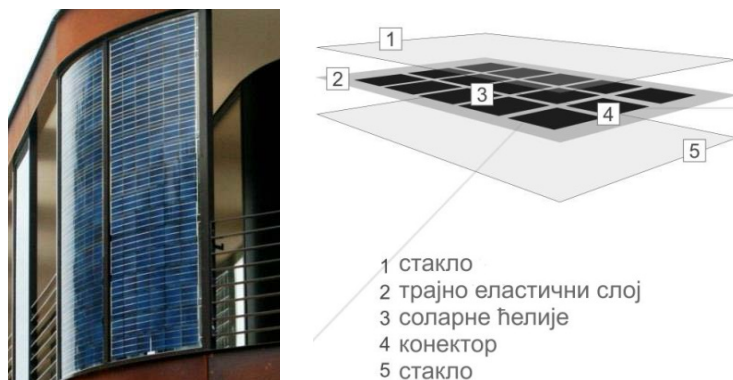
Такође, значајан утицај имају саме ивице термоизолационих панела. Заптивка на ивицама термоизолационих панела дозвољава мала померања и ротације стакла на ивицама панела (Слика 5.38д). У зависности од оптерећења, растојање између стаклених плоча може се смањити или повећати. У зависности од типа ивица (њихове обраде), могући опсег померања је од 0,1 до 0,2 mm за величину панела од 1 m² (Neugebauer, 2009). За меке дистанцере могуће је остварити и већа померања од 0,2 mm. Иако ова померања нису велика, у случају веће површине панела може доћи до разлике у запремини панела (Слика 5.38д). Ову промену свакако не би требало занемарити, с обзиром да на основу претходно реченог, промена у запремини доводи и до промене унутрашњег притиска, а тиме и промене "климатског" (унутрашњег) оптерећења чији утицај може бити значајан нарочито у случају примене закривљених ТИ панела.

Може се закључити да је начин провођења топлотне енергије који подразумева радијацију, конвекцију и топлотну кондукцију, у случају равних термоизолационих панела и њихове позиције од хоризонталне до вертикалне, углавном истражен (Penkova and Neugebauer, 2014). Моделовање топлотних карактеристика специфичних склопова застакљења могуће је спровести уз помоћ компјутерског програма као што је *Therm*, који користи дводимензионалну анализу (2Д) прелаза топлоте кондукцијом и зрачењем на основу методе коначних елемената, омогућавајући процену укупних *U*-вредности и *g*-вредности за различите склопове застакљења, као и предвиђање њихових термичких перформанси на основу метода дефинисаних стандардима EN15099 и ISO 9050. Анализу топлотног оптерећења стаклених панела која подразумева детаљну тродимензионалну (3Д) анализу температурних поља услед слободног кретања гасова у међупростору у комбинацији са преносом топлоте (динамика флуида), а

затим и анализу напона и деформација узрокованих различитим температурама, могуће је спровести уз помоћ софтверских програма као што су *Ansys* и *Abaqus*. У случају закривљених стаклених омотача, како је претходно појашњено, анализа термичких карактеристика и топлотног оптерећења представља комплексан процес. За такву нумеричку анализу неопходно је креирати математички модел преноса топлоте у закривљеном термоизолационом панелу, који подразумева њено спровођење кондукцијом кроз стакло, размену на свакој површини стакленог панела (рефлексијом, апсорпцијом, трансмисијом, емисијом), као и природну конвекцију у међупростору, а све то као резултат унутрашње температуре, локалних климатских услова и соларног зрачења. Такав модел треба да да везу између геометрије закривљене стаклене површине, типа термоизолационог панела и енергетске ефикасности објекта. Највећи изазов би представљао коришћење таквог модела у процесу евалуације енергетске ефикасности објеката са геометријски комплексним стакленим омотачем.

5.2.3 Могућност интеграције соларних система у стаклени омотач геометријски комплексних форми

Како закривљено стакло као елемент закривљених и органских форми стаклених омотача представља екслузиван производ специфичног дизајна и израде, са правом се поставља питање интеграције соларних система у такав омотач. Са друге стране све већа примена геометријски комплексних форми стаклених омотача је наметнула потребу за проналажење могућности за интеграцију система чија технологија омогућава прилагођавање комплексној геометрији омотача. У том погледу као једини систем прилагођен закривљеним формама омотача може се навести систем фотонапонских модула који представља "стакло-стакло" модуле где су фотонапонске ћелије постављене између два слоја стакла у виду слоја за ламинирање и затим савијене у жељену форму (Слика 5.39).



Слика 5.39. Технологија фотонапонских "стакло-стакло" модула примењених на закривљеном стаклу

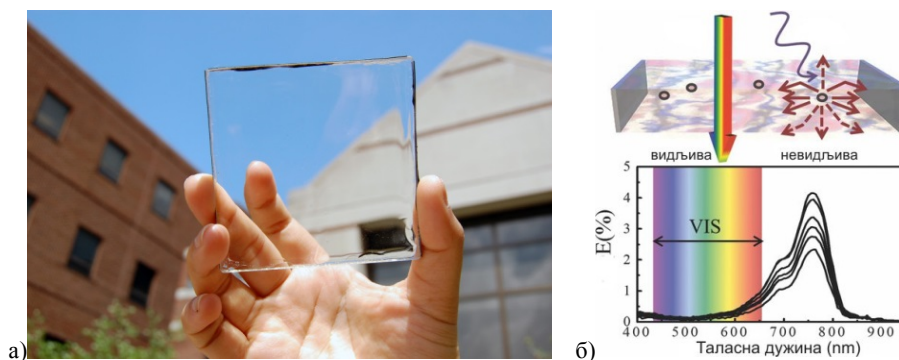
(Извор: <http://www.sunovation.de/en/products/curved-glass-glass-modules.html>, 22. 2. 2016)

Ови модули су произведени хладним процесом који омогућава уградњу фотонапонских ћелија у закривљена стакла без додатног напрезања. Саму структуру модула (стакленог панела) одређују специфичности самог пројекта односно статички захтеви произашли у односу на место апликације и форму стаклене површине, а који су у складу са важећим прописима и стандардима. У том смислу могућа је примена ламинираног сигурносног стакла, стакла са различитим премазима који имају додатну соларну функцију и слично.

Специфичности нових као и постојећих објеката намећу различите форме и димензије омотача попут малих радијуса закривљења које је могуће реализовати применом ових фотонапонских модула. Закривљени "стакло-стакло" модули могу бити инсталирани помоћу уобичајених елемената потконструкције, као што је оквирна конструкција, тачкасти држачи и структурално застакљење. Електрични каблови се скривају помоћу ивичних профила или унутрашњих прикључака. Модули могу бити како провидни тако и у боји различитог спектра. Ниво транспарентности модула се може одабрати, а самим тим и степен покривености унутрашње стране фотонапонских ћелија. Такође, унутрашња страна фотонапонских ћелија се може покрити сито-штампом што омогућује да се спољашњи изглед застакљења пренесе унутар објекта, пружајући истовремено атрактивно решење саме апликације фотонапонских модула. На овај начин се може постићи идентичан изглед са спољашње и унутрашње стране модула. Применом ове технологије могуће је произвести и мању количину модула различите геометрије уз релативно мале трошкове.

Такође, треба поменути нова истраживања која подразумевају потпуно транспарентне соларне ћелије које користе мало другачије технике за

прикупљање сунчеве светлости. За сада, ова истраживања се односе само на равна стакла.



Слика 5.40. а) У потпуности транспарентне соларне ћелије; б) Органске соли апсорбују УВ и инфрацрвене таласе и емитују друге инфрацрвене таласе - процеси који се јављају изван видљивог спектра, тако да ћелије изгледају транспарентне;

(Извор: <http://www.extremetech.com/extreme/188667-a-fully-transparent-solar-cell-that-could-make-every-window-and-screen-a-power-source>, 22. 2. 2016)

Истраживачи са Универзитета у Мичигену су 2014. године створили потпуно транспарентан соларни концентратор, који може да сваки прозор или стаклени панел претвори у фотонапонске соларне ћелије. За разлику од других познатих типова фотонапонских ћелија, ове соларне ћелије су у потпуности транспарентне (Слика 5.40а). У суштини, ове ћелије се разликују у односу на начина апсорбовања светлости, с обзиром да селективно "хватају" део сунчевог спектра који се не може видети, истовремено допуштајући видљивој светлости да пролази кроз стакло. Са научног аспекта, соларне (фотонапонске) ћелије производе енергију тако што апсорбују фотоне (светлост) и претварају их у електроне (електрична енергија). По дефиницији, транспарентан материјал подразумева материјал кроз који светлост у потпуности пролази и пада на задњи део нашег ока. То је разлог због чега су транспарентни модули заправо полутранспарентни и обично праве шарене сенке. Из ових разлога, научници су уместо транспарентних фотонапонских ћелија (што је готово немогуће), створили транспарентни прозирни соларни концентратор који се састоји од органских соли које апсорбују специфичне невидљиве таласне дужине ултраљубичасте и инфрацрвене светлости (Слика 5.40б). Ови таласи затим сијају другом таласном дужином инфрацрвене светлости (такође невидљивом). Ово емитована инфрацрвена светлост се води до ивице где је танке траке конвенционалних фотонапонских соларних ћелија претварају у електричну енергију.

5.2.3 Критеријуми са енергетског аспекта

С обзиром на комплексност анализе термичких карактеристика и тоplotног оптерећења у случају закривљених стаклених термоизолационих панела чији аспекти су претходно дефинисани и објашњени, а која превазилази обим овог рада, за даљу упоредну анализу креираних модела нису узети у обзир критеријуми са енергетског аспекта.

5.3 Технолошко-економски аспект

Полазећи од става да примена кривих линија у архитектонским формама значајно повећава могућност различитог израза, Карел Волерс (Vollers, 2001) је по први пут указао истовремено на практичне предности закривљених форми. То се првенствено односи на економски аспект, с обзиром на чињеницу да закривљена површина омотача подразумева његову већу крутост (што резултује мањом дебљином примењеног материјала) и веома често мању површину омотача (мања количина примењеног материјала и самим тим енергије потребне за његову производњу) (Слика 5.41).



Слика 5.41. Различити модели слободно закривљених (уврнутих) површина омотача
(Извор: Vollers, 2001: 159, 163, 175-176, 181)

Тренутна фасцинација криволинијским формама креира нове захтеве за архитектонско стакло. Два основна приступа обликовања стакла, како је претходно објашњено то омогућавају: хладно савијање и термичко савијање стакла. Генерално говорећи, хладно савијање користи предности "урођене савитљивости" материјала – прилагодљивости, заснованој на механичкој сили којом се савија стакло, било на градилишту или у аутоклаву током процеса ламинирања. Овај процес захтева пажљиву кординацију између инжењера и произвођача која би обезбедила да се не пређу границе напона стакла. У односу на овај поступак, термички савијено стакло се разликује по томе што овај поступак користи предности повратне фазе. Увођењем топлоте, стаклене плоче могу прећи фазу транзиције чврстог стања обичног стакла, креирајући полутечан материјал који се може обликовати у било коју форму. До недавно, комплексност овог производног процеса онемогућавала је примену закривљеног стакла на великим пројектима. Међутим, нови аутоматски процеси представљају опцију којом се скраћује време и рад неопходни за производњу закривљеног стакла. Али

још увек, у зависности од захтева пројекта, ручни процеси обликовања могу бити тражени.

5.3.1 Технолошко-економски параметри производње закривљеног стакла

Приликом примене закривљеног стакла, неопходно је претходно размотрити различите техничко-технолошке параметре који укључују и ограничења, а односе се на форму, димензије, чврстоћу стакла, могућности примене различитих превлака и појаву естетских недостатака на површини стакла.

Форма

За разлику од немачке публикације - Водича за термички закривљено стакло у грађевинарству, која није предвидела класификацију различитих форми закривљеног стакла, америчким стандардом, ASTM 1464, који је утврдило америчко друштво за испитивање материјала (*ASTM – American Society for Testing Materials*), извршена је класификација према следећим формама: комплексна двоструко закривљена, једноструко цилиндрично закривљена, једноструко елиптично закривљена, таласасто закривљена, са једним закривљењем, са више закривљења. Слика 5.42 илуструје примере дефинисаних типова. Сви примери различитих форми подразумевају или једноструко или двоструко закривљена стакла.

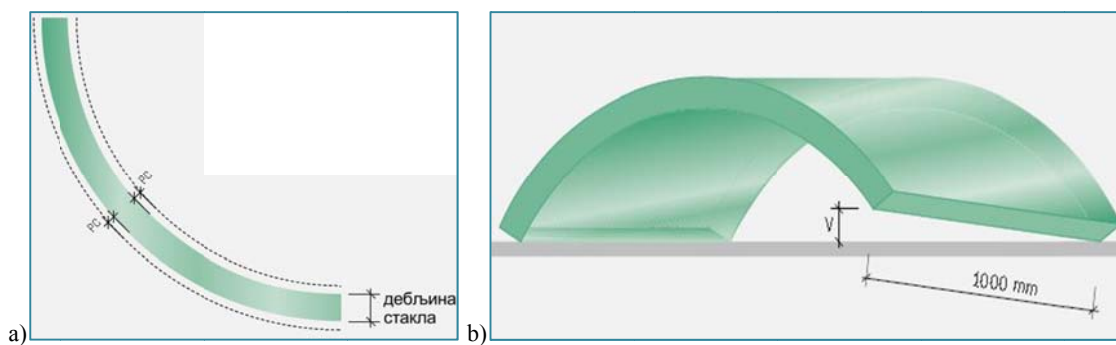


Слика 5.42. Типологија форми према америчком стандарду ASTM 1464, које је могуће произвести термичким обликовањем: комплексна двоструко закривљена, једноструко цилиндрично закривљена, једноструко елиптично закривљена, таласасто закривљена, са једним закривљењем, са више закривљења. Машине за обликовање на производној линији могу произвести све форме осим комплексних двоструко закривљених форми. Највећим делом комплексне форме се производе термичким обликовањем уз помоћ калуца (алата); (Извор: Timm & Chase, 2014: 144)

Како је термичким обликовањем на производној линији могуће добити само једноструко закривљена стакла, у случају захтева за двоструко закривљеним стаклима, неопходно је применити технику термичког обликовања уз помоћ

калупа (алата). С циљем избегавања овог, економски најнеповољнијег поступка, различитим процесима оптимизације и рационализације геометрије целог стакленог омотача и појединачних панела (видети прво поглавље, део 1.2.4), као и поделом на мање елементе, могуће је постићи економичнија решења. Тако, у случају да је могуће оптимизацијом форме целог омотача постићи цилиндричну форму самих панела (видети Прилог 1, Студија случаја 7), то ће омогућити, како визуелно-обликовно, тако и технолошко-економски повољније решење, чак и за пројекте великих размера.

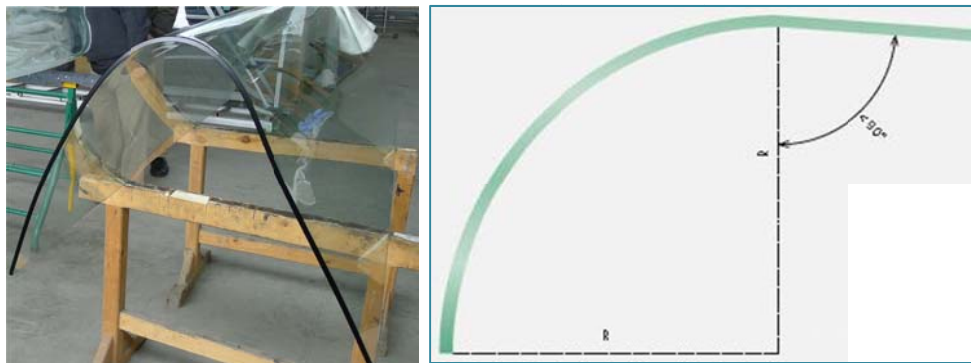
Немачки Водич за термичи закривљено стакло у грађевинарству и амерички стандард ASTM 1464 (Timm & Chase, 2014) наводе низ различитих производних одступања за форме приказане на Слици 5.42. Дозвољена максимална одступања дефинисана су за цилиндрично закривљено стакло и односе се на висину (закривљења), обим, прецизност форме, попречно закривљење, уврнутост (видети димензионалне карактеристике закривљеног цилиндричног стакла, треће поглавље, Слика 3.4). Тако, према немачком Водичу за термичи закривљено стакло у грађевинарству максимална дозвољена одступања у односу на форму (PC), која показују прецизност постигнуте форме износе ± 5 mm (Слика 5.43а), док максимална дозвољена одступања у погледу торзије (уврнутости) панела (V), дозвољавају да горња ивица (конкавне површине) одступа максимално ± 3 mm (Слика 5.43б) по дужном метру.



Слика 5.43. Дозвољена одступања: а) Одступање у односу на форму (PC) показује прецизност постигнуте форме, а дозвољена максимална вредност износи ± 5 mm; б) Одступање у погледу торзије (уврнутости) панела (V), дозвољава да горња ивица (конкавне површине) одступа максимално ± 3 mm по дужном метру; (Извор: Bundesverband Flachglas, 2011)

Поред тога, Водич наводи да су стакла са једним закривљењем и са више закривљења склона непрецизној тангентности са једне или обе стране закривљеног дела панела (Слика 5.44). Сваки раван део панела који није

тангентан на закривљени део панела формираће наглашен прелаз (Слика 5.44) и визуелно ће подсећати на набор. С обзиром на то да већина произвођача у свету често публикује своје стандарде, препорука је упознати се са свим резултатима тестова које је произвођач спровео, као и табелама које показују дозвољена одступања.



Слика 5.44. Непрецизна тангентност са једне стране закривљеног дела панела: а) Панел произведен уз помоћ калупа; б) Према немачком Водичу за термички савијено стакло, не препоручује се да угао између тангенте и одговарајућег полупречника буде мањи од 90° ; (Извор: а) Аутор, 2014; б) Bundesverband Flachglas, 2011)

Када је потребно постићи економски повољније решење закривљеног омотача, неопходно је узети у обзир величину закривљења у односу на размеру целог омотача. Веома често, у пројектима великих размера, као што су јавни објекти (аеродроми и слично) или високи објекти (небодери), са већим површинама закривљеност је већа. Оно што изгледа као тродимензионална закривљеност на нивоу посматраног целог омотача објекта, може се постићи процесом оптимизације помоћу цилиндара (једноструко закривљених форми) на нивоу појединачних панела (видети Прилог 1, Студија случаја 7/8/11). Такође, на примеру пројекта кула близнакиња (*West Towers*) на Менхентну пројектног бироа *SOM (Skidmore, Owings & Merrill)*, чија изградња је започета 2013. године, приказано је како се може постићи оптимизација тродимензионалне форме стакленог омотача помоћу појединачних панела у форми трапезоидних цилиндара (Слика 5.45). Конусну форму могуће је било постићи одступањем тангенти два суседна панела мањим од 0,1 mm (што представља мање одступање него у случају зид завеса) (Timm & Chase, 2014). Поред тога, значајна је, као у овом случају, могућност комбиновања закривљених панела обликованих хладним и термичким савијањем.

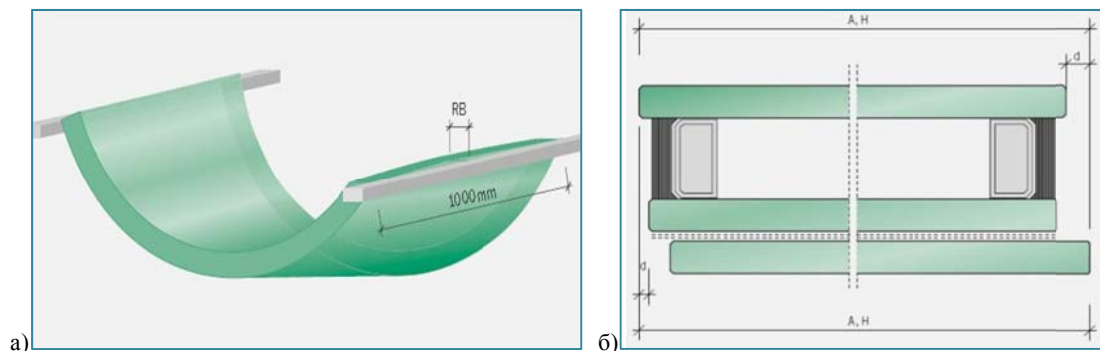


Слика 5.45. Стаклени омотач кула близнакиња (*West Towers*) на Менхентну пројектног бироа *SOM (Skidmore, Owings & Merrill LLP)*, чија тродимензионална форма је оптимизирана помоћу панела у форми трапезоидних цилиндара; (Извор: http://www.som.com/projects/manhattan_west_development)

Димензије

Произвођачи, приликом спецификације, димензионишу једноструко закривљена стакла према следећим обликовно-димензионалним карактеристикама које су наведене у немачком Водичу за термички закривљено стакло у грађевинарству: спољашњи обим лука, полчупречник, висина лука, тетива унутрашњег лука, угао, дебљина и дужина (видети треће поглавље, део 3.1.2., Слика 3.4). Да би били упознати и разумели сва ограничења у погледу димензија и одступања, неопходно је разумети све елементе геометрије закривљеног стакла. То је посебно важно када треба одлучити о примени одређене технике обликовања: термичко савијање на производној линији или помоћу калупа или хладно савијање. Тако, може се рећи да у стручној јавности, мање или више, постоји неслагање око одговарајућих одступања у односу на одређену дебљину стакла. Ова одступања се крећу у опсегу од $\pm 0,2$ mm (за стакла дебљине од 2 до 6 mm), до ± 1 mm (за стакло дебљине 25 mm), док дозвољена одступања у погледу дужине и ширине (дужина криве линије) износе $\pm 1-2$ mm (Neugebauer, 2014). Генерално, дебљина стакла варира у оквиру стандардне стаклене плоче (SRPS EN 572-2, 2013). Према немачком Водичу за термички закривљено стакло у грађевинарству максимална дозвољена одступања у односу на дужину и ширину (дужина криве линије) за стакла димензија до 2 m и дебљине до 12 mm износе ± 2 mm, док за дебљину већу од 12 mm износе ± 3 mm. Такође, за стакла димензија већих од 2 m и дебљине до 12 mm, максимална дозвољена одступања износе ± 3 mm, док за дебљину већу од 12 mm износе ± 4 mm. Поред тога, Водич наводи

девијацију горње ивице (RB), чије максимално одступање износи ± 2 mm за стакла дебљине до 12 mm и ± 3 mm за стакла веће дебљине од 12 mm (Слика 5.46а), као и одступање (помереност) стаклених плоча једне у односу на другу (d), чија максимална вредност износи од ± 2 до ± 4 mm (Слика 5.46б) у зависности од типа стакленог панела и његове површине.



Слика 5.46. Дозвољена одступања: а) Девијација горње ивице (RB), чије максимално одступање износи ± 2 mm за стакла дебљине до 12 mm и ± 3 mm за стакла веће дебљине од 12 mm; б) Одступање (помереност) стаклених плоча једне у односу на другу (d), чија максимална вредност износи од ± 2 до ± 4 mm у зависности од типа стакленог панела и његове површине; (Извор: Bundesverband Flachglas, 2011)

Како се стакло током процеса термичког савијања на производној линији креће дуж производне линије, димензије и полупречник су ограничени машином за савијање на производној линији. Типична опрема омогућава стандардне димензије стаклених елемената. Превелике – џамбо (*jumbo*) димензије превазилазе могућности већине машина. У случају термичког савијања уз помоћ калуца, димензије су ограничене димензијом пећи. Џамбо димензије могуће је постићи прилагођавањем димензија пећи, што може бити релативно једноставно. Произвођачи су најчешће спремни да прошире своје типичне могућности у зависности од величине и комплексности пројекта.

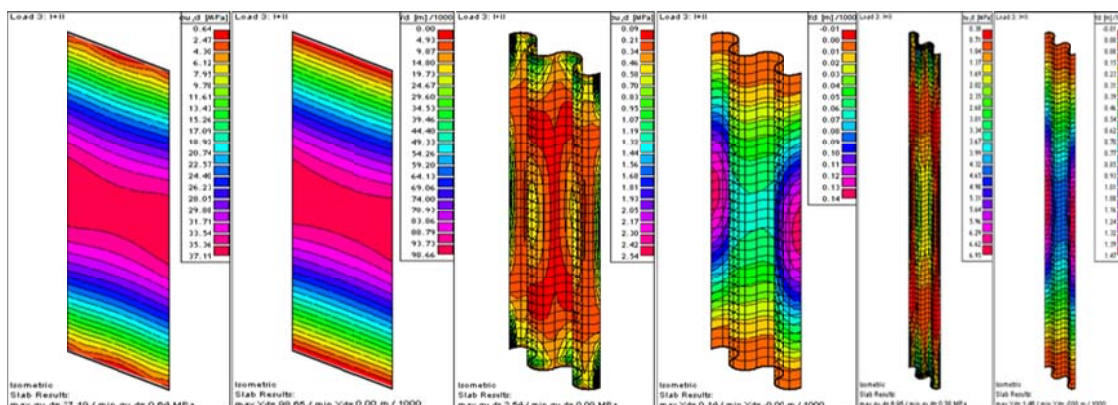
Како је објашњено у трећем поглављу (део 3.2.4 Савремене технике обликовања) традиционалним поступком термичког савијања уз помоћ калуца могуће је добити само обична пливајућа (некаљена) стакла. Приликом примене великих закривљених стакала, немогућност њиховог каљења могуће је компензовати већом дебљином стакла. Већа дебљина стакла доприноси ојачању стакла и може спречити евентуални лом приликом његове уградње. Међутим, дебљином није могуће умањити склоност обичног пливајућег стакла да попусти под повећаним термичким оптерећењем. Услови различитих температура на унутрашњој и спољашњој површини стакла могу код монолитног и ламинираног

обичног пливајућег стакла довести до термичког шока, односно лома стакла. Полиране стаклене ивице могу смањити могућност појаве феномена термичког шока, али је увек неопходно у том погледу консултовати произвођаче. У сваком случају, пре одабира врсте и начина обликовања, неопходно је узети у обзир локацију, климу, могућности обраде ивица и примене стакла са одређеним превлакама.

Планирање и повезивање појединачних производних процеса свих врста обликовања, у случају закривљеног стакла, играју пресудну улогу. У том смислу, геометрија ивица мора бити прецизно дефинисана. Сам процес савијања деформише ивице на различите начине. У случају да су ивице видљиве (ограде спиралних степеница), у намери да се обезбеди гладак прелаз између доњих и горњих ивица, посебну пажњу првенствено треба обратити на начин производње равног панела и обраде његових ивица, што може допринети равномерној расподели напона на ивицама. Слично је и са формирањем отвора, које се мора извршити пре ламинирања, узимајући у обзир геометријску крутост панела која ће уследити након савијања.

Чврстоћа

Архитекте најчешће користе закривљено стакло из обликовних разлога. Међутим, карактеристика која постаје све значајнија приликом примене закривљеног стакла јесте што се самим процесом савијања добија форма љуске која је у конструктивном смислу отпорнија (на моменте савијања). Слика 5.47 приказује заједно деформације и моменте фасадних панела димензије 1200 x 4000 x 18 mm, различитих геометрија, под типичним оптерећењем од ветра. У поређењу са равним стаклом, закривљено стакло се мање деформише. Поред мањих деформација, закривљени панели омогућавају постизање глаткоће површине уз коришћење тањег стакла.



Слика 5.47. Напони и деформације фасадних стаклених панела различите геометрије, димензије 1200x4000x18 mm, услед стандардног оптерећења од ветра; (Извор: Krstic-Furundzic et al., 2012)

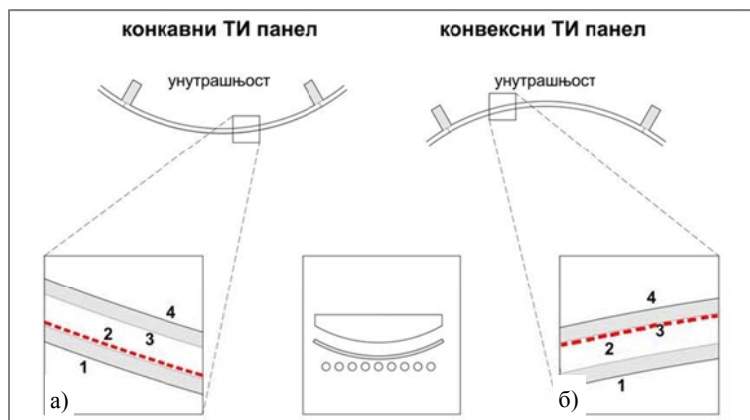
Својствена чврстоћа закривљене форме (геометрије) наводи на примену стакла и у конструкцијама љуски, које користећи предности стакла у погледу чврстоће на притисак, у потпуности равномерно преносе оптерећење као силе притиска кроз површину стакла (видети треће поглавље, део 3.2.4.2, Слика 3.27). У том погледу посебно је значајна примена хладног савијања којом је могуће постићи димензије панела и до 3,30 x 15 m (видети треће поглавље, део 3.4.4 Техника хладног савијања). Даља истраживања у овом домену ће свакако допринети већој примени стакла као конструктивног елемента.

Премази

Највећа примена стакла у спољашњем омотачу захтева веома често примену стакла са нискоемисионим превлакама како би одговорили захтевима националних и локалних стандарда у погледу енергетске ефикасности или захтевима инвеститора за високим перформансама зграда. У сваком случају, стакла са превлакама доприносе већој комплексности примене закривљеног стакла. За њихову примену, неопходно је претходно размотрити тип превлаке (мека или тврда), њену дебљину (једноструки, двоструки, или троструки слој, најчешће сребра), полупречник закривљења, конкавна или конвексна површина (Guardian, 2012). Поред тога, процес обликовања има утицај на избор позиције на стакленом панелу за наношење премаза.

Генерално, превлаке се могу класификовати као меке (распршујуће) и тврде (пиролитичке). Стакла са меким (распршујућим) превлакама која се производе током процеса производње пливајућег стакла, данас се најчешће користе из разлога што омогућавају неутралне боје и боље енергетске

перформансе. С друге стране, као осетљивији материјал, меке превлаке се лакше могу оштетити и потребно је пажљивије руковање приликом њихове примене. У том погледу, стакла са меким превлакама захтевају посебну пажњу приликом процеса термичког савијања. То подразумева да се меке превлаке морају поставити са конкавне стране савијеног стакла (која је изложена притиску), из разлога што кретање стакла по траци са ваљцима може оштетити превлаку на конвексној страни. Такође, то је веома значајно приликом примене термоизолационих панела који обухватају обе, конкавну и конвексну страну, што ограничава могућу позицију премаза. Уколико је термоизолациони панел конвексан са спољашње стране, унутрашња страна спољашњег стакла (позиција 2) ће током процеса термичког савијања на линији, бити конкавна и на њој се може налазити мека превлака (Слика 5.48а). На исти начин, конкаван панел са спољашње стране ће искључити могућност превлаке на унутрашњој страни спољашњег стакла (позиција 2) која ће се тада наћи на спољашњој страни унутрашњег стакла (позиција 3) (Слика 5.48б).

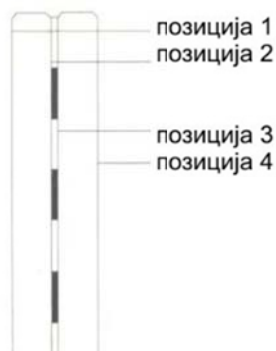


Слика 5.48. Сви термоизолациони панели обухватају и конкавне и конвексне површине, због чега би пажљиво требало размотрити са произвођачима премаза и савијеног стакла жељену позицију премаза: а) конкавни ТИ панел са унутрашње стране и превлака на позицији 2; б) конвексни ТИ панел са унутрашње стране и превлака на позицији 3; (Извор: Timm & Chase, 2014: 147)

Треба нагласити да ће на овај начин, различита позиција нискоемисионе превлаке имати различиту функцију. Тако ће превлака на унутрашњој страни спољашњег стакла (позиција 2), у зависности од примењеног поступка наношења, омогућити квалитетан пролаз светлости уз спречавање прегревања лети, док ће превлака на спољашњој страни унутрашњег стакла (позиција 3) спречити израчавање топлоте из унутрашњег простора, односно смањити топлотне губитке зими.

Стакла са тврдим (пиролитичким) премазима се, такође, могу користити за термичко савијање. Пиролитички премази се примењују током процеса производње пливајућег стакла. Хемијски премаз се наноси у полуистопљеном стању. Резултат тога јесте да су пиролитички премази трајнији, дајући стакло већу флексибилност у позиционирању нискоемисионог премаза. Ипак, треба нагласити да стакла са пиролитичким премазима неће у потпуности задовољити захтеве у погледу високих обликовних перформанси (Timm & Chase, 2014) и термоизолационих својстава, као што је случај са стаклима са меким превлакама. За термичко савијање уз помоћ калупа користе се стакла са тврдим филмом.

Ипак, сам процес наношења неких врста премаза доприноси смањењу чврстоће стакла. Тако, током процеса емајлирања, керамички слој се спаја (запече) са стаклом током процеса термичког каљења стакла на производној линији. Сам процес умањује затезну чврстоћу на савијање за око 40% (Molter & Wolf, 2011) у зависности од врсте стакла, што може имати значајан утицај у случају када следи обликовање техником хладног савијања. Осим тога, процес обликовања има утицај на избор позиције за наношење. Тако, у случају ламинираног стакла, по правилу премаз се поставља на позицију 2, с циљем заштите од оксидације или других унутрашњих утицаја (Слика 5.49). Супротно томе, у неким случајевима комплексних форми премаз може бити нанесен на спољашњу страну (позицију 1), као на примеру хотела *Wagram*, Париз (видети Прилог 1, Студије случаја) из разлога што површина на коју је нанесен премаз може бити оштећена током процеса обликовања.



Слика 5.49. Означавање позиција у случају ламинираног стакла; (Извор: (Molter & Wolf, 2011: 81)

Из горе поменутих разлога, произвођачи стакла препоручују да се приликом примене закривљеног стакла са различитим премазима, спроведе израда модела-узорка у размери 1:1 пре финалног одабира. Модел треба да

покаже све карактеристике закривљеног стакла, као што су премази, ламинирање, керамичке боје, третмани ојачања, тип дистанцера и слично. Представљање модела у фази израде детаљног (уколико постоји могућност) или коначног пројектног решења (видети четврто поглавље, део 4.2.4, Дијаграми 4.4 и 4.5) представља заштиту пројектанта и произвођача закривљеног стакла од могућих изненађења током процеса пројектовања и конструкције омотача и обезбеђује подобност премаза за одређену намену. То је посебно значајно, из разлога што квалитет подлога и премаза варира од земље до земље, чак и када их производи исти произвођач.

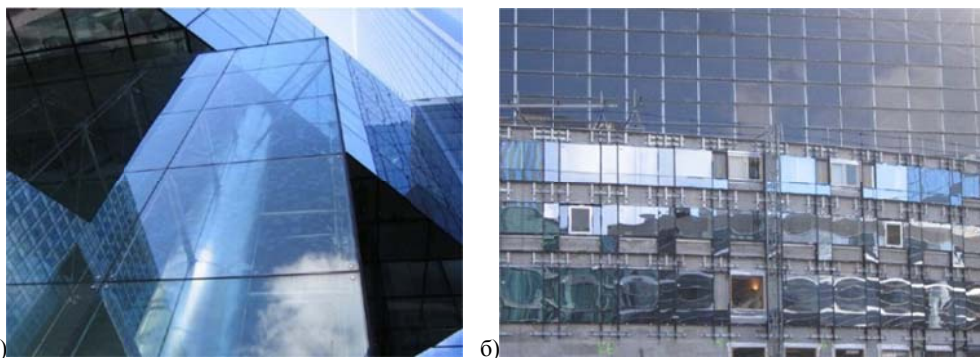
На основу горе изнетог, примена хладног савијања има велику предност, због тога што је за процес хладног савијања могуће применити стакла са скоро свим врстама премаза чије карактеристике остају непромењене и након процеса хладног савијања.

Визуелни недостаци

Приликом примене термички закривљеног стакла неопходно је узети у обзир визуелне недостатке који су својствени за финални производ, односно термички савијено стакло, а који укључују: оптичке дисторзију, анизотропију, дисторзију услед рефлексије.

Технологије производње равног стакла, данас, омогућавају добијање стакла веома доброг квалитета у погледу равноће основног производа. С обзиром на честу примену термички обрађеног стакла, овај процес значајно повећава ризик од појаве могућих дисторзија. Овај недостатак, назван анизотропија, у највећем броју случајева настаје као резултат неусаглашености услова (време и температура) током процеса термичке обраде и представљен је кружним или пругастим флекама по површини стакла (Слика 5.50а). Термичко ојачање (каљење) стакла индукује притисак по површини и затезање у унутрашњости услед наглог хлађења загрејаног стакла, мењајући тако његову молекуларну структуру, што значајно доприноси већој отпорности на механичке и друге утицаје. Млазнице, које загревају стакло, неравномерно ударају (притискају) површину. Ипак, највећа компресија се јавља током процеса хлађења управо на местима удара ваздуха. Места која су била изложена већем притиску појављују се као тамнија, посматрајући стакло под одређеним светлосним условима. У том

смислу, највећи проблем представља хлађење које треба спровести на веома контролисан начин. Према америчком стандарду, овај недостатак не представља дефект, с обзиром на то да га је немогуће избећи током процеса термичког ојачања (Timm & Chase, 2014). У случају примене стакла са превлакама, време и температура морају се посебно подесити. Тако, разлике у извођењу процеса хлађења могу да појачају ефекат дисторзије. Треба истаћи да у случају примене закривљеног стакла, овај недостатак је посебно наглашен. Закривљена површина ствара више различитих углова под којим је могуће сагледати површину омотача, као и различите углове под којима светлост пролази кроз стакло. Настала игра светлости на површини стакла појачава настале флеке. Препорука произвођача је да се примени дебље спољашње стакло у случају термоизолационих панела, уколико је то могуће.



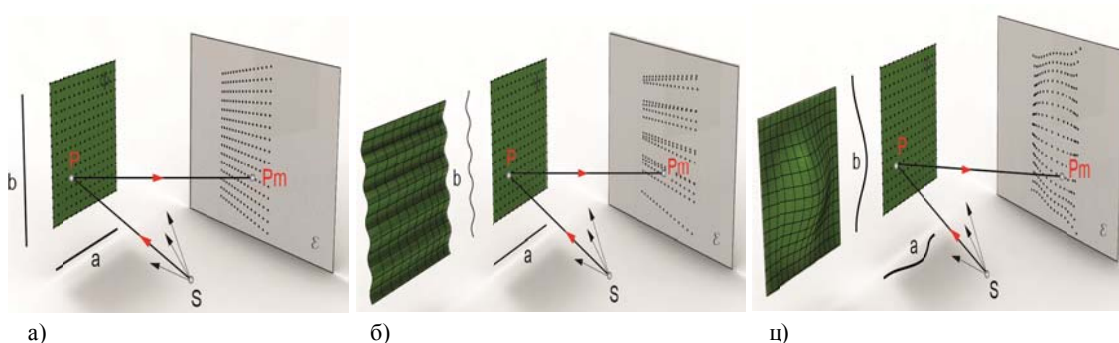
Слика 5.50. Визуелни недостатци као последица различитих узрока: а) Анизотропија узрокована термичком обрадом стакла; б) Дисторзија површине стакла као последица више различитих узрока; (Извор: Musovic, 2013: 27, 28)

Такође, исти проблем може настати током процеса термичког савијања. Посебно, термички ојачано закривљено стакло има значајно већи ризик од појаве дисторзије. Слика 5.51 приказује цилиндрично закривљено стакло са видно наглашеним таласима узрокованим процесом термичког ојачања спроведеним истовремено са савијањем на производној линији (кретање стакла на ваљцима).



Слика 5.51. Цилиндрично закривљено стакло са видно наглашеном дисторзијом у виду таласа узрокованом процесом термичког каљења на производној линији; (Извор: Аутор, 2014)

Поред тога, квалитет стаклене фасаде се може сагледати на основу рефлексије, с обзиром на то да сва закривљена стакла рефлектују светлост. Као гладак материјал, стакло показује правилну рефлексију јер се сви светлосни зраци рефлектују са површине у једном правцу тако да је угао одлазећег зрака једнак углу упадног зрака, о чему је такође било речи у делу 5.1.2 Визуелно-обликовни критеријуми – Утицај закривљености на светлосне ефекте. У случају конкавно и конвексно закривљеног стакла, њихова геометрија креира централну тачку – жижу која или спаја (конкавно) или раздваја (конвексно) светлосне зраке рефлектујући их са површине. Конвексно стакло умањује рефлектоване предмете који се удаљавају од површине чинећи их мањим. Конкавно стакло рефлектује различите типове слике у зависности од удаљености објекта и површине. Резултујући ефекат настале слике представља саставни део пројектоване форме. Поред тога, геометрија конкавног стакла има тенденцију да прикупи и фокусира светлосне зраке и њихову одговарајућу енергију у једну тачку – жижу. Ова склоност конкавног стакла, посебно у случаје двоструке закривљености, представља потенцијалну опасност за његову примену у архитектонским објектима, као што је претходно приказано (видети исто поглавље, део 5.1.2 Визуелно-обликовни критеријуми, Слика 5.14). Слика 5.52 приказује различиту рефлексију ортогоналне мреже произвољне (закривљене) површи на потпуно равну површ где се могу уочити мање или веће деформације рефлектоване мреже у случају једноструко и двоструко закривљене површи.



а) б) ц)
Слика 5.52. Различита рефлексија ортогоналне мреже произвољне (закривљене) површи на равну површ: а) Недеформисана рефлектована мрежа са равне површи; б) Деформисана рефлектована мрежа са једноструко закривљене површи; ц) Деформисана рефлектована мрежа са двоструко закривљене површи; (Извор: Захвалношћу др М. Ставрић)

Поред поменутих типова, дисторзија може бити узрокована и различитим врстама оптерећења (сопствено, снег, ветар или унутрашње). У највећем броју случајева дисторзија има више од једног узрока, који се сабирају (Слика 5.50б).

Приликом формирања термоизолационог панела, спајање стаклених плоча врши се помоћу дистанцера и примарног и секундарног заптивача. Код равних термоизолационих панела, примењен дистанцер је обично крут и најчешће алуминијумски, док се код закривљеног стакла примењује меки дистанцер који је флексибилан и може да се прилагоди различитим формама (Слика 5.53а). Иако меки дистанцер може бити понуђен у различитим бојама, неопходно је сагледати могућност да и заптивачи одговарају датој боји, с обзиром на то да су тренутно у примени углавном црни који не могу да задовоље естетске захтеве.



Слика 5.53. а) Формирање закривљеног термоизолационог панела са флексибилним синтетичким дистанцером у фабрици; б) Керамичка боја на таласасто закривљеном стаклу; (Извор: Аутор, 2014)

Примена керамичке боје (емајлирана стакла) може визуелно представљати прави изазов у случају закривљеног стакла (Слика 5.53б). Када је могуће, боја се наноси пре савијања и након излагања нижим температурама и спајања са стаклом, могуће је наставити са његовом термичком обрадом. Неопходно је поменути да, каљено стакло при термичком савијању уз помоћ калупа, поново постаје обично (некаљено) стакло.

Трошкови производње

На економску цену закривљеног стакла утиче жељена форма стакла, врста стакла, техника обликовања и облик алата помоћу којег се савија стакло (израђени калупи од челичних профила). У случају неопходне примене калупа где трошкови подразумевају израду одређеног типа калупа као и производњу стаклених панела помоћу калупа, у процесу оптимизације неопходно је размотрити могућност

замене одређеног број панела другим који се могу произвести на економичнији начин или уз помоћ мањег укупног броја калупа. На тај начин могуће је минимизирати трошкове производње, под условом минималног одступања од оригиналне форме.

Такође, у економску цену/ m^2 улази сечење, брушење ивица и ламинирање стакла. У погледу сечења равног стакла, четвороугаона форма елемената је економичнија, с обзиром на то да троугаона форма подразумева већи број сечења. Ламинирање закривљеног стакла захтева примену 2 до 4 слоја *PVB* фолије. За разлику од равних каљених стакала за чије је ламинирање *PVB* фолијом неопходно поставити бар два слоја фолије дебљине од 0,76 mm, за ламинирање закривљених каљених стакала истом фолијом неопходна је примена бар три слоја, што подразумева укупну дебљину фолије од 2,28 mm. Већи број међуслојева је неопходан из разлога што се приликом каљења стакло излаже радним температурама од 700-740°C. Толике температуре, у комбинацији са дејством ваљака на омекшалу, готово растопљену површину стакла изазивају деформације. Као последица тога, добијају се површине стакла које нису у потпуности равне и исте дебљине, односно истог попречног пресека. Већи број међуслојева служи ефикаснијем попуњавању микропразнина које настају приликом постављања једног каљеног стакла преко другог. Такође, могућа је примена течне фолије за ламинирање у виду смоле (код нас је примењује произвођач Павле). Поред тога, неопходно је нагласити да маса за заптивање термоизолационих панела (Слика 5.54), такође, утиче на економску цену. То подразумева да мања димензија термоизолационих панела, а тиме и већи укупни обим свих стаклених панела једног омотача, налажу потребу за већом количином материјала за заптивање, и самим тим доприносе већим укупним трошковима.



Слика 5.54. Примарни и секундарни заптивач термоизолационих панела са крутим и меким дистанцером; (Извор: према Guardian, 2012: 39)

Након производње закривљеног стакла одабраном техником обликовања, потребно је утврдити да ли димензије одговарају пројектованом моделу. Дозвољена одступања финалног производа варирају у односу на тип пројекта, полупречник закривљености и процес обликовања. У том смислу, дозвољена одступања представљају веома важну улогу у укупним трошковима и неопходно их је утврдити са произвођачем. Генерално, типична одступања подразумевају ± 3 mm за просечне димензије панела. Неки произвођачи врше проверу геометрије дигиталним путем помоћу 3Д скенера упоређујући на тај начин произведени панел са комјутерским моделом. Други користе шаблон генерисан помоћу комјутерског модела, помоћу кога је могуће мануелно проверити форму и упоредити је са цртежом.

5.3.2 Могућности производње закривљеног стакла у свету и код нас

С циљем максималног искоришћења предности примењеног процеса обликовања закривљеног стакла, неопходно је да пројектанти буду упознати са својственим ограничењима у погледу форми, чврстоће, димензија и третмана површине, специфичним за сваки производни процес. Ова ограничења је неопходно сагледати током самог процеса (видети мапу процеса пројектовања и конструкције – Дијаграм 4.4), односно фазе разраде детаљног пројектног решења када је неопходно укључити их у процену изградљивости пројектованих система.

У свету, највећи произвођачи закривљеног стакла су *Sunglass*, Италија, *Cristacurva*, САД, *Cricursa*, Шпанија, и *SFL Technologies*, Аустрија. У Србији, фабрике које могу да произведу закривљено стакло су: Конкав Конвекс, Добановци, и Павле и Беоком, који се налазе у Панчеву.

У Србији, произвођачи који се баве термичком обрадом и обликовањем закривљеног стакла, увозе стакла познатих произвођача, као што су *AGC*, *Guardian*, и *Pilkington*. Највећа количина стакала, који се користе за омотаче зграда, јесу стакла са различитим типовима превлака (меким и тврдим филмовима) чија функција је спречавање или контрола сунчевог зрачења и дневне светлости, као и регулисање рефлексије. С обзиром на то да током процеса термичког савијања стакла који се одвија на температурама од 500-600°C, може доћи до уништења меког филма, већина стакала са меким превлакама, не могу се

уопште савијати. Емајлирање, тј. керамички премази изводе се током процеса каљења стакла, тако што претходно нанешена боја изложена нижим температурама очврсне, након чега се наставља процес термичке обраде стакла. Код нас није могуће произвести емајлирано закривљено стакло. У свету постоје специјалне боје које се стављају на већ каљена стакла. Стакла великих димензија представљају већи проблем у погледу савијања, из разлога што примена углавном шупљих калупа захтева пажљив начин постављања стакла у пећ за термичко обликовање.

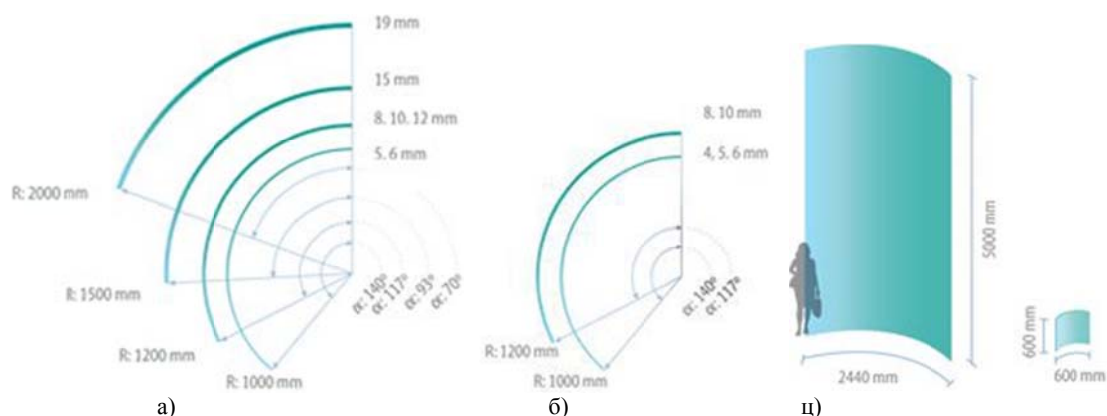
Технолошки параметри који приказују могућности и ограничења производње у погледу форме, димензија, врсте и чврстоће стакла, премаза и визуелних недостатака, а у односу на различите технике обликовања закривљеног стакла које примењују различити произвођачи, приказани су у Табели 5.3.

Производна ограничења произвођача у Србији се пре свега односе на могуће димензије закривљеног стакла. Највећа могућа димензија двоструко закривљеног стакла (великог радијуса) износи 380 x 220 x 50 cm у ручно израђеној пећи (Павле, стандардна пећ - 290 x 190 x 50 cm), односно 350 x 200 x 70 cm (Конкав Конвекс) и 300 x 195 x 50 cm (Беоком). Највећа димензија каљеног једноструко закривљеног стакла, које се кали у специјалној калионици износи 146 x 232 cm (Беоком), где мања димензија подразумева савијену страну. Минимални (средњи) полупречник каљеног једноструко закривљеног стакла, односно највећа закривљеност стакла износи 80 cm (за стакла дебљине 4,5,6 и 8 mm). За стакла дебљине 10 mm, минимални (средњи) полупречник закривљености износи 100 cm. С друге стране, максимални (средњи) полупречник каљеног једноструко закривљеног стакла, односно најмања закривљеност стакла износи 800 cm (за стакла дебљине 4, 5, 6, 8 и 10 mm). Стакла веће дебљине од 10 mm, не савијају се у калионици.

У Србији није могуће произвести двоструко закривљена каљена стакла, као ни двоструко закривљена стакла са меким и керамичким премазима. Наведена стакла могу бити само једноструко закривљена.

За разлику од Србије, у свету је могуће произвести закривљено стакло знатно већих димензија, што се може уочити из анализираних студија случаја (Прилог 1), као и представљених производних могућности шпанског произвођача

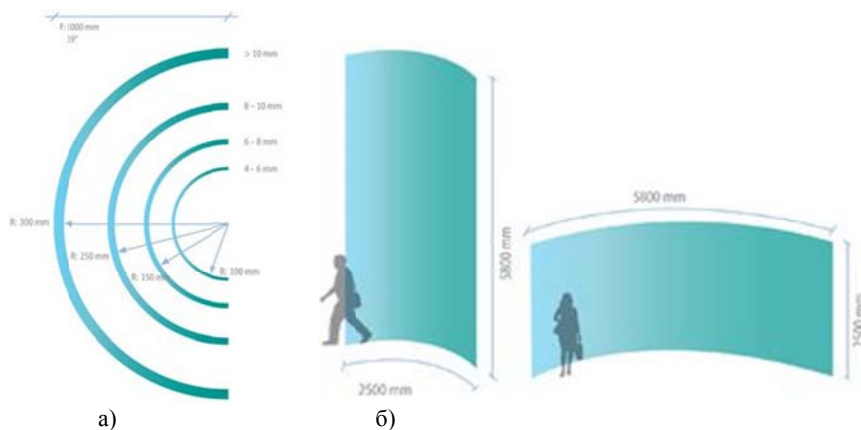
Cricursa (Табела 5.3). Максималне димензије и минимални полупречници закривљености стакла произведеног на производној линији и уз помоћ калупа једног од највећих произвођача закривљеног стакла *Cricursa* представљени су на Сликама 5.55 и 5.56. Поред тога, технолошки параметри – индикатори могућности и ограничења за производњу у односу на различите технике обликовања закривљеног стакла истог произвођача представљени су у Табели 5.3.



Слика 5.55. Могућа закривљеност и димензије једноструко закривљеног стакла, произвођач *Cricursa*, Шпанија: а) Минимални полупречник закривљености једноструко закривљеног каљеног стакла у односу на различиту дебљину стакла; б) Минимални полупречник закривљености једноструко закривљеног, делимично каљеног стакла у односу на различиту дебљину стакла; ц) Максималне и минималне димензије једноструко закривљеног, каљеног и делимично каљеног стакла; (Извор: "Cricursa", 2016:2)

Типови стакала која шпански произвођач *Cricursa* може термички истовремено да савија и кали на производној линији укључују: обично пливајуће, екстра-прозирно, бојено, штампано, стакла са соларном контролом, стакла са нискоемисионим и селективним премазима (пиролитичким и новом генерацијом меких премаза – *magnetronic*), дихроик (*dichroic*) и нерелефтујућа стакла. Закривљена стакла произведена на овај начин обезбеђују:

- Мањи ризик од лома услед термичког шока,
- Већу отпорност на механичке утицаје (оптерећење, ветар, снег),
- Боље могућности за тачкасто ношење панела,
- Ломи се на ситне комаде заобљеног облика,
- Оптички квалитет у погледу рефлексије и преламања,
- Непромењена физичка својства каљеног стакла (модул еластичности, оптичка својства, коефицијент пролаза топлоте, коефицијент топлотног ширења, специфични топлотни капацитет).



Слика 5.56. Могућа закривљеност и димензије двоструко закривљеног некаљеног стакла, произвођач *Cricursa*, Шпанија: а) Минимални полупречник закривљености двоструко закривљеног некаљеног стакла у односу на различиту дебљину стакла; б) Могуће димензије двоструко закривљеног некаљеног стакла; (Извор: "Cricursa", 2016:3)

Типови стакала која шпански произвођач *Cricursa* може термички да савија уз помоћ калупа укључују: обично пливајуће, екстрапрозрачно, бојено (само одређене боје), стакла са рефлексијом и нискоемисионим премазима (пиролитичким и новом генерацијом меких премаза – *magnetronic*).

У том погледу, за разлику од термичког савијања, значајна карактеристика технике хладног савијања која до сада није била позната у Србији јесте та, да је могуће применити све врсте стакала и типова стаклених панела, као и стакла са свим врстама премаза. Поред тога, за разлику од традиционалних техника (термичко савијање), нови начин обликовања стакла може знатно да обезбеди естетски квалитет (глатка површ, скоро без изобличења и визуелних дисторзија које настају поступком термичког савијања), непромењеност физичких особина стакла (не ствара промене у структури, већ само промену у форми), и умањи укупне инвестиционе трошкове примене закривљеног стакла. С обзиром на то да ова техника, чије су основне теоријске поставке описане у трећем поглављу, део 3.2.4.2 Техника хладног савијања и која подразумева савијање панела у жељену форму помоћу спољашњег контактеног притиска, не узима у обзир климатске услове (температуру и притисак), стакло је могуће обликовати директно на потконструкцији, на градилишту. Једино ограничење технике хладног савијања представља дозвољена закривљеност, која је представљена минималним полупречником закривљености од око 900 cm (за дебљину стакла од 6 mm) у случају једноструко закривљеног стакла, и максималним одступањем једног темена четвороугаоног панела од равни од 16,8x дебљина стакла, у случају

уврнутих (хипар) панела чије ивице су равне (видети треће поглавље, део 3.2.4.2 Техника хладног савијања). Поред тога, хладним савијањем током процеса монтаже могуће је савити стакло само са константним полупречником. У том погледу, најчешће се овим поступком савија ламинирано сигурносно стакло. Такође, могуће је савити и термоизолациони панел на нижим температурама, али постоји могућност оштећења заптивача. Само обликовање током процеса монтаже подразумева ризик од лома стакла. Понашање стакла до његових крајњих граница истезања (око 0,1%) јесте линеарно-еластично, односно хладним савијањем постигнут је стални модул еластичности (у зависности од места износи 50-90 KN/mm²). Када се ова еластична зона прекорачи, атомске везе које су формиране током процеса производње пливајућег стакла (фаза топљења) и доприносе да стакло брзо очврсне, изненада се прекидају доводећи до лома стакла.

Значајна карактеристика ове технике односи се на изглед који подразумева елементе који ће задржати савијене панеле у жељеној форми. Такође, хладним савијањем изазвани су стални напони који се морају узети у обзир приликом прорачуна конструктивних карактеристика стакла (видети четврто поглавље, део 4.2.3, Дијаграм 4.4 Фаза израде детаљног пројектног решења) које је могуће контролисати, за разлику од напона изазваних термичким савијањем стакла. Насупрот термички савијеном стаклу за које не постоје стандарди у погледу чврстоће, техничка правила за примену застакљења са линеарним ослоном¹ налажу да максималне деформације за сва хладно савијена стакла не прелазе (Molter & Wolf, 2011):

- $l/200$ (за стакло које је причвршћено са једне или две стране),
- $l/100$ (за стакло које је причвршћено четири стране).

Дебља стакла подразумевају већи полупречник закривљености, док тања стакла омогућавају већу слободу у погледу геометрије стакла. Дозвољени полупречник закривљености за хладно савијена стакла, према ауторима Молтер и Волф (Molter & Wolf, 2011) описан је као:

$$r_{doz.} = \frac{E \cdot z}{\sigma_{doz.}} \quad (5.23)$$

¹ *Technical Rules for the use of Glazing with Linear Supports (TRLV)*

где је:

$r_{doz.}$ - полупречник закривљености (mm),

E - модул еластичности стакла (N/mm^2),

z - максимално централно растојање (од средње линије попречног пресека до ивице) (mm),

$\sigma_{doz.}$ - дозвољени стални напон 1 (N/mm^2).

Генерално, треба истаћи да, иако није строго регулисано, обрада површина која укључује гравирање, пескарање и емајлирање, смањује чврстоћу стакла.

Обликовање хладним савијањем уз помоћ процеса ламинирања подразумева две стаклене плоче и између њих пластичну мембрану – фолију (најчешће поливинил бутирал - *PVB*) који постављени заједно на претходно обликовани рам и изложени ниској температури, омогућавају обликовање жељене геометрије. Помоћу накнадног притиска од око 14 бара (у вакум кеси) и константне температуре од $140^{\circ}C$ у аутоклаву, ламинирано стакло очврсне у задатој форми и затим се транспортује на градилиште (Слика 5.57). На овај начин било је могуће до сада обликовати само једноструко закривљено стакло, али даља истраживања спроводе се у правцу обликовања форми са неконтинуалним полупречником. Овај процес је повратан, с обзиром на то да се одиграва у условима који подразумевају температуру испод тачке омекшавања стакла, Када би мембрана била уклоњена, стакло би се највећим делом вратило у првобитну форму.



Слика 5.57. Савијање стаклених панела помоћу процеса ламинирања;
(Извор: Molter & Wolf, 2011: 86)

Табела 5.3. Технолошки параметри – индикатори могућности и ограничења за производњу у односу на различите технике обликовања закривљеног стакла (у погледу форме, димензија, чврстоће, премаза и визуелних недостатака)

| Технолошки параметри – индикатори могућности и ограничења за производњу закривљеног стакла | | | | | | | | | |
|--|---|---|-----------------|-----------------------------|----------------------------------|---|---|--|--|
| Примењена техника обликовања | | Термичко савијање | | | | | Хладно савијање | | |
| Произвођач | | Беоком | | Конкав Конвекс | Павле | Cricursa, Шпанија | | | |
| Процес | | На производној линији | Уз помоћ калупа | Уз помоћ калупа | Уз помоћ калупа | На производној линији | Уз помоћ калупа | Механички | Ламинирањем |
| ФОРМА И ДИМЕНЗИЈЕ | Једноструко закривљена стакла | + | + | + | + | + | + | + | + |
| | Двоструко (комплексно) закривљена стакла | - | + | + | + | - | + | + | + |
| | Макс. димензије панела (см) (ширина x дужина x висина закривљ.) | 146 x 232 | 195 x 300 x 50 | 200 x 350 x 70 | 190 x 290 x 50 220 x 380 x 50 | 244 x 450 | 320 x 1.000 x 100 | 330 x 1.500 | 330 x 1.500 |
| | Макс. полупречник закривљености (см) | 800 (дебљ. 4,5,6,8 и 10 мм) | / | / | / | / | / | | |
| | Мин. полупречник закривљености (см) | 80 (дебљ. 4, 5, 6, и 8 мм) 100 (дебљ. 10 мм) | / | није могућ мали полупречник | није могућ мали полупречник | 200 (дебљ. 19 мм) 150 (дебљ. 15 мм) 120 (дебљ. 8, 10, 12 мм) 100 (дебљ. 5, 6 мм) | 300 (дебљ. >10 мм) 250 (дебљ. 8-10 мм) 150 (дебљ. 6-8 мм) 100 (дебљ. 4-6 мм) | 500 (дебљ. 3 мм) 900 (1.000) (дебљ. 6 мм) $r_{доз.} = E \cdot z / \sigma_{доз.}$ | 500 (дебљ. 3 мм) 900 (1.000) (дебљ. 6 мм) $r_{доз.} = E \cdot z / \sigma_{доз.}$ |
| | Макс. одступање од равни (см) | | | | | | | < 16,8x дебљина стакла | < 16,8x дебљина стакла |
| | Дозвољена одступања (мм) (у погледу дужине и ширине, и форме) | / | / | ±1-2 мм (дужина и ширина) | ±3 мм (дужина и ширина) | ±0,2 мм (дим<2 м, д<12 мм) ±0,3 мм (дим<2 м, д>12 мм) ±0,4 мм (дим>2 м, д>12 мм) ±5 мм (форма) | ±0,2 мм (дим<2 м, д<12 мм) ±0,3 мм (дим<2 м, д>12 мм) ±0,4 мм (дим>2 м, д>12 мм) ±5 мм (форма) | / | / |
| ВРСТА/ЧВРСТОЋА СТАКЛА | Обично пливајуће стакло | + | + | + | + | + | + | + | + |
| | Полукаљено стакло | - | - | - | - | + | - | + | + |
| | Каљено стакло | + | - | - | - | + | - | + | + |
| | Ламинирано стакло | + | + | + | + | + | + | + | + |
| | Термоизолационо стакло | + | + | + | + | + | + | + | + |
| ПРЕМАЗИ И ФИЛМОВИ | Меке превлаке (на одређеној позицији) | + | - | - | - | + | + | + | + |
| | Тврде превлаке | + | + | + | + | + | + | + | + |
| | Керамички премази (боја) | - | - | - | - | + | - | + | + |
| В. НЕДОСТАЦИ | Анизотропија | + | - | - | - | - | - | + | + |
| | Оптичка дисторзија | + | + | + | + | - | + | - | - |

+ могуће
- ограничено (није могуће)

5.3.3 Технолошко-економски критеријуми

На основу претходно објашњених технолошко-економских карактеристика, а с циљем процене креираних модела, усвојени су следећи технолошко-економски критеријуми, сврстани у две групе:

- Критеријуми са технолошког аспекта:

1. Техника обликовања закривљеног стакла,
2. Искоришћеност материјала,

- Критеријуми са економског аспекта:

3. Економска цена/ m^2 стакленог омотача,
4. Економска цена (укупна инвестиција) целог стакленог омотача.

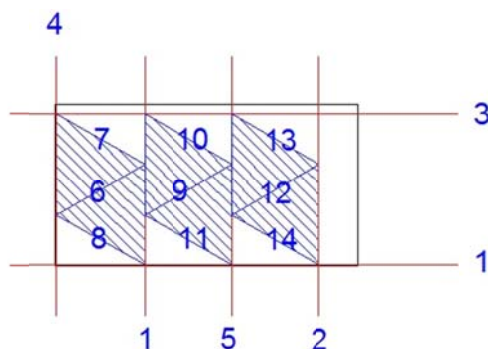
Процена различитих модела према првој групи критеријума са технолошког аспекта (техника обликовања стакла и искоришћеност материјала) вреднована је поенима на скали 0-1. Усвојена конвенција подразумева 0 поена за лоше карактеристике и 1 поен који подразумева одличне карактеристике у погледу усвојене технике обликовања и искоришћености материјала. С друге стране, усвојена друга група критеријума представља економску цену - параметар који је сам квантификован и упоредив, тако да у односу на економске карактеристике креираних модела (економска цена/ m^2 и укупна инвестиција), није вршено додатно вредновање. Поред тога, треба истаћи да су обе групе критеријума у директној међузависности. Тако, техника обликовања која подразумева мање сложен процес (мање времена, ангажовање радне снаге и комплексности), подразумева и мању економску цену, како по m^2 , тако и целог омотача. Такође, искоришћеност материјала, која није у вези са техником обликовања стакла, директно утиче на економску цену. Преглед анализираних технолошких карактеристика дефинисаних модела, које су квантификоване, дат је у Табели 6.2, док је преглед економских карактеристика дат у Табелама 6.3 и 6.4 у следећем поглављу.

Основне карактеристике усвојених критеријума и начин вредновања дефинисаних модела подразумевају:

1. **Техника обликовања закривљеног стакла** – Све технике обликовања закривљеног стакла детаљно су описане у трећем поглављу. Одабрана техника обликовања стакла за сваки дефинисани модел вреднована је поенима: 0,25; 0,50; 0,75; и 1. С обзиром на то да примена равног стакла не захтева додатно обликовање, вреднована је 1 поеном. Техника хладног савијања која

подразумева примену равног стакла које је механички савијено на лицу места на потконструкцији, оцењена је са 0,75 поена. Техника термичког обликовања стакла на производној линији, којом је могуће обликовати само једноструко закривљено стакло, вреднована је са 0,50 поена. Најкомплекснија техника термичког обликовања уз помоћ калупа, која подразумева највећи утрошак времена и радне снаге, оцењена је са 0,25 поена.

2. **Искоришћеност материјала** – Представља проценат материјала који је искоришћен након сечења елемената у оквиру стандардне стаклене плоче (321 x 600 cm). Четвороугаона панелизација чија усвојена димензија панела омогућава максималну искоришћеност материјала, односно минимални растур материјала, вреднована је 1 поеном. Четвороугаона панелизација са усвојеним већим димензијама панела и нешто већим процентом неискоришћености материјала, оцењена је са 0,75. Троугаона панелизација са једнакостраничним троугловима, из разлога мање искоришћености материјала, оцењена је са 0,50 поена (Слика 5.58). Четвороугаона панелизација са највећом димензијом панела оцењена је са 0,25 поена из разлога веома мале искоришћености материјала.



Слика 5.58. Шема сечења панела у форми једнакостраничних троуглова странице 207 cm у оквиру стандардне стаклене плоче (321 x 600 cm); (Извор: Захвалношћу Б. Стојановића, Конкав Конвекс)

3. **Економска цена/м² стакленог омотача** – Директно зависи од типа панелизације, димензија и геометрије појединачних панела, као и начина производње и обраде (сечење и обрада ивица) и технике обликовања закривљеног стакла. Подаци о економској цени/м² површине дефинисаних модела стакленог омотача, у односу на различите типове застакљења, добијени су од два произвођача (Конкав Конвекс, Добановци и Павле, Панчево) и као такви су даље у раду анализирани. Економска цена/м² обухвата обраду (сечење и обрада ивица) равног стакла и обликовање закривљеног стакла без монтаже. Генерално, може се сматрати да монтажа увећава трошкове за 20-30%. С обзиром на то да се хладно савијање стакла изводи током процеса монтаже,

директно на градилишту, није узето у обзир за формирање економске цене. Такође, како ова техника није до сада била позната у Србији, нису постојали подаци на основу којих би било могуће формирати укупну цену производње, обраде и обликовања техником хладног савијања.

4. **Економска/инвестициона цена целог стакленог омотача** – Прорачуната је на основу економске цене/ m^2 површине дефинисаних модела стакленог омотача и њихове укупне површине.

Резултати технолошко-економске анализе различитих модела геометрије и материјализације стакленог омотача представљени су у Поглављу 6.

6. Испитивање хипотетичких модела материјализације стакленог омотача

У овом поглављу креирани су хипотетички модели различитих варијантних решења обликовања стакленог омотача у погледу како различите геометрије и величине самих стаклених панела, тако и различите геометрије укупне површине стакленог омотача. Такође, дефинисане су подваријанте у погледу материјализације стаклених елемената која подразумева различите типове застакљења који су најчешће у примени. У другом делу извршена је евалуација усвојених модела према претходно дефинисаним визуелно-обликовним и технолошко-економским критеријумима приказаним у Поглављу 5.

6.1 Дефинисање хипотетичких модела

Инспирацију за ово истраживање представљала је фасада изграђеног стамбено-пословног објекта *Infinity* за коју је њен аутор рекао да је инспирисана природним окружењем – водом, "која је обликовала положај, живот и душу Београда" ("*Infinity*" Beograd, 2009: 1). Слободно-закривљена таласаста форма стаклене фасаде, која се састоји од 238 геометријски различитих стаклених панела (Слика 6.1), представља пример, на коме је по први пут у Србији, примењено закривљено стакло различите геометрије. Фасада представља двоструки омотач – заштиту од атмосферских утицаја и буке, постављен испред класичне фасаде и терасе и отворен са стране омогућавајући природну вентилацију простора терасе.



Слика 6. 1. Изглед стаклене фасаде стамбено-пословног објекта Инфинити

Геометрија фасаде, као што приказује Слика 6.1, представљена је комплексном геометријом, односно слободно закривљеном формом стакленог омотача. Комплексна геометрија закривљене површи стакленог омотача реализована је претварањем двоструко закривљене површи у правоизводну површ која је генерисана линеарном интерполацијом две криве. Ова комплексност стаклене површине је уравнотежена универзалним дизајном челичне потконструкције компатибилне са геометријом стакла, доприносећи притом једноставности детаља. Цртежи детаља конструкције и материјализације, као и техника обликовања стакла овог омотача постојећег објекта детаљно су приказани и описани у Прилогу 1 - Анализа примера/студије случаја, као пример 8.

У овом делу истраживања приказане су могућности реализације дате форме омотача уз помоћ различите геометрије, како самих стаклених панела, тако и целог стакленог омотача. Циљ креирања различитих модела био је да се произведу геометријски разнолика али оптимално уравнотежена пројектна решења панелизације површине уз поштовање (сличности) оригиналне пројектантске идеје, а у односу на транспарентност површине омотача, једноставност чворне везе, технологију обликовања и искоришћеност материјала. Израз "оптимално" подразумева квалитативне и квантитативне карактеристике, и јасно ће бити приказано на које се односи. Затим да се изврши њихова процена, односно рангирање, у односу на успостављене визуелно-обликовне, и технолошко-економске критеријуме.

Иако геометрија слободне форме (геометријски комплексне форме) нема званичну дефиницију, може се генерално препознати по глаткоћи јединствене површине и кривим линијама које "теку", као и недостатку својствене симетрије.

Одабрани модел постојећег стакленог, омотача иако слободно закривљене форме (Слика 6.1), довољно је прилагодљив различитим начинима обликовања, али истовремено и довољно сложен да представи комплексан процес панелизације.

На основу дефинисаног циља креирано је 10 хипотетичких модела – различитих варијантних решења обликовања стакленог омотача, како различите геометрије и величине самих стаклених панела, тако и различите геометрије укупне површине стакленог омотача. Такође, дефинисане су варијанте у погледу материјализације стаклених елемената која подразумева различите типове застакљења који се најчешће примењују.

6.1.1 Геометрија хипотетичких модела (форма, растер, панелизација)

Основа за формирање модела јесте геометрија двоструко закривљене површи стаклене фасаде постојећег објекта. Димензије фасаде, које одговарају постојећем објекту су усвојене за све моделе. Такође, постигнуте закривљености површина свих модела су оптимално уравнотежене, поштујући сличност са оригиналним моделом, односно постојећом фасадом. Параметри геометријских карактеристика који варирају по моделима, односе се на појединачне панеле и укључују:

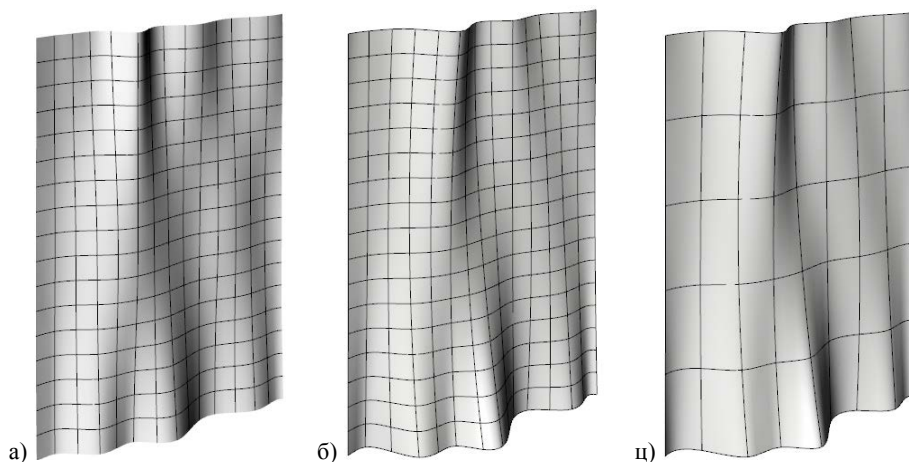
- Форму панела (четвороугаона, и троугаона),
- Закривљеност површи панела (равни, једноструко закривљени, и двоструко закривљени),
- Форму ивица панела (све ивице равне, две равне и две закривљене ивице, и све ивице закривљене), и
- Величину панела (усвојене две величине панела и у случају четвороугаоне и троугаоне панелизације).

За моделе, усвојене су најчешће коришћене форме панела геометријски комплексних стаклених омотача, које подразумевају троугаону и четвороугаону форму. Као што је претходно објашњено (видети прво поглавље), троугаона форма панела омогућава једноставно моделовање стакленог омотача с обзиром да је њихова површина увек равна, док четвороугаона панелизација формира чворове који су конструктивно стабилнији и омогућава примену закривљеног стакла.

Разноврсност примењених панела у погледу закривљености обухвата равне, једноструко закривљене, и двоструко закривљене панеле. Такође, равни панели су равних ивица, што омогућава њихово лакше уклапање, док код једноструко закривљених панела, две ивице су равне и две су криве линије. Поред тога, примењен је тип панела (хипар) чија је површина двоструко закривљена, док су ивице равне из разлога што је двоструко закривљена површ исечена по асимтотским кривама (видети прво поглавље).

Две варијанте величине панела су усвојене. У случају четвороугаоне панелизације, прва варијанта одговара димензијама панела постојећег омотача. Друга усвојена величина има једну доминантну димензију – висину, која одговара спратној висини. Такође, у случају троугаоне панелизације, прва варијанта подразумева једнакостраничне троуглове, док је друга креирана уз помоћ великих троугаоних површи.

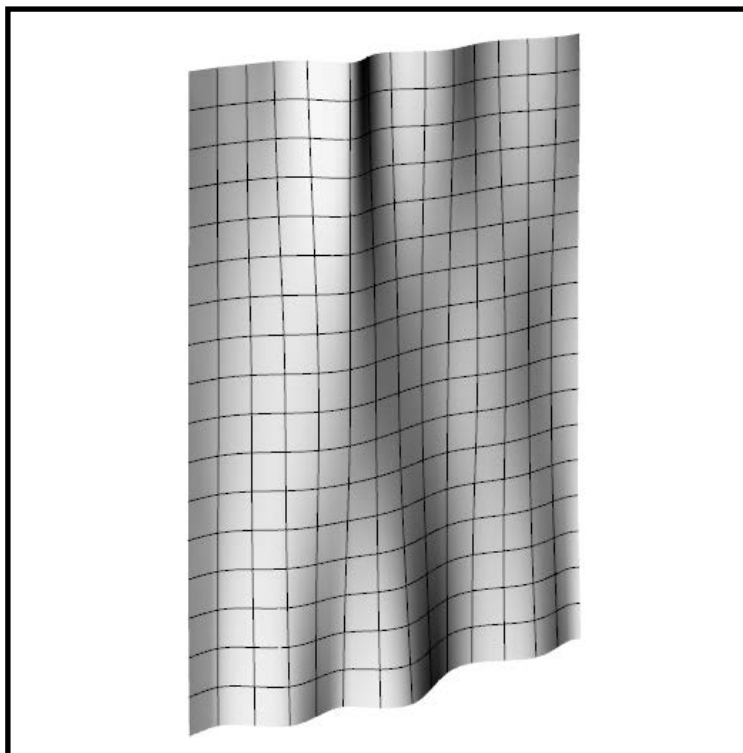
Моделу су креирани у компјутерском програму *Rhinoceros* 4.0 уз помоћ алата (plug-in-a) *Grasshopper* који заједно омогућавају креирање геометријски комплексних форми. Формирањем параметарског модела стакленог омотача омогућено је да се комплексна хијерархија међузависности различитих параметара, као што су форма и закривљеност површи и величина стаклених панела (Слика 6.2), може са лакоћом интерактивно прецизирати, односно димензионо подешавати у фази креирања модела. Површине геометријски комплексних површи хипотетичких модела су прорачунате у компјутерском алату *Grasshopper*-у.



Слика 6.2. Параметарски модел - промена једног или више параметара омогућава лаку промену закривљења површи и величине панела: а) Мања закривљеност површи и мала величина панела; б) Већа закривљеност површи и мала величина панела; ц) Већа закривљеност површи и велика димензија панела

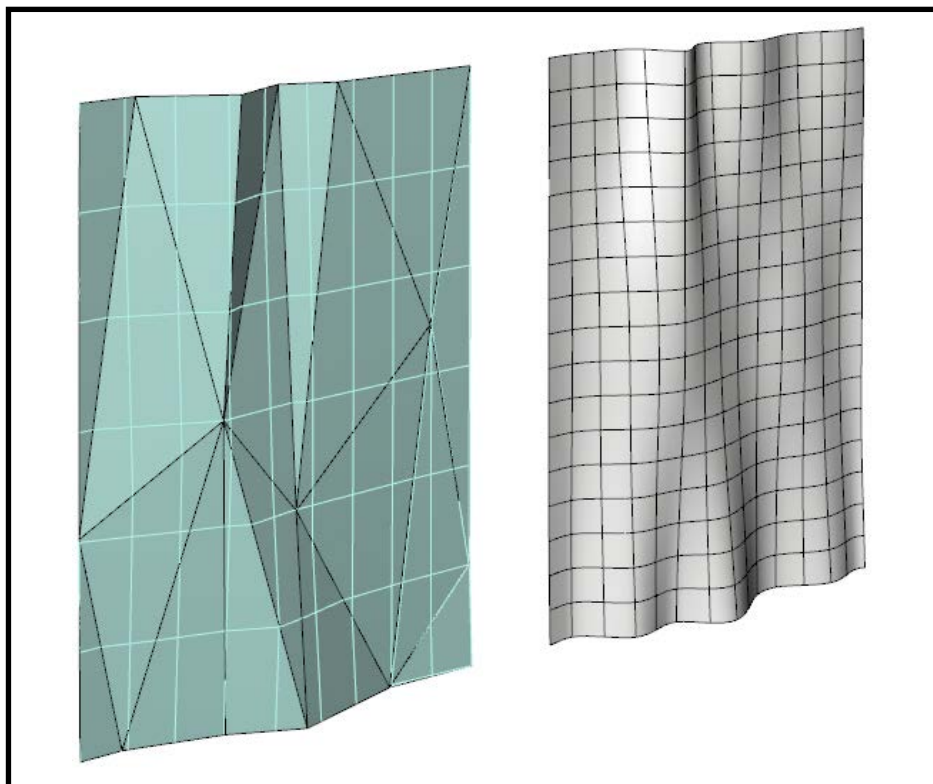
Према претходно дефинисаним параметрима, за анализу су креирани и одабрани следећи модели:

1. **Референтни Модел 1** – креиран је према оригиналној идеји аутора постојећег објекта, и подразумева двоструко закривљену површ, како самих стаклених панела тако и целог стакленог омотача (Слика 6.3). Усвојена величина панела (раванска пројекција) одговара величини стаклених панела фасаде изграђеног објекта и износи 94,4 x 111,4 cm, са хоризонталним и вертикалним размаком између панела од 16 mm. Све ивице стаклених панела су криве линије. Из поменутих разлога, и с обзиром да као двоструко закривљена површ представља геометријски најкомплекснију форму, усвојен је као Референтни Модел 1. Усвојена дебљина једноструког стакла од 6 mm одговара величини и геометрији панела. Укупан број панела је 238. Укупна површина омотача износи 270,20 m².



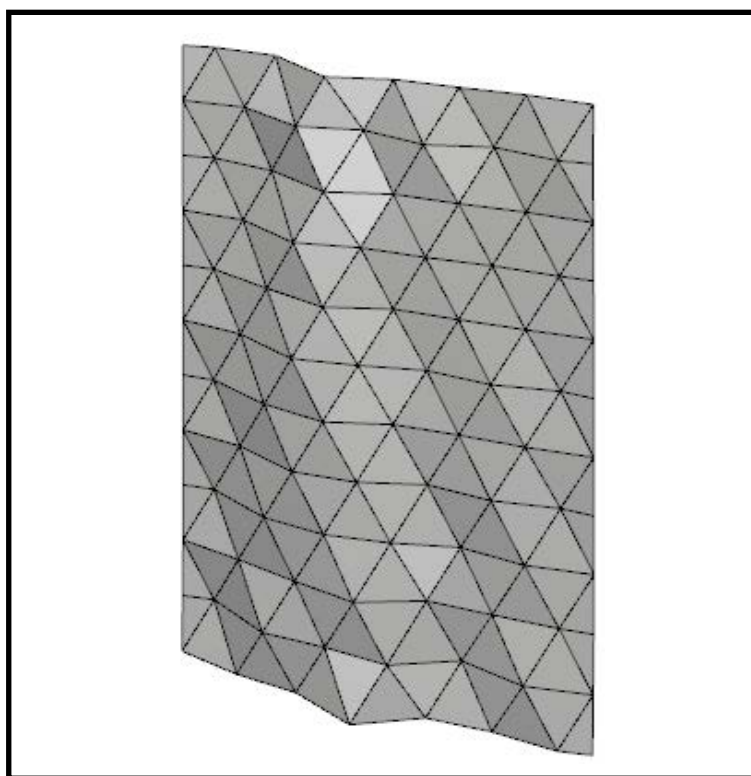
Слика 6.3. Референтни (основни) Модел 1

2. **Модел 1 (Велики троуглови)** – креиран је уз помоћ преломљених равни у виду великих троуглова различите величине, чија форма је оптимално уравнотежена, обликовно поштујући сличност са Референтним (основним) моделом (Слика 6.4). Преломљена површина подељена је растером који представља величину панела од 147,7 x 318,5 cm (раванска пројекција) са размаком између панела од 16 mm. Сви стаклени панели су равне површине, и њихове ивице су такође равне. Усвојена дебљина једноструког стакла од 10 mm одговара величини и геометрији панела. Површина се састоји од 6 целих правоугаоних и 122 комада исечених (троугаоних, трапезоидних, и вишеугаоних) панела. Укупна површина омотача износи 271,20 m².



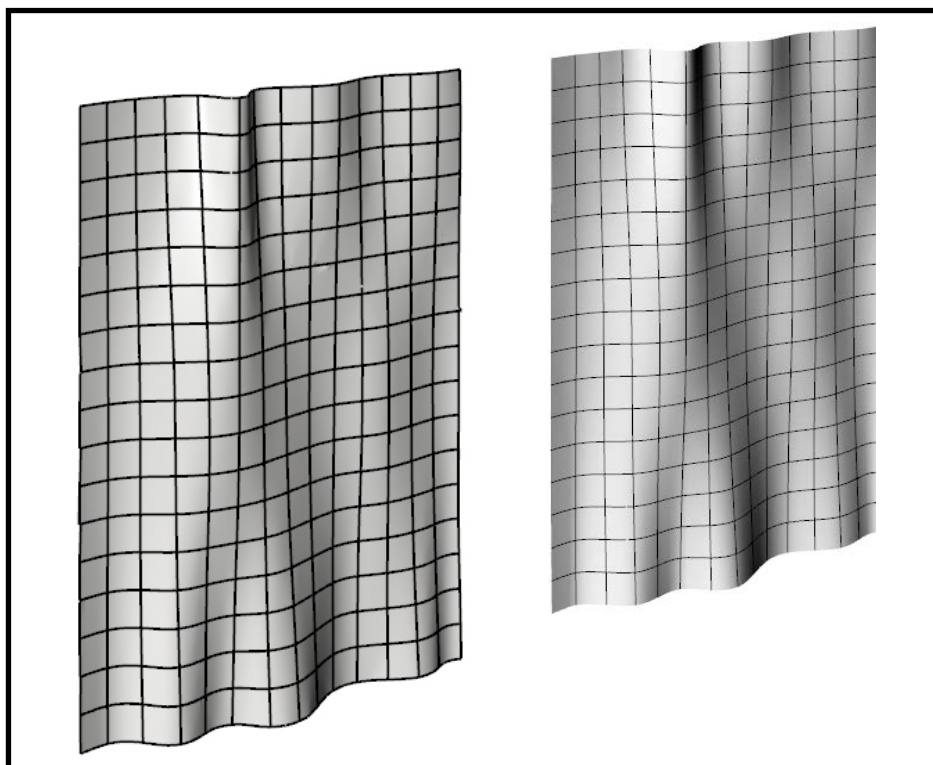
Слика 6.4. Модел 1 - Велики троуглови, у односу на Референтни Модел 1

3. **Модел 2 (Једнакостранични троуглови)** – је креиран уз помоћ једнакостраничних троуглова тако да је његова форма оптимално уравнотежена, обликовно поштујући сличност са Референтним (основним) моделом (Слика 6.5). Величина странице једнакостраничних троуглова (раванска пројекција) износи 207 cm, са усвојеним хоризонталним и косим размаком између панела од 16 mm. Сви стаклени панели су равне површине, и њихове ивице су такође равне. Усвојена дебљина једноструког стакла од 8 mm одговара величини и геометрији панела. Површина се састоји од 132 комада једнакостраничних и 22 комада правоугаоних троуглова. Укупна површина омотача износи 265,32 m².



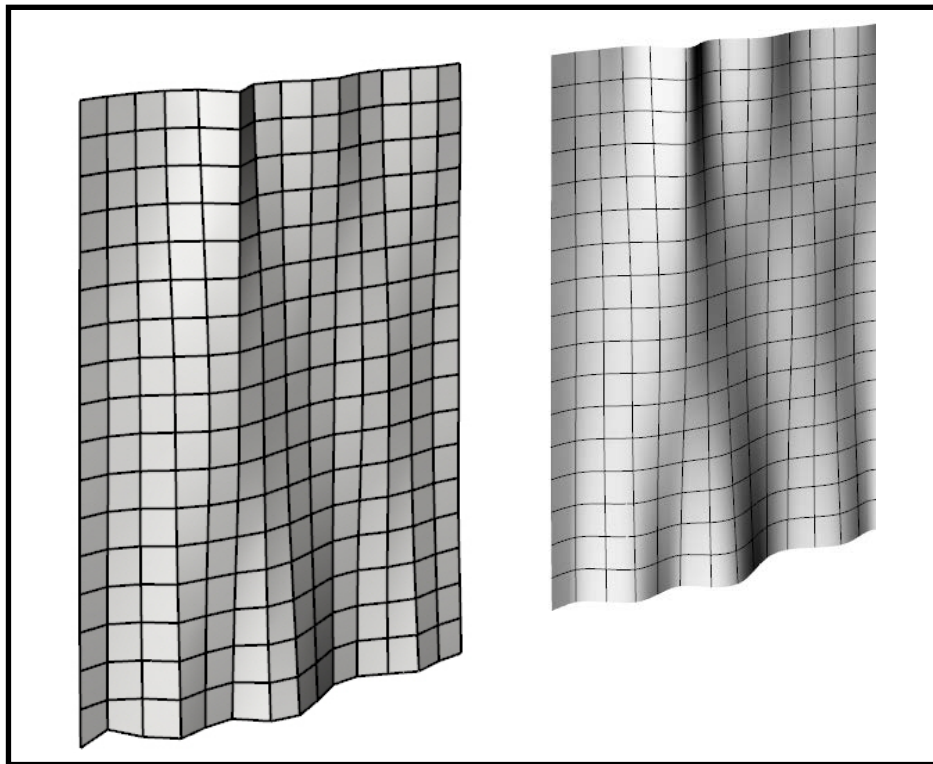
Слика 6.5. Модел 2 - Једнакостранични троуглови

4. **Модел 3 (Торза хоризонтална)** – подразумева двоструко закривљену површ омотача креирану помоћу једноструко закривљених панела (правоизводне површи) постављених у хоризонталном правцу (Слика 6.6). Једноструко закривљена форма панела је постигнута апроксимативним подешавањем двоструко закривљене површи. Према овом моделу изведена је стаклена фасада постојећег објекта. Назив модела Торза хоризонтална подразумева архаичан назив за једноструко закривљену - правоизводну површ (видети прво поглавље, стр. 42), која је у овом случају постављена у хоризонталном правцу. Усвојена величина панела (раванска пројекција) одговара величини стаклених панела фасаде изграђеног објекта и износи 94,4 x 111,4 cm, са хоризонталним и вертикалним размаком између панела од 16 mm. Вертикалне ивице стаклених панела су праве линије, што омогућава минимална одступања, а тиме и лакше уклапање панела у вертикалном правцу. Хоризонталне ивице су криве линије, што доприноси већој могућности одступања у хоризонталном правцу. Усвојена дебљина једноструког стакла од 6 mm одговара величини и геометрији панела. Укупан број панела је 238. Укупна површина омотача износи 269,88 m².



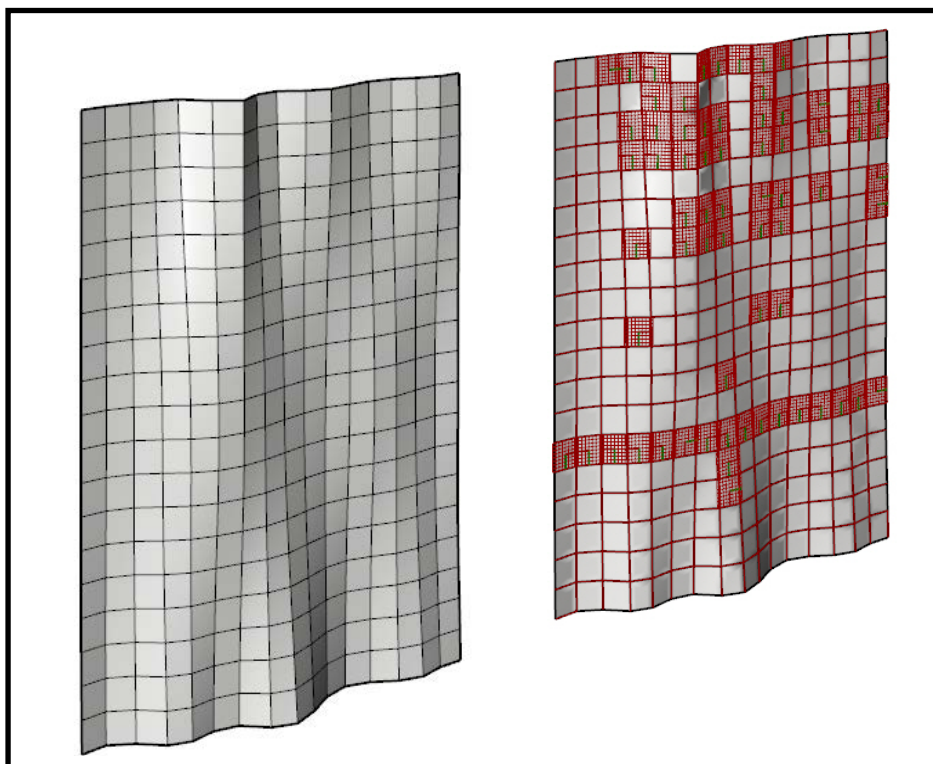
Слика 6.6. Модел 3 - Торза хоризонтална (једноструко закривљени панели у хоризонталном правцу) у односу на Референтни модел 1 – (двоструко закривљени панели)

5. **Модел 4 (Торза вертикална)** – подразумева двоструко закривљену површ омотача креирану помоћу једноструко закривљених панела (правоизводне површи) постављених у вертикалном правцу (Слика 6.7). Једноструко закривљена форма панела је постигнута апроксимативним подешавањем двоструко закривљене површи. Назив модела Торза вертикална подразумева архаичан назив за једноструко закривљену - правоизводну површ (видети прво поглавље, стр. 42), која је у овом случају постављена у вертикалном правцу. Усвојена величина панела (раванска пројекција) одговара величини стаклених панела фасаде изграђеног објекта и износи 94,4 x 111,4 cm, са хоризонталним и вертикалним размаком између панела од 16 mm. Хоризонталне ивице стаклених панела су праве линије, што омогућава минимална одступања а тиме и лакше уклапање панела у хоризонталном правцу. Вертикалне ивице су криве линије, што доприноси већој могућности одступања у вертикалном правцу. Усвојена дебљина једноструког стакла од 6 mm одговара величини и геометрији панела. Укупан број панела је 238. Укупна површина омотача износи 269,88 m².



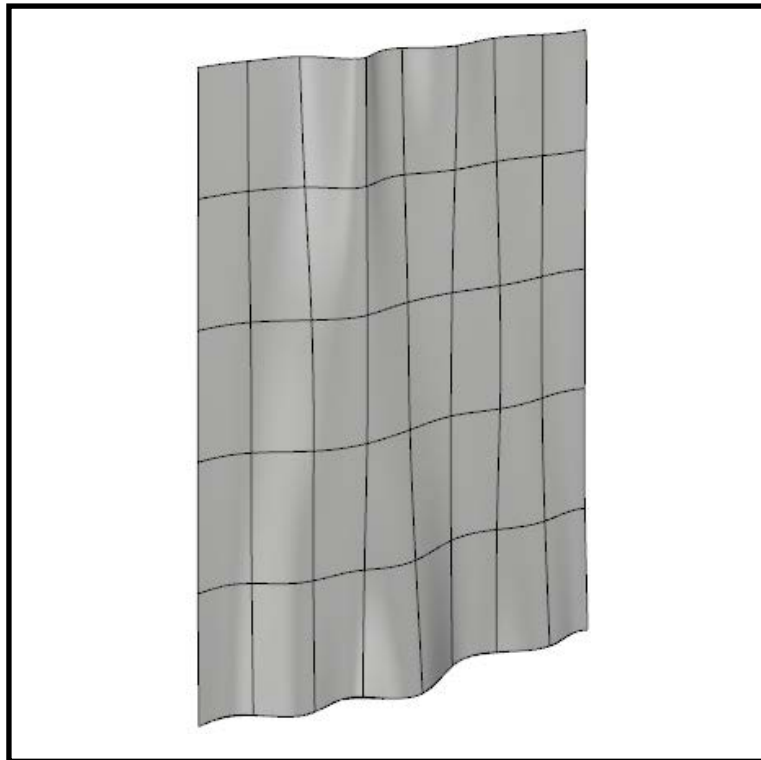
Слика 6.7. Модел 4 - Торза вертикална (једноструко закривљени панели у вертикалном правцу) у односу на Референтни модел 1 – (двоструко закривљени панели)

6. **Модел 5 (Хипар-ХП)** – подразумева двоструко закривљену површ омотача креирану помоћу двоструко закривљених панела који имају форму хиперболичног параболоида али су исечени по асимтотској мрежи – изводницама чинећи да ивице панела буду праве линије (Слика 6.8). Усвојена величина панела (раванска пројекција) одговара величини стаклених панела фасаде изграђеног објекта и износи 94,4 x 111,4 cm, са хоризонталним и вертикалним размаком између панела од 16 mm. Усвојена дебљина једноструког стакла од 6 mm одговара величини и геометрији панела. Укупан број панела је 238. Укупна површина омотача износи $P=268,92 \text{ m}^2$ Хоризонталне и вертикалне ивице стаклених панела су праве линије, што омогућава минимална одступања а тиме и лакше уклапање панела у оба правца. Додатно, геометријском оптимизацијом саме површи омотача постигнута је могућност да 67 панела од укупно 238 панела могу бити равни, уклапајући се у двоструко закривљену површ омотача, чиме је избегнута потреба за њиховим савијањем.



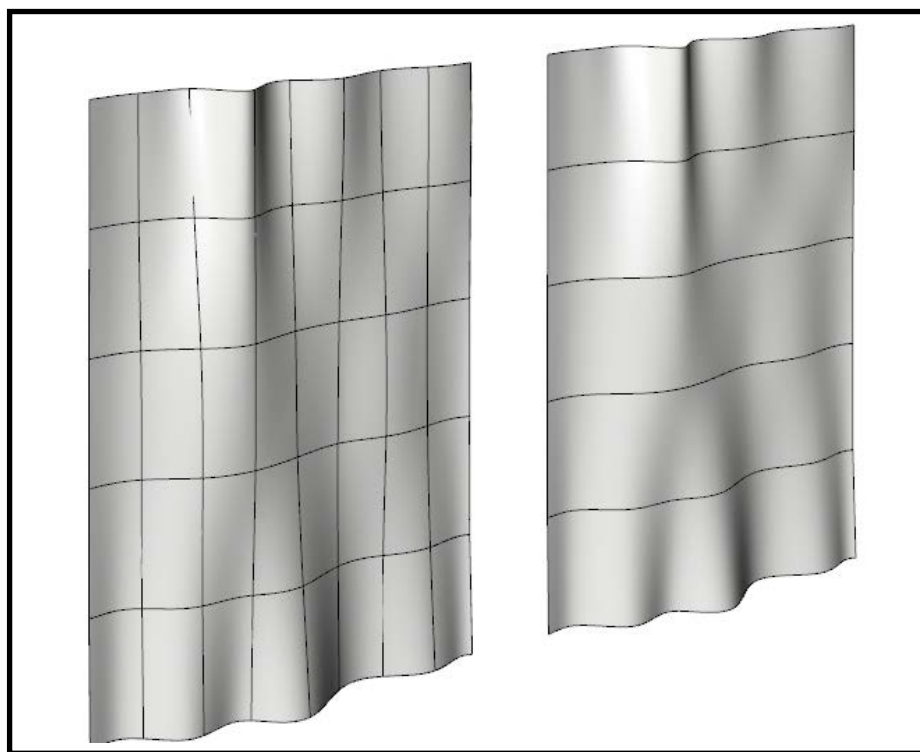
Слика 6.8. Модел 5 (Хипар-ХП) и геометријска оптимизација истог модела којом је постигнута могућност да 67 панела буду равни

7. **Референтни Модел 2** – је креиран према оригиналној идеји аутора постојећег објекта, и подразумева двоструко закривљену површ, како самих стаклених панела тако и целог стакленог омотача (Слика 6.9). Усвојена величина панела (раванска пројекција) износи 166,4 x 382,6 cm, са хоризонталним и вертикалним размаком између панела од 16 mm. Све ивице стаклених панела јесу криве линије. С обзиром на то да геометријске карактеристике двоструко закривљене површи, које су исте као код основног модела (Референтни Модел 1), а за разлику од кога је усвојена панелизација површине која омогућава да једна димензија панела – висина, одговара спратној висини објекта, овај модел је усвојен као Референтни Модел 2. Усвојена дебљина једноструког стакла од 10 mm одговара величини и геометрији панела. Укупан број панела је 40. Укупна површина омотача износи 270,20 m².



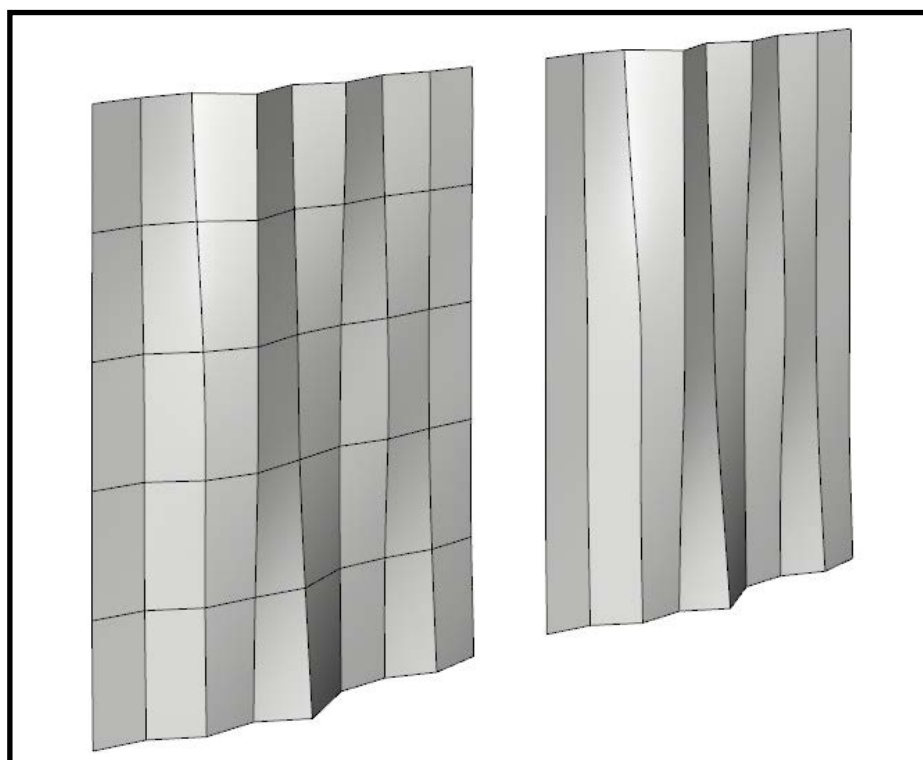
Слика 6.9. Референтни Модел 2

8. **Модел 6 (Торза хоризонтална)** – подразумева двоструко закривљену површ омотача креирану помоћу једноструко закривљених панела (правоизводне површи) постављених у хоризонталном правцу (Слика 6.10). Једноструко закривљена форма панела је постигнута апроксимативним подешавањем двоструко закривљене површи. Назив модела Торза хоризонтална подразумева архаичан назив за једноструко закривљену - правоизводну површ (видети прво поглавље, стр. 42), која је у овом случају постављена у хоризонталном правцу. За разлику од Модела 3 усвојена је панелизација површине која омогућава да једна димензија панела – висина, одговара спратној висини. Усвојена величина панела (раванска пројекција) износи 166,4 x 382,6 cm, са хоризонталним и вертикалним размаком између панела од 16 mm. Вертикалне ивице стаклених панела су праве линије, што омогућава минимална одступања, а тиме и лакше уклапање панела у вертикалном правцу. Хоризонталне ивице су криве линије, што доприноси већој могућности одступања у хоризонталном правцу. Усвојена дебљина једноструког стакла од 10 mm одговара величини и геометрији панела. Укупан број панела је 40. Укупна површина омотача износи 269,88 m².



Слика 6.10. Модел 6 - Торза хоризонтална
(једноструко закривљени панели у хоризонталном правцу)

9. **Модел 7 (Торза вертикална)** – подразумева двоструко закривљену површ омотача креирану помоћу једноструко закривљених панела (правоизводне површи) постављених у вертикалном правцу (Слика 6.11). Једноструко закривљена форма панела је постигнута апроксимативним подешавањем двоструко закривљене површи. Назив модела Торза вертикална подразумева архаичан назив за једноструко закривљену - правоизводну површ (видети прво поглавље, стр. 42), која је у овом случају постављена у вертикалном правцу. За разлику од Модела 4 усвојена је панелизација површине која омогућава да једна димензија панела – висина, одговара спратној висини. Усвојена величина панела (раванска пројекција) износи 166,4 x 382,6 cm, са хоризонталним и вертикалним размаком између панела од 16 mm. Хоризонталне ивице стаклених панела су праве линије, што омогућава минимална одступања, а тиме и лакше уклапање панела у хоризонталном правцу. Вертикалне ивице су криве линије, што доприноси већој могућности одступања у вертикалном правцу. Усвојена дебљина једноструког стакла од 10 mm одговара величини и геометрији панела. Укупан број панела је 40. Укупна површина омотача износи 269,88 m².



Слика 6.11. Модел 7 - Торза вертикална (једноструко закривљени панели у вертикалном правцу); (Извор: Аутор)

10. **Модел 8 (Хипар-ХП)** – подразумева двоструко закривљену површ омотача креирану помоћу двоструко закривљених панела који имају форму хиперболичног параболоида али су исечени по асимтотској мрежи – изводницама чинећи да ивице панела буду праве линије (Слика 6.12). За разлику од Модела 5 усвојена је панелизација површине која омогућава да једна димензија панела – висина, одговара спратној висини. Усвојена величина панела (раванска пројекција) износи 166,4 x 382,6 cm, са хоризонталним и вертикалним размаком између панела од 16 mm. Хоризонталне и вертикалне ивице стаклених панела су праве линије, што омогућава минимална одступања а тиме и лакше уклапање панела у оба правца. Усвојена дебљина једноструког стакла од 10 mm одговара величини и геометрији панела. Укупан број панела је 40. Укупна површина омотача износи 268,92 m².

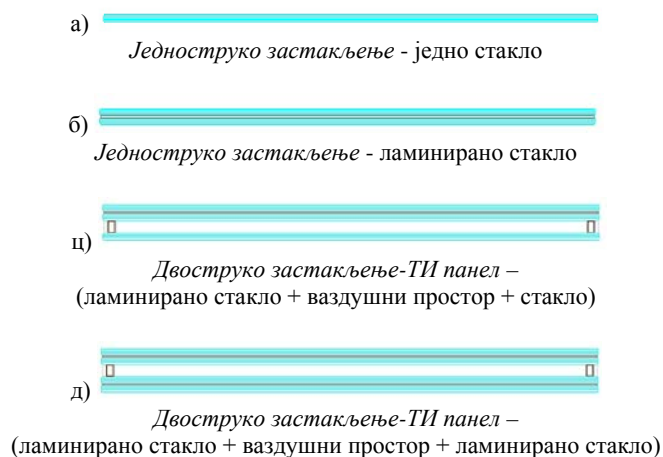


Слика 6.12. Модел 8-Хипар (ХП) (двоструко закривљени панели у форми хиперболичног параболоида са ивицама које су праве линије); (Извор: Аутор)

6.1.2 Материјализација

За материјализацију усвојених хипотетичких модела усвојено је стакло основног квалитета - пливајуће (*float*) стакло, без премаза, одговарајуће дебљине која је у директној зависности од геометрије и величине панела. Усвојена су четири типа застакљења која се у зависности од врсте (места) апликације најчешће користе, и представљена су према начину усложњавања основног елемента застакљења:

1. **Једноструко застакљење** које се састоји од једног стакла и као такво се ретко користи за материјализацију омотача, у чијем случају је неопходно применити каљено стакло (Слика 6.13). Ово застакљење је усвојено ради даље упоредне анализе. Најчешћа примена ове врста застакљења, ипак, је у ентеријеру или у материјализацији стаклених ограда, али је тада, такође, неопходна примена каљеног стакла.
2. **Једноструко застакљење** које се састоји од ламинираног стакла (два слоја стакла са слојем сигурносне фолије између). Ова врста застакљења налази примену у материјализацији нетермичког омотача, као што је фасада изграђеног објекта у Београду, као и двоструких фасада, надстрешница и сличних апликација које не захтевају примену термичког омотача (Слика 6.13). Ламинирано стакло је одабрано из разлога места апликације за које је, према прописима, неопходна примена сигурносног стакла.



Слика 6.13. Усвојени типови застакљења као варијанте материјализације усвојених геометријских модела; (Извор: Аутор)

3. **Двоструко затакљење** - *ТИ панел* које се састоји од једног ламинираног стакла и једног обичног стакла са ваздушним простором између. Ова врста застакљења налази примену у материјализацији термичког омотача (Слика 6.13). Ламинирано стакло је одабрано за спољашње стакло ТИ панела из разлога места апликације за које је, према прописима, неопходна примена сигурносног стакла.
4. **Двоструко затакљење** - *ТИ панел* које се састоји од два ламинирана стакла и ваздушног простора између. Ова врста застакљења налази примену у материјализацији термичког омотача (Слика 6.13). Ламинирано стакло је одабрано за спољашње стакло ТИ панела из разлога места апликације за које је, према прописима, неопходна примена сигурносног стакла, као и за унутрашње стакло када је то неопходно (у случајевима посебних захтева који произилазе из начина коришћења објекта).

Важно је напоменути да за анализу обликовних карактеристика нису релевантни различити типови материјализације стакленог омотача, док су у анализи технолошко-економских карактеристика узети у обзир.

6.2 Резултати компаративне анализе хипотетичких модела

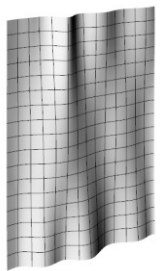
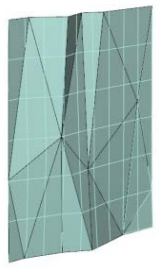
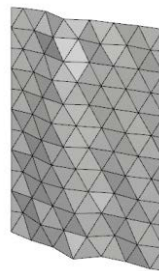
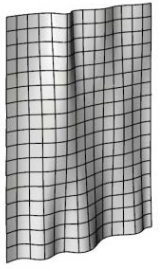
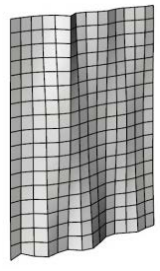
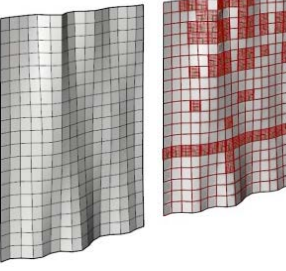
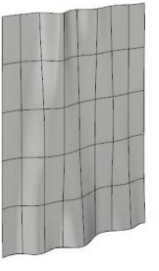



Свако пројектно решење омотача архитектонских објеката започиње скицом или моделом који илуструје главни пројектантски концепт. Тако је, за анализу разичитих модела материјализације геометријски комплексног стакленог омотача, претпостављено је да је почетна форма – основни модел представљен као глатка површ моделована по узору комерцијално доступних софтвера, у овом случају програма за 3Д моделовање *Rhinoceros*. Како је претходно наглашено, циљ креирања различитих модела је био да се произведу разнолика али оптимално уравнотежена пројектна решења панелизације површине уз поштовање (сличности) оригиналне пројектантске идеје, а у односу на транспарентност површине омотача, комплексност чворне везе, визуелни доживљај, технику обликовања, искоришћеност материјала и економску цену; затим да се изврши њихова процена, односно рангирање, у односу на успостављене визуелно-обликовне и технолошко-економске критеријуме.

6.2.1 Анализа визуелно-обликовних карактеристика

Резултати анализе различитих модела материјализације геометријски комплексног стакленог омотача према визуелно-обликовним критеријумима приказани су у Табели 6.1.

Табела приказује квантификовану оцену различитих модела материјализације геометријски комплексног стакленог омотача у односу на изабране визуелно-обликовне критеријуме који су сврстани у две групе: критеријуми са аспекта геометрије и аспекта перцепције. Десет дефинисаних модела представљено је основним карактеристикама у погледу димензија и површина.

Табела 6.1. Резултати анализе – приказ квантификованих оцена различитих модела материјализације геометријски комплексног стакленог омотача на основу изабраних визуелно-обликовних критеријума

| Модел различите геометрије слободно-закривљене стаклене побршине омотача | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|--|---|---|--|---|---|---|---|-------------|
| | Референтни Модел 1 – (оригинална подела) | Модел 1 – Велики троуглови | Модел 2 – Једнакокрајни троуглови | Модел 3 – Торза хоризонтална | Модел 4 – Торза вертикална | Модел 5 – Хипар-ХП (макс. одступање од хоризонталне равни 10цм) | Референтни модел 2 – (велика подела) | Модел 6 – Торза хоризонтална (велика подела) | Модел 7 – Торза вертикална (велика подела) | Модел 8 – Хипар-ХП (велика подела) | |
| |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | |
| Димензије панела (укупна површина пројекције 13,42x19,19m=257,53m ²) | 94,4x111,4 cm дебљ. 6 mm П=270,20 m ² (238 ком.) | 147,7x318,5 cm дебљ. 10 mm П=271,20 m ² (6 ком. целих и 122 ком. исечених) | 207x207x207 cm дебљ. 8 mm П=265,32 m ² (132ком. једнакокрајних троугл. и 22ком. правоуглих) | 94,4x111,4 cm дебљ. 6 mm П=269,88 m ² (238 ком.) | 94,4x111,4 cm дебљ. 6 mm П=269,88m ² (238 ком.) | 94,4x111,4 cm дебљ. 6 mm П=268,92 m ² (238 ком., 67 ком. равних) | 166,4x382,6 cm дебљ. 10 mm П=270,20 m ² (40 ком.) | 166,4x382,6 cm дебљ. 10 mm П=269,88 m ² (40 ком.) | 166,4x382,6 cm дебљ. 10 mm П=269,88 m ² (40 ком.) | 166,4x382,6 cm дебљ. 10 mm П=268,92 m ² (40 ком.) | |
| Визуелно-обликовни критеријуми (визуелно-оптичке карактеристике) | | | | | | | | | | | |
| са аспекта геометрије | Форма/Геometriја – сличност оригиналном моделу | 1 | 0,50 | 0,25 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 1 | 0,75 | 0,75 | |
| | Транспарентност површине | 0,50 | 0,75 | 0,25 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 1 | 1 | 1 | |
| | Комплексност чворне везе | 0,40 | 0,40 | 0,20 | 0,60 | 0,60 | 0,80 | 0,60 | 0,80 | 1 | |
| | Укупан квалитет са аспекта геометрије | 1,90 | 1,65 | 0,70 | 1,85 | 1,85 | 2,05 | 2,60 | 2,55 | 2,55 | 2,75 |
| са аспекта перцепције | Поглед на горе/одоздо (контуре и глаткоћа површине) | 1 | 0,40 | 0,20 | 1 | 0,80 | 0,80 | 1 | 1 | 0,60 | 0,60 |
| | Доживљај изнутра (визуелна дисторзија посматране перспективне слике) | 0,20 | 1 | 0,80 | 0,20 | 0,40 | 0,60 | 0,20 | 0,20 | 0,40 | 0,60 |
| | Утицај закривљености на светлосне ефекте (каустика) | 0,20 | 1 | 1 | 0,40 | 0,40 | 0,60 | 0,20 | 0,40 | 0,40 | 0,60 |
| | Укупан квалитет са аспекта перцепције | 1,40 | 2,40 | 2 | 1,60 | 1,60 | 2 | 1,40 | 1,60 | 1,40 | 1,80 |
| Укупан визуелно- обликовни квалитет | 3,30 | 4,05 | 2,70 | 3,45 | 3,45 | 4,05 | 4 | 4,15 | 3,95 | 4,55 | |

На основу квантификоване оцене визуелно-обликовних карактеристика дефинисаних модела, приказаних у Табели 6.1 могу се извести следећи закључци:

- На основу представљених резултата може се закључити да за анализу/дефинисање визуелно-обликовних потенцијала и ограничења геометријски комплексних (закривљених) форми стаклених омотача могуће је формирати критеријуме који би били релевантни у групи, односно који би могли да се споје и заједно дају укупну оцену, иако је анализа представљених студија случаја углавном указала на појединачне параметре који су посебно сваки за себе релевантни и морају посебно да се проуче. Тако формиране две групе визуелно-обликовних критеријума, који су на први поглед супростављени, ипак дају укупан очекивани резултат анализе.
- У погледу прве групе визуелно-обликовних критеријума са аспекта геометрије најбољи квалитет показују модели са панелима великих димензија (Референтни Модел 2, Модел 6, 7, и 8) међу којима је Модел 8 са двоструко закривљеним панелима хипар површи, најбоље оцењен. Разлог томе је што задовољавају критеријуме у погледу геометрије и транспарентности (велика површина панела), као и комплексности чворне везе (четворугаона веза и мањи број веза).
- Такође, добар квалитет у погледу прве групе критеријума показује и модел са двоструко закривљеним панелима хипар површи и мањих димензија (Модел 5), као и модели са једноструко закривљеним панелима мањих димензија. Разлог нешто лошијег квалитета јесте мања површина панела и већи број чворних (четвороугаоних) веза.
- У погледу друге групе визуелно-обликовних критеријума са аспекта перцепције најбољи квалитет међу моделима са закривљеним панелима показују модели хипар, како са панелима мањих димензија (Модел 5), тако и са панелима већих димензија (Модел 8). Разлог томе је геометрија која подразумева двоструку мању закривљеност панела равних ивица и самим тим и мање визуелне деформације. Ипак најбоље карактеристике са аспекта перцепције показују модели са равним панелима, посебно Модел 1 чија форма визуелно подсећа на оригинални модел. Разлог томе је што

равно стакло не карактерише визуелна дисторзија ни светлосни ефекти (каустика).

- У погледу првог критеријума – доживљаја контура и глаткости стакленог омотача најбоље су оцењени модели са двоструком закривљеношћу панела, као и модели са једноструком закривљеношћу у хоризонталном правцу. На основу тога, може се закључити да глаткост при посматрању стакленог омотача са улице, највише зависи од хоризонталне континуалне закривљености која је доминантна у односу на вертикалну закривљеност, било да се ради о једноструко или двоструко закривљеној површини омотача.
- У погледу укупне оцене визуелно-обликовних карактеристика најбоље је оцењен модел са панелима великих димензија хипар површи (Модел 8), као и модел са великим димензијама једноструко закривљених панела у хоризонталном правцу (Модел 6). Такође, добре карактеристике показују и модел са панелима мањих димензија хипар површи (Модел 5) и модели са једноструко закривљеним панелима мањих димензија (Модел 3 и 4). То указује на могућност постизања доброг квалитета у погледу визуелно-обликовних карактеристика помоћу једноставнијих геометријских решења које је могуће произвести економичнијим техникама обликовања (хладно савијање).
- Значајно је поменути да добре укупне визуелно-обликовне карактеристике показује и модел са наборима у виду великих троуглова (Модел 1) којим је уједно постигнут визуелни ефекат оригиналног модела и економичније решење, с обзиром да примењени равни панели не захтевају додатно обликовање.
- Најлошији квалитет у односу на визуелно-обликовне критеријуме, како са аспекта геометрије, тако и са аспекта перцепције показао је модел са равним једнакостраничним троугловима из разлога највећег одступања од геометрије оригиналног модела, најмање транспарентности, најкомплексније чворне везе и најлошијег доживљаја контура и глаткоће стаклене површине.

6.2.2 Анализа технолошко-економских карактеристика

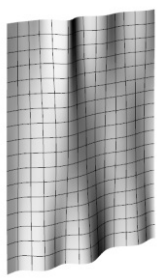
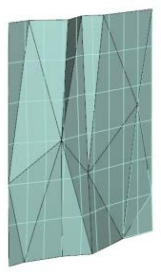
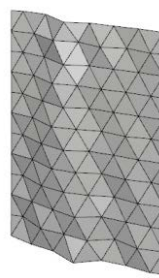
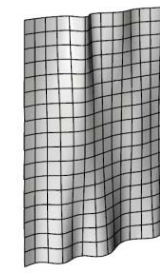
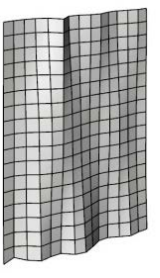
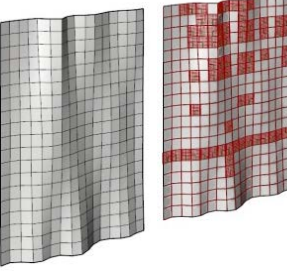


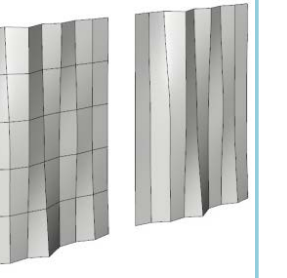

Резултати анализе различитих модела материјализације геометријски комплексног стакленог омотача према производно-економским критеријумима представљени су у Табелама 6.2, 6.3 и 6.4.

Табела 6.2 приказује квантификовану оцену различитих модела материјализације геометријски комплексног стакленог омотача у односу на изабране технолошке критеријуме. У Табели, приказано је свих десет модела са основним карактеристикама у погледу димензија, површина и одабране технике обликовања. За сваки модел усвојена је одговарајућа техника обликовања условљена геометријом самих стаклених панела и њеном доступношћу у Србији. У случају једноструке закривљености панела у хоризонталном и вертикалном правцу – Модели Торза (Модел 3, 4, 6, и 7) дат је предлог три могуће технике обликовања. Прва техника, која је усвојена за даљу економску анализу, јесте техника којом су произведени панели реализованог модела омотача и техника која је доступна у фабрикама Конкав Конвекс и Павле. Друга усвојена техника којом је могуће обликовати једноструко закривљене панеле мале закривљености, јесте хладно савијање, техника која није била позната до сада у Србији. Трећа усвојена техника која се сматра веома погодном за ову геометрију панела јесте термичко обликовање на производној линији, али из разлога њене примене само у фабрици Беоком, није било могуће добити потребне податке за даљу економску анализу. Због горе поменутог, усвојен је редослед предложених техника.

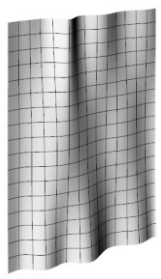
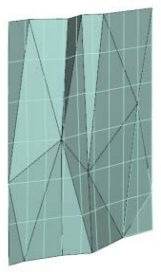
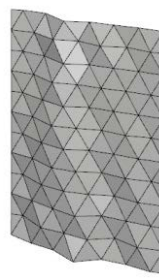
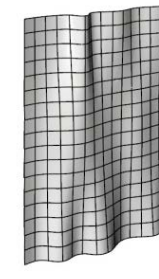
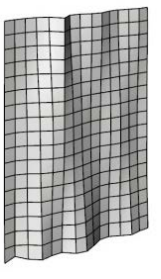
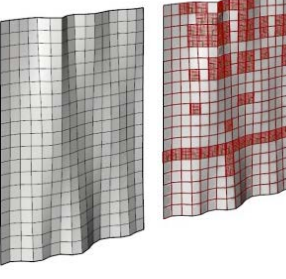


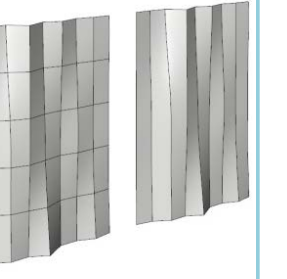

Табела 6.3 приказује квантификовану оцену различитих модела и подваријанти материјализације геометријски комплексног стакленог омотача у односу на економски критеријум - цену.

Табела 6.4 приказује квантификовану оцену различитих модела и подваријанти материјализације геометријски комплексног стакленог омотача у односу на економски критеријум – укупни инвестициони трошкови.

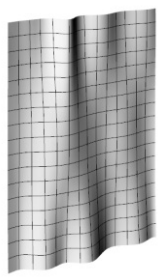
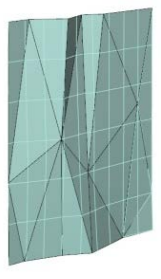
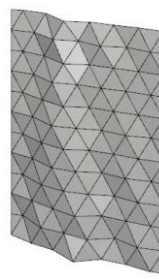
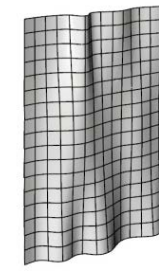
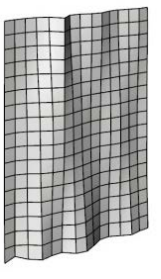
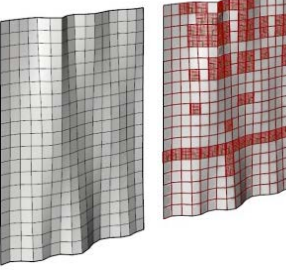


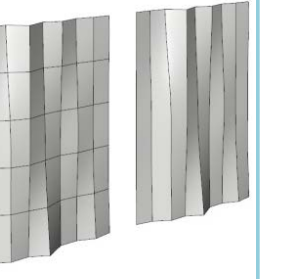

Табела 6.2. Резултати анализе – приказ квантификованих оцена различитих модела материјализације геометријски комплексног стакленог омотача на основу изабраних технолошких критеријума

| | | Модел различите геометрије слободно-закривљене стаклене површине омотача | | | | | | | | | |
|---|---------------------------------------|---|--|--|---|---|--|---|---|---|---|
| | | Референтни Модел 1 – (оригинална подела) | Модел 1 – Велики троуглови | Модел 2 – Једнакостранични троуглови | Модел 3 – Торза хоризонтална | Модел 4 – Торза вертикална | Модел 5 – Хипар-ХП (макс. одступање од хоризонталне равни 10цм) | Референтни модел 2 – (велика подела) | Модел 6 – Торза хоризонтална (велика подела) | Модел 7 – Торза вертикална (велика подела) | Модел 8 – Хипар-ХП (велика подела) |
| | |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Димензије панела (укупна површина пројекције 13,42x19,19m=257,53m ²) | | 94,4x111,4cm дебљ. 6mm П=270,20m ² (238 ком.) | 147,7x318,5cm дебљ. 10mm П=271,20m ² (6 ком. целих и 122 ком. исечених) | 207x207x207cm дебљ. 8mm П=265,32m ² (132ком. једнакостраничних троугл. и 22ком. правоуглих) | 94,4x111,4cm дебљ. 6mm П=269,88m ² (238 ком.) | 94,4x111,4cm дебљ. 6mm П=269,88m ² (238 ком.) | 94,4x111,4cm дебљ. 6mm П=268,92m ² (238 ком., 67 ком. равних) | 166,4x382,6cm дебљ. 10mm П=270,20m ² (40 ком.) | 166,4x382,6cm дебљ. 10mm П=269,88m ² (40 ком.) | 166,4x382,6cm дебљ. 10mm П=269,88m ² (40 ком.) | 166,4x382,6cm дебљ. 10mm П=268,92m ² (40 ком.) |
| Усвојена техника обликовања закривљеног стакла | | Поступак термичког обликовања уз помоћ калупа (алата). | -- | -- | 1. Поступак термичког обликовања уз помоћ калупа. 2. Поступак хладног савијања. 3. Поступак термичког обликовања на производ. линији. | 1. Поступак термичког обликовања уз помоћ калупа. 2. Поступак хладног савијања. 3. Поступак термичког обликовања на производ. линији. | Поступак хладног савијања. Геометријском оптимизацијом омогућено је да одређен број панела буду равни. | Поступак термичког обликовања уз помоћ калупа (алата). | 1. Поступак термичког обликовања уз помоћ калупа. 2. Поступак хладног савијања. 3. Поступак термичког обликовања на производној линији. | 1. Поступак термичког обликовања уз помоћ калупа. 2. Поступак хладног савијања. 3. Поступак термичког обликовања на производној линији. | Поступак хладног савијања. |
| Технолошки/производни критеријуми | | | | | | | | | | | |
| критеријуми | Техника обликовања закривљеног стакла | 0,25 | 1 | 1 | 0,25 (0,75) (0,50) | 0,25 (0,75) (0,50) | 0,75 | 0,25 | 0,25 (0,75) (0,50) | 0,25 (0,75) (0,50) | 0,75 |
| | Искоришћеност материјала | 1 | 0,75 | 0,50 | 1 | 1 | 1 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| Укупан квалитет са технолошког аспекта | | 1,25 | 1,75 | 1,50 | 1,25 (1,75) (1,50) | 1,25 (1,75) (1,50) | 1,75 | 0,50 | 0,50 (1) (0,75) | 0,50 (1) (0,75) | 1 |

Табела 6.3. Резултати анализе – приказ квантификованих оцена различитих модела материјализације геометријски комплексног стакленог омотача на основу економског критеријума (цена/м²)

| Модел различите геометрије слободно-закривљене стаклене побршине омотача | | | | | | | | | | | |
|---|---|--|---|---|---|--|---|---|---|---|------|
| | Референтни Модел 1 – (оригинална подела) | Модел 1 – Велики троуглови | Модел 2 – Једнакокрајични троуглови | Модел 3 – Торза хоризонтална | Модел 4 – Торза вертикална | Модел 5 – Хипар-ХП (макс. одступање од хоризонталне равни 10цм) | Референтни модел 2 – (велика подела) | Модел 6 – Торза хоризонтална (велика подела) | Модел 7 – Торза вертикална (велика подела) | Модел 8 – Хипар-ХП (велика подела) | |
| |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | |
| Димензије панела (укупна површина пројекције 13,42x19,19m=257,53m ²) | 94,4x111,4cm дебљ. 6mm П=270,20m ² (238 ком.) | 147,7x318,5cm дебљ. 10mm П=271,20m ² (6 ком. целих и 122 ком. исечених) | 207x207x207cm дебљ. 8mm П=265,32m ² (132ком. једнакокрајичних троугл. и 22ком. правоуглих) | 94,4x111,4cm дебљ. 6mm П=269,88m ² (238 ком.) | 94,4x111,4cm дебљ. 6mm П=269,88m ² (238 ком.) | 94,4x111,4cm дебљ. 6mm П=268,92m ² (238 ком., 67 ком. равних) | 166,4x382,6cm дебљ. 10mm П=270,20m ² (40 ком.) | 166,4x382,6cm дебљ. 10mm П=269,88m ² (40 ком.) | 166,4x382,6cm дебљ. 10mm П=269,88m ² (40 ком.) | 166,4x382,6cm дебљ. 10mm П=268,92m ² (40 ком.) | |
| Усвојена техника обликовања закривљеног стакла | Поступак термичког обликовања уз помоћ калупа (алата). | -- | -- | Поступак термичког обликовања уз помоћ калупа. | Поступак термичког обликовања уз помоћ калупа. | Поступак хладног савијања. Геометријском оптимизацијом омогућено је да одређен број панела буду равни. | Поступак термичког обликовања уз помоћ калупа (алата). | Поступак термичког обликовања уз помоћ калуца. | Поступак термичког обликовања уз помоћ калуца. | Поступак хладног савијања. | |
| Економски критеријум (цена – €/m²) | | | | | | | | | | | |
| ПАВЛЕ ДОО | Једноструко | 170 | 35 | 30 | 120 | 120 | 20 | 585 | 350 | 350 | 40 |
| | Једноструко ламинирано (x3) | 500 | 100 | 80 | 350 | 350 | 60 | 1.750 | 1.050 | 1.050 | 120 |
| | ТИ –Једност. ламинирано + једноструко (x5) | 850 | 175 | 150 | 600 | 600 | 100 | 2.920 | 1.750 | 1.750 | 200 |
| | ТИ –Једност. ламинирано +једност. ламинир.(x6,5) | 1.100 | 230 | 195 | 780 | 780 | 130 | 3.800 | 2.275 | 2.275 | 260 |
| КОНКАВ КОНВЕС ДОО | Једноструко | 200 | 55 | 50 | 180 | 180 | 40 | 400 | 360 | 360 | 80 |
| | Једноструко ламинирано (x3) | 600 | 165 | 150 | 540 | 540 | 120 | 1.200 | 1.080 | 1.080 | 240. |
| | ТИ –Једност. ламинирано + једноструко (x4.5) | 900 | 247,50 | 225 | 810 | 810 | 180 | 1.800 | 1.620 | 1.620 | 360 |
| | ТИ –Једност. ламинирано +једност. ламинир.(x6,5) | 1.300 | 357,50 | 325 | 1.170 | 1.170 | 260 | 2.600 | 2.340 | 2.340 | 520 |

Табела 6.4. Резултати анализе – приказ квантификованих оцена различитих модела материјализације геометријски комплексног стакленог омотача на основу економског критеријума (укупни инвестициони трошкови)

| Модел различите геометрије слободно-закривљене стаклене побршине омотача | | | | | | | | | | | |
|---|---|--|---|---|---|--|---|---|---|---|----------------|
| | Референтни Модел 1 – (оригинална подела) | Модел 1 – Велики троуглови | Модел 2 – Једнакокрајни троуглови | Модел 3 – Торза хоризонтална | Модел 4 – Торза вертикална | Модел 5 – Хипар-ХП (макс. одступање од хоризонталне равни 10цм) | Референтни модел 2 – (велика подела) | Модел 6 – Торза хоризонтална (велика подела) | Модел 7 – Торза вертикална (велика подела) | Модел 8 – Хипар-ХП (велика подела) | |
| |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | |
| Димензије панела (укупна површина пројекције 13,42x19,19m=257,53m ²) | 94,4x111,4cm дебљ. 6mm П=270,20m ² (238 ком.) | 147,7x318,5cm дебљ. 10mm П=271,20m ² (6 ком. целих и 122 ком. исечених) | 207x207x207cm дебљ. 8mm П=265,32m ² (132ком. једнакокрајних троугл. и 22ком. правоуглих) | 94,4x111,4cm дебљ. 6mm П=269,88m ² (238 ком.) | 94,4x111,4cm дебљ. 6mm П=269,88m ² (238 ком.) | 94,4x111,4cm дебљ. 6mm П=268,92m ² (238 ком., 67 ком. равних) | 166,4x382,6cm дебљ. 10mm П=270,20m ² (40 ком.) | 166,4x382,6cm дебљ. 10mm П=269,88m ² (40 ком.) | 166,4x382,6cm дебљ. 10mm П=269,88m ² (40 ком.) | 166,4x382,6cm дебљ. 10mm П=268,92m ² (40 ком.) | |
| Усвојена техника обликовања закривљеног стакла | Поступак термичког обликовања уз помоћ калупа (алата). | -- | -- | Поступак термичког обликовања уз помоћ калупа. | Поступак термичког обликовања уз помоћ калупа. | Поступак хладног савијања. Геометријском оптимизацијом омогућено је да одређен број панела буду равни. | Поступак термичког обликовања уз помоћ калупа (алата). | Поступак термичког обликовања уз помоћ калупа. | Поступак термичког обликовања уз помоћ калупа. | Поступак хладног савијања. | |
| Економски критеријум (укупни инвес. трошкови – €) | | | | | | | | | | | |
| ПАВЛЕ ДОО | Једноструко | 45.934 | 9.492 | 7.960 | 32.385 | 32.385 | 5.378 + хладно сав. | 158.067 | 94.458 | 94.458 | 10.757 + х.с. |
| | Једноструко ламинирано (x3) | 135.100 | 27.120 | 21.226 | 94.458 | 94.458 | 16.135 + хладно сав. | 472.850 | 283.374 | 283.374 | 32.270 + х.с. |
| | ТИ –Једност. ламинирано + једноструко (x5) | 229.670 | 47.460 | 39.798 | 161.928 | 161.928 | 26.892 + хладно сав. | 788.984 | 472.290 | 472.290 | 53.784 + х.с. |
| | ТИ –Једност. ламинирано +једност. ламинир.(x6,5) | 297.220 | 62.376 | 51.738 | 210.506 | 210.506 | 34.960 + хладно сав. | 1.026.760 | 613.977 | 613.977 | 69.919 + х.с. |
| КОНКАВ КОНВЕС ДОО | Једноструко | 54.040 | 14.916 | 13.266 | 48.578 | 48.578 | 10.757 + хладно сав. | 108.080 | 97.157 | 97.157 | 21.514 + х.с. |
| | Једноструко ламинирано (x3) | 162.120 | 44.748 | 39.798 | 145.735 | 145.735 | 32.270 + хладно сав. | 324.240 | 291.470 | 291.470 | 64.540 + х.с. |
| | ТИ –Једност. ламинирано + једноструко (x4,5) | 243.180 | 67.122 | 59.697 | 218.602 | 218.602 | 48.406e + хладно сав. | 486.360 | 437.206 | 437.206 | 96.812 + х.с. |
| | ТИ –Једност. ламинирано +једност. ламинир.(x6,5) | 351.260 | 96.954 | 86.229 | 315.759 | 315.759 | 69.919 + хладно сав. | 702.520 | 631.519 | 631.519 | 139.838 + х.с. |

На основу квантификоване оцене технолошких карактеристика дефинисаних модела, приказаних у Табели 6.2 могу се извести следећи закључци:

- У погледу технике обликовања, осим модела са равним панелима (Модел 1 и 2) најбоље је оцењен модел са панелима хипар површи (Модел 5 и 8) које је могуће обликовати хладним савијањем, техником која не захтева производни процес. Такође, моделе торза са једноструко закривљеним панелима (Модел 3, 4, 6, и 7) могуће је обликовати на овај начин.
- У погледу искоришћености материјала најбоље карактеристике показују модели са четвороугаоним панелима мањих димензија (Референтни Модел 1, Модел 3, 4, и 5) који показују добру искоришћеност стандардног стакленог панела. Знатно лошије карактеристике има модел са једнакостраничним троугловима (Модел 2) који подразумева већи растур материјала. Најлошије карактеристике показује модел са великим димензијама панела (Референтни Модел 2, Модел 6, 7, и 8), с обзиром да је од једног стандардног стакленог панела могуће добити само један панел због његове велике димензије.
- У погледу укупног квалитета технолошких карактеристика најбоље је оцењен модел са панелима хипар површи мањих димензија (Модел 5) као и модел са великим троугловима (Модел 1). Такође, истим поенима оцењени су модели са једноструко закривљеним панелима мањих димензија (Модел 3 и 4) које је такође могуће обликовати хладним савијањем.
- Како модел са панелима хипар површи мањих димензија показује, такође, најбоље економске карактеристике, може се закључити да је у погледу укупног квалитета технолошко-економских карактеристика најбољи управо овај модел (Модел 5).
- У погледу могућности производње у Србији, може се закључити да због ограничених димензија пећи за термичко савијање, највеће димензије панела није могуће произвести на овај начин. Велике димензије панела хипар површи (Модел 8), као и једноструко закривљене површи (Модел 6 и 7) могуће је обликовати поступком хладног савијања, с обзиром да њихова геометрија која подразумева малу закривљеност то омогућава.

На основу анализе добијених података економских карактеристика дефинисаних модела, приказаних у Табелама 6.3 и 6.4 могу се извести следећи закључци:

- У случају примене равних стаклених елемената (Модел 1 и 2), економски повољнији је модел са великим троугловима (Модел 2), из разлога што је за модел са мањим једнакостраничним троугловима (Модел 3) потребан већи број сечења, као и већи растур материјала што незнатно повећава цену, како по m^2 , тако и укупне инвестиционе трошкове.
- Значајне уштеде могуће је постићи применом равних панела код модела који обликовно подсећа на оригинални модел (Модел 1), и то од 5x (за двоструко закривљене панеле – Референтни Модел 1) до 3,5x (за једноструко закривљене панеле – Модел 3 и 4) у случају мање димензије панела, и од 16x (за двоструко закривљене панеле - Референтни Модел 2) до 10x (за једноструко закривљене панеле – Модел 6 и 7) у случају веће димензије панела.
- Не постоји разлика у трошковима за модел са једноструко закривљеним панелима постављеним у хоризонталном правцу у односу на модел са једноструко закривљеним панелима постављеним у вертикалном правцу.
- Применом једноструко закривљених панела у односу на двоструко закривљене могуће је постићи значајне уштеде, и то до 30% у случају модела са мањом димензијом панела (Модел 3 и 4 у односу на Референтни Модел 1), односно до 40% у случају модела са великом димензијом панела (Модел 6 и 7 у односу на Референтни Модел 2).
- Најзначајније уштеде могуће је постићи применом технике хладног савијања панела у форму хипар (Модел 5 и 8), и то од 8,5x (за двоструко закривљене панеле – Референтни Модел 1) до 6x (за једноструко закривљене панеле – Модел 3 и 4) у случају мање димензије панела, односно од 15x (за двоструко закривљене панеле – Референтни Модел 2) до 8,5x (за једноструко закривљене панеле – Модел 6 и 7) у случају веће димензије панела, не узимајући у обзир трошкове хладног савијања које се спроводи током процеса монтаже. Поред тога, уз помоћ оптимизације (апроксимације) површине могуће је постићи да одређени број панела буду

равни, односно није потребно њихово савијање. Највећа уштеда (30x) постигнута је применом хладно савијених панела мање димензије (Модел 5) у односу на двоструко закривљене панеле већих димензија (Референтни Модел 2).

- У случају примене хладног савијања за моделе са једноструко закривљеним панелима (Модел 3, 4, 6, и 7), могуће је постићи исте трошкове, односно уштеде, као у случају модела са панелима хипар површи, како мањих (Модел 5), тако и већих димензија (Модел 8).
- Најмањи укупни трошкови производње закривљеног омотача, који се односе на производњу равних панела мањих димензија а који су касније савијени техником хладног савијања (Модел 5 – панел од ламинираног стакла), износе 16.135 евра, док се највећи трошкови односе на модел са двоструко закривљеним панелима већих димензија (Референтни Модел 2 - ТИ панел од ламинираног стакла) и износе 1.026.760 евра.
- Такође, значајна разлика у трошковима уочава се између модела са мањом и већом димензијом панела, и то од 2x (Конкав Конвекс) до 3x већи (Павле) у случају, како двоструко (Референтни Модел 2 у односу на Референтни Модел 1), тако и једноструко закривљених панела (Модел 6 и 7 у односу на Модел 3 и 4).
- Генерално, уочава се значајна разлика у цени између два произвођача (обрађивача) стакла у Србији.

Закључак

Актуелна фасцинација криволинијским архитектонским формама поставила је нове захтеве за примену како закривљеног тако и равног стакла као елемента геометријски комплексног омотача архитектонских објеката. Технолошка и практична унапређења производње стакла, а посебно закривљеног стакла допринела су повећању броја пројеката архитектонских објеката са великим површинама стаклених омотача геометријски комплексних форми. Из тих разлога јавило се интересовање за истраживање могућности примене стакла у реализацији геометријски комплексних форми омотача архитектонских објеката, на основу кога је постављен циљ овог истраживања. Циљ истраживања, дефинисан у уводном делу дисертације, огледа се у утврђивању потенцијала и ограничења примене, како закривљеног, тако и равног стакла у реализацији геометријски комплексних форми омотача, односно његових визуелно-обликовних, енергетских и технолошко-економских потенцијала и ограничења. Само истраживање базирано је на студији случаја и анализи креираних хипотетичких модела са аспекта односа елемената материјализације стакленог омотача и њихових визуелно-обликовних и производно-економских карактеристика. Из постављених циљева произашао је низ различитих задатака истраживања.

Истраживање је започето са следећим хипотезама:

- Постојећа теоријска и практична искуства у домену пројектовања и материјализације стакленог омотача геометријски комплексних форми коришћењем закривљеног стакла, могу послужити за дефинисање хипотетичких модела и проверу могућности њихове фабрикације у Србији.
- Применом закривљеног стакла у материјализацији омотача геометријски комплексних форми могуће је постићи максимално искоришћење карактеристика стакла.
- Уочавањем општих и специфичних карактеристика стаклених омотача геометријски комплексних форми и њихових основних типолошких образаца, могу се идентификовати потенцијали и ограничења у погледу

примене закривљеног стакла, који се потом могу приказати кроз критеријуме и параметре за пројектовање и материјализацију, односно успоставити методолошки поступак.

У првом делу истраживања дате су теоријске поставке на којима се базира истраживање и основни принципи архитектонске геометрије. Првенствено је разматрана улога геометрије у креирању геометријски комплексних форми стаклених омотача. На основу типологије геометријски комплексних форми стаклених омотача/конструкција, дати су могући типови појединачних стаклених панела, према типу геометрије (начину генерисања) и типу закривљености, а који су даље у раду коришћени и анализирани.

С циљем идентификације различитих технологија производње и обликовања закривљеног стакла, истражене су две основне технике, са посебним акцентом на теоретске основе, принципе и ограничења примене технике хладног савијања која је једноставна за примену, а која је била до сада непозната код нас и дат је преглед најзначајнијих утицајних фактора и начина примене.

Проучавањем расположиве грађе, а нарочито базе података прикупљене током спроведених интервјуа са актерима који укључују инжењере, архитекте, консултанте и произвођаче стакла и фасада (током посета факултетима, пројектантским бироима и фабрикама у Европи и Србији), уочена је потреба за дефинисањем процеса пројектовања и конструкције/израде геометријски комплексних форми омотача архитектонских објеката. До овога се дошло с обзиром на то да су током интервјуа добијени различити одговори и подаци који су указали на чињеницу да није могуће добити утврђене елементе процеса већ се процес посебно прилагођава сваком пројекту. Имајући у виду концепт стаклене површине, геометрију форме, конструктивне и термичке карактеристике, форму стаклених елемената и технике израде, компатибилност свих третмана са процесом савијања, а с циљем креирања мапе процеса путем дијаграма, идентификована је процедура и фактори који дефинишу примену стакла у материјализацији геометријски комплексних форми омотача.

Значајан је контакт са професором Мауром Оверендом (Dr Mauro Overend) и др Елеонором Вос (Dr Eleonor Voss) са Универзитета у Кембриџу који је омогућио, у договору са њима, да се постојећи модел мапирања процеса

пројектовања и конструкције нових типова фасада унапреди за моделовање фасада од закривљеног стакла. За то је коришћен процес мапирања применом стандардизованог начина графичког представљања специфичних процеса у моделу пословног процеса (*BuildingSMART's adaptation of Business Process Map Notation*), помоћу кога је креирана мапа процеса. Путем спроведених анкета извршена је валидација концепата успостављених процеса.

Анкета и примери су у почетку показали да критеријуми за пројектовање нису кохерентни и да их није могуће повезати, већ да функционишу независно и неповезано. Разговори са стручњацима и највећим делом запажања на лицу места, омогућили су да се успоставе почетни критеријуми који су се касније анализом и упоређивањем даље развијали и унапређивали, док се није дошло до процеса вредновања и критеријума који дају употребљиве резултате. Поступак оцењивања према успостављеним критеријумима допринео је дефинисању потенцијала и ограничења у погледу визуелно-обликовних и технолошко-економских карактеристика.

Проучавањем студије случаја уочена је потреба за дефинисањем одговарајуће типологије стаклених елемената у односу на геометрију и тип закривљености, а која је прилагођена потребама конкретног истраживања. С циљем утврђивања/процене визуелно-обликовних и производно-економских карактеристика стаклених омотача геометријски комплексних форми креирани су хипотетички модели. Имајући у виду геометрију укупне површине омотача и геометрију предложених типова појединачних стаклених елемената, као и тип панелизације, а с циљем одабира карактеристичних форми које ће се анализирати у истраживању, креирани су следећи модели:

- *Референтни Модел 1* – креиран према оригиналној идеји аутора постојећег објекта, и подразумева двоструко закривљену површ, како самих стаклених панела тако и целог стакленог омотача (оригинална подела).
- *Модел 1 (Велики троуглови)* – преломљене равни (набори) у виду великих троуглова различите величине чија форма је оптимално уравнотежена, обликовно поштујући сличност са Референтним (основним) моделом.

- *Модел 2 (Једнакостранични троуглови)* – оптимално уравнотежена форма површине креиране од једнакостраничних троуглова, која поштује сличност са Референтним (основним) моделом.
- *Модел 3 (Торза хоризонтална)* – двоструко закривљена површина креирана помоћу једноструко закривљених панела који су постигнути апроксимативним подешавањем двоструко закривљене површи. Назив модела *Торза хоризонтална* подразумева архаичан назив за једноструко закривљену површ која је у овом случају постављена у хоризонталном правцу.
- *Модел 4 (Торза вертикална)* – двоструко закривљена површина креирана помоћу једноструко закривљених панела који су постигнути апроксимативним подешавањем двоструко закривљене површи. Назив модела *Торза вертикална* подразумева архаичан назив за једноструко закривљену површ која је у овом случају постављена у вертикалном правцу.
- *Модел 5 (Хипар-ХП)* – двоструко закривљена површина креирана помоћу двоструко закривљених панела (форма хиперболичног параболоида) исечених по асимтотској мрежи – изводницама, чинећи да ивице панела буду праве линије.
- *Референтни Модел 2* – креиран према оригиналној идеји аутора постојећег објекта, и подразумева двоструко закривљену површ, како самих стаклених панела тако и целог стакленог омотача (велика подела).
- *Модел 6 (Торза хоризонтална)* – двоструко закривљена површина креирана помоћу једноструко закривљених панела који су постигнути апроксимативним подешавањем двоструко закривљене површи. Назив модела *Торза хоризонтална* подразумева архаичан назив за једноструко закривљену површ која је у овом случају постављена у хоризонталном правцу (велика подела).
- *Модел 7 (Торза вертикална)* – двоструко закривљена површина креирана помоћу једноструко закривљених панела који су постигнути апроксимативним подешавањем двоструко закривљене површи. Назив модела *Торза вертикална* подразумева архаичан назив за једноструко

закривљену површ која је у овом случају постављена у вертикалном правцу (велика подела).

- *Модел 8 (Хипар-ХП)* – двоструко закривљена површина креирана помоћу двоструко закривљених панела (форма хиперболичног параболоида) исечених по асимтотској мрежи – изводницама, чинећи да ивице панела буду праве линије (велика подела).

Истраживање хипотетичких модела показало је да је одређене геометрије стаклених омотача могуће остварити на једноставнији начин уз примену геометријских принципа који омогућавају постизање истих визуелно-обликовних/естетских ефеката двоструко закривљене стаклене површи, али који су економичнији, како са технолошког, тако и економског аспекта.

Закључци (овог дела) истраживања хипотетичких модела јесу следећи:

- Троугаона форма појединачних елемената, која се најчешће користи за материјализацију геометријски комплексних форми стаклених омотача, омогућава једноставно моделовање било које форме стакленог омотача с обзиром на то да су равни, док је њихова чворна веза комплекснија због појаве сила торзије. С друге стране, квадратна панелизација има чворове који су конструктивно стабилни, чиме је оправдано коришћење квадратне форме која омогућава и примену закривљеног стакла. Са економског аспекта троугаона подела подразумева економски неповољније решење из разлога већег броја сечења стакла, као и већи број елемената потконструкције.
- Добар квалитет закривљеног стакленог омотача у погледу визуелно-обликовних карактеристика могуће је постићи помоћу једноставнијих геометријских решења који подразумевају једноструко закривљену и хипар површ појединачних панела, а које је могуће произвести економичнијим техникама обликовања стакла (хладно савијање).
- Глаткост стаклене површине највише зависи од хоризонталне континуалне закривљености која је доминантна у односу на вертикалну закривљеност, при посматрању стакленог омотача са улице, било да се ради о једноструко или двоструко закривљеној површини омотача.

- Величина закривљености значајно утиче на визуелну дисторзију (неприродно сужавање и растезање слике онога што се посматра кроз стакло узроковане различитим преламањем светлости) и такође доприноси већој могућности различитих светлосних ефеката - каустике (рефлексије и преламања).

Основни закључци истраживања се могу исказати кроз неколико ставова:

- Принцип формирања модела различитих (оптималних) обликовно-технолошких решења геометријски комплексних стаклених омотача са равним и закривљеним стакленим панелима се, без обзира на варијације материјалних карактеристика, може адекватно применити у пракси. Понуђени варијетет модела са равним и закривљеним стакленим панелима који следе савремене одреднице за пројектовање, омогућен је на основу дефинисане типологије стаклених омотача и појединачних елемената према типу геометрије (начину генерисања) и типу закривљености, као и различитих процеса обликовања, чиме је даље успостављен методолошки приступ проблему реализације геометријски комплексних стаклених омотача. Овим је потврђена прва и друга хипотеза.
- Савремена техника обликовања закривљеног стакла поступком хладног савијања, која није до сада примењивана код нас, представља решење усклађено са физичким карактеристикама стакла, истовремено доприносећи знатно економској ефикасности, спречавању визуелних проблема површине стакла који могу настати термичким обликовањем и могућности примене већине премаза и филмова. Поступком хладног савијања могуће је обликовати моделе стакленог омотача чија геометрија је представљена хипар (хиперболички параболоид) и торза (једноструко закривљеном) површи појединачних стаклених панела. Такође, могуће је постићи уштеде у процесу производње и до преко 8x, у случају мање димензије панела и чак до 15x у случају веће димензије панела.
- Формираним моделом мапирања процеса пројектовања и конструкције геометријски комплексних стаклених омотача успостављена је хијерархија, условљеност и међузависност свих елемената процеса који нису били

познати на почетку истраживања. Мапа процеса се може применити за разумевање улоге различитих актера и активности, као и њихове одговорности и идентификацију различитих захтева током процеса пројектовања и конструкције, као и за утврђивање рокова, уз потребан списак референтног материјала и докумената неопходних за спровођење активности (корака) или као резултат (извештај) у оквиру одређене фазе. Такође, мапа представља основу за развој алата који помажу ефикасном складиштењу, приступу и преносу информација о предложеном моделу закривљеног стакленог омотача, као и алата за оптимизацију стаклених површина, али и подршку у даљем истраживању примене како закривљеног тако и свих других типова стаклених омотача.

- Дефинисањем критеријума за вредновање, омогућено је процењивање појединачних модела на основу добијених резултата, али и њихова међусобне поређења. Квалитет и квантитет овако добијених резултата омогућава утврђивање закључака о квалитативним карактеристикама стакленог омотача како према дефинисаним визуелно-обликовним, тако и у односу на технолошко-економске критеријуме. Овај успостављени метод оцене може да омогући, свим актерима у процесу, процену различитих обликовних и технолошких решења модела закривљених стаклених омотача који су естетски задовољавајући и економски прихватљиви. Овим је потврђена трећа хипотеза.
- Резултати истраживања у виду утврђених технолошких параметара – индикатора могућности и ограничења за производњу закривљеног стакла, могу се користити као полазна основа приликом дефинисања форме, димензија, чврстоће, могућих премаза и визуелних карактеристика закривљеног стакла у односу на одређену технику обликовања.

На основу приказаног прегледа резултата истраживања, научни допринос ове дисертације обухвата:

- Сагледавање историјског развоја геометријски комплексних архитектонских форми и типологија стаклених површи према начину генерисања и типу закривљености,

- Анализа типова стаклених омотача са аспекта релевантног за предмет истраживања, првенствено са аспекта типолошких одредница које се базирају на геометријским, конструктивним и технолошким карактеристикама,
- Систематизација постојећих теоријско-емпиријских сазнања о равном и закривљеном стаклу,
- Формирање модела мапирања процеса пројектовања и конструкције геометријски комплексних стаклених омотача за утврђивање рокова, разумевање улоге различитих актера и активности, као и њихове одговорности и идентификацију различитих захтева током процеса пројектовања и конструкције. Мапа представља основу за развој алата који помажу ефикасном складиштењу, приступу и преносу информација о предложеном моделу закривљеног стакленог омотача, као и подршку у даљем истраживању примене како закривљеног тако и свих других типова стаклених омотача,
- Приказ савремених технологија обликовања закривљеног стакла примењеног у архитектонским објектима,
- Допринос методологији истраживања којим се поставља оквир за емпиријске студије у области реализације геометријски комплексних форми стаклених омотача, а на основу прецизно дефинисаних критеријума.
- Дефинисање критеријума који омогућавају вредновање и процену модела геометријски комплексног стакленог омотача, и представљају основ за успостављање вишекритеријумске оптимизације,
- Формирање модела различитих (оптималних) обликовно-технолошких решења геометријски комплексних стаклених омотача са равним и закривљеним стакленим панелима,
- Закључци који, као резултат валоризације и компаративне анализе добијених резултата, указују на потенцијале и ограничења и формулишу принципе и начине даље примене стакла у омотачу архитектонских објеката геометријски комплексних форми.

Посебан допринос ове дисертације је практична примена истраживања која се огледа у могућностима примене нове технике обликовања хладним савијањем стакла која до сада није била примењивана код нас, као и у томе што се истражени хипотетички модели омотача могу применити у процесу пројектовања и материјализације, како нових објеката, тако и реконструкције постојећих. Самим тим овим истраживањем дат је подстрек за заосталу привреду и указано је на правце даљег развоја с циљем постизања бољег самопозиционирања на тржишту и тиме постизања боље конкурентности.

Нова истраживања која би представљала наставак овог истраживања које је рађено први пут код нас, а које због своје сложености није обухватило и дотичне теме, могу допринети:

- Примени методе вишекритеријумског компромисног рангирања алтернативних решења с циљем избора оптималног решења геометријски комплексног стакленог омотача. Ова метода је погодна у случају постојања више разнородних критеријума, као што је случај са успостављеним критеријумима у овом истраживању, који су често међусобно супростављени, и већег броја алтернатива – решења, где се све друге могућности могу прецизно вредновати према сваком од критеријума. Циљ оптимизације је избор најбољег решења стакленог омотача, односно најбоље варијанте из низа понуђених повољних варијанти у погледу усвојених критеријума и дефинисаних ограничења.
- Експерименталном истраживању обликовања стакла техником хладног савијања.
- Испитивању различитих система потконструкције који су развијени за равно стакло, и могућностима и условима њихове примене у случају закривљеног стакла.
- Испитивању могућности примене конструктивног закривљеног стакла.
- Креирању математичког модела преноса топлоте у закривљеном термоизолационом панелу који би дао везу између геометрије закривљене површине, типа термоизолационог панела и енергетске ефикасности, с циљем његовог коришћења у процесу евалуације енергетске ефикасности зграда са геометријски комплексним стакленим омотачем.

- Формирању стандарда из области конструктивне примене стакла и усаглашавање домаће регулативе са међународном.

Представљено истраживање показало је да могућност реализације геометријски комплексних форми стаклених омотача архитектонских објеката који су одрживи са аспекта обликовања, технологије и трошкова, подразумева кохерентност између геометрије, конструкције и производње и да се може постићи помоћу одређених геометријских принципа у комбинацији са добрим разумевањем карактеристика стакла и техника обликовања.

LITERATURA

- Addington, D. M. and Schodek, D. L. (2005). *Smart Materials and New Technologies*. Oxford: Architectural Press, An imprint of Elsevier.
- Administration Building in Istanbul. (2011). *Detail- Glass Construction*, 1/2, 64-70.
- Alihodžić, R. (2007). *Definisanje primarnih aspekata psihološkog doživljaja*. Ulcinj: Plima.
- Alihodžić, R., Kurtović-Folić, N. (2010). Phenomenology of Perception and Memorizing Contemporary Architectural Form. *Facta Universitatis, Series: Architecture and Civil Engineering*, 8 (4), 425-439.
- Arnhajm., R. (1987). *Umetnost i vizuelno opažanje*. Beograd: Univerzitet umetnosti.
- Arnhajm., R. (1990). *Dinamika arhitektonske forme*. Beograd: Univerzitet umetnosti.
- Architecture of The Spertus Building. Retrieved March 7, 2016 from: <http://www.spertus.edu/about/architecture>
- Asimgil, B. (2007). Perceptual approaches in transparent buildings created with glass material. In: *Proceedings of Glass Performance Days Conference 2007* (pp. 293-295). Retrieved March 12, 2015 from: <http://www.glassfiles.com/articles/perceptual-approaches-transparent-buildings-created-glass-material>
- Achilles, A. & Navratil, D. (2009). *Basic Glass Construction*. Basel: Birkhauser Verlag AG.
- Bagger, A. (2010). *Plate shell structures of glass, Studies leading to guidelines for structural design*. PhD Thesis. Denmark: DTU Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark.
- Baldassini, N., Hutchison, C. (2006). Interdisciplinary Approach to Glass Design Structures. In: *Proceedings of Glass Processing Days China Conference 2006* (pp. 33-36).
- Baldassini, N. (2008). Hidden and Expressed Geometry of Glass, In: *Proceedings of Challenging Glass, Conference on Architectural and Structural Applications of Glass*. Retrieved March 3, 2014 from: www.bk.tudelft.nl/challengingglass

- Baldassini, N. (2009). Glass and Geometry. In: *Glass processing days 2005*. Retrieved March 3, 2014 from: www.glassfiles.com
- Baldassini, N. (2009). New trends in free-form design. In: *Proceedings of Glass Performance Days Conference 2009* (pp. 54-58). Retrieved October 10, 2015 from: <http://www.glassfiles.com/articles/new-trends-free-form-design>
- Baldassini, N. (2009). Geometry, mechanics and the environment: integrated transparent thinking, In: *Proceedings of Glass Performance Days Conference 2009* (pp. 713-717). Retrieved November 10, 2015 from: <http://www.glassglobal.com/gpd/downloads/LaminatedGlass-Baldassini.pdf>
- Basulto, D. (2010). Glass Pavilion at the Toledo Museum of Art / SANAA. Retrieved October 4, 2014 from: <http://www.archdaily.com/54199/glass-pavilion-at-the-toledo-museum-of-art-sanaa-pritzker-prize-2010/>
- Beier, O., Greiner, R., Rinkens, R. (Eds.). (2012). *Glass Time, Technical Manual*. Dudelange: Guardian Europe.
- Belis, J. (Ed.) (2012). *Proceedings of the Student Colloquium COST Action TU0905 Training School "Structural Glass" – Recent, Current & Near-Future Research on Structural Glass*. Ghent: Ghent University, University Press.
- Belis, J., Louter, C., Nijssse, R. & Veer, F. (Eds.). (2013). *Proceedings of Challenging Glass 3-Conference on Architectural and Structural Application Of Glass*. Amsterdam: IOS Press BV.
- Belis, J., Louter, C., & Mocibob, D. (Eds.). (2013). *Proceedings of COST Action TU0905, Mid-term Conference on Structural Glass*. London: Taylor & Francis Group.
- Belis, J., Louter, C., Nielsen, J., Teixidor, C., (2013). Introduction to Glass Buildings. In: *Proceedings Structural Glass Cost Training School* (pp.9-27). Darmstadt: Technische Universitat Darmstadt, COST European Cooperation in Science and Technology.
- Bell, M. And Kim, J. (2009). *Engineered Transparency – The Technical, Visual, and Spatial Effects of Glass*. New York: Princeton Architectural Press.

- Behr, R. and Minor, J. (2006). Structural Design of Architectural Glazing: A State-of-the-Practice Summary. *Journal of Architectural Engineering*, 12 (3), 107.
- Blandini, L., Schmidt, T., Winterstetter, T., Sobek, W.(2012). The Enzo Ferrari Museum, Modena, Engineering a Freeform Skin. In: O. Enghardt (Ed.): *Proceedings of Advanced Building Skins*, (pp. ABS 07). Graz: Institute of Building Construction, University of Technology.
- Bos, F.P., Heijden, van der, T. & Schreurs, P. (2012). The glass sphinx: a massive stacked glass structure. In: F. Bos, C. Louter, R. Nijssse & F. Veer (Eds), *Proceedings of Challenging Glass 3-Conference on Architectural and Structural Application Of Glass*, (pp. 47-56). Amsterdam: IOS Press BV.
- BuildingSMART's adaptation of Business Process Map Notation. Quick Guide Business Process Modeling Notation (BPMN). (2007). Retrieved April 10, 2016 from:
http://www.google.co.uk/url?sa=t&ret=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwie3ZXli87LAhVDMJoKHao2AacQFgg7MAA&url=http%3A%2F%2Fiug.buildingsmart.org%2Fidms%2Fmethods-and-guides%2FQuickGuideToBPMN.pdf%2Fat_download%2Ffile&usg=AFQjCNFZSS8QftdpJvMPiMyzggczMBTiXw&sig2=LEmm1WDk5R6KU25rEINd4A
- Button, D. and Pye, B. (1993). *Glass in Building*. Oxford: Pilkington Glass and Butterworth.
- Vakko Headquarters and Power Media Center /REX. (2010). Retrieved May 12, 2014 from: <http://www.archdaily.com/56149/vakko-headquarters-and-power-media-center-rex-2/>
- Vigener, N. and Brown, M. (06. 01. 2009). *Building Envelope Design Guide-Glazing*. Retrieved October 10, 2015 from:
http://www.wbdg.org/design/env_fenestration_glz.php
- Vollers, K. (2001). *Twist&Build – creating non-orthogonal architecture*. Rotterdam: 010 Publisher.
- Voordt, T. J. M. van der and Wegen, H. B. R. van (2005). *Architecture in Use*. Oxford: Architectural Press, Elsevier.
- Voss, E. (2013). *An Approach to Support the Development of Manufacturable Façade Designs*. Doctoral dissertation. Cambridge: University of Cambridge. Department of Structural and Civil Engineering.

- Voss, E., Jin, Q., Overend, M. (2013). A BPMN-based process map for the design and construction of facades. *Journal of Façade Design and Engineering* 1, 17-29.
- Geometry-Mathematics. (2015). In: *Encyclopedia Britannica*. Retrieved January 10, 2016 from: <http://www.britannica.com/topic/geometry>
- Giedion, S. (1941). *Space, Time and Architecture: The Growth of a New Tradition*. Cambridge, USA: Harvard University Press.
- Glazed Roof at the Victoria and Albert Museum in London (2011). *Detail- Glass Construction*, 1/2, 71-76.
- Goncalves, M. C. (2015). Glass. In: M. C. Goncalves & F. Margarido (Eds.) *Materials for Construction and Civil Engineering – Science, Processing, and Design*, (pp.336-337). Switzerland: Springer International Publishing.
- Gonchar, J. (2008). Nordpark Cable Railway, Architectural Record. Retrieved October 10, 2015 from: <http://www.architecturalrecord.com/articles/8091-nordpark-cable-railway?v=preview>
- Glymph, J., Shelden, D., Ceccato, C., Mussel, J., Schober, H. (2004). A parametric strategy for free-form glass structures using quadrilateral planar facets. *Automation in Construction*, 13, 187–202. Retrieved May 10, 2015 from: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.360.5183&rep=rep1&type=pdf>
- Great Glazing: SickKids Research Tower.(06. 09. 2013). Retrieved October 10, 2015 from: <http://glassmagazine.com/article/commercial/greatglazing-sickkids-research-tower-1311666>
- Green, R. R. (2013). Philosophical questions of designing glass – The need for a structural glass standard. In: J. Belis, C. Louter, D. Mocibob (Eds), *Proceedings of COST Action TU0905, Mid-term Conference on Structural Glass* (pp. 45-52). London: Taylor & Francis Group.
- Group Leroi - Lerobel (2014). Strong in Glass. Retrieved October 10, 2015 from: <http://www.lerobel.be/products.aspx?iSectionID=52&l=EN>
- Guidance Note on the Construction Products Regulation, Version 3*. (2014). London: Construction products association.

- Guidelines for thermally-curved glass in the building industry.* (2011). Troisdorf: Bundesverband Flachglas.
- Dimensional Facades: The Spertus Institute, Chicago. (2013). Retrieved October 17, 2014 from: <https://roofdoorwall.wordpress.com/2013/09/28/dimensional-facades-the-spertus-institute-chicago/>
- Directive of the European Parliament and of the Council on the Energy Performance of Buildings (EPBD).* (2010). 2010/31/EU.
- Eekhout M. and Staaks, D. (2012). Cold twisted glass panels in Engineered transparency. In: *Proceedings of Engineered transparency, International Conference at Glasstec* (pp. 213-222).
- Eigensatz, M., Kilian, M., Schiffner, A. Mitra, N. L., Pottmann, H., Pauly, M. (2010). Paneling Architectural Freeform Surfaces. In: *ACM Transactions on Graphics (TOG) - Proceedings of ACM SIGGRAPH 2010* (pp. 45.1-45.10). Retrieved April 9, 2016 from: http://vecg.cs.ucl.ac.uk/Projects/SmartGeometry/paneling/paneling_sig_10.html
- Englhardt, O. (Ed.). (2012). *Proceedings of International Conference on Building Envelope Design and Technology - Advanced Building Skins*. Graz: Institute of Building Construction, University of Technology.
- Euclids Elements, Introduction. Retrieved October 10, 2015 from: <http://aleph0.clarku.edu/~djoyce/java/elements/elements.html>
- Euroglas/Glas Trosch, Le Partenaire du Verre [Catalog]. (2013).
- Zarnic, R., Tsionis, G., Guitierrez, E., Pinto, A., Geradin, M., Dimova, S. (2007). *Purpose and justification for new design standards regarding the use of glass product in civil engineering works, Support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes* [JRC Scientific and Technical Reports]. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Interview with Enrique Sobejano (2011). *Detail- Glass Construction, 1/2*, 10-18.
- Infinity. (2010). U: *Arhitekton – graditelj iluzija, 04*, 86-95.
- "Infinity" Beograd - građevina koja menja istoriju, ali i vidike. (2009). Preuzeto 10.09.2014. sa: <http://www.ekapija.com/website/sr/page/257474/Infinity-Beograd-građevina-koja-menja-istoriju-ali-i-vidike>

- Jelle, B. P., Hynd, A., Gustavsen, A., Arasteh, D., Goudey, H., & Hart, R. (2012). Fenestration of today and tomorrow: A state-of-the-art review and future. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 96, 1-28.
- Kajtazović A., Rizvić S. (2013). *Грађење стаклом*. Preuzeto 20.02.2016. sa: <http://www.scribd.com/doc/251758860/Gradjenje-staklom>.
- Klein, J., Stern, M., Franchin, G., Kayser, M., Inamura, C., Dave, S., ... Oxman, N. (2015). Additive Manufacturing of Optically Transparent Glass. *3D Printing and Additive Manufacturing, Volume 2, Number 3*. DOI: 10.1089/3dp.2015.0021.
- Kolarevic, B. (Ed.). (2003). *Architecture in the Digital Age – Design and Manufacturing*. New York: Spon Press, Taylor & Francis Group.
- Kosic, T., Krstic-Furundzic, A., Stavric, M. (2012). Geometric Complexity of Freeform Glass Facade Design. In: J. Belis (Ed), *Proceedings of the Student Colloquium COST Action TU0905 Training School “Structural Glass” – Recent, Current & Near-Future Research on Structural Glass* (pp. 35-38). Ghent: Ghent University, University Press.
- Косић, Т., Крстић-Фурунџић, А., Грујић, М. (2015). Економски аспект апликације топлотних пријемника сунчеве енергије на омотач вишепородичне стамбене зграде. У: Т. Мрђеновић. & А. Ђукић (ур.), *Одржи град: дизајн и одрживи развој за паметније и еколошки здраве заједнице* (стр. 256-285). Београд: Архитектонски факултет.
- Kottas, D. (2012). *Architecture and Construction in Glass*. Barcelona: Linksbooks.
- Krstic-Furundzic, A., Kosic, T., Terzovic, J. (2012). Architectural Aspect of Structural Design of Glass Facades/Glass Skin Application. In: F. Bos, C. Louter, R. Nijssse & F. Veer (Eds), *Proceedings of Challenging Glass 3- Conference on Architectural and Structural Application Of Glass*, (pp. 891-900). Amsterdam: IOS Press BV.
- Krstic-Furundzic, A., Kosic, T., Terzovic, J. (2013). Architectural aspect of structural glass roof design. In: J. Belis, C. Louter, D. Mocibob (Eds), *Proceedings of COST Action TU0905, Mid-term Conference on Structural Glass* (pp. 45-52). London: Taylor & Francis Group.
- Krstić-Furundžić, A., Kosić, T., Terzović, J. (2014). Influence of Glass Component Joints on the Structural Glass Facade Design. In: E. Vanista Lazarevic, A. Krstic-Furundzic, A. Djukic, M. Vukmirovic (Eds), *Proceedings of*

1th International Academic Conference on Places and Technologies (pp.709-719). Belgrade: Faculty of Architecture, University of Belgrade.

Krstic-Furundzic, A., Kosic, T., Terzovic, J. (2015). Chapter 17 - Glass Panel Supporting Systems And Design Of The Structural Glass Façade. In: E. Vanista Lazarevic, M. Vukmirovic, A. Krstic-Furundzic, A. Djukic (Eds), *Keeping up with Technologies to Improve Places*, (pp.189-208). Newcastle upon Tyne: Cambridge Scholars Publishing.

Krstić-Furundžić, A., Kosić, T. (2016). Assessment of energy and environmental performance of office building models: A case study. *Energy and buildings*, 115, 11-22.

Leduc, N., Raynaud, J., Badassini, N. (2012). Project for the Eiffel Tower: Constructive Geometry. In: Belis, Louter, Nijssse & Veer (Eds), *Proceedings of Challenging Glass 3-Conference on Architectural and Structural Application of Glass*, (pp.93-100). Amsterdam: IOS Press BV.

Leon Battista, A. (1970). *On Painting* (Translated with Introduction and Notes by J. R. Spencer). New Haven: Yale University Press. (First published: 1435-1436, first printed: 1956). Retrieved May 10, 2016 from: <http://www.noteaccess.com/Texts/Alberti/Intro1.htm>

Linear Perspective in Painting. Retrieved January 22, 2016 from: <http://www.visual-arts-cork.com/painting/linear-perspective.htm#types>

Liu, Y., Xu, W., Wang, J. Zhu, L., Guo, B., Chen, F. Wang, G. (2011). General Planar Quadrilateral Mesh Design Using Conjugate Direction Field. In: *ACM Transactions on Graphics (TOG) - Proceedings of ACM SIGGRAPH Asia 2011* DOI:10.1145/2070781.2024174.

Lomholt, I. (2014). Hotel Renaissance Paris Wagram. Retrieved October 20, 2015 from: <http://www.e-architect.co.uk/paris/renaissance-paris-wagram-hotel>

Lomholt, I. (2016). Nordpark Cable Railway Innsbruck. Retrieved April 10, 2016 from: <http://www.e-architect.co.uk/austria/nordpark-zaha-hadid>

Louter, C., Bos, F., Belis, J. & Lebet, JP. (Eds.). (2014) *Proceedings of Challenging Glass 4-COST Action TU0905 Final Conference*. Leiden: CRC Press/Balkema is an imprint of the Taylor & Francis Group.

Malaguzzi, F. (2013). A splinter piercing the heart of London. Retrieved September 10, 2015 from:

http://www.permasteelisa.com/media/documents/attachment/2013-FinestraA_ENG.pdf

Marzo, J. M. & Quintans, C. (2009). *Tectonica 3- Architecture, Technology and Construction Monographs: Glass*. Madrid: ATC Ediciones, S.L.

Марчетић, Д. (03.5. 2014). Лични интервју.

MacFairlane, T. (16. 5. 2014). Lični intervju.

McLeod, V. (2010). *Detail in Contemporary Glass Architecture*. London: Laurence King Publishing.

Мирковић, М. (10. 4. 2014). Лични интервју.

Mitchell, R., Kohler, C., Curcija, D., Zhu, L., Vidanovic, S., Czarnecki, S. and Arasteh, D. (2016). *Therm 7/ Window 7 NFRC Simulation Manual*. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory.

Molter, F. & Wolf, T. (2011). Glass-shaping Techniques in Building. *Detail- Glass Construction, 1/2*, 80-86.

Musovic, A. (2013). Staklo – AGC Glass Europe. Retrieved May 20, 2015 from: www.arhitekt.unizg.hr/SU/.../2013/.../ZG_3_13_Staklo_AM.pdf

Несторовић, М. (2000). *Конструктивни системи, принципи конструисања и обликовања*. Београд: Архитектонски факултет.

Neugebauer, J. (2009). A Design Concept for Bent Insulated Glasses for the Reading Room of the Berlin State Library. In: *Proceedings of Glass Performance Days Conference 2009* (pp. 244-249). Retrieved October 10, 2015 from: <http://www.glassfiles.com/articles/design-concept-bent-insulated-glasses-reading-room-berlin-state-library>

Neugebauer, J. (2012). Big Daylight funnels made of conically shaped insulated glass, In: *Proceedings of Engineered transparency, International Conference at Glasstec* (pp. 407-413).

Neugebauer, J. (2013). Applications for curved glass. In: Belis, Louter & Mocibob (Eds), *Proceedings of COST Action TU0905, Mid-term Conference on Structural Glass* (pp. 69-76). London: Taylor & Francis Group.

Neugebauer, J. Penkova N., Iliev V. (2013). Insulated Glass and Curved Glass. In: *Proceedings Structural Glass Cost Training School* (pp.71-104).

Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, COST European Cooperation in Science and Technology.

Neugebauer, J. (03. 5. 2014). Lični intervju.

New Perspectives in Architectural Glass. Pilkington Architectural Glass Product Catalog. Retrieved September 7, 2014 from: <http://www.buildsite.com/pdf/pilkington/Pilkington-Architectural-Glass-Product-Catalog-Product-Catalog-346689.pdf>

Nieri, G. & Trösch, E. (2014). Long span glass structures. In: C. Louter, F. Bos, J. Belis & J.P. Lebet (Eds), *Proceedings of Challenging Glass 4 & COST Action TU0905 Final Conference* (pp. 617-623). London: Taylor & Francis Group.

Nijsse, R. (2009). Corrugated glass as improvement to the structural resistance of glass. In: A. Domingo & C. Laaro (Eds), *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS)* (pp. 3052-3064). Valencia: Universidad Politecnica de Valencia.

Nijsse, R. (2013). Structural Glass Facades, Chapter B1.2, Action on glass component, in Educational Pack Presentations [Power Point presentation]. Retrieved May 18, 2014 from: <http://www.glassnetwork.org> (for members of Action TU0905 Structural Glass).

Nordpark Cable Railway, Zaha Hadid Architects. (2008). Retrieved October 12, 2014 from: <http://www.arcspace.com/features/zaha-hadid-architects/nordpark-cable-railway/>

Overend, M., Vandebroek, M., Honfi, D. (2013). General Design Guidelines. In: *Proceedings Structural Glass Cost Training School* (pp.173-199). Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, COST European Cooperation in Science and Technology.

Overend, M. (20. 3. 2014). Lični intervju.

Paoletti, I. (2005). *Costruire le forme complesse*. Milano: Clup

Patterson, M. (2011). *Structural Glass Facades and Enclosures*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

Penkova, N. (2013). Thermal load analysis of single glass and insulating glass units, Chapter B1.1, Action on glass component, in Educational Pack Presentations [Power Point presentation]. Retrieved December 10, 2014

from: <http://www.glassnetwork.org> (for members of COST Action TU0905 Structural Glass).

- Penkova, N., Iliev, V., Neugebauer, J. (2013). Thermal-mechanical behaviour of insulating glass units. In: Belis, Louter & Mocibob (Eds), *Proceedings of COST Action TU0905, Mid-term Conference on Structural Glass* (pp. 295-303). London: Taylor & Francis Group.
- Penkova N. and Neugebauer, J. (2014). Thermal load analysis of cylindrically bent insulating glass units. In: C. Louter, F. Bos, J. Belis & J.P. Lebet (Eds), *Proceedings of Challenging Glass 4 & COST Action TU0905 Final Conference* (pp. 123-132). London: Taylor & Francis Group.
- Peters, S. (Ed). (2013). *Intelligent Glass Solutions*. Issue 4. London: Intelligent Publications Limited.
- Pottmann, H., Asperl, A., Hofer, M., Kilian, A. (2007). *Architectural Geometry*. E. Bently (Ed). Pennsylvania: Bentley Institute Press.
- Powell, K. (2011). *21st Century London – The New Architecture*. London: Merrell Publishers Limited.
- Правилник о енергетској ефикасности зграда* (2011). Београд: Службени гласник РС (61/2011).
- Preiser, W. F.E. and Vischer, J. C. (2005). *Assessing Building Performance*. Oxford: Elsevier.
- Proceedings of the Glass Performance Days Conference*. (2011). Tampere: Glass Performance Days, Glaston Finland.
- Raynaud, J. (2014). Smooth free-form glass skins. In: C. Louter, F. Bos, J. Belis & J.P. Lebet (Eds), *Proceedings of Challenging Glass 4, Cost Action TU0905 Final Conference* (pp. 57-66). Leiden: CRC Press/Balkema.
- RIBA Plan of Work (2013). Retrieved October 8, 2014 from: www.ribaplanofwork.com
- Richards, B. (2006). *New Glass Architecture*. London: Laurence King Publishing.
- Rogan, D. (20. 3. 2014). Lični intervju.
- Rogers, E. (2014). From Design to Testing to Installation, Experts Weigh in on Cold-Formed Glass. Retrieved December 12, 2015 from: http://www.glass.com/USGlass/2014/March/ColdPlay_Feature.htm

- Rubel, C. (2014). Insulating glass with flexible spacer in architectural glass applications. In: C. Louter, F. Bos, J. Belis & J.P. Lebet (Eds), *Proceedings of Challenging Glass 4, Cost Action TU0905 Final Conference* (pp. 305-310). Leiden: CRC Press/Balkema.
- Saksala, M. (2005). Extraordinary Shapes with Ordinary Costs. In: *Proceedings of Glass Processing Days Conference 2005* (pp. 371-373). Retrieved October 10, 2015 from: <http://www.glassfiles.com/articles/mouldless-glass-bending-and-tempering-extraordinary-shapes-ordinary-costs>
- Schittich, C., Stalb, G., Balkow, D., Schuler, M., Sobek, W. (2007). *Glass Construction Manual* (2nd revised and expanded edition). Munich: Birkhauser, Edition Detail.
- Sobejano, E. (2011). Architecture must react to what is already there – a conversation with Enrique Sobejano. *Detail- Glass Construction*, 1/2, 10-18.
- Spertus Institute for Jewish Learning and Leadership. (2016). In: *Wikipedia*. Retrieved February 10, 2016 from: https://en.wikipedia.org/wiki/Spertus_Institute_for_Jewish_Learning_and_Leadership
- Spring, M. (2007). Innsbruck cable car stations: Zaha Hadid lifts the spirits. Retrieved October 4, 2015 from: <http://www.building.co.uk/innsbruck-cable-car-stations-zaha-hadid-lifts-the-spirits/3100491.article>
- Stavrić, M. (2013). Free Form Building Envelope, Chapter C, Architectural Geometry, in Educational Pack Presentations [Power Point presentation]. Retrieved December 17, 2015 from: <http://www.glassnetwork.org> (for members of COST Action TU0905 Structural Glass).
- Stavrić, M., Manahl, M. & Wiltsche, A. (2014). Discretization of double curved surface. In: C. Louter, F. Bos, J. Belis & J.P. Lebet (Eds), *Proceedings of Challenging Glass 4, Cost Action TU0905 Final Conference* (pp. 133-140). Leiden: CRC Press/Balkema.
- Standard Srbija. (2013). *Građevinsko staklo — Proizvodi od natrijum-kalcijum silikatnog stakla — Deo 2: Flot-staklo* (SRPS EN 572-2:2013). Beograd: Službeni glasnik (106/13).
- Stephan, S., Sánchez-Alvarez, J., Knebel, K. (2004). Reticulated Structures on Free-Form Surfaces. In: *Proceedings of IASS Symposium Shell and Spatial Structures, From Models to Realization*. Retrieved October 16, 2014

from: <http://docslide.us/documents/reticulated-structures-on-free-form-surfaces-soeren-stephan-et-al-iass-2004.html>

Schneider, J., and Weller, B. (Eds). (2012). *Proceedings of Engineered transparency, International Conference at Glasste*. Technische Universität Darmstadt and Technische Universität Dresden.

Schneider, J. (Ed.). (2013) *Proceedings Structural Glass COST Training School*. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt.

Schober, H., Bergermann, S., und Partner. (2006). *Freeform Glass Structures*. Retrieved January 22, 2014 from: http://www.formpig.com/pdf/formpig_freeform%20glass%20structures_schober.pdf

Schumacher, P. (2012). *The Autopoiesis of Architecture – A New Agenda for Architecture*. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd.

Timm, C. and Chase, J. (2014). Thermally curved glass for the building envelope. In: C. Louter, F. Bos, J. Belis & J.P. Lebet (Eds), *Proceedings of Challenging Glass 4 & COST Action TU0905 Final Conference* (pp. 141-149). London: Taylor & Francis Group.

Tuba, C. (2007). *An Appraisal of Curvilinear Forms in Architecture with an Emphasis on Structural Behaviour: A Case Study on Channel Tunnel Railway Terminal at Waterloo*. Master Thesis. Ankara: The Middle East Technical University. The Graduate School of Natural and Applied Sciences.

Thermal Performance of Windows, Doors and Shading Devices — Detailed Calculations, ISO/DIS 15099 (2000).

The Overall Redevelopment of the 1st floor of the Eiffel Tower. (2011). Retrieved April 8, 2015 from: http://www.toureiffel.biz/images/PDF/press%20kit_overall_redevelopment_of_the_1st_floor_of_the_eiffel_tower.pdf

Feijen, M., Vrouwe, I., Thun, P. (2012). Cold-Bent Single Curved Glass; Opportunities and Challenges in Freeform Facades. In: Belis, Louter, Nijssse & Veer (Eds), *Proceedings of Challenging Glass 3-Conference on Architectural and Structural Application of Glass*, (pp.829-836). Amsterdam: IOS Press BV.

- Feldmann, M., Kasper, R., Abeln, B., Cruz, P., Belis, J., Beyer, J.,... Zarnic, R. (2014). *Guidance for European Structural Design of Glass Components - Support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocode*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Field, J. V., (1997). *The Invention of Infinity: Mathematics and Art in the Renaissance*. Oxford: Oxford University Press. Retrieved May 7, 2014 from:
https://books.google.rs/books?id=Awl6FO_5AvgC&pg=PA183&lpg=PA183&dq=Kepler+unified+the+conic+sections.&source=bl&ots=rS7kv4CA8p&sig=isJFbJ8bdDsk0bFDXkJjcPxIw&hl=en&sa=X&ved=0CBsQ6AEwAGoVChMIpL_elNKNyAIVBAYsCh0y7QIR#v=onepage&q=Kepler%20unified%20the%20conic%20sections.&f=false
- Fildhuth, T. & Knippers, J. (2009). Double Curved Glass Shells from Cold Bent Glass Laminates. In: *Proceedings of Glass Performance Days Conference 2011* (pp. 316-321). Retrieved September 7, 2015 from:
https://www.academia.edu/26070318/Double_Curved_Glass_Shells_from_Cold_Bent_Glass_Laminates
- Florides, G. (2016). *Space Heating and Cooling systems, COST Action Training School Presentations*. Retrieved May 10, 2016 from: <http://www.tu1205-bists.eu/> (for the members of COST Action TU1205 Building Integrated Solar Thermal Systems).
- Haldimann, M., Luible, A., Overend, M. (2008). *Structural Use of Glass*. Zurich: IABSE-AIPC-IVBH, ETH Zurich.
- Hambleton, D., Howes, C., Hendricks, J., Kooymans, J. (2009). Study of Panelization Techniques to Inform Freeform Architecture. In: *Glass processing days 2005*. Retrieved October 20, 2015 from:
www.glassfiles.com
- Hill, J. (2006). *Immaterial Architecture*. Abingdon, Oxon: Routledge, Taylor & Francis Group.
- Hof, P. & Oechsner, M. (2013). General technical approval for curved annealed and curved tempered glass in Germany. In: Belis, Louter & Mocibob (Eds), *Proceedings of COST Action TU0905, Mid-term Conference on Structural Glass* (pp. 183-188). London: Taylor & Francis Group.
- CAD software history, 1970s, Internal to international standard. Retrieved April 12, 2016 from: <http://www.cadazz.com/cad-software-history-1970s.html>

- Canopy, Z. (2006). Octatube. Retrieved October 10, 2015 from: <http://www.octatube.nl/en/projects/20/zuidpoort-canopy/>
- Carpó, M. (Ed.). (2013). *The Digital Turn in Architecture 1992-2012*. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons Ltd.
- Crisinel, M., Eekhout, M., Haldimann, M. and Visser, R. (Eds.). (2007). *Proceedings of the Glass & Interactive Building Envelopes – EU COST C13 Final Report*. Amsterdam: IOS Press.
- Cricursa – Inspiring Glass Solutions. (2016). Retrieved April 10, 2016 from: <http://www.cricursa.com/segur/home.aspx>
- Čikić, J. (2007). *Konstruktivna primena stakla u arhitekturi*. Beograd: Građevinska knjiga.
- Wallner, J. & Pottmann, H. (2011). Geometric Computing for Freeform Architecture. *Journal of Mathematics in Industry 2011, 1:4*. DOI: 10.1186/2190-5983-1-4. Retrieved April 4, 2016 from: <http://www.mathematicsinindustry.com/content/1/1/4>
- Warmglass, The Basic Fusing and Slumping Process. (2014). Retrieved April 8, 2014 from: <http://www.warmglass.com/the-basic-fusing-and-slumping-process/>
- WAF Awards 2010, World Architecture Festival Awards. (2010). Retrieved September 8, 2014 from: <http://www.e-architect.co.uk/awards/waf-awards-shortlist-2010>
- Weber, F. (2009). Curved glass structures. In: *Proceedings of Glass Performance Days Conference 2009* (pp. 375-380). Retrieved October 4, 2013 from: <http://www.glassfiles.com/articles/curved-glass-structures>
- Wigginton, M. (2002). *Glass in Architecture*. London: Phaidon Press Ltd.
- Window Technologies: Properties Primer, Transmittance. (4.3.2015). Retrieved March 5, 2015 from: <http://www.commercialwindows.org/transmittance.php>
- White, R. L. (2007). *Glass as a Structural Material*. Master Thesis. Manhattan, Kansas: B.S., Kansas State University, Department of Architectural Engineering and Construction Science.
- Wurm, J. (2007). *Glass Structures: Design and Construction of Self-supporting Skins*. Basel: Birkhauser Verlag AG.

Zuidpoort Canopy. (2006). Retrieved October 10, 2015 from:
<http://www.octatube.com/en/projects/20/zuidpoort-canopy/>

Прилог 1

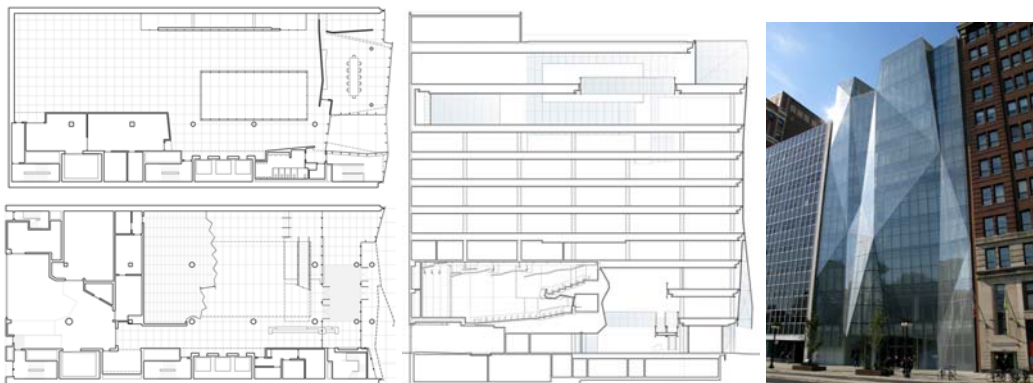
П.1 Анализа примера/студије случаја из света и Србије

П.1.1 Студије случаја термичког стакленог омотача геометријски комплексних форми са равним стакленим елементима

Пример/Студија случаја 1 – Институт за јеврејске студије Spertus, Чикаго

Контекст

Стакло као материјал и различите технологије његовог обликовања данас се све чешће примењују на фасадама објеката, пажљиво водећи рачуна о детаљима, с циљем да се подржи жељени израз архитектонског омотача, као и открије унутрашња динамика и енергија која подразумева различите садржаје. Тако и у случају кристалне структуре на прометној локацији Мичиген авеније у Чикагу која представља нови дом Спертус Института за јеврејске студије у Чикагу дизајниран од стране чикашког архитектонског бироа *Krueck+Sexton Architects*. Смештена између објеката из 19. века пројектованих од стране архитеката као што су Бурнхам (Burnham) и Саливен (Sullivan) подсећа на изузетно обликован "дијамант смештен између камених зидова". Њена динамична наборана стаклена фасада симболизује светлост (Слика П1.1), како ону стварну којој дозвољава да се шири кроз узак фронт објекта, тако и метафорички као одраз јеврејске религије и традиције. Заједно са логоом института који карактерише пламен и фраза "Yehi", што значи "нека буде светлост", представљају образовно и духовно просветљење које се постиже кроз учење ("Spertus Institute for Jewish Learning and Leadership", 2015).



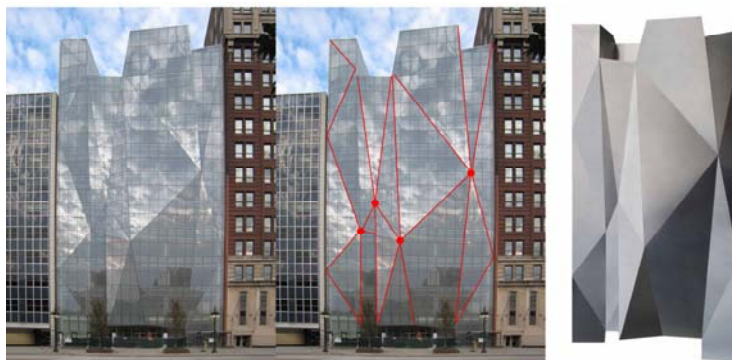
Слика П1.1. Основа 1. и 10. спрата, пресек и изглед стаклене фасаде Спертус института за јеврејске студије, Чикаго, (Извор: Преузето са <http://www.archdaily.com/39707/spertus-institute-of-jewish-studies-krueck-sexton-architects/>, 10. 4. 2015)

У есеју из 1989. године, критичар архитектуре Мартин Повли (Martin Pawley) препричава разговор са инжењером Питером Рајсом (Peter Rice) поредећи грађевинску индустрију са другим индустријама: *"Аутомобили и авиони нису дизајнирани, они су побољшани, а дизајнери аутомобила су врло обични људи. Истина је да све своје проблеме разлажу у детаљне изводљиве задатке и затим полако унапређују свој производ. Једина ствар у грађевинарству која издалека подсећа на индустрију аутомобила је америчка индустрија зид завеса, али далеко је иза"* ("Dimensional Facades: The Spertus Institute", 2013). Ово поређење између аутомобила и зид завеса, заиста је очигледно. Као и код аутомобила, за пројектовање стаклених зид завеса архитектонских објеката неопходно је одговорити на захтеве одређеног скупа критеријума за пројектовање: првенствено да обезбеђују сигурност, регулишу утицај животне средине на унутрашњост објекта, да лепо изгледају и у већини случајева да су обешене вертикално, изван конструкције објекта. То показује да се проблеми савремених стаклених фасада заиста могу разложити на појединачне сегменте који, сваки за себе, представља посебан задатак у погледу мењања, како перформанси стакла, тако и алуминијумске и челичне потконструкције која га носи. То доказује да је њихово обликовање резултат постепеног унапређења, док се њихова лепота огледа у великој префињености детаља.

У том контексту, стаклена зид завеса Спертус института представља напредак, иако је свеобухватни израз фасаде веома упечатљив. Архитекте су креирале геометријски нерегуларну, преломљену фасаду која обликовно представља "драгуљ" авеније Мичиген, док у погледу функционалности представља конвенционално решење у виду "заптивене кутије" чија је комплексна геометрија поједностављена праволинијском мрежом потконструкције.

Геометрија и визуелни/обликовни потенцијали

Геометрија фасаде је јединствена јер је већи део површине развијен тродимензионално у виду равне наборане структуре, што резултује одређеним бројем појединачних стаклених елемената у облику паралелограма, за разлику од осталих који су у облику правоугаоника. Геометрију фасаде формирају четири главна врха од којих је сваки повезан са другим врхом и са тачкама које се налазе на ивицама фасаде (Слика П1.2).



Слика П1.2. Геометрија и модел стаклене фасаде, (Извор: Преузето са <http://design.epfl.ch/piraeus/tag/spertus-institute>, 10. 4. 2015)

Камен и теракота, материјали околних фасада зграда у низу, формирају чврст рам-оквир уске стаклене фасаде и управо је то динамика која приморава на савијање и покретање стакла (Слика П1.3). Истовремено, просечна величина сваког од појединачних панела стаклене фасаде у складу је са стандардном величином прозора у зградама дуж Мичиген авеније ("Spertus Institute for Jewish Learning and Leadership", 2015). Неколико елемената фасаде излазе из фронталне равни суседних објеката омогућавајући посетиоцима поглед дуж авеније. Посматрајући фасаду, она осликава фрагменте дрвећа, улице и неба, с обзиром на различите положаје преломњених равни. С друге стране, својом транспарентношћу наглашава јавни и приступачан карактер објекта, привлачећи посетиоце да уђу и истраже образовну и културну понуду института.

Конструктивни систем, везе и димензије стаклених елемената

Специјално дизајнирана алуминијумска потконструкција је распона од 4,20m од прве до осме етаже и 6,4m на деветој и десетој етажи.



Слика П1.3. Изглед, пресек и детаљ потконструкције стаклене фасаде Спертус института (Извор: Преузето са <http://design.epfl.ch/piraeus/tag/spertus-institute>, 10. 4. 2015)

Права лепота детаља огледа се у форми вертикалне потконструкције. Пружајући се вертикално под различитим угловима, елегантно обликована у форми "У" попречног пресека (Слика П1.3) подсећа на сребрни елемент возне пруге. Потконструкција је довољно робусна и флексибилна, с циљем подржавања комплексне геометрије. Сваки елемент се нежно савија тако што врх "У" форме има конкавни радијус да прихвати различите хоризонталне углове рамовске конструкције стаклених панела ("Dimensional Facades: The Spertus Institute", 2013). Блага закривљеност потконструкције представља супротност тестерасто-шиљатој спољашњости фасаде.

Тип застакљења и техника обликовања стакла

Наборана структура стаклене фасаде састоји се од 726 стаклених елемената од којих је 556 истог облика и величине (1,32 x 2,13 m). Термоизолационо стакло дебљине 35 mm састоји се од спољашњег једноструког каљеног стакла од 10 mm са малим садржајем гвожђа, 13 mm ваздушног простора и 12 mm ламинираног унутрашњег стакла (2 x 6 mm) ("Architecture of The Spertus Building", 2015).



Слика П1.4. Изглед стаклених панела фасаде Спертус института из екстеријера и ентеријера
(Извор: Преузето са http://www.flickrriver.com/photos/atelier_flir/sets/72157603513965733/,
11. 4. 2015)

На стакленим панелима (позицији 2 - унутрашњој површини спољашњег стакла) примењен је ниско-емисиони премаз високих перформанси као и керамички премаз у виду тачкица беле боје величине 6,5 mm смањујући транспарентност стакла за 40% (Слика П1.4), који заједно са унутрашњим засторима доприносе контроли топлотних добитака и унутрашњег бљеска ("Architecture of The Spertus Building", 2015).

Специфичности

Објекат подразумева много елемената одрживог дизајна као и *LEED* сребрну сертификацију што је у складу са јеврејским начелима "не уништавај и не стварај отпад" (*bal tashchit*) и "поправи свет" (*tikkun olam*). Коришћењем дневног осветљаја кроз динамичку стаклену фасаду, енергетски ефикасног осветљења и вентилације према потреби постигнута је редуција у потрошњи енергије од 29%, резултујући у смањењу емисије CO_2 за скоро 550 тона. Квалитет унутрашњег ваздуха је осигуран коришћењем здравих материјала, ефикасном филтрацијом и контролом влажности ваздуха обезбеђујући, како благостање запослених и посетилаца, тако и очување значајне архиве. На врху зграде налази се 620 m^2 зеленог крова под вегетацијом који апсорбује загађеност ваздуха, смањује количину атмосферске воде и потребе за хлађењем лети ублажујући ефекат топлотног острва - урбани феномен који узрокује повећање температуре у граду од $2\text{-}10^\circ\text{C}$ у односу на околне руралне области. Нажалост овај нови интригантни архитектонски елемент је недоступан јавности ("*Architecture of The Spertus Building*", 2015).

Сличан концепт наборане стаклене фасаде примењен је на објекту *Basque Health Department Headquarters* у Билбаоу, Шпанија где овај начин обликовања фасаде омогућио вишеструке погледе са радних места на урбано окружење (Слика П1.5). Фасада у виду зид завесе део је двоструког омотача и представља спољашње једноструко застакљење терасе панелима са алуминијумским рамом и ламинираним рефлектујућим стаклом дебљине 12 mm ($2 \times 6 \text{ mm}$).



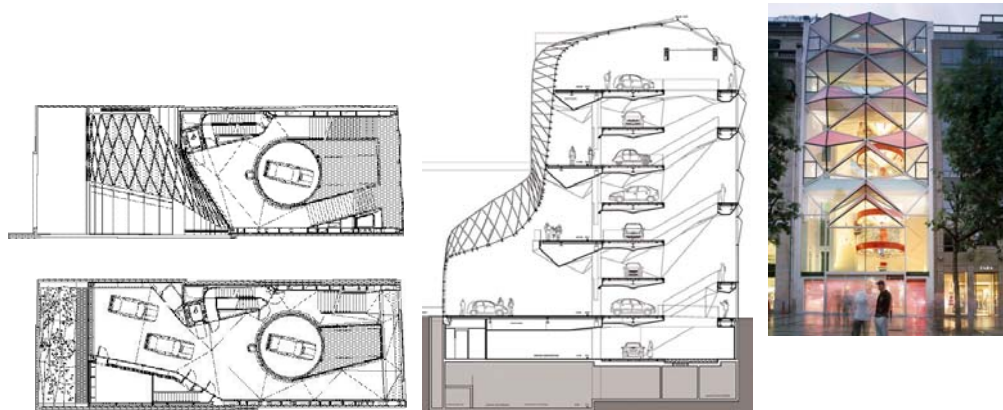
Слика П1.5. Изглед и пресек фасаде, основа и пресек детаља везе стаклених панела и потконструкције, и основа детаља везе панела под углом од 170° , објекат *Basque Health Department Headquarters*, Билбао; (Извор: McLeod, 2010: 166)

Пример/Студија случаја 2 – Салон аутомобила "Citroen", Париз

Контекст

Ауто салони су некада представљали чуда савременог света, велике храмове технолошког напретка, а Цитроен као компанија увек окренута будућности, међу првима прихвата потенцијале савремених архитектонских технологија за пројекат новог изложбеног простора својих производа.

Нови Цитроенов салон аутомобила на Јелисејским пољима (Champs Elysee) у Паризу површине 1.200 m², на локацији на којој се налази од 1920. год., представио је изражајну и помало драматичну стаклену фасаду која укључује иконички Цитроенов знак уграђен у дизајн фасаде. На овај начин познати бренд представљен је фасадом чији помало храбри дизајн одражава дух креативности и иновативности карактеристичан за филозофију Цитроенове компаније. Нови објекат, познат као "C42" пројектован је од стране архитекте Мануеле Готранд (Manuelle Gautrand) након интернационалног конкурса (McLeod, 2010). С обзиром на чињеницу да је основна функција објекта салон аутомобила, и жељу пројектанта да се тај основни циљ изрази кроз форму самог простора, форма омотача зграде инспирисана је формом аутомобила познатог бренда. Као такав, објекат није обликован на конвенционалан начин са предњом и задњом фасадом и кровом, већ је извајан помоћу стаклених закривљених и флуидних површина креирајући јединство између места и производа који представља и истовремено обликујући комплексан ентеријер (Слика П1.6).



Слика П1.6. Основа приземља и 2. спрата, пресек и изглед објекта (стаклене фасаде) Цитроеновог салона, Париз, (Извор: McLeod, 2010: 122, 123)

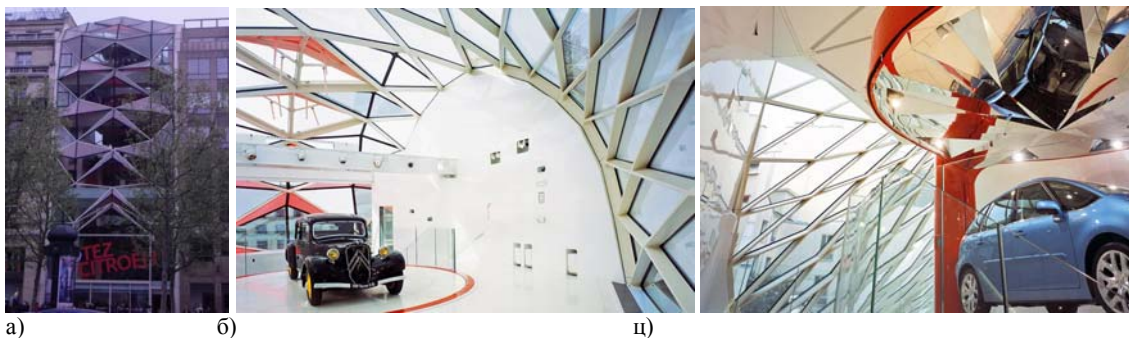
Сам архитекта описује фасаду као алегорију аутомобилског дизајна због своје 86 тона тешке фасаде коју чине челични профили и "латице од стакла" која

затвара простор, а истовремено је слободно-стојећа и само-носећа са својом висином од 30 m, као што и каросерија аутомобила представља структурални елемент (McLeod, 2010).

Главну одлику ентеријера представља централни стуб - "јарбол" који се пружа целом висином објекта као велики дисплеј у виду осам кружних ротирајућих платформи пречника 6 m на којима су изложени аутомобили а чији плафон је обложен огледалима који својом рефлексијом мултиплицирају детаље изложених модела аутомобила (Слика П1.7б и ц). Поред наглашеног присуства модела аутомобила, овај елемент наглашава и вертикалност простора и ствара узбудљив осећај лакоће. Посетиоци се спроводе кроз објекат низом степеница и рампи које спирално круже око платформи, више у маниру музеја, омогућавајући уживање како у аутомобилима, тако и у изузетном погледу на Јелисејска поља.

Геометрија и визуелни/обликовни потенцијали

На нивоу улице, фасада је минималистичка, показујући извесну строгост са својим равним стакленим елементима, али увођењем познатог *chevron* знака од прве етажне почиње оригиналан дизајн који подразумева различите форме панела у виду ромба, троуглова и оригиналне ознаке брэнда. Како се поглед диже све више ка врху зграде, стаклена фасада постаје све више тродимензионална где панели попримају форму стаклених призми додајући дубину самој форми фасаде. На крају сам врх објекта представља велику стаклену скулптуру чија геометрија подсећа на оригами. Знак брэнда је и даље присутан, али мање дефинисан, скоро не приметан у укупној форми фасаде. На врху зграде, стаклена фасада прелази у комплексну, у потпуности закривљену површину ромбоидне конструкције, спуштајући се ка дворишту (Слика П1.7).

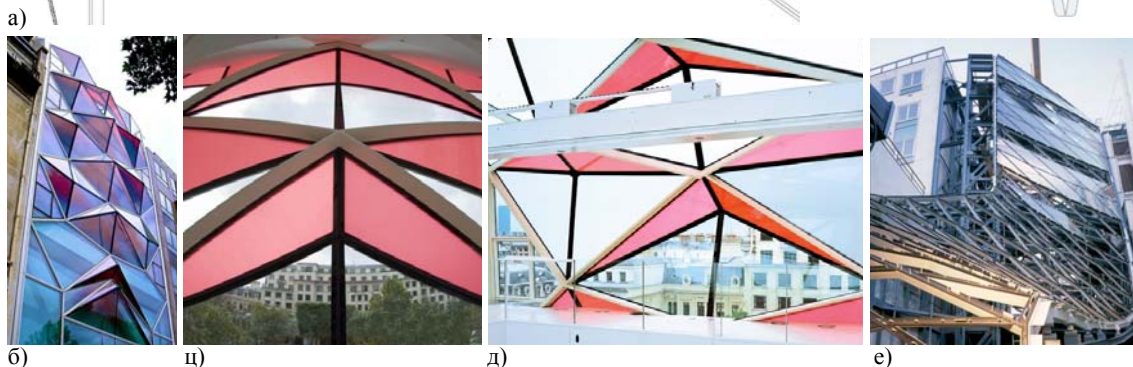


Слика П1.7. Изглед главне фасаде и поглед из ентеријера на врх и дворишну фасаду Citroëновог салона (Извор: а) Аутор, 2012; и б) и ц) Преузето са <http://www.e-architect.co.uk/paris/c42-citreon>, 12. 4. 2015)

Видљивост и светлост су доминантне карактеристике дизајна фасаде. Током дана улична фасада пропушта сунчеву светлост повећавајући осећај простора и истичући рефлектујуће површине. Ноћу, објекат је осветљен у игри светлости у препознатљивим нијансама црвене и беле боје (Слика П1.8б, ц, и д).

Конструктивни систем, везе и димензије стаклених елемената

Основну конструкцију уличне фасаде чини потконструкција у виду ромбова која носи стаклене панеле, а која је прихваћена по ободу фасаде. Ромбови чине базу испупчене форме “набора” формираних помоћу троугаоних елемената различитих димензија чија структурална веза је покривена завршним профилем, омогућавајући континуитет стаклене површине. Како конструкција није прихваћена на нивоу међусpratне таванице, што ово решење чини изузетним, стиче се утисак у потпуности самостојеће фасаде. Ромбоидна конструкција дворишне фасаде је разапета између ивичних челичних носача (Слика П1.8е).



Слика П1.8. Наборана, континуална фасада Цитроеновог салона: а) Детаљ пресека фасаде и моста на мезанину, и типични детаљи везе; б) Изглед главне фасаде; ц) и д) Изглед главних челичних профила потконструкције; и е) Монтажа конструкције дворишне фасаде; (Извор: а), ц) и д) McLeod, 2010: 122-125; б) и е) Преузето са <http://www.pinterest.com/manuelle-gautrand/>, 14. 4. 2015)

Челични *V*-профил облика и доминантне димензије од 15cm обликован је да сакрије алуминијумски ужљебљени профил различите форме који омогућава прихватање стаклених панела под различитим угловима (Слика П1.8а). За монтажу геометријски комплексне фасаде било је потребно 5 месеци (McLeod, 2010).

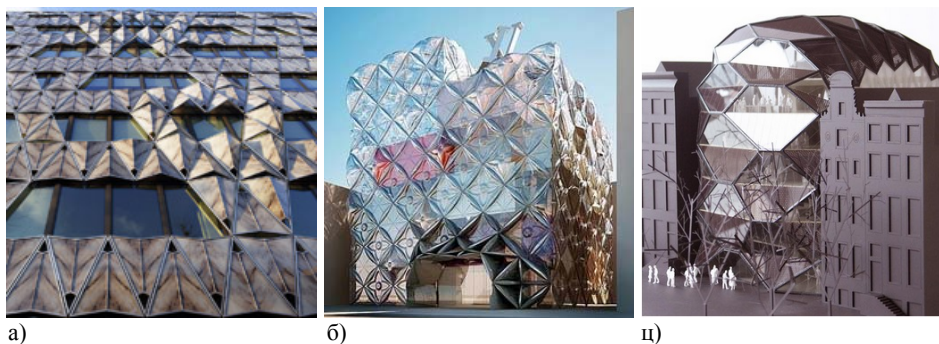
Тип застакљења и техника обликовања стакла

Геометријски комплексну фасаду чине равни термоизолациони панели у форми правоугаоника, троуглова и ромбоида. Термоизолациони панели формиран су од 2 ламинирана стакла и простором између испуњеним ваздухом (2 x 6 + 20 + 2 x 6 mm).

Првобитна идеја црвене боје стакла као ознаке самог брэнда, која би претерано нагласила фасаду објекта је модификована применом специјалног филтера унутар самих термоизолационих панела чиме је постигнут знатно светлији тон црвене боје, посматрано из екстеријера, који не нарушава историјски контекст улице Елисејска поља, док је у ентеријеру видна оригинална боја црвеног и белог прозачног филма на стакленим панелима који симболизују Цитроенов знак. Црвена боја стакла и посебан филтер унутар стаклених панела додатно смањују топлотне добитке крејирајући истовремено прозачно-бисерну атмосферу унутар објекта.

Специфичности

Спектакуларан, футуристички салон има панорамски лифт који води посетиоце до последње етажe омогућавајући изванредан панорамски поглед кроз скулптурални врх континуалне стаклене фасаде на авенију, реку и оближње баште. Ова узбудљива форма Цитроеновог салона може се описати као нешто између објекта и ликовне скулптуре, што такође представља једну од препознатљивих и изузетних одлика рада пројектанта Мануел Готранд (Слика П1.9), чији фокус је, такође, однос између старог и новог, између споља и унутра, као и "живахан израз" самих објеката, често истакнут стакленим омотачем, који омогућава интеракцију зграде са својим окружењем.



Слика П1.9. Радови пројектанта Мануел Готранд: а) Оригами објекат у Паризу, б) Модел стаклене фасаде "Луј Витон" у Сеулу, Кореја и ц) Модел пословне зграде Рокин у Амстердаму (Извор: Презумето са <http://www.manuelle-gautrand.com/>, 14. 4. 2015)

Поред представљеног примера, а у контексту једноставнијег решења геометријски комплексних форми стаклених омотача, не могу се занемарити могућности које пружа примена равних троугаоних стаклених панела који омогућавају материјализацију различитих форми. Иако, у обликовном смислу овај тип панелизације има ограничења у визурама ка спољашњем простору, с обзиром на мању димензију елемената и потконструкцију која се пружа у три правца, његова примена у материјализацији геометријски комплексних форми стаклених омотача веома је честа. У том смислу, северна фасада правног факултета у Кембриџу из 1999. год. (Слика П1.10) може се сматрати једноставним елегантним концептуалним решењем које у виду хибридног свода од челика и стакла (без прозора, зида и крова), а попут великог конзерваторијума обухвата и уједно открива четири етаже библиотеке, као и све активности студената.



Слика П1.10. Северна фасада правног факултета у Кембриџу и детаљ везе и споја троугаоних панела (Извор: Аутор, 2014)

За разлику од фиксних троугаоних елемената омотача објекта правног факултета у Кембриџу, нова технолошка решења омогућавају и њихово отварање око једне стране једнакостраничног троугла, пружајући могућност природне вентилације (Слика П1.11а). Такође, важно је нагласити да њиховом применом је могуће материјализовати сваку комплексну форму омотача (Слика П1.11б).



Слика П1.11. а) Изглед и детаљ везе фасаде Европске инвестиционе банке, Луксембург б) Блоб, Ајндховен (Извор: Преузето са а) <http://www.detail-online.com/article/european-investment-bank-luxembourg-13796/>, 03. 5. 2015; б) https://commons.wikimedia.org/wiki/File:The_Blob_in_Eindhoven, 03. 5. 2016)

Пример/Студија случаја 3 – небодер “Shard”, Лондон

Контекст

Више него било која друга метрополу, Лондон карактерише континуална промена урбаног и архитектонског миљеа. Његов урбани пејзаж увек се издвајао присуством савремених објеката поред постојећих историјских структура, што се може упоредити са владајућом монархијом и њиховим ритуалима у односу на савремене глобалне трендове у разним сферама живота града.



Слика П1.12. а) Урбани пејзаж и б) Изглед врха стаклене фасаде објекта Шард, Лондон (Извор: Преузето са а) <http://www.permasteelisagroup.com/project-gallery/470>, 23. 8. 2014; б): <http://www.rpbw.com/files/b793baab05b6e74b348cc0ba39f96bf30fc773d9.pdf>, 13. 2. 2016)

Међутим, појава објекта Шард на лондонском небу (највеће зграде у Европи) изазива велике дебате и контраверзе, још од почетка пројектовања и његовог отварања 2012. године, а посебно сада када је зграда, изграђена у историјском подручју, видљива из скоро сваке локације у граду (Слика П1.12). Небодер је пример урбане регенерације и згушњавања (вертикални град) који представљају фундаменталну стратегију за будућност европских градова.



Слика П1.13. Скица пресека (аутор Ренцо Пијано) и основе 9, 23, 32, 39 и 68 спрата објекта Шард; (Извор: Преузето са <http://www.permasteelisa.com/media/documents/attachment/2012-Casabella-TheShard.pdf>, 25. 2. 2016)

Геометрија и визуелни/обликовни потенцијали

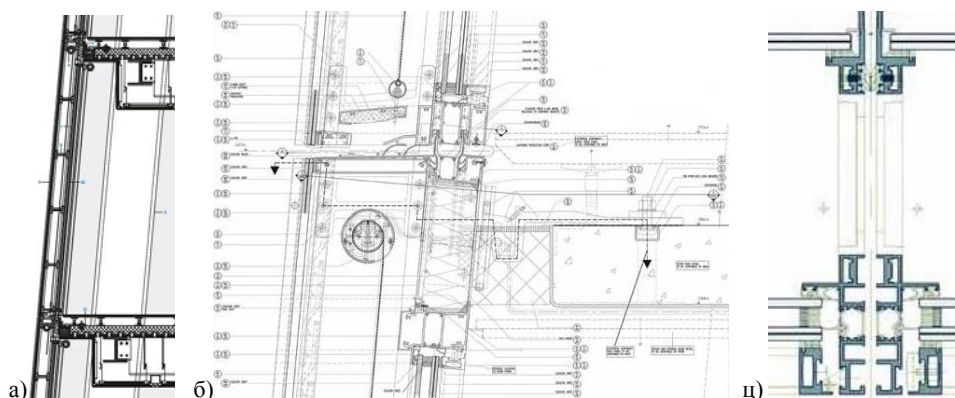
Форма и светла боја објекта одређују врло специфичан однос са сталним променама лондонског неба. Осам косих равни које карактеришу стаклени омотач не додирују се, чак ни на самом врху дајући тиме лакоћу самој структури, што је чини посебном у односу на геометрију површине омотача. Перцепција форме даје утисак вишеструког "сечива", чија сјајна транспарентна површина омогућава посматрачу да сагледа унутрашње активности насупрот тамним градским небодерима. Нагнутост фасадних равни, додатно рефлектује небо крејирајући светлосне ефекте који чине објекат изузетно светлим посебно из даљине. Форма омотача, који је у потпуности од стакла, алуминијума и челика, инспирисана је небодерима Мис Ван де Роа (Mies van der Rohe) које карактеришу оштре, прецизне и вертикалне линије. Односно, као што професор Политехнике из Милана (*Politecnico di Milano*) Франческа Малагуци (Malaguzzi, 2013) објашњава да од првих скица, идеја Ренца Пјана (Renzo Piano) је била да утисне и наоштри објекат почев од потпуно не-регуларне геометријске форме (Слика П1.13), па до основа које садрже зимске баште и отворе који су смештени по разним етажама не само да би удахнули живот у целокупну композицију, већ и да омогуће унутрашњу вентилацију обезбеђујући најбоље еколошке услове унутар објекта. Унутрашњост објекта обухвата широк спектар функција: од нижих етажа у којима су смештени пословни простори до јавних зона, аудиторијума и престижног хотела у центру, па све до станова на горњим спратовима и видиковца на врху, презентујући на најбољи начин "вертикални град". Сам Ренцо Пијано је објаснио како форма заправо следи унутрашњу функцију (Malaguzzi, 2013: 1):

"Објекат није изграђен на овај начин из хира или случајно, овај пирамидална форма прати смањење 'тежине' функција; подсећа на торњеве који красе цркве Лондона, као што је катедрала 'St. Paul' симбол обнове града након пожара из 1666. године."

Конструктивни систем, везе и димензије стаклених елемената

Конструкција објекта високог 300m, окрућена бетонским језгром, прилагођена је различитим функцијама. Ниже спратове са пословним простором карактерише челична конструкција од шупљих греда (укупне дужине од 500 m), док спратове са резиденцијалним простором и хотелом карактерише бетонска међуспратна таваница у виду преднапрегнуте плоче дебљине 20 cm, која је због

своје дебљине омогућила изградњу већег број спратова (два додатна спрата) у односу на одговарајућу челичну међуспратну конструкцију. Ободни стубови су од челичних шупљих профила чија се тежина, пресек и размак смањују ка вишим спратовима. Тако, на етажама са канцеларијама размак износи 6 m, на етажама са становима 3 m, а у хотелу и до самог врха размак износи 1,5 m. Стаклена зид завеса (Слика П1.14) састоји се од 11.000 модуларних елемената двоструке фасаде односно 22.000 појединачних панела димензија 3,80 x 1,50 m, чије ширина је модуларна у односу на размак ободних челичних стубова.



Слика П1.14. Пресек и детаљ двоструке фасаде мале ширине међупростора, са унутрашњим ТИ панелом и спољашњим једноструким застакљењем; (Извор: Преузето са http://www.permasteelisagroup.com/media/documents/projects/470/2013-FinestraA_ENG.pdf, 24. 1. 2016)

Тип застакљења и техника обликовања стакла

Око 55.000 m² стаклене зид завесе пројектовала је и израдила компанија *Scheldebouw BV* из Холандије, део групације *Permasteelisa Group*. Спољашње стакло које је екстра прозирно, произведено је од сигурносног стакла са малим процентом гвожђа (*Pilkington*) што му даје белу прозачну боју, а специјални премаз рефлектујућу површину преко 24% (Слика П1.15). Насупрот томе, унутрашњи стаклени зид састављен је од термоизолационих панела од којих су неки фиксни а одређени број се може отворити изнутра (П1.15). Унутрашње стакло термоизолационог панела је такође сигурносно. С обзиром на то да су стакла равна, њихова производња није захтевала посебан начин обликовања. Унутар двоструке фасаде налази се платнена завеса на моторни погон која доприноси смањењу сунчевог зрачења. Просечна вредност укупног коефицијента пролаза топлоте, односно U -вредност стаклене фасаде износи 1,1 W/m²К, а g -вредност износи 0,12 за спуштenu позицију застора (Malaguzzi, 2013). Ове вредности су у складу са важећим британским стандардима енергетске

ефикасности објеката из 2010. год. Аутоматски систем спушта ролетне када сунчево зрачење достигне вредност од 200 W/m^2 , доприносећи контроли максималног оптерећења система за хлађење.



Слика П1.15. Изглед још недовршеног стакленог омотача и модел-узорак двоструке фасаде са стакленим панелима спратне висине, уским међупростором и отварањем унутрашњег ТИ панела ради одржавања, фабрика *Scheldebouw, Middelburg*, Холандија; (Извор: Аутор, 2012)

Специфичности

Стаклени омотач укључује и веома иновативну технологију, с обзиром на то да пасивна двострука фасада има интегрисани софистицирани систем контроле унутрашњег окружења. Тако, постоји значајан систем коришћења природне вентилације, с циљем смањења нивоа емисије CO_2 у ваздуху као и коришћење кишнице за санитарну воду, регулисање нивоа влажности у просторијама, а све ради одржања одговарајуће микроклиме унутар простора. Како се све активности у објекту одвијају у оквиру 24 часа, одлучено је да се усвоји систем когенерације који може да омогући производњу енергије за грејање и хлађење са високом ефикасношћу. Постигнута енергетска ефикасност објекта показује смањење укупне потрошње енергије за преко 35% у односу на конвенционалне небодере (Malaguzzi, 2013). То је постигнуто, не само захваљујући перформансама самог омотача са интегрисаним високоефикасним системом климатизације, већ и прецизираним сценаријима коришћења дневног осветљења и пажљивим управљањем вештачким осветљењем искључиво као комплементарног. Такође, избор екстра прозирног стакла са малим процентом гвожђа, на први поглед необичан избор за разлику од тамнијих, делимично рефлектујућих стакала, била је жеља пројектанта с циљем постизања потпуно транспарентног омотача који ће омогућити посматрање "живота" унутар објекта. Осим тога, овај тип застакљења може рефлектовати небо и његове различите нијансе боја које се мењају у односу на време и доба дана.

П.1.2 Студије случаја термичког стакленог омотача геометријски комплексних форми са закривљеним стакленим елементима

Пример/Студија случаја 4 - Музеј "Victoria & Albert", Лондон

Контекст

Музеј Викторија и Алберт (*Victoria & Albert Museum*) у Лондону, представља један од најзначајнијих музеја дизајна и примењених уметности у свету са поставком од око 4 милиона експоната. Изложбени простор од 45.000 m² подељен је на 145 изложбених простора. С обзиром на чињеницу да се објекат у јужном Кенсингтону (*South Kensington*) користи преко 150 година, 2001. године донесен је стратешки план о обнови постојећег комплекса објеката музеја по фазама које су планиране у периоду од око 10 година. Реновирање јужно-источног крила са средњовековним и ренесансним галеријама представљао је посебан изазов због приступа великом броју различитих нивоа и непостојању визуелне везе између суседних изложбених простора. Права вредност овог пројекта обнове галерија је што је омогућен одговарајући амбијент за колекцију од 1800 експоната - „правих звезда“ (Powell, 2011) који представљају одраз европске уметности и културе из периода од пада Римског царства до модерне ере (Слика П1.16), укључујући и белешке Леонарда да Винчија ("Glazed Roof", 2011).

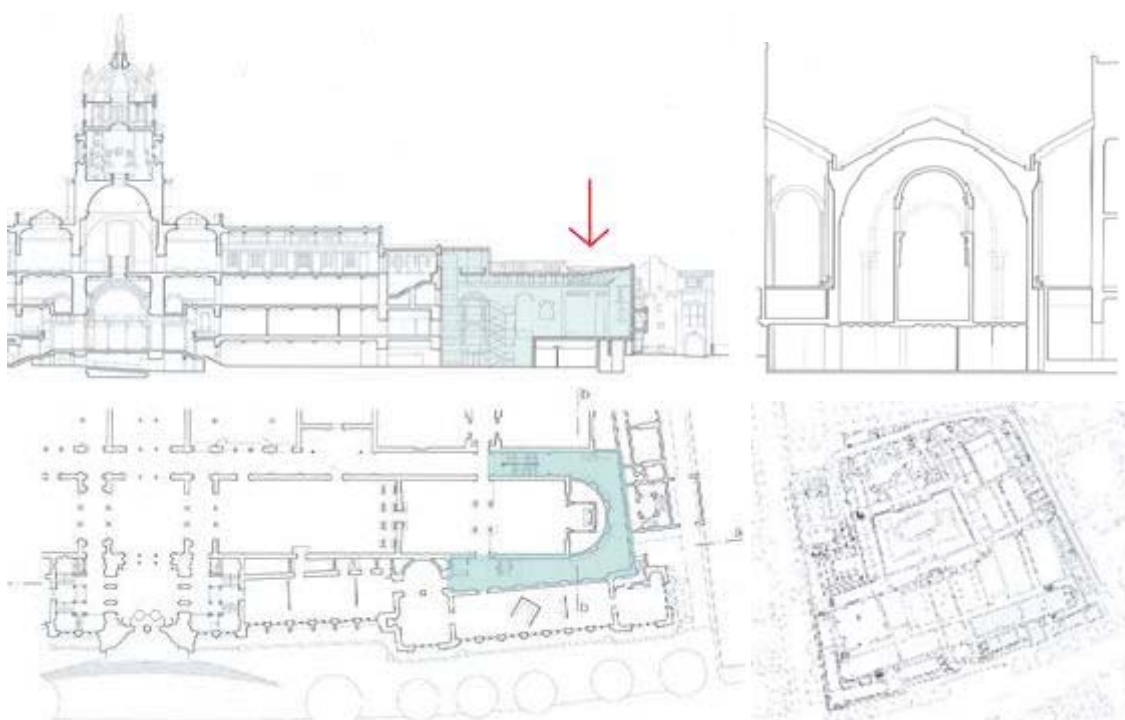


Слика П1.16. Реновирана централна галерија, и експонати савремене примене стакла у дизајну и ентеријеру изложени у обновљеном јужно-источном крилу музеја Викторија и Алберт (*Victoria & Albert Museum*), Лондон, (Извор: Аутор, 2014.)

Пројекат обнове 4.500m² средњовековних и ренесансних галерија музејског кампуса Викторија и Алберт, вредан £32.000.000 поверен је МУМА архитектама (*MUMA – Mclnnes Usher McKnight Architects*) који су, као млада пракса основана 2000. године, победили на конкурсима 2003. године. Кенет Повел

(Kenneth Powell) наглашава да „*постигнути резултати су универзално хваљени како у погледу музеолошких тако и архитектонских захтева*“ (Powell, 2011: 82).

Десет галерија је враћено у првобитно стање поновним постављањем пропорција и ритма оригиналног низа просторија, као и јасним концептом кретања. Поред нове вертикалне комуникације – куле са лаким степеништем и стакленим лифтом који омогућавају доступност свих шест етажа посетиоцима различитих генерација, неискоришћено унутрашње двориште је трансформисано у нови изложбени простор испуњен светлошћу у коме су смештени велики фрагменти историјских објеката (Слика П1.17 и П1.22).



Слика П1.17. Основа музеја и основа, подужни и попречни пресек унутрашњег реновираног дворишта музеја *Victoria & Albert Museum*, Лондон, Енглеска, 2012., (Извор: "Glazed Roof", 2011: 71-74)

Геометрија и визуелни/обликовни потенцијали

Нови простор висок четири етаже просторно је дефинисан задњим полукружним зидом апсиде у источној сали и лагано искривљеним зидовима суседног крила. Површину крова, условљену таквом геометријом суседних објеката које је требало повезати са стакленим кровом, као и ограничењима наметнутим од стране архитеката, није било могуће формирати као равну што је захтевало проналажење технички иновативног решења застакљења крова (MacFarlane, 2014).



Слика П1.18. Спољашњи изглед витоперне стаклене површине кровног омотача реновираног дворишта музеја *Victoria & Albert Museum*, Лондон, Енглеска, 2012., (Извор: Преузето са <http://www.octatube.nl/en/projects/4/victoria-albert-museum/>, 15. 4. 2014)

Главни геометријски изазов предсављала је форма кровне површине. Обе ивице, горња и доња су постављене хоризонтално, али с обзиром на то да линије које их спајају полазе из два различита облика суседних зграда и нису паралелне, површина крова формира облик седла (Слика П1.18). Ова површ представља геометријски развојну површ која се такође назива "хипар површ", а њена примена је најпознатија код шаторских структура, где овај начин "контрасавијања" обезбеђује потребну стабилност за шаторске мембране.

Конструктивни систем, везе и димензије стаклених елемената

Захваљујући истраживању могућности изградње предложене стаклене структуре, које је спроведено од стране фирме Дјухарст Мекфарлејн и партнери (*Dewhurst Macfarlane & Partners*) из Лондона, као и претходног искуства примене хладног савијеног каљеног и уврнутог стакла из 2001. године примењеног на градској општини у Алфену (*City Hall of Alphen aan den Rijn*), у Холандији фирме Октатјуб (*Octatube*), идеја витоперног стакленог омотача мале закривљености је реализована уз помоћ хладног савијања (Eekhout and Staaks, 2012). Спектакуларна провидна таласаста кровна структура галерије, постављена на висини од 14 m, омогућава природну светлост новом, сада већ препознатљивом артефакту. Пројекат је добио нареду за "Конструктивно решење године" на светском фестивалу архитектуре у Барселони 2010. године ("WAF Awards", 2010).

Основну структуру кровне конструкције чине 73 ламиниране полу-каљене сигурносне стаклене греде висине око 450 mm, постављене радијално од

централног полукружног објекта ка околним објектима формирајући "лепезу" која дефинише простор. Стаклене греде чији максимални распон износи 11 m (Слика П1.19) су састављене од три стаклена каљена панела, 12 mm дебљине, ламинирана белом ПВБ (enɡl. PVB) фолијом. Ослонци греда, које извиру изнад венца полукружног зида (Слика П1.20) и ишчезавају у прорезима на супротним зидовима, сакривени су, док су темена греда увек на истој коти образујући хоризонталне линије. Сама површина крова формирана је од термоизолационих панела димензије око 1,2 x 4 m који су фиксирани помоћу тачкастих држача - конектора за стаклену греду преко континуалног челичног-инокс профила залепљеног силиконом на горњу ивицу греде (Слика П1.21). Укупна површина крова износи око 370 m² (MacFarlane, 2014). У комбинацији са транспарентним стакленим панелима, прозрaчне греде креирају разноврстан доживљај стакленог кровног омотача, у зависности од положаја посматрача, од потпуно отвореног ка небу до потпуно затвореног (Слика П1.19).



Слика П1.19. Витоперна стаклена структура кровног омотача реновираног дворишта музеја *Victoria & Albert Museum*, Лондон, Енглеска, 2012.;

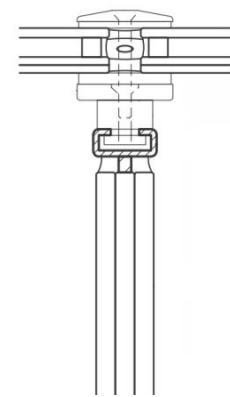
(Извор: а) <http://www.octatube.com/en/projects/4/victoria-albert-museum-daylit-gallery/>; б) Аутор, 2014)

Сама форма допринела је да реализација овог пројекта представља изазов и то како са аспекта геометрије тако и са аспекта сигурности кровне конструкције. Посебна пажња, посвећена је првенствено проналажењу одговарајућег решења за сигурност конструкције, а с обзиром на то да су греде неуобичајено дугачке и троструко ламиниране, оштећење једног стакленог слоја-плоче а посебно и целе греде, морало се посебно размотрити. То је омогућено уз помоћ експерименталног и нумеричког истраживања (Eekhout and Staaks, 2012). За сваки тип могућег оштећења, неопходно је било сагледати вероватноћу лома конструкције као и могуће последице.

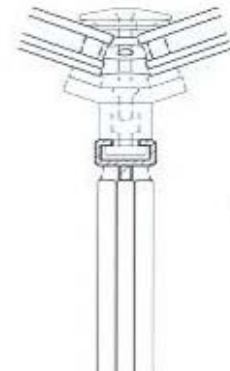
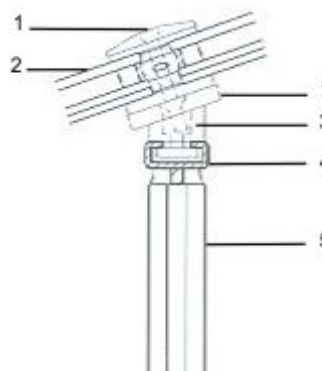
1. Стежући плочасти држач - конектор од нерђајућег челика, 120/60 mm
2. Кровни омотач: транспарентни, хладно савијени ТИ панел (6 mm каљено стакло + 12 mm + 2 x 5 mm ламинирано сигурносно каљено стакло
3. Дистанцер од нерђајућег челика, полиран, 100/35 mm
4. Челични профил налепљен силиконом на горњу ивицу стаклене греде
5. Ламинирана сигурносна стаклена греда, делимично провидна, 455-545/39 mm од 3 x 12 mm каљеног пескираног стакла са белом PVB фолијом
6. Покривна плоча од 2mm црног нерђајућег челика
7. Перфорирани алуминијумски панел (метална потконструкција на угловима)
8. Конструкција новог парапета: 1 8mm водоотпорна шперплоча, црне летве 12/50 mm, 400 mm термичке изолације од минералних влакана између дрвеног рама 100/50 mm фиксираног на челичну папучу (ослонац стаклене греде), 25 mm водоотпорна, паронепропусна шперплоча, стишљиви термоизолациони панел 40 mm између летвица 40/50 mm на размаку 400 mm, 12 mm водоотпорна шперплоча, хидроизолација и паропропустљива мембрана, летвице 10/50 mm на размаку 400 mm, 12 mm водоотпорна шпер плоча, облога од поцинкованог лима
9. Челична папуча за прихватање стаклене греде
10. Постојећи зид од опеке (очишћен)
11. Постојећа опека постављена након монтирања стаклене греде
12. Облога од 2 mm нерђајућег чел. лима, матирана, демонтажна
13. Ниша у постојећем зиданом зиду 235 x 900 mm, малтерисана



Слика П1.20. Детаљ споја - везе ламиниране стаклене греде са спољашњим зидовима постојећих објеката унутрашњег дворишта музеја *Victoria & Albert Museum*, Лондон, 2012.
(Извор: "Glazed Roof", 2011: 74, 75)



1. Стежући плочасти конектор – спона од нерђајућег челика, 120/60 mm
2. Кровни омотач: транспарентни, хладно савијени ТИ панел (6mm каљено стакло + 12 mm + 2x5mm ламинирано сигурносно каљено стакло)
3. Дистанцер од нерђајућег челика, полиран, 100/35 mm
4. Челични профил налепљен силиконом на горњу ивицу стаклене греде
5. Прозрачна ламинирана сигурносна стаклена греда, 455-545/39 mm од 3 x 12 mm каљеног пескираног стакла са белом PVB фолијом



Слика П1.21. Детаљ споја троструко ламиниране стаклене греде и термоизолационих кровних панела (под различитим угловима) стакленог омотача реновираног унутрашњег дворишта музеја *Victoria & Albert Museum*, Лондон, Енглеска, 2012., (Извор: Преузето са <http://www.octatube.nl/en/projects/4/victoria-albert-museum/>, 15. 4. 2014)

Такође, изазов је представљао геометријски неправилан облик старих зграда које дефинишу границе кровне површине. Детаљи крова су предвидели веома мала дозвољена одступања за подешавање, тако да би се осигурала тачност, површина дворишта је ласерски скенирана и подаци су сачувани као тродимензионални CAD модел. Уз помоћ овог модела, осмишљени су и произведени сви потребни елементи крова пре почетка извођења радова.

Тип застакљења и техника обликовања стакла

Опција савијања стаклених транспарентних термоизолационих панела (6mm каљено стакло + 12 mm + 2 x 5mm сигурносно ламинирано каљено стакло) на градилишту (на лицу места) је одабрана из разлога високе цена термичког савијања која подразумева обликовање сваког панела у јединствен облик уз помоћ калупа (приближно 200 различитих калупа), као и због визуелног квалитета где се овим поступком обликовања (термичко савијање) производе панели чија површина није у потпуности глатка. Такође, префабриковани, термички савијени панели захтевају детаљнији производни процес са више активности у низу. С

друге стране, поступак хладног обликовања панела ствара зоне притиска у површини стакленог панела тако да се стабилност форме мора проверити у раној фази процеса дизајна. Типична геометрија примењених хладно савијених и уврнутих стаклених панела представља правоугаони и трапезни облик панела са три угла у заједничкој равни и једним углом изван ове равни, што резултује двоструко-закривљеним дијагоналама и равним ивицама (хипар површ) панела. Нестабилност ове форме након одређене границе, резултира извијањем једне од две дијагонале (MacFarlane, 2014). Фирма Октајуб је спровела и упоредила модел коначних елемената (*FEM* модел) са неколико физичких тестова с циљем дефинисања тачних вредности добијених помоћу нумеричких анализа, након чега је, површина термоизолационих панела постала права хипар површ, као што су архитекте и предвиделе. Примењени панели су истовремено и ламинирани и формирани у ТИ панел, и као такви су много крући него само једноструко ламинирани панели. Приликом њиховог обликовања, било је неопходно применити већу силу затезања-увртања да би се добила жељена форма.

Специфичности

Поред тога што је ово истраживање захтевало дугорочно тестирање панела како би се осигурала њихова издржљивост, допринело је и развоју теорије хладног увртања стакла (Eekhout and Staaks, 2012). Након њихове прве примене, даља истраживања о структурном понашању уврнутих стаклених панела спроведена су од стране Дри Стакса (Dries Staaks). Изведени закључци који анализирају напрезања у стаклу и указују на максималне деформације (видети Поглавље 3) без визуелних оштећења, названи Стаксов закон, допринели су јасном разумевању њиховог квантитативног понашања у односу на напрезања и стабилност при хладном савијању.

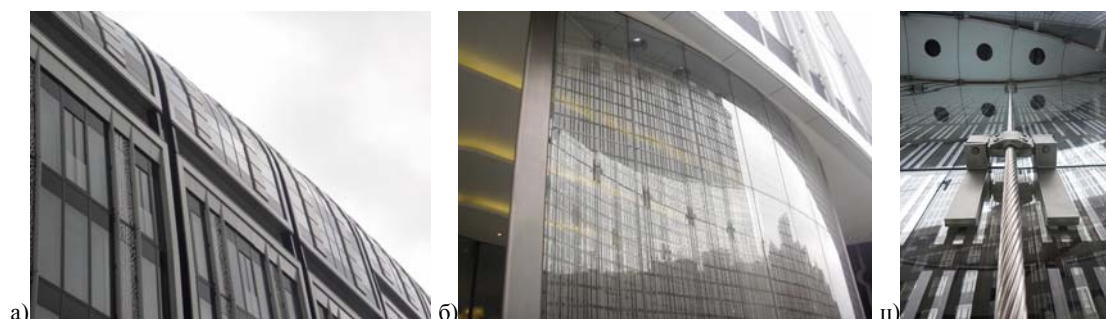
На крају, узорак модела дела крова у размери 1:1 креирала је фирма Октајуб с циљем обезбеђивања квалитета детаља, односно везе карактеристичних прозрочних греда са термоизолационим панелима и провере њихове водоотпорности. У жељи да се избегне компликована веза, дизајнирана је веза од нерђајућег челика (Слика П1.21) која омогућава да се термоизолациони панели лако причвршћују, како на греде, тако и једни са другима. Један узорак модела крова конструисан је да покаже могућност извитоперености панела с

циљем формирања жељене форме и истовремене чврсте заштивености, што је показало да су узорци модела од непроцењиве вредности, и да је неопходно укључити их у процес дизајна и конструкције двоструко застакљених, закривљених стаклених панела, односно геометријски комплексних форми стаклених омотача (Слика П1.22).



Слика П1.22. Стаклене греде и двоструко застакљени уврнути ТИ панели кровног омотача реновираног дворишта музеја *Victoria & Albert Museum*, 2012., (Извор: Аутор, 2014)

За разлику од малог закривљења застакљеног крова музеја, већа закривљеност може се уочити на омотачу последње две етажe објекта *Park House*, у Лондону (Слика П1.23а). Оптимизацијом геометрије омогућена је рационализација производње панела тако што је постигнута мања закривљеност панела омогућила њихово савијање хладним поступком, док је одређени број панела (30%), због веће закривљености, морао бити савијан термичким путем.



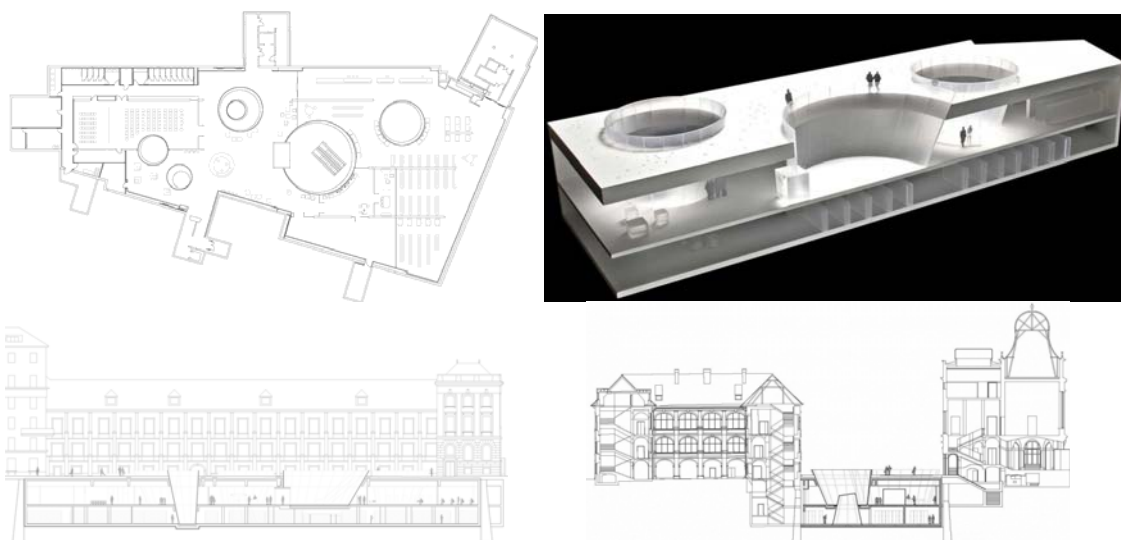
Слика П1.23. Објекат *Park House*, Лондон: а) Закривљена форма омотача последње две етажe; б) Изглед "стакленог сочива"; и ц) Кабловска конструкција "стакленог сочива" – улазног портала (Извор: а) и б) Аутор, 2014; ц) Преузето са: <http://www.eocengineers.com/project/lens-park-house-174>)

Поред тога, овај пројекат карактерише уметничка инсталација, пројектног тима *Carpenter Lowings*, у форми "стакленог сочива", димензија 8 x 8 m у изгледу (Слика П1.23б), која формира улазни портал двоструке висине наглашавајући и одвајајући улазни део од тока улице. Рефлектујућа површина закривљених ламинираних панела са наизменичном шаром керамичке штампе резултује динамичним визуелним ефектом истовремено задржавајући транспарентност. Унутрашња потпорна мрежа каблова (Слика П1.23ц) је преднапрегнута пружајући отпорност на ветар, не преносећи силе затезања на главну конструкцију објекта.

Пример/Студија случаја 5 – Музејски комплекс “Joanneumsviertel”, Грац

Контекст

Нови улаз музејског комплекса (музеј природних наука и музеј модерне уметности) *Joanneumsviertel* у историјском центру Граца, Аустрија завршен је крајем 2011. године у част прославе двестоте годишњице оснивања музеја. Према речима једног члана ауторског тима Енрике Собехана (Enrique Sobejano, Nieto Sobejano Arquitectos-Madrid, eep architects-Graz) (Sobejano, 2011) победничко решење није подразумевало реконструкцију постојећег објекта у виду видљивог проширења са спољашње стране и у том смислу је било јединствено. Неопходно је било схватити важност постојећих објеката у процесу обнове, као и могућност формирања новог јавног простора у Грацу. Креирање новог трга, који ће трансформисати постојеће двориште-врт у јавни простор остављајући чисту површину – “контекст који не би требало да буде прекинут” (Sobejano, 2011: 16) истуреним архитектонским елементима између главног објекта из осамнаестог века и објекта из периода раног барока, била је примарна идеја победничког тима због чега су све нове функције смештене у подземним етажама. Њиховим планом, сама интервенција практично је визуелно нестала између постојећих објеката (Слика П1.24). Према Енрикеу Собехану неки пројекти (објекти) су сами по себи скулптуре, док други представљају потпуну супротност (Sobejano, 2011).



Слика П1.24. Основа, пресеци и макета реконструисаног трга и улаза музејског комплекса *Joanneumsviertel*, Грац, Аустрија, 2011.,

(Извор: Преузето са <http://www.dezeen.com/2012/01/02/joanneum-museum-extension-by-nieto-sobejano-arquitectos-and-eep-architekten/>, 22. 6. 2014)

Везу два музеја представљају две подземне етаже укупне висине око 10m постављене између крила у којима се налази нови улаз у музеј. Према речима ауторке Фуенсанте Ниете (*Fuensanta Nieto, Nieto Sobejano Arquitectos*) само један архитектонски елемент је коришћен, али на различите начине: различитих димензија и постављен у различитим правцима.

Геометрија и визуелни/обликовни потенцијали

Архитктонски изазов представљало је дневно осветљење подземних етажа које је остварено кроз међуспратну армирано бетонску плочу великог распона. Усвојено концептуално решење подразумевало је проток чисте дневне светлости управо кроз једини примењени архитектонски елемент – вертикалне купе - "левке" (Слика П1.25) у форми малих кружних дворишта, максималног пречника до 16 m у подножју подрумске етаже. Централна оса стаклених конуса нагнута је под углом од 15° у односу на вертикалу и из тих разлога нагиб стаклених панала варира од вертикалне позиције до позиције под нагибом од 30° у односу на вертикалу (Слика П1.24). Такође, два конуса се прожимају стварајући пресек у облику параболе (Слика П1.24 и П1.25), док је један стаклени конус обрнуто постављен и налази се у центру већег конуса (Слика П1.26).

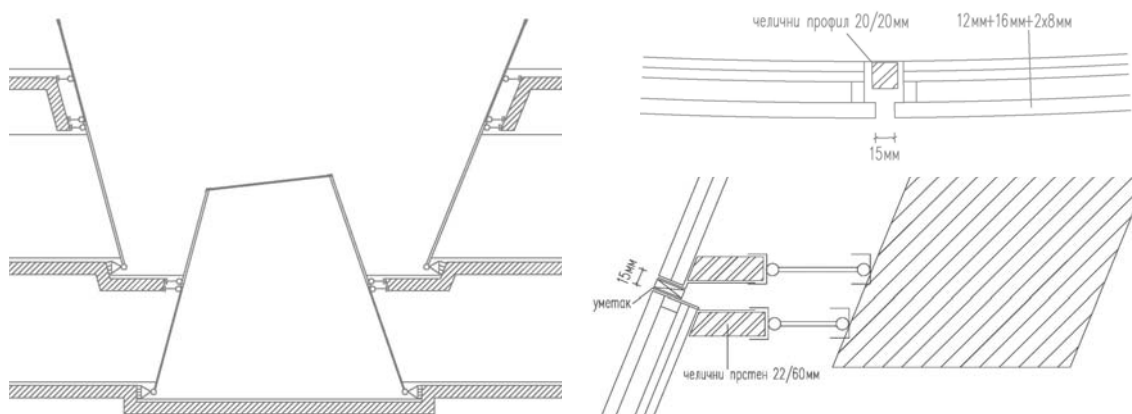


Слика П1.25. Музејски комплекс *Joanneumsviertel*, Грац, Аустрија, 2011.: а) Изглед параболног пресека стаклених Конуса 1&2; б) Изглед трга; и ц) Изглед Конуса 2 који се пружа кроз две подземне етаже; (Извор: Преузето са http://www.joanneumsviertel.at/en/history_and_architecture/planning_and_construction, 22. 6. 2014)

Конструктивни систем, везе и димензије стаклених елемената

Основни принцип застакљења заснован је на чињеници која подразумева специјалне граничне услове услед великих деформација армирано-бетонске плоче великог распона које износе више од 30 mm (за дугорочне деформације) (Neugebauer, 2014), услед чега је неопходно било проналажење специјалног конструктивног система застакљене површине. Стаклени панели ограде су

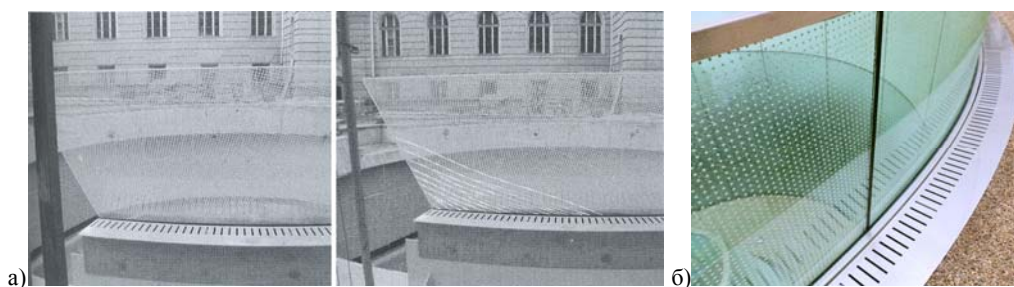
ослоњени на термоизолационе панеле доњег нивоа, што је подразумевало укључивање њиховог оптерећења у нумеричке анализе. С циљем одржања растојања између горњих и доњих стаклених панела, коришћен је вештачки уметак ширине 15 mm (Слика П1.26). Анализа прорачуна је показала да додатни напони, услед оптерећења горњих стаклених панела ограда, нису велики и у том смислу су прихватљиви. На доњој ивици термоизолационог панела за прихватање оптерећења стаклених панела формирана је челична конзола монтирана на армирано-бетонску плочу. За прихватање хоризонталног оптерећења, стаклени панели су залепљени за крути прстен од нерђајућег челика димензија 22/60 mm (Слика П1.26) и дискретно причвршћени на својим крајевима. Ова зглобно формирана веза преноси хоризонтално оптерећење као што су ветар и људски фактор на армирано-бетонску плочу, гарантујући истовремено слободу вертикалних померања саме плоче (Слика П1.26).



Слика П1.26. Принцип конструктивног система стаклених купа музејског комплекса *Joanneumsviertel*, Грац, Аустрија, 2011.: Пресек Купа 3&4, и шематски приказ пресека детаља везе стаклених панела Купе 3 (велика) и шематски приказ основе детаља везе стаклених панела Купе 4 (мала), (Извор: Аутор)

Сви конуси су различити и дизајнирани су уз помоћ методе коначних елемената за чији прорачун је дефинисано оптерећење које укључује сопствено оптерећење саме конструкције (стаклени панели), оптерећење од ветра и хоризонтално оптерећење (људски фактор). За анализу оптерећења стаклене ограде узето је оптерећење од 3 KN/m^2 које узима у обзир могућност великог окупљања (Neugebauer, 2012). Поред механичког оптерећења, климатско оптерећење које подразумева разлику температура (зима и лето), разлику метеоролошког ваздушног притиска и надморске висине између места производње термоизолационих панела и места њихове уградње (градилиште) узето је у обзир. Сва ова спољашња и унутрашња оптерећења су суперпонована у

анализи коначних елемената (Neugebauer, 2014). Такође, за ламинирано сигурносно стакло у анализи динамичког оптерећења, неопходно је било спровести тестирање отпорности на удар уз помоћ клатна. Тестирање је спроведено директно на градилишту у реалним граничним условима (Слика П1.27). Челична маса од 50 kg обложена двама гумама замахнута је на стаклену ограду са висине од 900 mm (према стандарду). Први део теста подразумевао је ударац у центар панела са висине од 450 mm. С обзиром да је тест успешно прошао, висина замаха је повећана на 900 mm. Ударац у центар панела, такође, није проузроковао пукотине стакла, док ударац близу вертикалне ивице са висине од 900 mm довео је до лома стакленог панела на страни примењеног оптерећења. Пукотине и комади сломљеног стакла (Слика П1.27) услед оптерећења односили су се на тестирани панел, док су суседни панели остали у првобитном стању (Neugebauer, 2012).



Слика П1.27. Стакло ограде пре и након теста отпорности на удар и изглед постављене ограде музејског комплекса *Joanneumsviertel*; (Извор: а) Neugebauer, 2012: 413; и б) Аутор, 2014)

Највећи конус – Конус 5, пречника око 16 m дизајниран је као главни улаз на првој подземној етажи за посетиоце музеја до којих се стиже ескалатором (Слика П1.24). Централна оса овог конуса је нагнута под углом од 15° у односу на вертикалу и из тих разлога нагиб стаклених панела варира од вертикалне позиције (близу ескалатора) до позиције под нагибом од 30° у односу на вертикалу. Застакљење подземне етаже пројектовано је од термоизолационих панела формираних од конусно закривљеног ламинираног сигурносног стакла (2 x 8 mm пливајућег-флот стакла и 16 mm ваздушног простора између). Хоризонтални и вертикални (и нагнути) спојеви стаклених панела су заптивени силиконом. Стаклену ограду на врху-продужетку конуса чини ламинирано сигурносно стакло дебљине 24 mm (2 x 12 mm конусно закривљени стаклени панели од флот стакла). Горња ивица стакла покривена је челичним-инокс *U*-профилом која као рукохват штити стакло од оштећења (Слика П1.27) (Neugebauer, 2014).

Тип застакљења и техника обликовања стакла

За застакљење 6 конуса коришћено је ламинирано сигурносно стакло којим су формиран термоизолациони панели. Конуси 1&2, који су лоцирани на северном делу јавног трга, су конуси који се прожимају (Слика П1.28). Конус 1, дијаметра око 9 m, пружа се до прве подземне етаже, док Конус 2, пречника око 6 m, пружа се до друге подземне етаже (Слика П1.28). За ограду је коришћено ламинирано сигурносно стакло дебљине 24 mm (2 x 12 mm конусно закривљено флот стакло), док за застакљење подземних етажа је коришћен термоизолациони панел (12 mm конусно закривљено стакло са спољашње стране и 2 x 8 mm конусно закривљено флот стакло са унутрашње стране са 16 mm ваздушног простора између стаклених панела (Neugebauer, 2014). Специфичан и компликован детаљ представља прожимање ова два конуса за који је посебан изазов како са аспекта геометрије, тако и техничког решења, представљао начин заптивања (посебно против кише) параболичне криве насталог пресека. Међупростор између ивица стаклених панела и саме ивице покривен је специјално обликованим челичним-инокс профилем чији је попречни пресек приближно истог *U*-пресека као челични профил-рукохват стаклене ограде.



Слика П1.28. Изглед Конуса 1&2, 3&4 из ентеријера и постигнути континуитет штампе стаклених панела као посебан изазов, музејски комплекс *Joanneumsviertel*, (Извор: Аутор, 2014.)

Конус 3 који се пружа до прве подземне етаже већим полупречником окренут је ка горњој страни, у поређењу са Конусом 4 који већим полупречником лежи на подној плочи друге подземне етаже. Својом горњом површином мањег полупречника продире међуспратну таваницу између прве и друге подземне етаже постављајући се својим врхом у центар Конуса 3 који је већи (Слика П1.28). Врх Конуса 4 је покривен равним, елиптичним термоизолационим панелом који је ослоњен на веома танки челични кутијаста профил, позициониран у међупростору између конусних стаклених елемената, подупрен на нивоу

међуспратне армирано-бетонске плоче (Слика П1.28). За ограду је коришћено ламинирано сигурносно стакло дебљине 24 mm (2 x 12 mm конусно закривљено флот стакло). За застакљење прве подземне етажe за оба конуса коришћен је термоизолациони панел (12 mm конусно закривљено стакло са спољашње стране и 2 x 8 mm конусно закривљено флот стакло са унутрашње стране са 16 mm ваздушног простора између стаклених панела). За застакљење мањег конуса у другој подземној етажи која се користи као депо за експонате музеја коришћено је ламинирано сигурносно стакло дебљине 24 mm (2 x 12 mm конусно закривљено флот стакло). Конус 6 је идентичан Конусу 3 (Neugebauer, 2012).

Стаклени панели произведени су у *SFL Technologies*, малој компанији за производњу и обраду стакла из Аустрије. Стакло је произведено на један од тренутно најчешћих начина савијања стакла - термичким поступком на температури већој од 550°C, која представља температуру трансформације стакла, односно промене његове вискозности. Зхваљујући сили гравитације омекшало стакло пада на специјално дизајниран калуп добијајући жељену геометрију. Посебно су савијени панели од 8 mm који су затим ламинирани и панел од 12 mm, а затим су формиран термоизолациони панели.

Специфичности

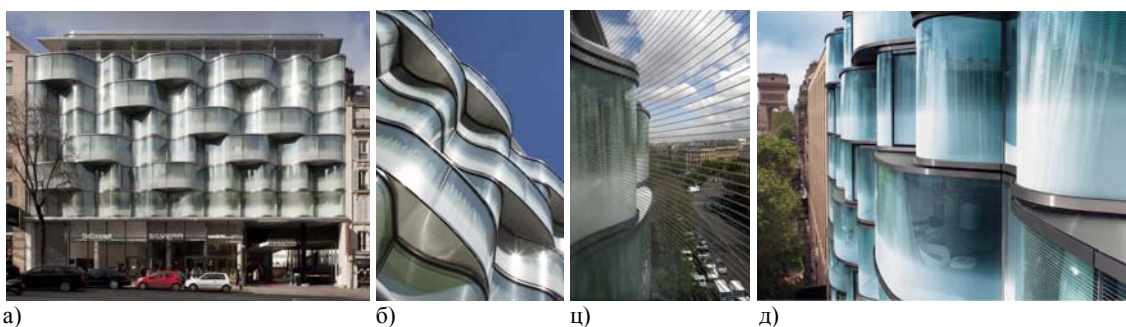
Тежина највећег панела који се налази испод покретних степеница, чија висина је 3,5 m, износи 600 kg односно 80 kg/m² (Neugebauer, 2014a). За монтажу панела било је неопходно коришћење дизалице са посебним држачима (због форме стакла) која је омогућила постављање панела у одговарајући положај.



Слика П1.29. Узорак керамичке штампе на стаклу (Извор: Аутор, 2014)

Такође, посебну специфичност представљао је постигнути континуитет штампе (беле тачкице) која се у односу на суседни панел континуално наставља у истим правцима, што је претходно захтевало добро испланирану припрему. Штампа је урађена лаком уз помоћу фолије као шаблона на позицији 4 ТИ панела (Слика П1.29).

Слична форма, у овом случају цилиндрично (једноструко) закривљених панела спратне висине, постављених на фасади хотела *Renaissance* на Авенији *Wagram* у Паризу ствара потпуно другачији визуелни доживљај (Слика П1.30а, б, и д). Фасаду коју одликују хоризонталне таласасте стаклене траке пројектовао је Кристијан де Портзампарк (Christian de Portzamparc). Ово "стаклено ткање" чине лучни прозори соба - еркери који омогућавају шири поглед на Тријумфалну капију и окружење. Еркери се састоје од великих једноделних закривљених стаклених ТИ панела димензија 2,5 x 3,6 m (дужина криве 4,1 m), ширине 5 cm и представљају прави подвиг у погледу производње коју је спровела компанија *Seele* (Lomholt, 2014). Нерегуларне конкавне и конвексне криве формирају плетеницу, чиме је испуњена жеља пројектанта да се разбије монотонија уличних фасада и обезбеди визуелни комфор корисника.



а) б) ц) д)
Слика П1.30. Стаклена фасада хотела *Renaissance* на Авенији *Wagram* у Паризу: а) Изглед; б), ц, и д) Форма и текстура стакла постигнута пескирањем - ефекат избељености дају одређени ритам на фасади хотела

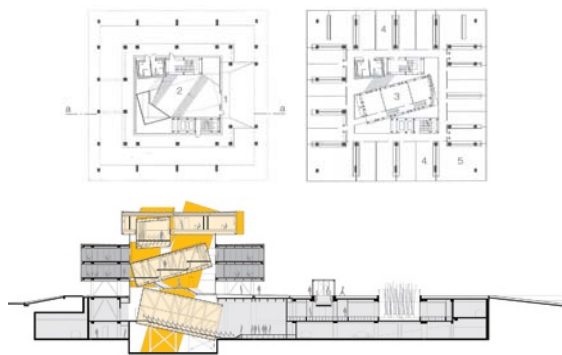
(Извор: Преузето са <http://www.e-architect.co.uk/paris/renaissance-paris-wagram-hotel>, 13. 6. 2015)

Специфичност ове стаклене фасаде је примењена текстура стакла постигнута помоћу пескирања која омогућава да се види, а да се не буде виђен или бар да се умањи транспарентност из екстеријера, а све с циљем очувања приватности корисника (Слика П1.30б, ц, и д). Ова техника штампе коју архитекта Портзампарк често користи у својим пројектима заснована је на принципу: "што је стаклена фасада више бела, мање рефлектује своје окружење" (Lomholt, 2014). Овим поступком избељивања, стаклу се додељује материјалност и решава проблем транспарентности, рефлексije и "опипљивости". Линеарна штампа на стакленим панелима хотела *Renaissance* постепено бледи ка горњем делу панела због густине линија, омогућавајући поглед и креирајући одређени ритам на фасади (Слика П1.30ц).

Пример/Студија случаја 6 – Модни центар “Vakko”, Истанбул

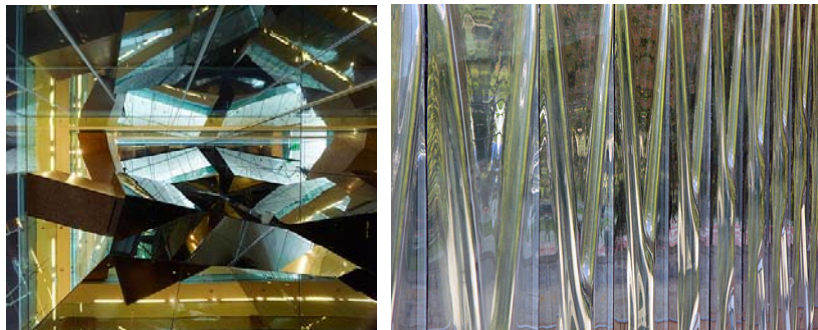
Контекст

Објекат *Vakko* модног центра настао је трансформацијом напуштеног бетонског скелета недовршеног хотелског пројекта у Истанбулу и представља један од најзначајнијих примера савремене турске архитектонске праксе који је изграђен за само 23 месеца. Креирање новог, архитектонски изузетног седишта компаније, било је од кључног значаја за одржање позитивне слике о компанији. Објекат се састоји из два конструктивно независна дела. С обзиром на временско ограничење, пројектантски студио из Њујорка *Rex* предложио је да највећи део зграде, који представља лебдеће-плутајући двоетажни кубус, чију конструкцију чини постојећа бетонска робусна конструкција неизграђеног хотела коју је тешко било сакрити, буде у потпуности обавијен стакленим панелима, чинећи је "елегантном стакленом кутијом" са конвенционално организованим пословним простором ("*Vakko Headquarters*", 2010). Стаклени панели су скоро идентични, а карактерише их *X* форма панела висине једне етаже која је испупчена око 50 mm у односу на њихову вертикалну површину (Слика П1.31). Одвајање структуре у две независне целине омогућило је да изградња започне одмах на постојећем скелету упоредо са пројектом унутрашње, атријумске, челичне конструкције, високе скоро 5 етажа, формиране од низа челичних кутија чија конфигурација је произашла из захтева за коришћење простора, ограничења условљених прописима, као и путање кретања корисника од подземних етажа ка врху. Унутрашња структура укључује вертикалну комуникацију и изложбене просторе, док последња етажа, која је благо ротирана садржи конференцијске сале (Слика П1.31).



Слика П1.31. Изглед, основа приземља и прве етаже и пресек објекта *Vakko Fashion Center*, (Извор: "Administration Building in Istanbul", 2011: 64-66)

Застакљене површине и огледала "оживљавају" атријум између унутрашњег и спољашњег дела објекта (Слика П1.32) стварајући ефекат каледиоскопа – игру слика и рефлексија.



Слика П1.32. Игра слика и рефлексија у ентеријеру и на стакленој фасади, објекат *Vakko*, (Извор: Преузето са <http://archinect.com/features/article/97579/showcase-vakko-fashion-center>, 16. 5. 2015)

Геометрија и визуелни/обликовни потенцијали

Примена закривљеног стакла подразумева веома комплексан процес како у случају једноструко закривљеног стакла, тако и двоструко закривљеног које се ређе примењује у пракси, јер га је много теже фабриковати. Сам процес захтева више радних модела и прототипова у процесу његове израде ради производње конзистентног производа. Све ово, у комбинацији са компликованим руковањем и складиштењем, додатно повећава трошкове. Резултат наведених услова јесте да се закривљена стакла добијена термичким обликовањем (слегањем помоћу калупа) ретко примењују, а њихова примена је најчешће из естетских разлога. У том смислу, стаклена фасада *Vakko* објекта представља изузетак, јер форма панела није примењена само због естетских већ и због функционалних разлога. Овим примером није представљена комплексна геометрија површине стакленог омотача, већ комплексна геометрија појединачних стаклених панела где су форма и функција комбиноване на најбољи могући начин. Непостојање оквирних носача, као и сама конструктивна форма стаклених панела која "разбија" монотонију стаклене кутије допринели су креирању веома транспарентне, прозирне фасаде која омогућава да се спољашња бетонска конструкција "чита" у потпуности. На тај начин бетонска конструкција је постављена у контраст са рефлектујућим стакленим омотачем последње етажe и комплексном челичном конструкцијом унутрашњег језгра. Посматрана изнутра, стаклена фасада даје ефекат оптичке дисторзије попут визуелног доживљаја приликом посматрања кроз "кухињску теглу" (Слика П1.33).



Слика П1.33. Геометрија стаклених панела и оптичка дисторзија посматрана из ентеријера као последица форме панела; (Извор: Преузето са <http://www.rex-ny.com/work/vakko-fashion-center/>, 16. 5. 2015)

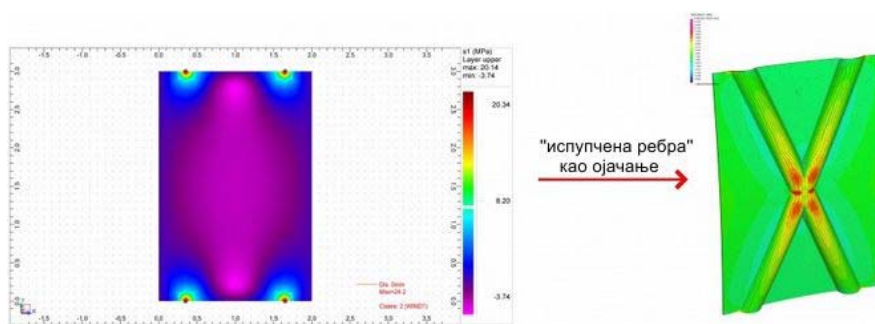
Конструктивни систем, везе и димензије стаклених елемената

Стаклена зид завеса висине две етажe је без линеарних елемената потконструкције. Уместо њих, побољшане конструктивне карактеристике су постигнуте помоћу испупчене X-форме стаклених панела доприносећи већој чврстоћи, смањеној дебљини панела и елиминисању потребе за оквирним носачима стаклених панела. TI панели димензије 3,35 x 1,50 m тачкасто су фиксирани за бетонску међуспратну конструкцију уз помоћ кружног држача тако што је држач уметнут у слој ламинираног стакла дебљине 10 mm (Слика П1.34).



Слика П1.34. Основа, пресек и изглед детаља везе (тачкасто фиксирање) стаклених панела за бетонску међуспратну конструкцију, (Извор: "Administration Building in Istanbul", 2011: 65)

Колики је допринос саме X-форме панела његовим конструктивним карактеристикама, најбоље се може представити кроз анализу напона и деформација термоизолационих панела, где су очекивано највећи напони који износе око 20MPa и налазе се око 4 рупе на угловима панела, формиране за тачкасто фиксирање панела, док у средини панела износе око -4MPa (Слика П1.35). Анализа деформација је показала да се највеће деформације налазе у средини панела, али су представљене малим процентом површине, док остали, већи део површине панела трпи знатно мање деформације (Слика П1.35).



Слика П1.35. Напони и деформације стаклених панела, (Извор: Преузето са http://www.archdaily.com/56149/vakko-headquarters-and-power-media-center-rex-2/vakko_facade-calculation_credit-rex/, 16. 5. 2015)

Тип застакљења и техника обликовања стакла

Термоизолационо застакљење примењено на објекту, које подразумева 12 mm термички савијено стакло, + 16-40 mm ваздуха, + 6+10 mm ламинирано сигурносно стакло са нискоемисионом превлаком на позицији 3, произвела је фирма *Lamglas*. Коефицијент пролаза топлоте (U -вредност) овог термоизолационог панела износи 2,0 W/m²K, док коефицијент пролаза укупног сунчевог зрачења (g -вредност) износи 0,67 ("Vakko Headquarters", 2010).

Потребна крутост двоструко застакљених панела постигнута је уз помоћ термичког обликовања спољашњег стакла термоизолационог панела. Испупчени X-облик је произведен у специјално конструисаној пећи у којој је стакло загревано са обе стране само на одговарајућем месту (Слика П1.36) како би се под дејством сопствене тежине испупчило око 3,5-4 cm у правцу осе нормалне на његову површину ("Administration Building in Istanbul", 2011).



Слика П1.36. Постављање програмираних грејача у калуп X-облика преко којих је постављено стакло које је загревано у строго контролисаним условима и изглед добијене форме стаклених панела, (Извор: "Administration Building in Istanbul", 2011: 69)

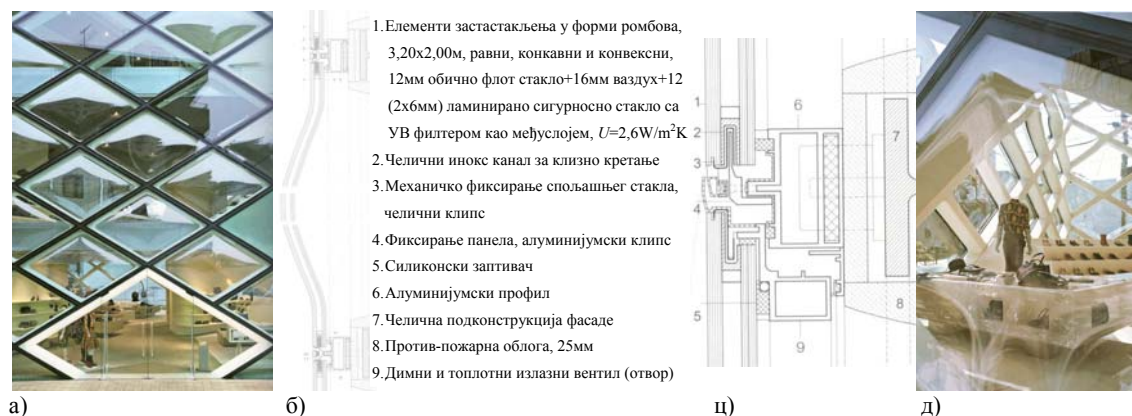
Специфичности

Коришћење већ готових стаклених панела формираних у фабрици, у већини случајева застакљених површина на објектима, није без компликација. Често, у шупљинама иза стакла појављују се прљавштина и влага, које су често последица различитих услова производње и монтаже термоизолационих панела (Neugebauer, 2013). Пројектант и произвођач стакла *Lamglas* нашао је решење у томе што су спољашњи закривљени стаклени елементи индивидуално на градилишту заптивени формирајући термоизолациони панел, док су унутрашњи равни стаклени елементи у потпуности заптивени по ободу још у фабрици спречавајући улаз прљавштине и влаге. Енергетска ефикасност закривљених термоизолационих стаклених панела може доћи у питање из разлога могућности примене само одређених фолија и превлака, ограничавајући термичке перформансе (Neugebauer, 2013). С друге стране, такође, закривљена стакла испупчене форме приказана у овом примеру, могу директно обезбедити термички допринос формирањем већег ваздушног простора између унутрашњег и спољашњег панела. Међутим, генерално говорећи, термички губици кроз термичке мостове (метал-стакло) могу бити значајни.

У случају стаклене фасаде Вако објекта, са сигурношћу се може рећи, да поред очигледне конструктивне и термичке предности представља снажан визуелни доживљај.

Слична испупчена форма стаклених панела чија геометрија подразумева равне ивице панела и испупченост средишњег дела панела може се уочити на објекту модне куће Прада (*Prada*) у Токију. Ромбична форма, равних, конкавних и конвексних термоизолационих панела заједно са конструкцијом креира робусну

структуру доприносећи отпорности на земљотресе, уједно обликовно формирајући велики тродимензионални прозор (Слика П1.37).



Слика П1.37. Стаклени омотач објекта модног центра *Prada*: а) Изглед; б) Пресек конвексног (испупченог) стакленог панела; ц) Детаљ фиксирања стаклених панела; д) Изглед споја суседних панела из екстеријера; (Извор: Schittich et al., 2007: 202, 206, 207)

Стаклени елементи димензија 3,20 x 2,00 m састоје се од спољашњег обичног флот стакла дебљине 12 mm (у складу са јапанским прописима) + 16 mm ваздушног простора + 2 x 6 mm ламинираног сигурносног стакла са УВ филтером као међуслојем, ради спречавања изложености робе сунчевој светлости. С циљем осигурања чврстоће целокупне структуре омотача, осим челичних дијагонала основне конструкције и фиксирања панела уз помоћ клипсе, додатни силиконски заптивач је коришћен са унутрашње стране стаклених панела.

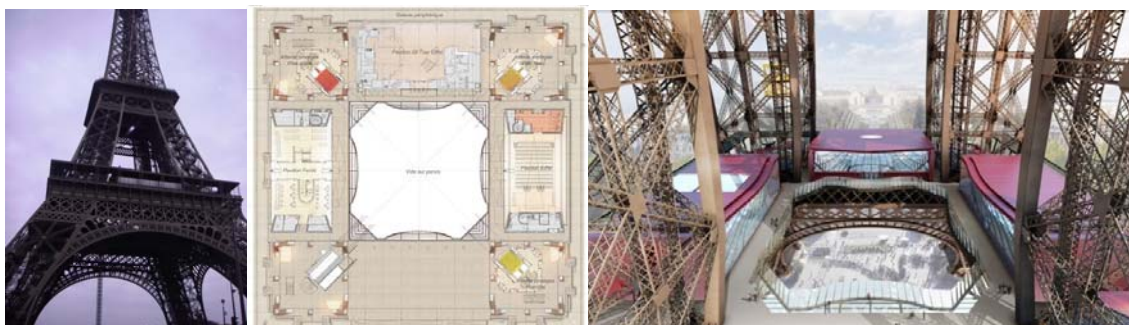
Производни процес панела подразумевао је загревање равних панела у трапезоидном оквиру до испупчења средишњег дела панела под утицајем сопствене тежине. Прецизно контролисан процес грејања, обликовања и хлађења у трајању од осам часова био је неопходан да би се добило испупчење од 150 mm уз толеранцију од +/-30 mm (Schittich et al., 2007).

Пример/Студија случаја 7 – Обнова првог спрата Ајфеловог торња

Контекст

Три фасаде павиљона које су део пројекта обнове првог спрата Ајфеловог торња који је завршен у октобру 2014. године, представљале су нови изазов на пољу транспарентних омотача геометријски комплексних форми. Торња је обновљен по трећи пут од када је изграђен, а вредност обнове је износила 25 милиона еура. Постављено је неколико циљева који су уједно били и повод да се приступи обнови торња ("The Overall Redevelopment of the 1st floor of the Eiffel Tower", 2011):

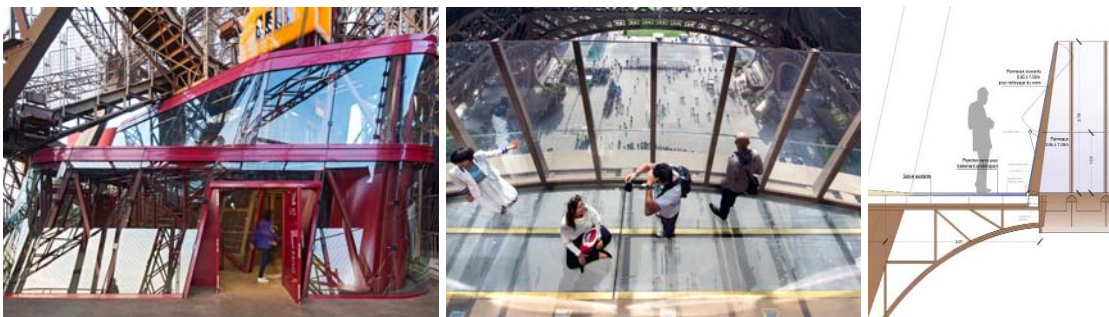
- а) обнова и модернизација павиљона и јавног простора (последње реновирање пре 30 година) као и све већи број посетилаца подразумевали су примену нових техничких стандарда;
- б) повећање атрактивности простора прве етажне (простор посвећен одмору, услугама, посматрању торња и откривању његове историје), упркос томе што је просторно највећи, најмање је посећен;
- ц) приступачност свих делова прве етажне хендикепираним особама, што до сада није било могуће;
- д) унапређење енергетских перформанси и смањење емисије гасова применом система (соларни панели, LED осветљење, четири ветрењаче) који ће надоместити део енергије потребне за функционисање торња.



а) б) ц)
Слика П1.38. Изглед, основа и модел реорганизације простора прве етажне Ајфеловог торња
(Извор: а) Аутор, 2012; и б) и ц) Преузето са http://www.tour-eiffel.biz/images/PDF/press%20kit_overall_redevelopment_of_the_1st_floor_of_the_eiffel_tower.pdf, 23. 6. 2015)

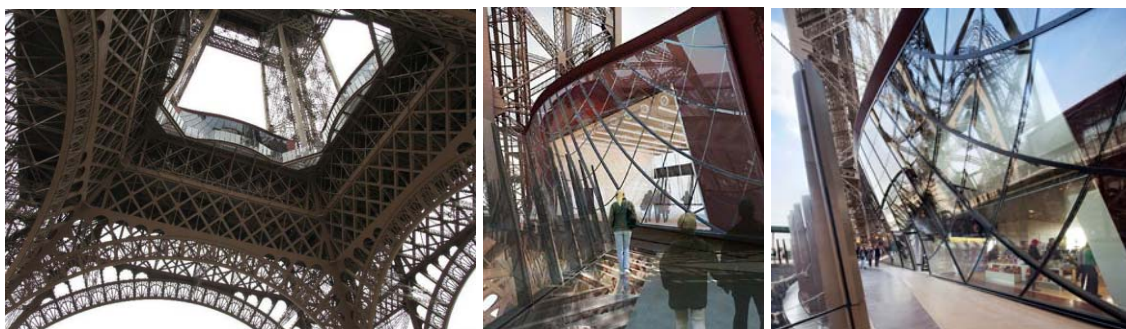
Предвиђено је да два нова павиљона представљају "станиште" за аудиторијум, продавнице и изложбени простор, као и да обнова фасаде "Ресторана 58" буде у визуелној хармонији са новим павиљонима (Слика П1.38).

Такође три стајалишта за лифтове на првој етажи добили су нови омотач. Посетиоци су у могућности да доживе висину од 57 m испод својих стопала ходајући по стакленом поду ширине 1,5 m који иде око централног атријума. Доживљај је акцентован застакљеном оградом висине 2,5 m нагнутом ка центру (Слика П1.39).



Слика П1.39. Изглед стајалишта за лифт, стаклени под и ограда и детаљ стаклене ограде на првој етажи Ајфеловог торња (Извор: Преузето са http://www.archdaily.com/577005/eiffel-tower-s-first-floor-refurbishment-agence-moatti-riviere/548a41bae58ecec437000064-mr_eiffel_0914, 23.06.2015.)

Нове структуре у пуноности представљају "ехо" геометрије Ајфеловог торња тако да фасада павиљона и стајалиште за лифтове, као и ограде, прате нагнути правац стубова торња (Слика П1.39). Закривљеност је посебно уочљива код фасада павиљона које су оријентисане ка средишту и које су двоструко закривљене (Слика П1.40).



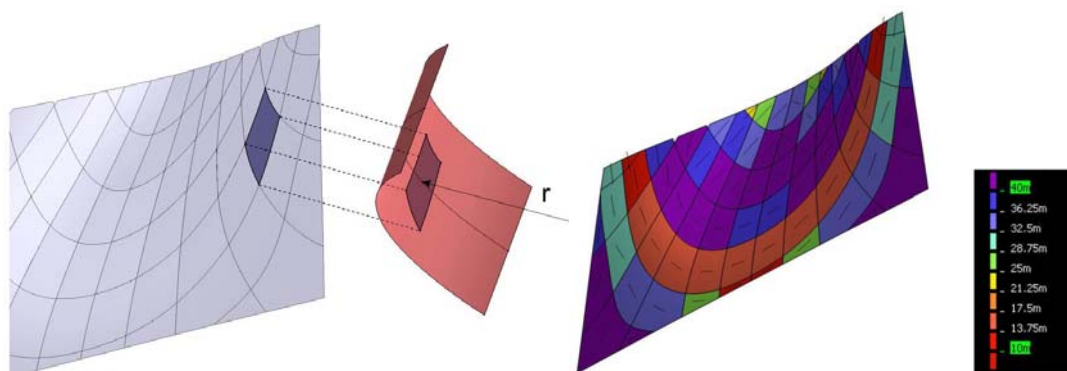
Слика П1.40. Поглед одоздо, модел и изграђена фасада павиљона на првој етажи Ајфеловог торња (Извор: Преузето са http://www.archdaily.com/577005/eiffel-tower-s-first-floor-refurbishment-agence-moatti-riviere/548a41bae58ecec437000064-mr_eiffel_0914, 23. 6. 2015)

Геометрија и визуелни/обликовни потенцијали

Најзначајнија одлика овог пројекта је нагнута двоструко закривљена фасада два павиљона чија је комплексна геометрија захтевала проналажење решења за двоструки изазов: са аспекта застакљења, и то првенствено у погледу одговарајуће потконструкције, као и испуњења термичких захтева. С циљем избегавања стандардне, класичне или структуралне фасаде, током разраде

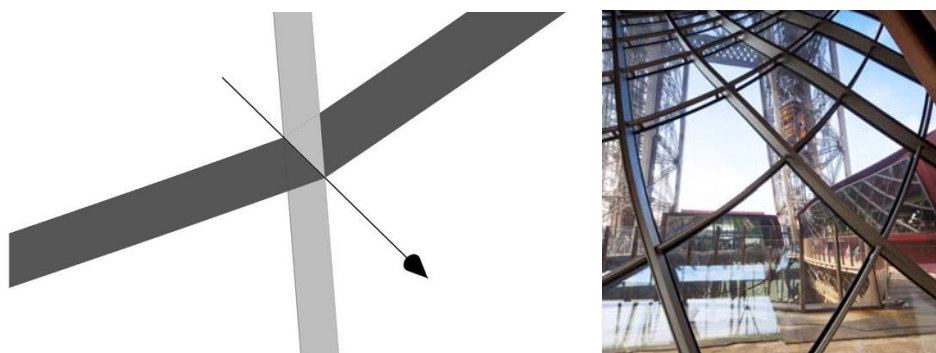
пројекта дошло се до решења које је омогућило потпуно интегрисање првобитне архитектонске идеје уједно гарантујући економску изводљивост.

Захваљујући оптимизацији параметарског модела, решење за двоструко закривљену површину транспарентног стакленог омотача, пронађено је у апроксиматизацији елемената којом су постигнуте четвороугаоне цилиндричне форме панела. Такође, оптимизацијом је постигнут одређени број панела истог полупречника, као што приказује Слика П1.41.



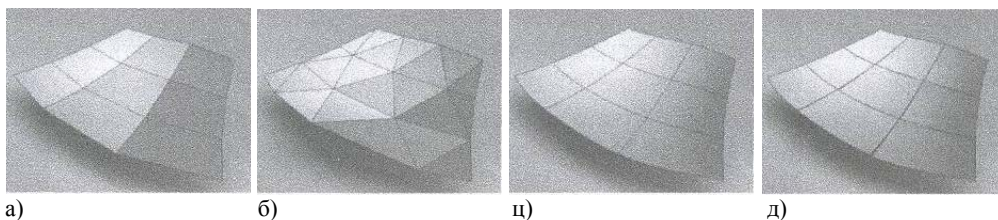
Слика П1.41. Сваки стаклени панел као део цилиндра и различити полупречници цилиндричних панела (Извор: Преузето са http://www.archdaily.com/577005/eiffel-tower-s-first-floor-refurbishment-agence-moatti-riviere/548a41bae58ecec437000064-mr_eiffel_0914, 25. 6. 2015.

Овим путем избегнути су напони торзије у структуралним чворовима што је омогућило производњу елемената потконструкције из једноструко закривљених елемената (геометријски развојних површи) (Слика П1.42) и њихово спајање заваривањем, а тиме и решење у виду стандардног детаља (Leduc et al., 2012).



Сprovedено је истраживање неколико варијанти застакљења комплексне двоструко закривљене стаклене површи. Варијанта са двоструко закривљеним панелима није прихваћена због економских разлога њихове производње, док је варијанта са применом равних панела, било троугаоних или четвороугаоних, са

аспекта визуелног доживљаја, сматрана неодговарајућом (Слика П1.43). Ово је посебно значајно за закривљену површину где је приоритет уочавање двоструке закривљености. Из наведених разлога усвојено решење, које приказује Слика П1.43д, одражава жељену закривљеност, гарантујући економску изводљивост која је омогућена индустријском производњом цилиндричних панела с обзиром на то да машине за савијање стакла омогућавају производњу цилиндричних панела различитог полупречника (Leduc et al., 2012).



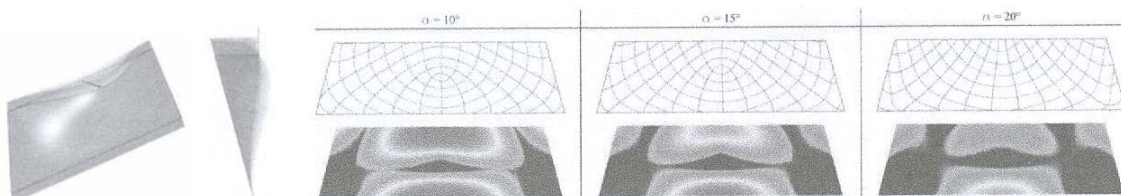
а) б) ц) д)
Слика П1.43. Различита панелизација геометријски комплексне фасаде павиљона: а) равни четвороугаони панели; б) равни троугаони панели; ц) двоструко закривљени четвороугаони панели; д) цилиндрични четвороугаони панели; (Извор: Leduc et al., 2012: 95)

Ово решење укључује два типа дисконтинуитета између два суседна панела: дисконтинуитет у позицији и тангентности који се могу умањити геометријском оптимизацијом. Минимизирање одступања је главни изазов са обликовног аспекта, али исто тако и са техничког у погледу фиксирања панела, њихове водонепропусности и слично. Опредељење за формирање спојница дуж линије закривљења минимизира одступања (Слика П1.44). Пошто се код цилиндра линије водиле (енг. *generatrixes*) поклапају са правцем максималног закривљења, пожељно је да распоред спојница буде истог правца ради смањивања дужине елемената (поделе-дискретизација), што се може сматрати максималном дужином панела у правцу водилца (енг. *generatrixes*). У случају мале максималне закривљености, оријентација цилиндра а самим тим и оријентације спојница су мање ограничене, што пружа већу слободу у распореду спојница који се може применити у равнијим зонама површине (Leduc et al., 2012).



Слика П1.44. Могућа одступања приликом примене цилиндричних панела (Извор: Leduc et al., 2012: 95)

Израда параметарског модела површине током целог процеса пројектовања је омогућила синергију између архитектонских ограничења и геометријских и техничких могућности. Варијације различитих параметара, као што су централно удаљење или тангенте горње ивице (Слика П1.45), дозвољавају брзу модификацију површине и стварање великог броја решења. Главне криве линије као и одговарајући распоред спојница генерисани су за сваки сет параметара. С циљем прилагођавања димензије панела, распоред спојница модификован је и не следи тачно главне криве линије. Ово има веома мали утицај на одступања између панела због тога што је углавном примењено на равнијим зонама површине (Leduc et al., 2012). Избор у овиру матрице решења одабран је у складу са архитектонским критеријумима и техничким перформансама (процена одступања, величина панела, и слично), као што приказује Слика П1.45.



Слика П1.45. Различити параметри површине: централно удаљење и тангенте горње ивице и пример панелизације (распоред спојница) за три различита сета параметара (различита закривљеност) (Извор: Leduc et al., 2012: 96)

Захваљујући алгоритмима оптимизације, полупречници и позиција цилиндричних панела оптимизирани су с циљем минимизирања одступања у позицији и тангентама суседних панела. Процес оптимизације је спроведен уз помоћ програма *Evolvute*, који је био главни предмет истраживања у оквиру европског истраживачког пројекта у ком су учествовали Универзитет у Бечу, компаније *RFR* и *Evolvute* (Leduc et al., 2012), а чији циљ је управо био проналажење решења за израду геометријски комплексних (слободних) форми омотача архитектонских објеката помоћу једноструко-закривљених панела. Квалитет решења прве фазе оптимизације био је задовољавајући и резултат су била одступања у позицијама мања од 2мм (Слика П1.46).

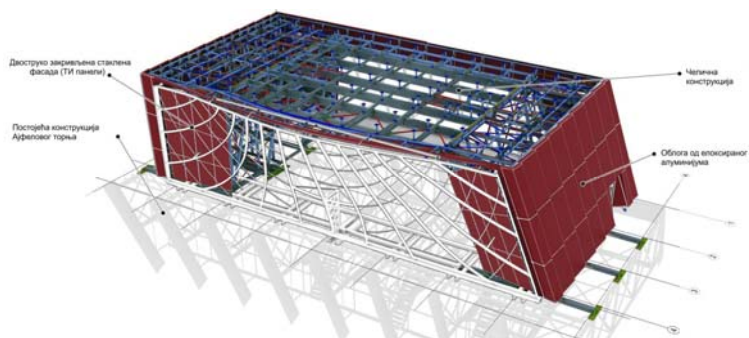


Слика П1.46. Прва фаза оптимизације и друга фаза-"ублажавање" цилиндара према вертикалном правцу (Извор: Leduc et al., 2012: 97)

Ово је допринело другој фази оптимизације са новим архитектонским ограничењима: цилиндри су реоријентисани тако да се дисконтинуитет тангенти усмери према вертикалним линијама како би се нагласио карактер Ајфеловог торња (Слика П1.46).

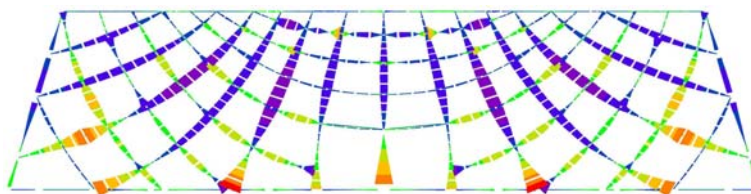
Конструктивни систем, везе и димензије стаклених елемената

Фирме *RFR* и *Moatti & Riviere Architects* су сарађивале у изради техничких детаља свих стаклених елемената, као и елемената потконструкције. За фасаду релативно скромних распона, главни пројектантски и извођачки изазов представљала је њена конструкција. Фасада Ајфеловог павиљона висока 8 m, ослоњена је по ободу ради преноса оптерећења на остали део оптерећења или постојећу конструкцију торња (Слика П1.47). Константно оптерећење саме конструкције фасаде преноси се, углавном вертикално оријентисаним елементима у централни део фасаде, а затим помоћу попречних греда.



Слика П1.47. Потконструкција двоструко закривљене стаклене фасаде
(Извор: Преузето са http://www.archdaily.com/577005/eiffel-tower-s-first-floor-refurbishment-agence-moatti-riviere/548a41bae58ecec437000064-mr_eiffel_0914, 26. 5. 2015)

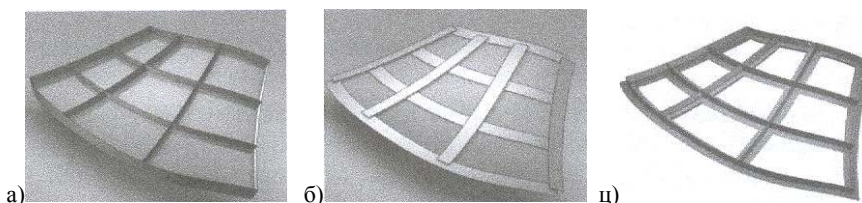
Носачи су изложени савијању с циљем прихватања хоризонталног оптерећења (ветар). У циљу смањења деформација насталих због хоризонталних сила, база носача је повезана за доњу ивичну греду крутом везом (Слика П1.48).



Слика П1.48. Дијаграм момената у елементима потконструкције
(Извор: Преузето са http://www.archdaily.com/577005/eiffel-tower-s-first-floor-refurbishment-agence-moatti-riviere/548a41bae58ecec437000064-mr_eiffel_0914, 26. 5. 2015)

Главне криве линије су лако прилагодљиве геометрији носача формираних од плочастих елемената (Слика П1.49). Како би се повећала виткост, одабран је

правоугаони пресек носача чија инерција је нормална на референтну површину и геометријску осу и који следи закривљени распоред спојница (Слика П1.50).



Слика П1.49. Могуће варијанте геометрије закривљених профила конструкције - профили формирани од: а) развојних површи нормалних на површину фасаде; б) развојних тангенцијалних површи; и ц) мешовитих-тангенцијалних и нормалних површи (Извор: Leduc et al., 2012: 96)



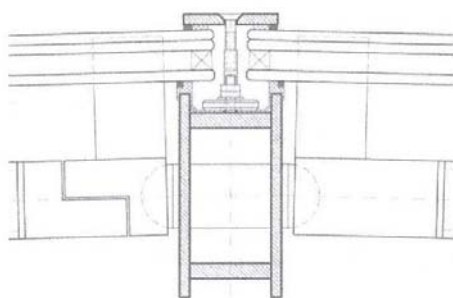
Слика П1.50. Усвојена геометрија и форма елемената потконструкције (Извор: Преузето са http://www.archdaily.com/577005/eiffel-tower-s-first-floor-refurbishment-agence-moatti-riviere/548a41bae58ecec437000064-mr_eiffel_0914, 26. 5. 2015)

Претходно је уочено да нормалне и тангенцијалне површине наслоњене на главну криву линију су развојне површи. Ортогонална пројекција (*offset*) развојне површи задржава исту форму, тако да су све четири стране такође развојне површи: бочне дуже стране носача су добијене ортогоналном пројекцијом средње нормалне површи док су фронталне стране добијене ортогоналном пројекцијом средње тангенцијалне површи. На тај начин су носачи добијени првенствено формирањем засебна четири лица носача сечењем равних челичних панела у жељени облик, њиховим једноставним савијањем без торзије и склапањем помоћу заваривања. Стране су увек нормалне између себе, што дозвољава много већи ниво конструктивности. Слика П1.51 приказује процес израде носача од четири засебна елемента чија закривљеност је намерно истакнута.



Слика П1.51. Тродимензионални модел, развијене све четири стране, и физички модел профила (Извор: Leduc et al., 2012: 99)

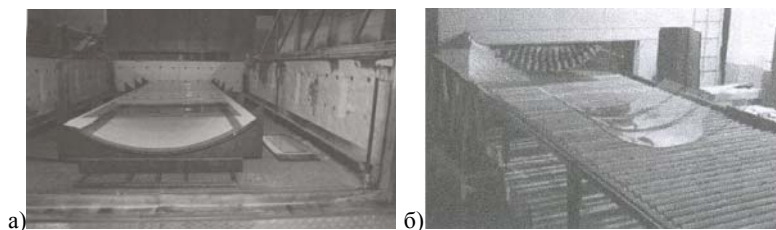
Главне криве линије имају још једну интересантну одлику: нормалне површи које се ослањају на главне криве линије нису само развојне, већ такође и симетрале два суседна цилиндрична панела, због чега је угао услед закривљења, симетричан са обе стране вертикалног профила-носача (Слика П1.52). Осим тога, могуће је прилагодити стандардни детаљ упркос геометријској комплексности фасаде, с обзиром да су одступања у позицији и углу ограничена. Притисни профил је фабрикован на сличном принципу као фронталне стране носача, што подразумева развојну површ формирану савијањем (без силе торзије) равног, исеченог панела у жељени облик (Слика П1.52) (Leduc et al., 2012).



Слика П1.52. Хоризонтални пресек детаља везе потконструкције и термоизолационог панела (начин заптивања термоизолационих панела), (Извор: Leduc et al., 2012: 99)

Тип застакљења и техника обликовања стакла

Стаклени панели су термоизолациони, формирани од спољашњег каљеног, ламинираног, сигурносног стакла с обзиром на то да се фасада протеже изнад јавног простора, и унутрашњег једноструког каљеног стакла (Слика П1.52). У данашње време, сада већ традиционални начин фабрикации закривљеног стакла јесте поступак загревања равног стакленог панела у пећи преко калупа отпорног на топлоту (често од челика) који омогућава савијање стакла под дејством гравитационе силе (Слика П1.53). Ова техника није била одговарајућа из два разлога: геометрија сваког панела је захтевала посебан калуп, а с обзиром на то да нема понављања исте, ова техника је представља веома скуп начин производње; такође, на овај начин веома је тешко омогућити поуздану термичку обраду стакла.



Слика П1.53. Традиционална техника савијања: а) уз помоћ калупа и б) савремено савијање и каљење уз помоћ машина (Извор: а) Hof & Oechsner, 2013: 184; и б) Leduc et al., 2012: 98)

Техника савијања уз помоћ машина за савијање постаје полако стандардна пракса. Уз помоћ ове технике могуће је савити стакло, као и истовремено обезбедити термичку обраду доброг квалитета. Ови уређаји су настали из индустријских машина за каљење стакла, прилагођених савијању стакла током процеса каљења. Стакло се савија уз помоћ комјутерски контролисаног механизма који укључује вентилаторе и ролере. Ова техника омогућава савијено каљено стакло доброг квалитета, али има два важна ограничења која су последице комплексности: могући облици су ограничени на цилиндричне форме и правац савијања је фиксан. Прво ограничење мора се контролисати помоћу оптимизације самих цилиндара, док друго намеће ограничење величине панела, у зависности од угла између основне површине и ивице панела, односно полупречника закривљености.

Специфичности

Сагледавање изводљивости изградње, како застакљења тако и конструктивних елемената, у раној фази пројекта уз истовремену контролу трошкова изградње омогућило је сагледавање и истраживање могућности, и одабир финалног оптималног решења (Слика П1.54) геометријски комплексног стакленог омотача. Примењени процес пројектовања, као резултат технички и производно оријентисаног размишљања, намењен за овај јединствени јавни простор високих перформанси, омогућио је да архитектонска идеја постане стварност на једном тако престижном историјском споменику.



Слика П1.54. Изглед стаклене фасаде павиљона и улаза у павиљон
(Извор: Преузето са http://www.archdaily.com/577005/eiffel-tower-s-first-floor-refurbishment-agence-moatti-riviere/548a41bae58ecec437000064-mr_eiffel_0914, 26. 5. 2015)

За разлику од конвексне фасаде павиљона, слична форма и пропорција фасаде, само у овом случају конкавне, може се уочити на објекту Enzo Ferrari

музеја у Модени. Такође, за разлику од павиљона на првом спрату Ајфеловог торња, на стакленој фасади музеја примењени су равни панели.



Слика П1.55. Изглед фасаде из екстеријера и ентеријера и детаљ везе-споне за прихватање ТИ панела вертикалним кабловима (Извор: Blandini et al., 2012: 1-3)

Стаклена фасада, висока 11 m и ношена косим кабловима, геометријски је дефинисана двама конусним површинама које се секу (Слика П1.55). Вертикални челични инокс каблови пречника 32 mm носе равне термоизолационе панеле који су формиран од спољашњег каљеног стакла дебљине 10 mm и два полукаљена стакла дебљине 6mm ламинирана помоћу *SentryGlas®Plus*¹ фолије (Blandini et al., 2012). Вијугава форма фасаде је остварена коришћењем правих каблова и равних стаклених панела који морају бити сечени под одреченим углом да би се постигла конусна геометрија фасаде.

Посебна пажња је посвећена контроли извијања фасаде, као и извитоперености најкритичнијих термоизолационих панела, која је постигнута оптимизацијом силе преднапрезања у сваком појединачном каблу и чија вредност варира између 80 и 330 kN (Blandini et al., 2012). Кабловска спона и фиксирање стакла су обликовани посебно за фасаду музеја са циљем да се смањи коришћење материјала на минимум, као и да се постигне упечатљив архитектонски језик (Слика П1.55). 3Д модел везе је прецизно дефинисан у сарадњи са малом фабриком специјализованом за дизајн предмета. Црни алуминијумски брисолеји, који обликовно истичу конкавну форму стаклене фасаде, смањују топлотне добитке.

¹ СентриГлас® јонопласт фолија (енгл. *SentryGlas® ionoplast*) омогућава креирање лакшег, сигурнијег ламинираног стакла које пружа нови ниво перформанси. Ламинирана стакла са овом врстом фолије пет пута су јача и до 100 пута чвршћа од конвенционалних материјала, што омогућава бољу заштиту од олује, удара и моћних експлозија. Поред своје снаге, СентриГлас® задржава изванредну јасноћу, чак и након неколико година, обезбеђујући истовремено трајну лепоту ламинираног стакла, без обзира на место његове апликације – стаклени подови и степенице, минимално ослоњене балконске ограде и стаклене надстрешнице.

П.1.3 Студије случаја нетермичког стакленог омотача геометријски комплексних форми са закривљеним стакленим елементима

С обзиром на дефиницију термичког омотача која подразумева да "термички омотач зграде чине сви елементи зграде који раздвајају грејани од негрејаног дела зграде, односно, целине зграде са различитим условима комфора..." (Правилник о енергетској ефикасности зграда), тиме односећи се на топлотне губитке, у раду је разматран и нетермички омотач као елемент који раздваја спољашњи од унутрашњег простора делимично или потпуно затвореног, чинећи целине са истим или сличним условима комфора. У наредном делу биће анализирани примери нетермичког омотача. Такође, биће представљени примери надстрешница, као и примери примене закривљеног стакла у ентеријеру који су са аспекта комплексне геометрије стакла релевантни за тему овог рада.

Пример/Студија сл. 8 – Стамбено-пословни објекат "Infinity", Београд

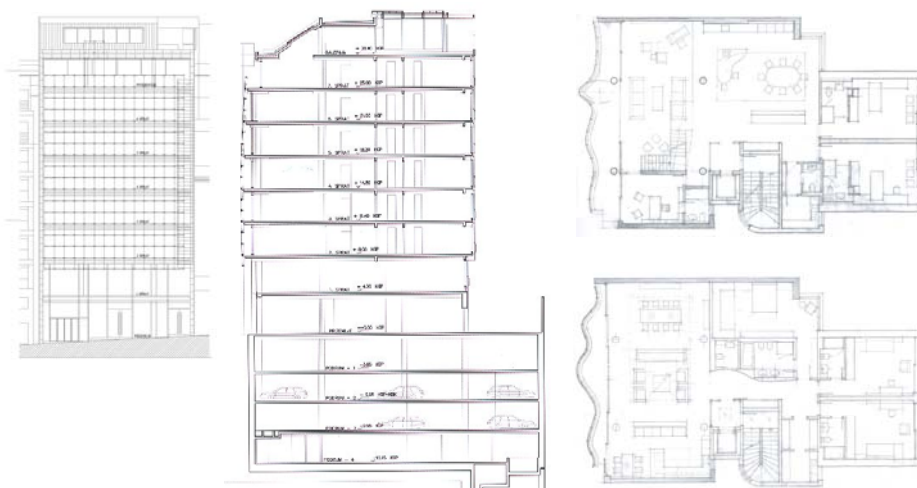
Контекст

Одабрани пример из Београда, Србије је недавно завршен, аутентичан стамбено-пословни објекат *Infinity* који инспирисан природним окружењем и заснован на *smart house* технологији која га чини паметним и енергетски-ефикасним објектом, помера границе осмишљавања новог концепта живљења у самом центру главног града. Ауторски тим, на челу са проф. др Миодрагом Мирковићем пројектовао је објекат који садржи шест стамбено-пословних апартмана од друге до седме етаже, од којих сваки заузима једну етажу, осим апартмана на седмој етажи који је двоетажан. У приземљу објекта, на првом спрату и у сутерену, налази се велики локал са излогом и улазом према улици. У подрумским етажама објекта, којима се приступа ауто-лифтом, смештена је гаража на 3 нивоа - 4 гаражна места припадају једном стану (Слика П1.56). Путнички и ауто лифт представљају иновативна технолошка решења која пружају комфор са најновијим системом контроле.

Применом савремених технологија у објекту Инфинити које подразумевају наменско дигитализовано управљање расветом, комуникацијом, подним и зидним грејањем, плафонским и зидним хлађењем, кућним уређајима, главним доводом воде, системом надзора објекта, и музике, а све преко централне управљачке

конзоле *touch screena* с циљем програмирања режима рада система, пружа се могућност прилагођавања специфичном начину и стилу живота, тренутним активностима, расположењу и навикама укућана ("Infinity", 2010). Према речима аутора ("Infinity" Beograd, 2009: 1):

"Чаролија је присутна, али невидљива. Најсавременија технолошка и архитектонска решења чине да простор дише, зрачи топлином зими и медитеранском свежином лети, да се отвара према сунчевој светлости или нечујно ушушкава док киша клизи низ кристалне сводове. А ништа од тога се не види оком и не нарушава естетско јединство овог чудесног места."



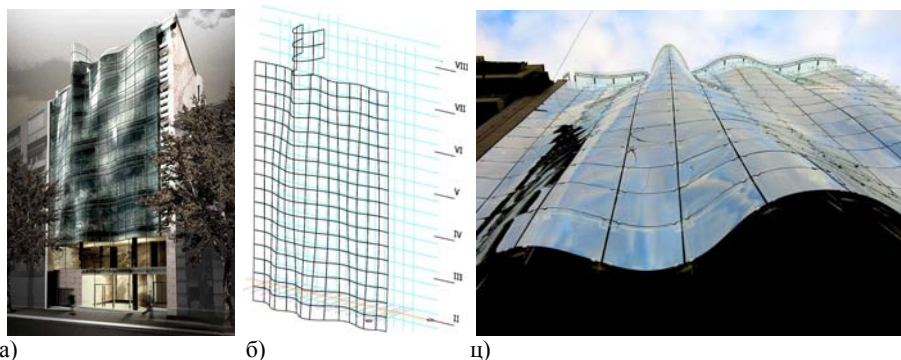
Слика П1.56. Основа спрата и дуплекса, пресек и изглед стамбено-пословног објекта "Infinity", (Извор: Захвалношћу проф. арх Миодрага Мирковића, 2014 и "Infinity", 2010: 86-95)

Геометрија и визуелни/обликовни потенцијали

Слободно заталасана форма стаклене фасаде објекта Инфинити који се налази у центру Београда, састоји од 238 у потпуности геометријски различитих стаклених елемената (Слика П1.57). Према речима аутора пројекта, дизајн фасаде инспирисан је природним окружењем – водом "која је обликовала положај, живот и душу Београда" ("Infinity" Beograd, 2009: 1).

Ништа не утиче толико на изглед објекта као што то чини фасада – омотач објекта. Суптилне нијансе плаве боје неправилно разливане остављају утисак "заталасане воде" како у динамичким условима природног осветљења на реалној фасади тако и у виртуелним условима на 3Д моделу, као што приказује Слика П1.57. У овом случају комплексне геометрије посебан изазов је представљао сам

процес дизајна и израде фасаде током кога је неопходно било комуницирати са клијентима, произвођачима и колегама, како ће заправо она изгледати, с обзиром да је први пут стаклена фасада слободне форме требало бити изграђена у Београду (Мирковић, 2014).

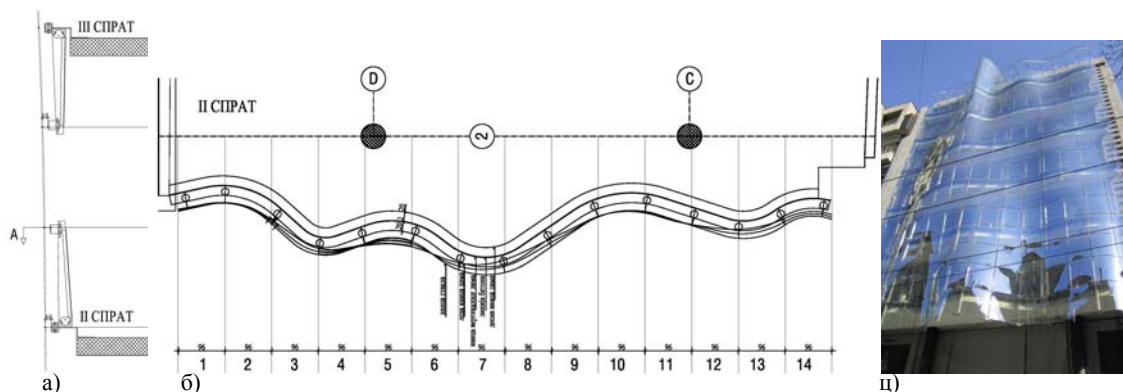


Слика П1.57. Слободно закривљена фасада објекта Инфинити, Београд: а) 3Д модел; б) Геометрија фасаде; и ц) Изглед фасаде са улице; (Извор: а) и б) Захвалношћу проф. арх. Миодрага Мирковића и доц. арх. Драгана Марчетића, 2014; и ц) Аутор, 2015)

Геометрија фасаде, као што приказује Слика П1.57, представљена је комплексном геометријом, односно слободно закривљеном - слободном формом стакленог омотача. Комплексна геометрија закривљене површи стакленог омотача је изведена претварањем двоструко-закривљене површи у правоизводну површ која је генерисана линеарном интерполацијом две криве. Ова комплексност стаклене површине је уравнотежена универзалним дизајном челичне потконструкције компатибилне са геометријом стакла доприносећи једноставности детаља.

Конструктивни систем, везе и димензије стаклених елемената

Стаклени панели су прихваћени помоћу вертикалне челичне потконструкције која се налази непосредно иза стаклене површине и која помоћу челичних држача и спона прихвата стаклене панеле у четири тачке по хоризонтали. Вертикална потконструкција није континуална, већ се састоји од вертикалних носача *I*-пресека, висине једног стакленог панела, који се каче за бетонску плочу изнад и испод ње (Слика П1.58), што омогућава већу транспарентност средишњих панела једне етаже иза којих се не налази потконструкција. Челична потконструкција пројектована је тако да је могуће њено штемовање у свим потребним правцима, а с циљем постављања панела на тачну меру, односно линију хоризонталних и вертикалних пресека у осама између два панела (Марчетић, 2014).

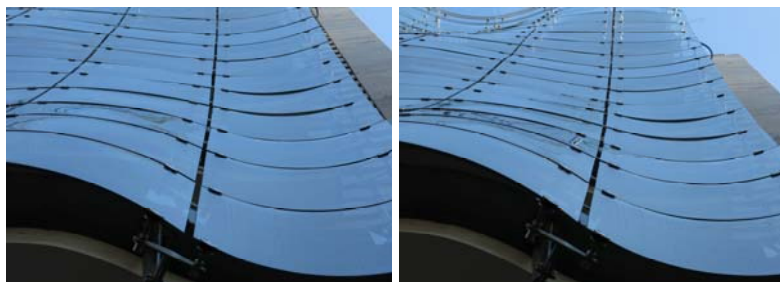


Слика П1.58. Пресек, основа и изглед потконструкције за тачкасто фиксирање стаклених панела, (Извор: Захвалношћу проф. арх. Миодрага Мирковића и доц. арх. Драгана Марчетића, 2014)

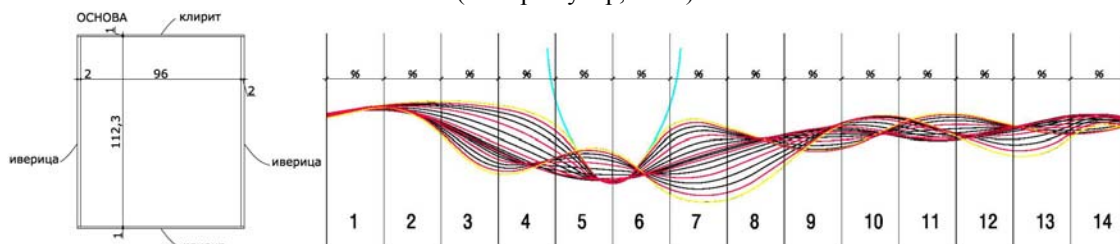
Стаклена фасада је пројектована у растеру 113 x 96 cm (фронтална пројекција осног хоризонталног и вертикалног размака између панела). С обзиром на пројектовани размак панела од 16 mm, димензије панела у раванској пројекцији су 111,4 x 94,4 cm. Стаклени панели на објекту Инфинити нису пројектовани као конструктивни елементи. Међутим, како је архитектонско стакло често на првој линији одбране, првенствено конструкције једне зграде (у погледу природних катастрофа као што су земљотреси и тешке олује), стаклене панеле, посебно без оквира као у овом примеру, неопходно је пројектовати као секундарну конструктивну компоненту (што је предвиђено новим Еурокодом 10).

Тип застакљења и техника обликовања стакла

С обзиром на то да стаклена фасада није термички омотач, већ двоструки омотач (застакљена тераса) која је у потпуности отворена са бочне стране, за њену материјализацију коришћено је ламинирано сигурносно стакло – 2 x 6 mm са сигурносном фолијом између стакла. Стакла су типа *neutral gray* са благом рефлексијом и брушеним ивица. Посебан изазов је представљало довођење ивица суседних панела у исту раван по ободу панела, а посебно у хоризонталном смислу (Слика П1.59 и П1.60) где је форма ивице стакла морала бити истоветна како не би дошло до подливања приликом падавина. Пројектовани хоризонтални и вертикални размак између стаклених панела износи 16 mm. За потребе штеловања вертикалне потконструкције "спајдера", узрокованог одступањима у току изградње бетонске конструкције (Слика П1.59), дозвољен је максимални размак између два панела од 20 mm, али то је подразумевало да хоризонтални и вертикални размаци између панела морају бити исти.



Слика П1.59. Уочљиво одступање суседних панела по хоризонталним спојницама;
(Извор: Аутор, 2015)



Слика П1.60. Калуп за стакла и закривљеност панела приказана хоризонталним пресецима у осама између два стаклена панела, (Извор: Захвалношћу проф. арх. Миодрага Мирковића, 2014)

Нестандардни панели су произведени термичким путем уз помоћ калупа, по релативно високој цени која је последица процеса њихове производње. На основу развијене димензије панела из 3Д модела фасаде произведени су посебни конкавни и конвексни калупи (Слика П1.60) за сваки стаклени панел (једноструко закривљен), чија геометрија је подразумевала равне вертикалне ивице панела (Слика П1.59).

Специфичности

Овај пример представља значајну примену стакла у контексту економски неразвијене земље, као што је Србија, као одговор на савремене захтеве и један од највећих изазова архитектуре од стакла - комплексну геометрију. Циљ је био да се обезбеди што економичније решење коначне варијанте дизајна стаклене фасаде које је обликовно у складу са оригиналном архитектонском идејом.



Слика П1.61. Слична таласаста форма стакленог омотача: а) фасада објекта *Infinity*, и б) фасада објекта *Musee de la Dentelle et de la Mode* у *Calais*-у, Француска;
(Извор: а) Аутор, 2013; б) Baldassini, 2009b, с: 55, 716)

Сличан приступ комплексној геометрији је примењен у дизајну фасаде објекта *Musee de la Dentelle et de la Mode* у *Calais*-у, Француска (Слика П1.61а и

П1.61б). Овде, такође форма стаклених панела није стандардизована, али је примењен универзални систем потконструкције, једноставне структуре од челичног лима чија форма је добијена ласерским сечењем (Baldassini, 2009а). Комплексност у геометрији стакленог омотача решена је захваљујући поједностављеном детаљу конструкције. Овај пројекат представља примену двоструко закривљених стаклених панела на фасади која је само делимично двоструко закривљена, а који с обзиром на трошкове и ограничења, не пружају потребну архитектонску флексибилност. Супротно овом пројекту, јесте примена закривљеног стакла из разлога додатног обезбеђења дневног осветљења, постигнутог већом површином закривљене површи, на објекту *SickKids Research Tower* у центру Торонта (Слика П1.62). Овај пример приказује већу економичност, због веће флексибилности, произашле из једноставније геометрије (једноструко закривљене) таласасте форме, која омогућава понављање панела исте закривљености.



Слика П1.62. Термоизолациони панели формирани од савијених конвексних и конкавних облика ниско-емисионог стакла, различитог радијуса и обраде - транспарентни и са мат премазима (Преузето са <http://glassmagazine.com/article/commercial/greatglazing-sickkids-research-tower-1311666>, 12. 9. 2014)

Панели су произведени од стране произвођача Кристакурва (*Cristacurva*) и састоје се од спољашњег каљеног стакла са нискоемисионим премазом (*SunGuard Neutral 50*) на позицији 2 и унутрашњег каљеног стакла са ниским процентом гвожђа, укупне дебљине 24 mm (6 + 12 + 6 mm), у случају транспарентних панела; спољашњег каљеног стакла са нискоемисионим премазом (*Frost Silk Screening*) на позицији 2 и унутрашњег каљеног стакла са ниским процентом гвожђа (*CurvaSpan Glass*), укупне дебљине 24 mm (6 + 12 + 6 mm) у случају мат панела; као и одговарајућим белим премазом на позицији 4 у случају декоративних стаклених панела. Све спојнице су заптивене сивим силиконом ("GreatGlazing: SickKids Research Tower", 2013).

Пример/Студија случаја 9 – Телевизијски студио "Channel 4", Лондон

Контекст

Објекат новог седишта телевизије *Channel 4* површине 15.000 m², пројектаната Ричарда Рођерса и партнера (*Richard Rogers Partnership*) из 1994. године, интегрисан је у урбани пејзаж у окружењу Вестминстер локације, на начин да се само лифт и сервисна кула издижу изнад околних објеката. Геометријска L-форма објекта постављеног на углу произашла је из саме локације (Слика П1.63). Приступ објекту је преко застакљеног моста изнад којег је обешена челично-стаклена конструкција надстрешнице.

Геометрија и визуелни/обликовни потенцијали

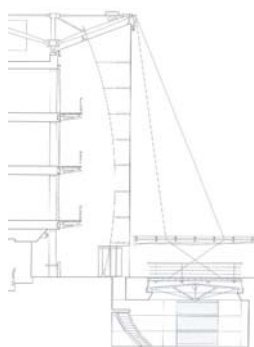
Оригинални детаљ улаза представља помало "драматична" 20 m висока, конкавна, једноструко-закривљена (цилиндрична) стаклена фасада. Спој стаклене фасаде са масивним делом објекта у основи је исечен и тако визуелно одвојен од осталог дела објекта (Слика П1.63).



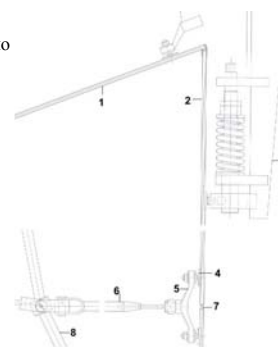
Слика П1.63. Основа спрата и изглед једноструко закривљене стаклене фасаде ТВ студија *Channel 4*, (Извор: а) Schittich et al. 2007: 282; б) и ц) Преузето са: <http://www.ajbuildingslibrary.co.uk/projects/display/id/445>, 27. 6. 2014)

Конструктивни систем, везе и димензије стаклених елемената

Стаклена фасада је обешена са препуштених челичних греда на крову. Попут карика ланца, сваки панел носи тежину свих панела испод себе. Унутрашња двострука мрежа преднапрегнутих челичних инокс каблова стабилизује конструкцију услед хоризонталног оптерећења од ветра. У средишњем делу фасаде, оптерећење од ветра је прихваћено хоризонталним кабловима, а усисне силе вертикалним кабловима. На ивицама стаклене фасаде, решење је обрнуто (Schittich et al., 2007). Овај систем за преношење оптерећења је довео до креирања равне мреже фиксираних у индивидуалним тачкама где су стаклени панели стабилизовани кратком зглобном шипком (Слика П1.64).



1. Кров, 12mm ламинирано стакло
2. Закривљено ламинирано сигурносно стакло 12 mm
3. Челични инокс обешени елемент са опругом
4. Тачкасто фиксирање, челични инокс дтжач (чеп) углављен у 1 слој стакла
5. Ливени челични инокс "спајдер" носач, четири тачке
6. Челична инокс зглобна шипка
7. Перманентно еластична силиконска спојница
8. Челични инокс кабл, $\phi 34$ mm



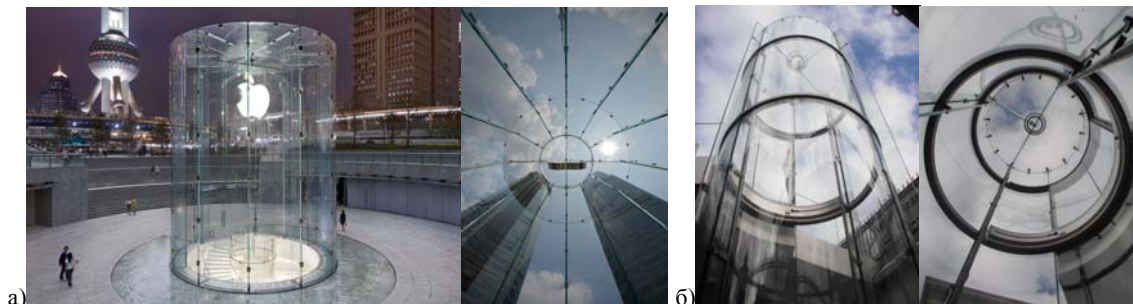
Слика П1.64. а) Изглед, пресек и детаљ конструкције једноструко закривљене конкавне стаклене фасаде телевизијског студија *Channel 4*, Лондон (Извор: а) Аутор, 2014; б) Schittich et al., 2007: 283)

Све везе и фиксирање стаклених панела су зглобне форме и као такви обезбеђују отпорност на променљивост оптерећења којем су поједини елементи изложени као и пренос спољашњег оптерећења на конструкцију. Коси делови фасаде, са страна, су изграђени као крути углови на којима је примењена структурална силиконска спојница између стаклених панела (Schittich et al., 2007).

Тип застакљења и техника обликовања стакла

Једноструко закривљени стаклени панели су од ламинираног стакла дебљине 12 mm (2 x 6 mm). С обзиром на годину изградње, претпоставка је да је стакло савијено на традиционалан начин термичким путем помоћу калуца.

За разлику од "тешке" и помало "драматичне" улазне фасаде објекта *Channel 4* високе 20 m, може се рећи да је било потребно 20 година да се искористе све предности закривљеног стакла и његове примене као елемента конструкције. То се најбоље може сагледати и упоредити на примеру улаза који су, такође, представљени једноструко закривљеним стакленим омотачем, чију форму карактерише "елегантна", "лака" и у потпуности транспарентна стаклена структура (Слика П1.65). На стакленом омотачу улаза у објекат *Apple* у Шангају, примењена је до сада највећа димензија закривљених стаклених панела (12x2,6m).



Слика П1.65. а) Улаз у подземни објекат "*Apple*", Шангај; б) Улаз у музеј *Mauritshuis*, Харг; (Извор: а) <http://www.ecoengineers.com/project/apple-ifc-shanghai-109>, 17. 3. 2016; б) Аутор, 2015)

Пример/Студија случаја 10 – Улазни павиљон “*St. Martins in the Fields*”, Лондон

Контекст

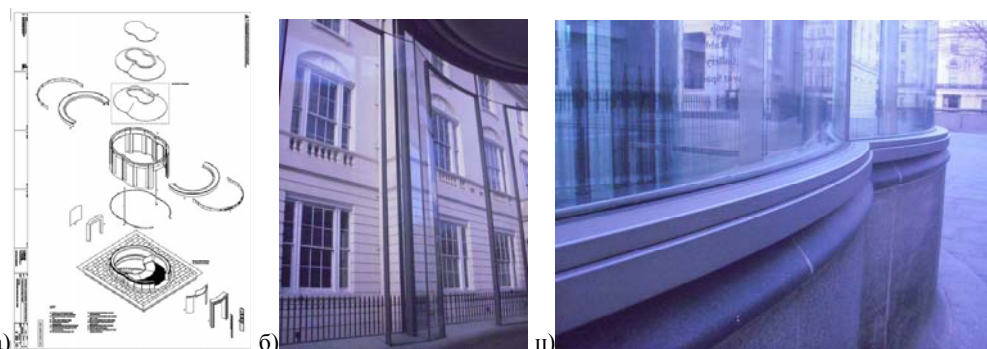
Нови улазни павиљон у катакомбе представља део изузетне обнове средњевековне цркве *St. Martins in the Fields* на Трафалгар тргу у центру Лондона. У павиљону се налази лифт и степениште које воде у катакомбе испод трга и објекта цркве у којима је смештен нови јавни простор (Слика П1.66).



Слика П1.66. Стаклени павиљон *St. Martins in the Fields* и катакомбе као нови јавни простор (Извор: Аутор, 2014)

Геометрија и визуелни/обликовни потенцијали

Главна одлика павиљона је цилиндрично закривљен стаклени зид који носи закривљен инокс челични кров тежак око 10 тона (Weber, 2009). Приближна димензија павиљона је око 7 x 10 m са висином од 6,5 m. Осам закривљених стаклених панела димензија 2,20 x 4,59 m постављени су тако да описују у основи два круга пречника око 3,60 m који се преклапају (Слика П1.67).



Слика П1.67. Стаклени павиљон *St. Martins in the Fields*: а) Изометрија елемената конструкције, б) Вертикални челични профил иза силиконског споја стаклених панела, и ц) База панела; (Извор: а) Weber, 2009: 378; б) и ц) Аутор, 2014)

Конструктивни систем, везе и димензије стаклених елемената

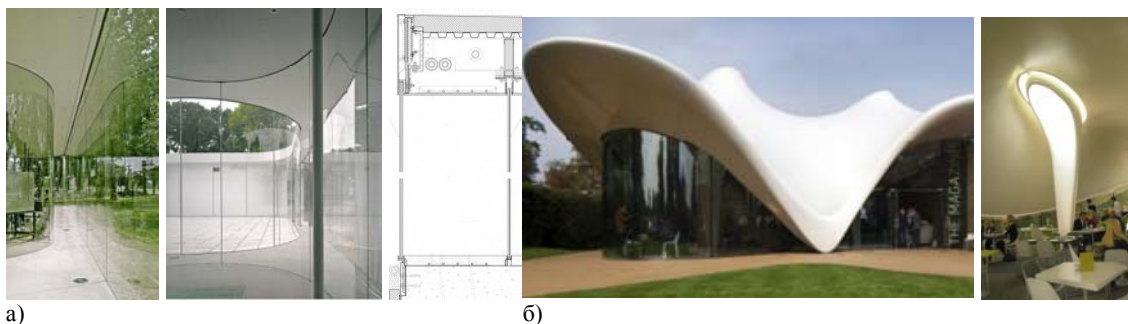
Бетонска база обложена каменом носи греду у виду челичног прстена са цепом *T*-пресека за прихватање стаклених панела који је након монтаже обложен челичним лимом фиксираним завртњима. Конструкција челичног-инокс крова је слично фиксирана за горњи челични прстен који носе стаклени панели (Слика П1.67). Континуитет стаклене конструкције постигнут је применом конструктивног силикона на доњим и вертикалним спојевима панела. Поред тога, квадратни челични-инокс профили поред вертикалних спојница који су фиксирани за базу и кров омогућавају да се стаклени панели не додирују (без "ослањања" на силикон). Линијски спој на крајевима је осмишљен тако да ограничи притиске настале услед различитог термичког ширења стаклених и челичних елемената. Закривљеност стаклених панела омогућава крутост против извијања и повећава конструктивне карактеристике за пријем хоризонталних сила. Како је структура довољно чврста предвиђено је да издржи губитак 2 панела (Weber, 2009).

Тип застакљења и техника обликовања стакла

Стакло је троструко ламинирано (2 x 12 mm + 10 mm), екстра прозирно са ниским садржајем фeroоксида, произведено уз помоћ калупа. Тежина сваког панела износи 860 kg. Тврда превлака на унутрашњој страни стакла дебљине 10 mm смањује соларне добитке и доприноси визуелном изразу и перцепцији саме форме стакленог павиљона. Техника обликовања равног пливајућег стакла помоћу калупа је одабрана из естетских разлога да би се избегла поларизација и ефекат сочива који су резултат "анизотропије" и таласа услед производње стакла на производној траци са ваљцима (Weber, 2009). Такође, пливајуће стакло је одабрано из разлога могућег оштећења стакла услед вандализма које би у случају чак и малог лома каљеног стакла проузроковало "узнемирујући изглед" због настале "шаре".

Слична геометријска форма цилиндрично закривљеног стакла димензија приближно 4 x 2,4 m примењена је на Стакленом павиљону Толедо Музеја уметности, Охајо, САД, где закривљени стаклени зидови, постављени на хоризонталној равни, раздвајају просторе унутар објекта и применом заштитног стакленог слоја—"материце" формирају тампон зоне омогућавајући истовремено

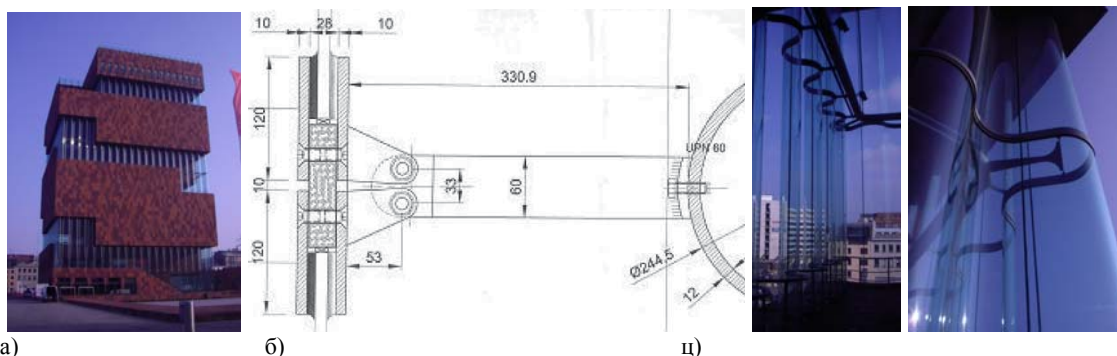
посетиоцима визуелни контакт са екстеријером, посматрање активности и изложених уметничких експоната (Слика П1.68а). Управо форма стакла упућује посетиоце у различитим правцима креирајући јединствени доживљај кроз различите просторне слике. Искуство посетилаца потврђује да су доживљај преламања светлости и еха карактеристике по којима се пампти овај пројекат јапанског студија САНА (SANAA) (McLeod, 2010). Још једна специфичност овог пројекта је да је 2.973 m² стакла произведено само у једној фабрици у Немачкој, а затим закривљено и ламинирано у Кини ("Glass Pavilion at the Toledo Museum of Art / SANAA", 2010). Слична димензија и закривљеност стаклених панела уочава се и на примеру екстензије Серпентин галерије (*Serpentine Sackler Gallery*), у Кенсингтон парку, Лондон, архитекте Захе Хадид, која је у складу са аморфном формом крова и унутрашњих стубова-елемената дневног осветљења (Слика П1.68б).



а) **Слика П1.68.** а) Изглед и пресек детаља закривљених стаклених панела павиљона Толедо Музеја уметности, Охајо, САД, и б) Изглед закривљене стаклене фасаде и елемента носеће конструкције и дневног осветљења екстензије Серпентин галерије (*Serpentine Sackler Gallery*), Лондон; (Извор: а) преузето са <http://openbuildings.com/buildings/toledo-museum-of-art-glass-pavilion-profile-1701>, 13. 5. 2015; и б) Аутор, 2014)

Већа закривљеност једноструко-закривљених површи омогућава и веће распоне (Krstic et al., 2012). Тако у случају МАС музеја (*museum aan de Stroom-MAS*) у Антверпену, и поред интересантне саме структуре музеја која подразумева осам "кутија" постављених једна на другу тако да је свака заротирана за 90°, доминира стаклена фасада чија висина у угловима обухвата две спратне висине и износи укупно 11 m (Слика П1.69а). Ова висина стаклених елемената још увек представља изазов у погледу материјализације у виду једног елемента из разлога ограничења у производњи (димензије пећи) и транспорту. Из тих разлога, пронађено је решење у ослонцу (минимално упадљиве димензије обешене челичне цеви) на средини распона чија улога је да прихвати оптерећење од ветра и истовремено прихвати ослонац – U-профил стакленим панелима омогућавајући

да горњи панел остане у положају у случају лома доњег панела, као и да омогући њихову замену (Слика П1.69б и ц).



Слика П1.69. МАС музеј у Антверпену: а) Изглед објекта; б) Детаљ и ц) Изглед ослоња на средини висине таласастих стаклених панела; (Извор: а) и ц) Аутор, 2012; б) Nijse, 2011: 396)

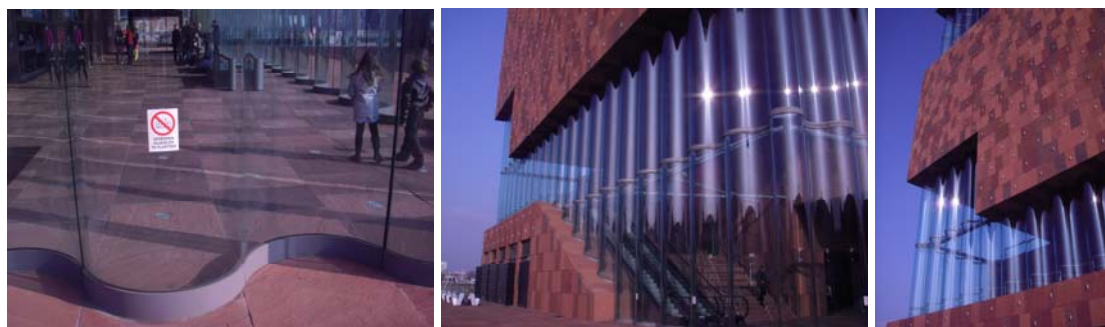
Такође, као што су различита истраживања показала да већа закривљеност може да допринесе смањивању напона при хоризонталном оптерећењу и до десет пута (Krstic et al., 2012), архитекте (*Neutelings Riedijk Architecten*) су у сарадњи са консултантом конструкције (компанија *ABT*) одлучили да уместо првобитне симетричне форме *C*-панела усвоје *S*-форму панела ширине 1800 mm и дебљине само 12 mm (2 x 6 mm) која је олакшала реализацију стакленог омотача. Међутим, мора се нагласити да су у почетку постојале несугласице између инжењера који су захтевали што већу "висину таласа" (закривљеност) и архитеката који су желели неометан поглед на околину, односно равне панеле. Ипак, може се закључити да, насупрот растућој тежњи ка потпуно транспрентним омотачима, ова таласаста форма услед визуелне дисторзије (деформације перспективне слике), подсећа корисника да се налази унутра и да је осећај ипак нешто другачији (Слика П1.70).



Слика П1.70. Деформације перспективне слике посматране кроз таласасто закривљено стакло: а) МАС музеј, Антверпен; б) Кућа музике (*Casa da Musica*), Порто; (Извор: Аутор, 2012, 2015)

Прорачуни су показали да је одговарајући однос висине таласа и распона панела у конструктивном смислу око 1:20, али с обзиром да су архитекте желеле да ефекат визуелне дисторзије из даљине буде што мањи, овај однос је

удвостручен и усвојена је висина таласа од 2 x 300 mm односно 600 mm (Nijse, 2011) (Слика П1.70). Прихватање сопствене тежине панела решено је постављањем таласастих панела једних на друге, а у односу на хоризонтално оптерећење (ветар) стаклени елементи се у конструктивном смислу понашају као плоче ослоњене на два ослонца распона 5,5 m. Озбиљан проблем представљала је производња панела, јер је нереално било очекивати да сви панели буду идентични из разлога њиховог обликовања термичким путем помоћу калупа. Искуство пројекта "Куће музике" (*Casa da Musica*), архитекте Рем Колхаса (Rem Koolhaas) у Порту, Португал, показало је да су могуће толеранције од +/-2 mm за ову форму панела (Nijse, 2011). Иако ова карактеристика првенствено утиче на визуелни квалитет панела, такође, има значајан утицај на његове конструктивне карактеристике као и на економски аспект (број и дужина силиконских спојева). Генерално, препорука је да се усвоји симетрична форма стаклених елемената која следи једноставно правило: ако се жељени, у овом случају таласаста, облик може креирати из једног комада папира, то подразумева да га индустрија стакла може произвести. Али, то не укључује конструктивна ограничења. Тачније, не значи да се асиметричне форме не могу узети у разматрање, али морају се имати у виду додатна напрезања која настају у стаклу (Слика П1.71).



Слика П1.71. а) Изглед панела S-форме, вертикалне спојнице два панела и изглед стакленог омотача на месту највеће постигнуте висине од 11m; (Извор: Аутор, 2012)

Како је усвојена S-форма панела асиметрична, односно постоји конкавни и конвексни део панела, то узрокује различито понашање у погледу крутости елемента, а самим тим и пријема оптерећења. Тачније, конвексни (испупчени) део ће се, услед хоризонталног оптерећења, више померити и тежиће да се поравна у средишњем испупченом делу, док ће конкавни део тежити да остане у оригиналном облику, што ће заједно утицати да се укупна померања ротирају у правцу конвексног дела. Међутим, то заједно може довести до додатних

напрезања у стаклу посебно у делу ослонца, где челични профил "стеже" стакло не дозвољавајући да се деформише при датом оптерећењу. Тако, може доћи и до 25% већих напрезања у стаклу на месту ослонца (Nijssse, 2011). Даље, напони настали услед вертикалног оптерећења који зависе од ширења којем доприноси еластични слој између две таласасте стаклене плоче, варирају у опсегу нормалних напона (притиска) од 2 (у концентрисаним тачкама ослонца) до $0,2 \text{ N/mm}^2$ (Nijssse, 2011), што су прихватљиве вредности напона у погледу притиска и на тај начин показују најважнију конструктивну карактеристику стакла, у овом случају закривљеног. Такође, услед температурних промена где може доћи и до великих разлика унутрашње и спољашње температуре, неопходно је узети у обзир напоне услед топлотног оптерећења (могућност термичког шока). На крају, неопходно је проценити укупне напоне услед свих поменутих утицаја. Такође, с циљем постизања бољег детаља челичног профила (који следи форму панела) у погледу његове монтаже и одржавања (Слика П1.72), а узимајући у обзир ефекат температурних промена и тежњу челика да се врати у првобитан положај након деформација, челични профили јесу мале дужине. Доњи и горњи челични профили су идентични (Слика П1.72). Поред поменутих карактеристика, неопходно је било узети у обзир могуће промене на вертикалним силиконским спојницама између панела, тачније веће ширење у централном делу распона и мање ширење у ослонцима, што изазива напоне затезања у спојницама и може резултовати њиховим кидањем и цурењем.



Слика П1.72. а) Изглед *U*-профила (дужине половине *S*-форме панела) који прихвата панел по хоризонталним спојевима у доњем делу, средини и врху стакленог омотача висине 11m; б) постављање *U*-профила (Извор: а) Аутор, 2012; и б) Nijssse, 2013: 29)

Узимајући у обзир карактеристике стакла које показују сву лепоту детаља, овим пројектом је приказано да је важно усавршити их узимајући у обзир различите аспекте.

Пример/Студија случаја 11 – Централна железничка станица, Страсбур, Француска

Контекст

Након много година пројектовања транспарентних површина слободних форми које, у погледу геометрије, карактерише подела (дискретизација-панелизација) закривљених површина на равне елементе, коначно се, почетком 21. века, дошло до решења која су омогућила да површина закривљеног стакленог омотача буде континуално глатка. Знање и искуство стечено током пројектовања и изградње надстрешнице метро станице *Saint Lazare* у Паризу и железничке станице у Авињону из 2001. године, компанија *RFR* је применила у процесу обликовања стакленог омотача "шкољке" којим је затворен простор испред реконструисаног објекта железничке станице у Страсбургу, *Strasbourg TGV*, чиме је потреба за проширењем њене функције задовољена (Слика П1.73). Резултат је био први пројекат на коме је примењена нова технологија обликовања стакла којом је постигнута глаткоћа двоструко закривљене површине. Пројекат је реализован 2007. године.



а)

б)

Слика П1.73. Стаклени омотач железничке станице *Strasbourg TGV*, Страсбург; (Извор: Преузето са: а) <http://www.gft.eng.cam.ac.uk/>, 06. 7. 2015; и б) https://en.wikipedia.org/wiki/Gare_de_Strasbourg, 06. 7. 2015)

Геометрија и визуелни/обликовни потенцијали

Примењени принцип је подразумевао декомпозицију двоструко-закривљене површи постигнуту коришћењем само једноструко закривљених стаклених панела. Обликовање стаклених панела постигнуто је технологијом хладног савијања.

Током процеса обнове и модернизације објекта станице из 1898. године изграђен је транспарентни хол дужине 120 m и ширине 25 m испред старог објекта чија је комплексна геометрија изведена из једне ротационе фигуре, веома сличне хоризонталном торусу који је накривљен у односу на хоризонталну раван

и чији вертикални попречни пресек није део кружнице, већ је формиран од лучних сегмената различитих радијуса.

Конструктивни систем, везе и димензије стаклених елемената

Челична потконструкција се састоји од примарних, секундарних и терцијалних носача који су закривљени у облику лукова пратећи форму омотача. Стабилност конструкције обезбеђена је кабловима-затегама (Слика П1.74).



Слика П1.74. Хијерархија елемената челичне потконструкције (примарна, секундарна и терцијална) стакленог омотача железничке станице *Strasbourg TGV*, (Извор: Baldassini, 2008: 9)

Тип застакљења и техника обликовања стакла

Стаклена површина састоји се од појединачних заобљених панела (једноструко закривљених) димензија 1,5 x 4,5 m (Слика П1.75) (Baldassini, 2008). Панели су радијално постављени и нису уврнути, већ еластично савијени у цилиндричну форму према геометрији постављене потконструкције.



Слика П1.75. Железничка станица *Strasbourg TGV*: а) Унутрашњи изглед стакленог омотача и челичне конструкције; б) Природна вентилација кроз приступ метро станици; и ц) Спољашњи изглед стакленог омотача; (Извор: Преузето са а) <http://blog-bilinguisme.fr/seul/une-minute-difference-france-alle/>; б) https://en.wikipedia.org/wiki/Gare_de_Strasbourg; ц) Baldassini, 2008: 10)

Панели су дугачки и уски с циљем максимизирања подужне флексибилности ради њиховог савијања, док је попречни распон релативно кратак (Слика П1.74 и П1.75). С обзиром на различиту закривљеност једноструких ламинираних стаклених панела, постигнута је оптимизација у техници хладног савијања у односу на различите радијусе.

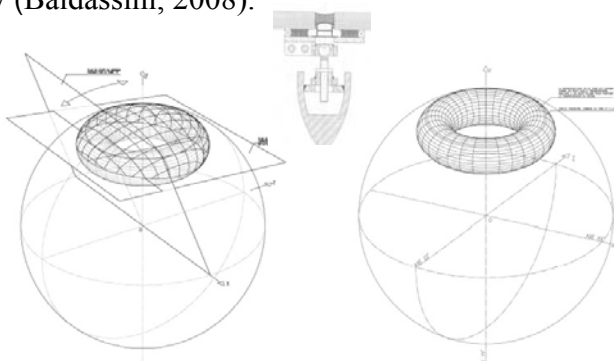
Геометрија омотача омогућила је да највећи број панела буде савијен овим поступком, с изузетком панела са најмањим радијусом код којих је процењено да би постигнути напони услед напрезања при механичком савијању били велики у односу на владајуће климатске услове. С циљем смањења напона у критичним зонама, стаклене плоче мањег радијуса су еластично савијене пре процеса ламинације и затим слепљене заједно уз помоћ међуслоја током процеса ламинације. Напони услед хладног савијања су компензовани ефектом закривљења што повратно побољшава перформансе у односу на равне панеле и омогућава веће димензије панела мање дебљине и тиме већу флексибилност и могућност савијања (Baldassini, 2008). Одлука за примену технике хладног савијања стакла је донесена из два основна разлога: до тада није изведена на панелима великих димензија што је говорило у прилог против примене ове технике на градилишту, па је представљала изванредан изазов. С друге стране, стакло добијено путем савијања уз помоћ топлоте има значајну оптичку дисторзију која може да утиче на визуелни доживљај транспарентне површине. Такође, разлог одабира ове технологије савијања јесте и једноставност монтаже, где се стакло поставља у положај механичком силом и затим фиксира у датом положају. Коришћењем геометријских правила добијена је глатка површина чија визуелна динамика превазилази рационалну геометрију.

Одступања појединачних равних стаклених панела од правоугаоног облика у односу на завршну двоструко закривљену форму панела у склопу целокупне форме хола, била су укључена у дозвољена померања између елемената. С обзиром на чињеницу да се Стразбург налази у турском подручју, велике димензије панела су такође пројектоване и конструисане у складу са дефинисаним толеранцијама (Baldassini, 2008). Конструктивне карактеристике и отпорност стакла су поред нумеричког модела тестирани на моделу-узорку у размери 1:1.

Специфичности

Еколошки аспект пројекта подразумевао је комплексну стратегију постизања енергетске ефикасности која је омогућила реализацију у потпуности застакљеног, јужно оријентисаног атријума који није ни хлађен ни механички вентилиран. Принцип природне вентилације је примењен на начин да се свеж ваздух увлачи из станице метро линије, која се налази у атријуму (Слика П1.75б),

и извлачи на врху атријума где стаклени панели наткривају постојећи објекат. Додатно ваздух улази кроз врата на нивоу улице, што доприноси константном протоку ваздуха који је неопходан, како због хлађења простора, тако и због обезбеђивања потребног комфора корисника. Овај активни систем допуњен је пасивним системом који смањује соларне добитке, а који се постиже апликацијом керамичког премаза на панелима на врху "стаклене љуске" где сунчеви зраци продиру кроз омотача под углом од скоро 90°C . Додатно смањење соларних добитака постигнуто је специјалним филмом (*Southwall XIR 72/47*). Такође, нискоемисиони премаз примењен на унутрашњој страни панела, ограничава топлотно зрачење према унутрашњем атријуму (Baldassini, 2008).



Слика П1.76. Изглед и геометрија надстрешнице улаза у станицу метроа *Lentille, St. Lazare*, Париз настала комбиновањем сферичних сегмената преко торусне форме, и детаљ везе закривљених стаклених панела и челичне конструкције; (Извор: Baldassini, 2008: 7; и Raynaud, 2014: 58)

Слична закривљеност, односно геометрија постигнута у случају надстрешнице станице метроа (*Lentille, St. Lazare*) у Паризу, генерисана је комбиновањем и стављањем сферичних сегмената преко торусне форме (Слика П1.76). Тако је добијена форма "балона" која и даље представља ротациону геометрију. С друге стране, оријентација конструкције је различита: лукови су постављени на основу квадратне мреже пројектоване преко сферног сегмента. Лукови су увек ортогонални у односу на сферни сегмент, али њихова нагнутост у односу на торус константно варира од једне до друге тачке. Разлика у оријентацији између стаклене површине и лукова решена је коришћењем самоподешавајуће сферичне везе између оквира стакла и потконструкције (Baldassini, 2011). Двоструко закривљени ламинирани панели од пливајућег стакла се сви разликују у основи, али односе се на само две двоструко-закривљене форме: једне сферне и друге торусне. На овај начин било је могуће смањити број калуца, односно савити све панеле уз помоћ свега неколико великих калуца.

П.1.4 Студије случаја нетермичког стакленог омотача геометријски комплексних форми са закривљеним стакленим елементима примењеног на надстрешницама и у ентеријеру

Пример/Студија случаја 12 – Железничке станице " Nordpark", Инсбрук

Контекст

Концепт пројекта за четири нове железничке станице у Инсбруку, које су дизајнирали Заха Хадид (Zaha Hadid) и Патрик Шумахер (Patrik Schumacher) а пројектовао Томас Ветцке (Thomas Vietzke) ("Nordpark Cable Railway", 2008), заснива се на два основна елемента која су у контрасту – лаганој, геометријски комплексној форми стаклених кровова (налик глечерским пејзажима) и смело обликованом бетонском подијуму (Слика П1.77). Почетна станица је станица Конгресног центра у самом центру града, док је последња станица у насељу *Hungerburg* које се налази 288 m изнад Инсбрука и где путници могу да преседну на жичару која ће их одвести на планину *Seegrube*.



Слика П1.77. Железничке станице *Nordpark*, Инсбрук, Аустрија
(Извор: Преузето са <http://www.arcspace.com/features/zaha-hadid-architects/nordpark-cable-railway/>,
02. 5. 2015)

Геометрија и визуелни/обликовни потенцијали

Кровне надстрешнице "плутају" преко отворених станица подсећајући на извитоперена авионска крила или још више на форме леда настале повлачењем глечера, док стакло доприноси сјајној полираној површини која подсећа на лед (Слика П1.77). У исто време њихове вајарске форме усклађене су са локалном топографијом и урбаним контекстом. Овај пројекат, чији дизајн је засигурно померио границе технологије израде стакла, представља јединствен пример обликовања једне органске форме стакленог омотача применом термичког савијања уз помоћ калупа и како каже Хадид (Lomholt, 2012: 1):

"Станице рефлектују континуирану посвећеност града највишим стандардима у архитектури и померају границе дизајна и

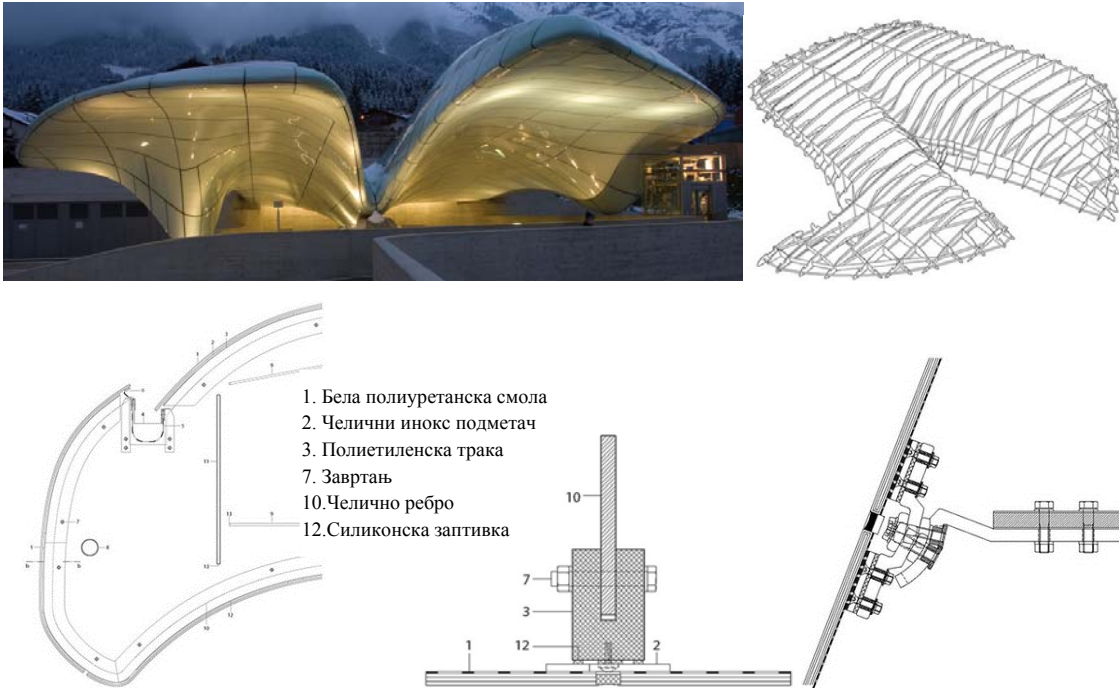
технологија изградње. Оне представљају глобални одредницу за коришћење двоструко закривљеног стакла у архитектури и грађевинарству.....Свака станица има свој јединствени контекст, топографију, налази се на различитој висини и различито је кретање корисника. Проучили смо природне феномене као што су ледене 'морене'-бразде и покретање леда – с обзиром да смо желели да за форму сваке станице користимо "језик флуида" као што је природно формирање леда на залеђеним обронцима околних планина. Високи степен флексибилности у том 'језику' омогућава да се љускане структуре прилагоде тим различитим параметрима уз задржавање кохерентне формалне логике. 'љуска & сенка' су два супротна елемента који стварају просторни квалитет сваке станице, и са лаганом органском кровном конструкцијом обложеном двоструко закривљеним стаклом 'плутају' изнад бетонског подијума креирајући вештачки пејзаж који је у покрету".

Конструктивни систем, везе и димензије стаклених елемената

Примењени систем конструкције подсећа на конструкцију авионских крила с обзиром на то да је стаклени омотач умотан око челичних ребара који су постављени на размаку од 1,25 m (Слика П1.78). Разлика је у чињеници да стакло није могло једноставно да се прикује за челична ребра да би се добила двоструко закривљена форма.

Тип застакљења и техника обликовања стакла

Крути савијени стаклени панели произведени су у ширини 1,25 m као што је размак ребара. Посебно, сваки панел је уз помоћ калупа прецизно обликован у двоструко закривљену форму уз помоћ топлоте. Укупно 850 стаклених панела површине 2.500 m² коришћено је за облагање 4 станице и сваки панел је јединствене форме. Примењено је каљено стакло које је практично трајније и отпорније на ударце од пада камења и дрвећа. Неки панели, који формирају олук на горњој површини надстрешнице имају континуално удубљење полупречника око 60 mm, док флуидна крива форма крова омогућава да вода "природно тече" (Spring, 2007).



Слика П1.78. Закривљена S-форма стакленог крова станице *Hungerburg*, конструкција формирана од челичних ребара на размаку 1,25 m, и детаљи облагања стакленим панелима и лепљена веза панела и челичног подметача помоћу којег је остварена веза са челичним ребрима (Извор: Преузето са http://www.building.co.uk/innsbruck-cable-car-stations-zaha-hadid-lifts-the-spirits/3100491_article#, 02. 5. 2015)

Технологија производње стакла развијена је од стране инжењерске компаније *Bollinger & Grohmann* из Франкфурта и Беча, док је произвођач *Pagitz Metalltechnik* из Клагенфурта, иако је стакло произведено у Кини уз помоћ комјутерски контролисаних *CNC* машина директно повезаних са пројектанским *CAD* системом у Европи. Основни материјал у процесу производње били су равни панели дебљине 12 mm. Калуп је произведен од челичних шипки прецизно обликованих у двоструко закривљену форму сваког панела. Стаклени панел дебљине 8 mm, савијен уз помоћ топлоте, постављен је преко калупа као доњи слој да ублажи испупчења и несавршености. Затим је завршни слој стакла дебљине 12 mm (2 x 6 mm) постављен преко доњег слоја. Стакло је ламинирано слојем беле полиуретанске смоле, постављене са унутрашње стране панела, што доприноси томе да стакло остане на месту у случају лома као и његовој изражајној белој боји. Имајући у виду трошкове, овај премаз се показао као добра алтернатива варијанти међуслоја *VSG-Century Glass*, која данас представља најбоље решење међуслоја. Дозвољена одступања у процесу фабрикации износила су ± 3 mm, а након производње, њихова форма и димензије су проверени

уз помоћ 3Д скенера. Процес монтаже на градилишту био је веома комплексан, нарочито због захтева архитекте да спољашња површина буде аеродинамична и без рупа, односно без одступања суседних панела и завртњева. Скривени систем веза је осмишљен на начин да челични инокс подметач буде залепљен за сваки панел тако да буде препуштен преко ивице. Истовремено, полиетиленска трака дебљине 93 cm, унапред обликована *CNC* машином у прецизну облину сваког панела, причвршћена је завртњима око спољашње ивице сваког челичног ребра. Постављањем панела у финалну позицију, његови залепљени челични подметачи су причвршћени завртњима за полимерски профил (Слика П1.78). На крају размак панела од 25 mm је испуњен црним силиконом чиме су сакривени челични подметачи и завртњеви (Spring, 2007).

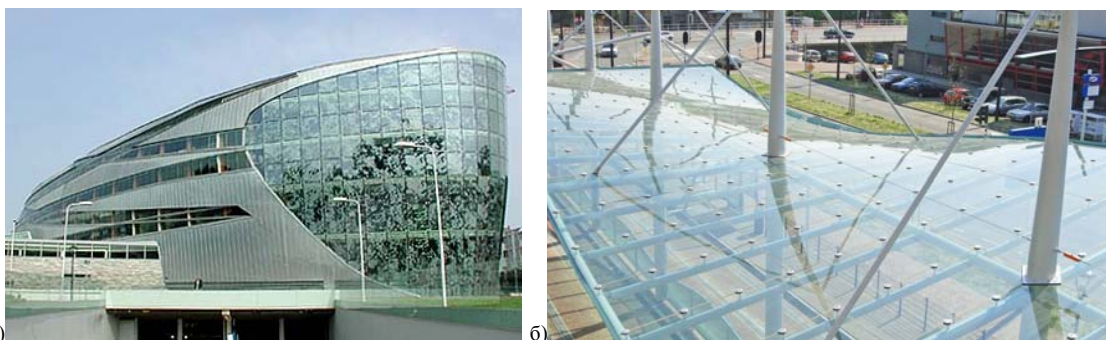
Специфичности

Према Хадид, свака станица има свој контекст, топографију, висину и циркулацију (Gonchar, 2008). Тако, улаз у подземну станицу Конгреса изгледа обликован у виду кружног тока аутомобилског саобраћаја, док се кров станице *Loewenhaus* појављује као издужен ток реке. *Alpenzoo* станица је спремна за полетање са свог 65 метара високог торња "уграђеног" у шумску падину, а станица *Hungerburg* је крилати заклон који лебди преко платоа са кога је спектакуларан поглед на град и на супротну страну планинског венца.

Пример/Студија случаја 13 – Надстрешница аутобуске станице "Zuidpoort", Делфт, Холандија

Контекст

Студент архитектуре у Ајнховену је након учествовања у примени хладног савијања - увртања стаклених панела у виду трака на задњој фасади Градске куће у Alphen a/d Rijn (Слика П1.79а), директно на градилишту, и детаљног истраживања и анализирања поставио теоретске основе за увртање (термоизолационих) стаклених панела. Његова теорија названа Стаксова теорија (*Theory of Staaks*), нашла је практичну примену на таласастом стакленом крову аутобуске и трамвајске станице *Zuidpoort* у центру Делфта, пројектоване од стране архитекте Мика Екаута (Mick Eekhout) (Eekhout and Staaks, 2012).



а) б)
Слика П1.79. Стаклени панели обликовани поступком хладног савијања на градилишту: а) Задња фасада Градске куће у *Alphen a/d Rijn*, Холандија; б) Надстрешница аутобуске и трамвајске станице *Zuidpoort*, Делфт, Холандија (Извор: Преузето са а) <http://www.architectenwerk.nl/box/030616.htm>, 24. 4. 2014; и б) <http://www.octatube.nl/en/projects/20/zuidpoort-canopy/>, 25. 4. 2014)

Геометрија и визуелни/обликовни потенцијали

Надстрешница је пројектована тако да користи максималне могућности хладног савијања резултујући континуално извитопереним стакленим кровом чије димензије (дужина и висина) су у хармонији са објектом шопинг центра *Zuidpoort* у Делфту. Форма надстрешнице је инспирисана таласима на самом грбу града Делфта који представљају везу са водом и морем, с обзиром да је лука града *Delfthaven* била некада лука града Ротердама (Eekhout and Staaks, 2012). Пројектовање и реализација су одвојено пажљиво спроведени.

Конструктивни систем, везе и димензије стаклених елемената

Главну конструкцију надстрешнице димензија 12 x 80 m и висине 6 m чине цевасти поцинковани челични рамови обешени са 7 конусних челичних стубова- "јарбола" (Слика П1.79б).

Тип застакљења и техника обликовања стакла

Укупна површина стакленог омотача је 720 m^2 , а панели су формирани од једне плоче обичног пливајућег (*float*) зеленог стакла дебљине 6 mm и једне плоче обичног пливајућег стакла дебљине 6 mm који су ламинирани. Обе плоче су каљене и произведене као стандардно пливајуће стакло. Хладно увртање кровних стаклених панела димензија 1,5 x 3 m подразумева одступање четвртог угла од равни на којој леже преостала три угла панела од максимално 100 mm ("Zuidpoort Canopy", 2006). На таласасту структуру цевастих ребара са челичним инокс држачима постављени су равни стаклени панели и под силом притиснути у жељену таласату форму, а затим фиксирани на врху другом челичном инокс споном која држи панел у преднапрегнутом стању (Слика П1.80). Већина панела је правоугаоне форме, али неки панели су морали бити неправоугаоне форме с циљем постизања паралелних ивица између свих панела ("Zuidpoort Canopy", 2006). На овај начин савијени панели поседују минималне визуелне дисторзије.



Слика П1.80. Изглед надстрешнице и стаклене површине са попречним цевастим ребрима (праве линије правоизводне површи) који носе челичне инокс држаче са спонама за фиксирање хладно савијених стаклених панела у жељену форму; (Извор: Аутор, 2015)

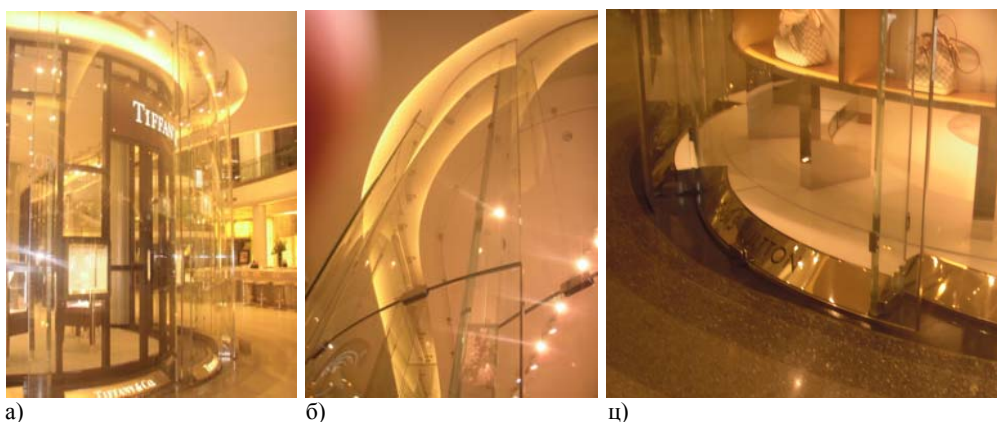
Специфичности

Специфичност овог пројекта представља шаблон који је развила фирма *Ostatube* помоћу кога се може предвидети понашање стакла приликом поступка хладног савијања. Максимална могућност деформације – торзије постигнуте помоћу поступка хладног савијања одредила је форму таласате надстрешнице ("Zuidpoort Canopy", 2006). У овом случају, Стаксова теорија је нашла пуну примену резултујући надстрешницом, интересантне таласасте форме, произведеном од стандардних равних стаклених панела који су обликовани на градилишту и притом су отпорни на урбане утицаје.

Пример/Студија случаја 14 – Примена закривљеног стакла у ентеријеру

Стаклени зидови излога шопинг-центра Westfield, Лондон; Стаклени панели кафе-ресторана Conde Nast Cafe, Њу Јорк; и Степениште продавнице Apple Coven Garden, Лондон

Нови концепт дизајна излога као својеврсна прекретница развоју малопродајних простора у западном Лондону представљен је кроз нови пројектантски приступ, од стране бироа *Gabellini Sheppard* из Њу Јорка, који користи све предности стакла као конструктивног материјала. Кључни параметри новог дизајна излога шопинг-центра *Westfield* у Лондону су висина закривљених и равних ламинираних панела од 8 m, тестерасти профил, и вијугава геометрија у основи (Слика П1.81). Жеља архитекте била је да креира такав ефекат који ће да покаже еклузивност изложене робе. Ослањајући се на већ развијену технологију ламинирања, која омогућава веће димензије, осмишљен је једноставан детаљ везе стаклених стубова и панела – лепљењем, који елиминише потребу за бушењем рупа у стакленим елементима. То је омогућило да стаклени стубови буду од обичног пливајућег (*float*) стакла и да њихове ивице буду полиране након процеса ламинирања, стварајући савршено јасну и сјајну ивицу која је додатно допринела жељеном ефекту. Једноставност везе омогућила је да стаклени стубови буду постављени под различитим углом у односу на површину стаклених панела, без потребе да се посебно прилагоде односно посебно произведу елементи везе. Такође, су допринели унапређењу визуелних карактеристика структуре укупне површине од преко 6.000 m² стакла (Rogan, 2014) чији елементи су у функцији примарних и секундарних елемената конструкције.



Слика П1.81. Излози шопинг-центра Westfield, Лондон: а) Изглед излога који је креиран помоћу стаклених стубова и закривљених ламинираних панела; б) Спој два вертикална панела помоћу споне; и ц) Изглед лепљене везе стакленог стуба и панела; (Извор: Аутор, 2014)

С друге стране, намерно "ометање" постојећег пословног окружења, чија намена је преименована у кафе-ресторан за 260 запослених на четвртном спрату пресељеног објекта *Conde Nast Publications House* у Њу Јорку, постигнута је уз помоћ само једног материјала – елемената закривљеног стакла који обликују простор, како вертикално, тако и хоризонтално. У овом случају, пројектант Френк Гери (Frank Gehry) је искористио стакло на јединствен начин, тачније као да је примењена еластична тканина, а не крхи транспарентни материјал који прави границу између различитих простора, упркос својој кристалној транспарентности (Слика П1.82). Јасно је постојање осећаја отворености и визура са једног простора за ручавање на други, док са друге стране рефлектујуће површине закривљених стакала креирају смирујуће делове који обезбеђују осећај приватности и издвојености. Стаклени зидови се састоје од великих ламинираних панела, димензија 3,65 x 1,2 m, дебљине 22 mm (Richards, 2006), у потпуности различите закривљености. Сваки панел, тежине 360 kg фиксиран је у горњем и доњем делу помоћу 30 cm дугачког конектора за челични инокс рам који је сакривен на врху у закривљеној форми плафона. Специјално обликована зглобна веза са гуменим дихтунгом (Слика П1.82) спречава стакло од лома. Стакло је произведено уз помоћ дигиталне фабрикације од стране калифорнијског произвођача стакла за аутомобилску индустрију.



Слика П1.82. Закривљени стаклени панели као елемент који раздваја различите просторе кафе-ресторана и детаљ зглобне везе (гумени дихтунг) са челичним-инокс конектором помоћу кога су ношени стаклени панели; *Conde Nast Cafe*, Њу Јорк (Извор: Richards, 2006: 144, 145, 149)

Кружно степениште (Слика П1.83) у продајном објекту *Apple Coven Garden*, у потпуности је од стакла. Конструкцију степеништа чине централни кружни стуб од 8 цилиндрично-закривљених ламинираних панела и образна стаклена греда (висине ограде) од цилиндрично закривљених ламинираних

елемената повезаних одговарајућом везом (споном). Иако је степенишна структура укрућена са две попречне стаклене греде (Слика П1.83), може се уочити знатно подрхтавање конструкције приликом њеног коришћења.



а) Изглед кружног степеништа у продајном простору; б) Детаљ везе стаклене греде за укрућење са централним стубом састављеним од цилиндрично-закривљених панела; и ц) Веза образне греде – стаклене ограде са стакленим подестом; (Извор: Аутор, 2014)

Прилог 2

Анкета

Анкетар (аутор) је припремио низ питања за разговор са стручњацима како би разматрали специфична и конкретна питања у вези стакла као елемента материјализације омотача и геометријски комплексних стаклених структура.

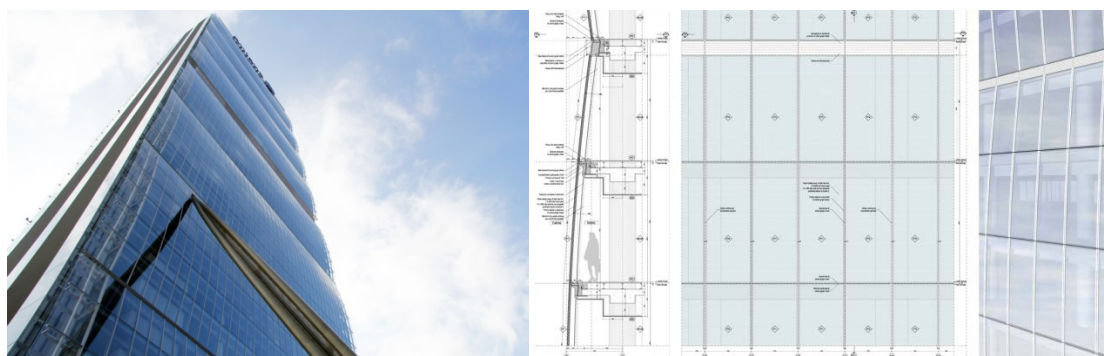
Питања постављена током интервјуа, као и одговори односили су се на:

1. Каково је ваше искуство са различитим врстама стакла (равна, једноструко закривљена, двоструко закривљена) и њиховим карактеристикама (визуелним, физичким, конструктивним, производним и економским)?
Примену које врсте стакла сматрате већим изазовом?
 - Сви осим **Јурген Нојгебауера (Jürgen Neugebauer)**: Примена закривљеног стакла сматра се већим изазовом.
 - **Френсис Еш (Francis Aish)** и **Стефан Веркуилен (Stephan Verkuiljen)**: До недавно, нису се узимале у обзир конструктивне карактеристике стакла.
 - **Тим Мекфарлејн (Tim Macfarlane)**: Примена равних стаклених елемената је најчешћа, како у случају омотача равних површина тако и у случају омотача закривљених форми. Тако, могућност и начин облагања једне нестандартне форме архитектонског омотача уз помоћ равних стаклених елемената може се представити на примеру три небодера *Flame Towers* у Азербејџану (Слика П2.1). Њихова у потпуности закривљена форма у виду пламена, која се завршава шиљатим врхом, наглашена је решеткастом поделом равних стаклених елемената. Дакле, свака врста стакла има своја правила за примену и понашање након апликације. Најзначајнија одлика примене стакла на закривљеним формама омотача су техничка ограничења у погледу димензија, закривљености и сл., што првенствено подразумева основно знање о стаклу као материјалу. Оно што треба имати у виду, јесте то да ће до лома стакла увек доћи, иако би желели да се то уопште не деси. У том смислу, обично пливајуће (*float*) стакло ће се сломити исто као и каљено само на другачији начин. Проблеми увек настају приликом договарања и убеђивања са архитектама, с обзиром на то да једино прихватљиво решење за њих представља невидљива потконструкција за ношење панела распона 25m. Ипак, прави изазов јесте "ко може и шта може да се изведе?"



Слика П2.1. Небодери *Flame Towers*, Азербејџан: а) урбано окружење; б) материјализација закривљене стаклене фасаде помоћу равних стаклених елемената; (Извор: Преузето са а) <http://www.archdaily.com/538883/baku-flame-towers-hok>; б) http://azertag.az/en/xeber/Baku_2015_Torch_descends_Flame_Towers_in_spectacular_abseil_VIDEO-862177; 18. 1. 2016)

- **Дамјан Роган (Damian Rogan)**: Визуелне карактеристике су веома често проблем у случају закривљеног стакла, с обзиром на то да приликом процеса термичког савијања настају оптичке дисторзије стакла. Хемијско каљење узрокује много мање визуелне неправилности, док савијањем стакла приликом ламинирања, не долази до дисторзије. Слично је и са поступком хладног савијања, али ограничење представља двоструко закривљено стакло које није могуће произвести на овај начин. Такође, највећи проблем хладног савијања представља немогућност структуралног силикона да се растегне и прилагоди жељеној форми (за разлику од стакла), посебно у случају једноструко закривљених ивица панела (Слика П2.2). У том случају може доћи до његовог цурења унутар панела услед померања рама и од 1 mm.



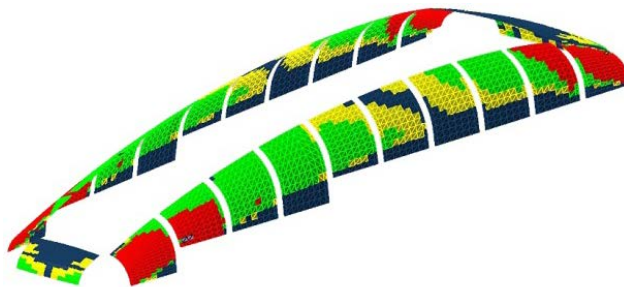
Слика П2.2. Обличаста форма панела висине шест етажа објекта *Allianz Tower* у Милану је одабрана са циљем да се избегне непријатна рефлексија равног стакла; панели обликовани техником хладног савијања равних ТИ панела, закривљених и спојених структурлним силиконом на алуминијумском раму; вертикални покривни профили постављени су накнадно у циљу додатног механичког фиксирања; (Извор: Преузето са <http://www.designboom.com/architecture/allianz-tower-milan-citylife-arata-isozaki-andrea-maffei-interview-11-03-2015/>, 28. 3. 2016)

- **Питер Ленк (Peter Lenk)**: Основни тип стакла – равно провидно пливајуће (*float*) стакло, које представља најјефтинији тип стакла, не поседује визуелну дисторзију и најчешће се користи за термоизолационе панеле. Максимална димензија ових панела износи 3,0 x 3,6 m. Проблем овог типа стакла представља могућност термичког шока, који се јавља услед различитог степена ширења материјала, када неравномерна напрезања која када пређу границу чврстоће материјала, могу проузроковати пукотине или лом стакла. Са становишта сигурности и трајности, следећи ниво представља полукаљено стакло које се користи када је потребна додатна чврстоћа да би стакло било отпорно на притисак ветра, структурална оптерећења, термички шок или све утицаје заједно. Друга предност јесте у случају лома стакла, када фрагменти, који су сличне величине и облика као код обичног пливајућег (*float*) стакла, имају тенденцију да остану у панелу дуже него код потпуно каљеног стакла. Ипак овај тип не представља сигурносно застакљење према европским и америчким прописима, из разлога што његов образац ломљења не спречава повреде. Полукаљено стакло је око 2 пута чвршће од равног пливајућег (*float*) стакла. Уобичајена дебљина је 10 mm, а могуће је и дебљина од 12 mm али је његова економска цена знатно већа. Следећи ниво сигурносног застакљења представља каљено стакло, чија производња подразумева нагло хлађење након загревања чиме се креира притисак на површини и ивицама стакла, што резултује 4-5 пута већом чврстоћом и мањом вероватноћом термичког шока од равног пливајућег стакла. Често као сигурносно стакло се користи ламинирано стакло које не мора да буде увек и каљено. У поређењу две врсте стакла: сигурносног каљеног стакла од 15 mm и ламинираног пливајућег стакла 2 x 8(6) mm, може се рећи да већу економску цену има каљено стакло. С друге стране, у погледу перформанси након лома стакла, најбоље се понаша ламинирано стакло и из тих разлога би га требало примењивати. Једнострукно закривљено пливајуће (*float*) стакло, добијено уз помоћ специјалних машина, има боље визуелне перформансе, док поступком термичког савијања стакла уз помоћ калуца настају визуелни проблеми. Из тих разлога све више се примењује поступак хладног савијања стакла. Такође, могућ је поступак хемијског

каљења након савијања, али је овај начин знатно економски неповољнији. Највећа напрезања, односно напони настају око формираних отвора, у случајевима тачкастог ношења панела, што резултује тиме да отвори представљају најосетљивија места на истим.



а)



б)

Слика П2.3. Закривљени панели стакленог омотача објекта *Park House*, Лондон: а) Изглед омотача; б) Различита закривљеност кровних панела (различите боје) приказује могућност различитог начина њихове производње у зависности од величине закривљења; (Извор: Преузето са

а) <http://www.abeasley.com/the-largest-development-on-oxford-street-in-40-years-park-house-oxford-street-w1-robin-partington-architects-hamiltons-architects-contractor-mace/>, 21. 3. 2016;

б) <http://www.gft.eng.cam.ac.uk/>, 21. 3. 2016)

- **Неша Гопал (Neesha Gopal)** и **Абикуниа Осунде-Огбебор (Aibiokunla Osunde-Ogbebor)**: Искуство пројектовања и израде двоструко закривљеног стакленог омотача две последње етажe (7. и 8. спрат) објекта *Park House* у Лондону (Слика П2.3) показало је да рестрикције настају када се разматрају могућности примене одређених превлака и боја, двоструког или троструког застакљења, ламинираног стакла, као и присутност визуелне дисторзије. Искуство примене закривљеног стакла за пројектно решење поменутог објекта показало је да је неопходна рационализација панела, односно да је неопходно било размотрити могућност хладног савијања одређеног броја панела, као и неопходност термичког савијања за одређени тип геометрије панела (30% полукаљених и ламинираних панела је произведено процесом термичког савијања). Застакљење је двоструко, а премази у боји песка временом су изгубили боју, што је указало на неопходност претходног упознавања са ограничењима примене различитих премаза попут ниско-емисионих и за соларну контролу, у случају закривљеног стакла. Толеранција, односно дозвољено одступање између панела, износило је $\pm 1,5$ cm.

- **Бенади Василченко-Малишев (Gennady Vasilchenko-Malishev):** У погледу конструктивних карактеристика присутна је већа крутост у случају закривљених стаклених елемената што показује и полупречник инерције (i):

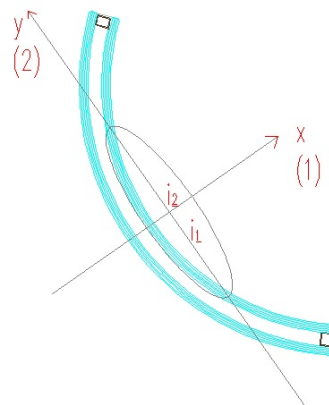
$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (\text{П2.1})$$

где је:

i - полупречник инерције;

I - моменат инерције;

A - површина попречног пресека.



Слика П2.4. Полупречници инерције i_1 и i_2 у правцу главних тежишних оса инерције;
(Извор: Аутор)

Поред тога, полупречник инерције (Слика П2.4) показује и већу могућност извијања (савијања) елемента око главне тежишне осе инерције са мањим основним моментом инерције, односно осе на којој лежи мање одстојање од тежишта попречног пресека до крајње тачке (мањи полупречник елипсе инерције). Такође, полупречник инерције је обрнуто пропорционалан вредности за виткост елемента (λ):

$$\lambda = \frac{l}{i} \quad (\text{П2.2})$$

где је:

λ - виткост;

l - дужина елемента;

i - полупречник инерције.

Такође, виткост показује стабилност елемента али се исто тако помоћу ове вредности може дефинисати и дозвољено оптерећење.

- **Јурген Нојгебауер (Jürgen Neugebauer):** Примена равног стакла представља такође изазов, посебно ако је један стаклени панел формиран од 47 различитих елемената као у случају подијума небодера *World Trade Centre Tower One* у Њујорку (Слика П2.5), узимајући у обзир 22 стаклена елемента, као и међуслојеве и везне елементе од нерђајућег челика. Савијено стакло се све више користи и за његову производњу неопходно је одредити прецизну геометрију с обзиром на то да на температури од 600-800°C на којој се стакло савија, долази истовремено до његовог растезања. У случају када се узимају у обзир његове конструктивне карактеристике потребно је прорачунати потребну дебљину. Такође, не може се одредити тачна *U*-вредност закривљеног панела пречника 2 m, већ је потребно додатно тестирање (динамика флуида).



Слика П2.5. Формирање стакленог панела, који садржи 47 различитих елемената, за објект *World Trade Center Tower One* у Њујорку, фабрика *SFL Technologies*, Аустрија; специфичност ових панела представљају елементи од *Dichroic* стакла дебљине 6мм који су интегрисани у стаклени панел (Извор: Аутор, 2014)

- **Проф. Миодраг Мирковић:** Од врсте објекта и архитектонског концепта зависи и примена стаклених површина. Када архитекта поштује контекстуални приступ при пројектовању значи да и примена застакљења, чија је основна сврха затварање објекта, али и пропуштање светлости, јесте последица пре свега функције објекта. Свакако форма објекта може бити више или мање постигнута и наглашена стакленим површинама. Не треба имати унапред опредељење за примену одређене врсте материјала, с обзиром на то да сваки нови пројекат представља нови изазов. Улога материјала јесте да промени и надогради ефекат композиције објекта, посебно у конститутивним елементима архитектуре, где припада и примена стакла.

- **Бојан Стојановић:** Савијене стаклене панеле је тешко произвести да буду идентични и идеално обрађени, а због технологије производње у Србији, њихова економска цена је за око 3,5 пута већа у односу на равне стаклене панеле.

Још увек не постоје систематизовани искуствени подаци.

2. Како се процес пројектовања и израде закривљеног стакленог омотача примењеног на зградама развијао у последњих неколико година?

- **Френсис Еш (Francis Aish) и Стефан Веркуилен (Stephan Verkuijlen):** Могуће је постићи веће распоне применом ламинираног закривљеног стакла, док истовремено савремене технологије производње закривљеног стакла омогућавају добијање стакла са мањом оптичком дисторзијом, а исто тако и много економичнија стакла.

- **Тим Мекфарлејн (Tim Macfarlane):** За примену закривљеног пливајућег (*float*) стакла све више се користи ламинирано стакло. Могућа димензија панела, која износи 18 x 3,2 m (закривљено, ламинирано и каљено стакло произведено процесом термичког савијања), и коју је произвела кинеска компанија показала је да није проблем величина панела већ питање економске одрживости његове производње и монтаже. Тако, на омотачу објекта *Apple* у Јапану примењено је хемијски каљено стакло димензија 3x11 m (троструко ламинирано), као одговор на изазов који је представљала сама форма и величина стаклених панела (Слика П2.6). Такође, могуће је реализовати структуре са преклопљеним панелима.



Слика П2.6. Хемијски каљени, троструко ламинирани стаклени панели димензија 3x11m, објекат *Apple* у Токију;

(Извор: Преузето са <https://www.flickr.com/photos/kaleidalabs/14211227890>, 05. 5. 2016)

Поред тога, најновија истраживања примене ултратанког и ултрачврстог Горила (енгл. *Gorilla*) стакла (Слика П2.7) у архитектури, које увелико има

своју примену у индустрији електронских уређаја, показала су знатно боље карактеристике у погледу чврстоће и тежине, пружајући на тај начин велике могућности за пројектовање стаклених конструкција. То се најбоље може уочити у поређењу хибридног стакленог панела дебљине 8 mm (0,5 mm Горила стакло + 0,5 mm фолија за ламинирање + 6 mm пливајуће стакло + 0,5 mm фолија за ламинирање + 0,5 mm Горила стакло) у поређењу са истом дебљином ламинираног стакла (4 mm пливајуће стакло + 0,5 mm фолија за ламинирање + 4 mm пливајуће стакло). Алуминосиликатни састав Горила стакла даје могућност његовог хемијског ојачања. Резултат је танак, лаган и отпоран на оштећење стаклени производ који пружа одличан визуелни квалитет уз могућност даље обраде процесом хладног или термичког савијања. Ограничења за сада представљају максималне димензије панела од 2,0 x 1,5 m, док су стандардне дебљине од 0,7 и 1,0 mm.



Слика П2.7. Ултратанко и ултрачврсто *Gorilla* стакло за примену у архитектури, фабрика *SFL Technologies*, Аустрија; (Извор: Аутор, 2014)

- **Дамјан Роган (Damian Rogan):** Повећано је коришћење закривљеног стакла и његовој примени се приступа са много више слободе и поверења, иако је равно обично пливајуће стакло много економичније. Такође, технике каљења су унапређене и још увек се савијено стакло највише производи процесом термичког савијања уз помоћ калупа, иако је све присутнија тежња за применом технике хладног савијања која подразумева мању економску цену.
- **Питер Ленк (Peter Lenk):** Процес производње закривљеног стакла је знатно унапређен, а тиме и управљање самим процесом. То се може сагледати на примеру произвођача закривљеног стакла *Sunglass* из Италије који може да

обезбеди бољи квалитет и веће димензије закривљеног стакла. Процесом производње помоћу ваљака на траци у специјалним машинама још увек није могуће избећи ефекат оптичке анизотропије (видни трагови ваљака). Данас је процесом термичког савијања стакла могуће постићи максималне димензије стаклених панела од 3 x 10(12) m. Тако, димензије ламинираних каљених закривљених панела стакленог омотача улаза у подземни објекат *Apple* у Шангају (Слика П2.8) износе 2,6 x 12 m дебљине 30 mm (15+15 mm), али значајан проблем је представљала њихова монтажа.



Слика П2.8. Кружна стаклена структура у виду цилиндра пречника 10m, која се састоји од 12 m високих стаклених стубова и конзолних стаклених греда, као и једнострано-закривљених стаклених панела димензија 2,6 x 12 m, формира импресиван улаз у подземни објекат *Apple*, Пудонг, Шангај; (Извор: Преузето са <http://www.eocengineers.com/project/apple-ifc-shanghai-109>, 14. 1. 2016)

- **Бенади Василченко-Малишев (Gennady Vasilchenko-Malishev):** Постигнуте су веће димензије стаклених елемената, бољи квалитет и конструктивне перформансе које се проверавају помоћу динамичких симулација (провера дозвољених напона). Структура се сматра задовољавајућом у погледу критеријума границе издржљивости (*Ultimate limit state-ULS*) ако сви напони савијања, смицања и затезања или притиска су у границама дозвољених вредности чиме се доказује да је ниво сигурности и поузданости пројектоване форме у потпуности постигнут.
- **Јурген Нојгебауер (Jürgen Neugebauer):** Последњих десет година повећана је примена геометријски комплексних форми стаклених омотача. Проблем је често у погрешној геометрији која се изводи помоћу програмских софтвера који то омогућавају, због чега треба више пажње посветити исрцтавању жељене форме у самим програмима. Такође, лимит представља економска

цена закривљеног стакла, тако да једноструко закривљено стакло има 3 пута већу економску цену у односу на равно док двоструко закривљено око 6-8 пута већу. Решење треба тражити у поједностављењу геометрије које треба извести постепено и у комуникацији са произвођачима (индустрија стакла) тражећи начине за умањење трошкова.

- **Проф. Миодраг Мирковић:** Одувек су се при пројектовању и грађењу објеката примењивале сложене и аморфне форме и то са великом прецизношћу. Само пројектовање је данас олакшано применом одговарајућих компјутерских програма, а у извођењу и применом компјутерски навођених робота. У процесу извођења, данас су могућа врло оригинална решења, али увек се поставља и питање економске цене предложеног решења.

- **Драган Тасковић:** Генерално говорећи, примена неортогоналних форми је све више присутна, а примена стакла у архитектонским објектима је у експанзији последњих година што указује и на све већу примену закривљеног стакла.

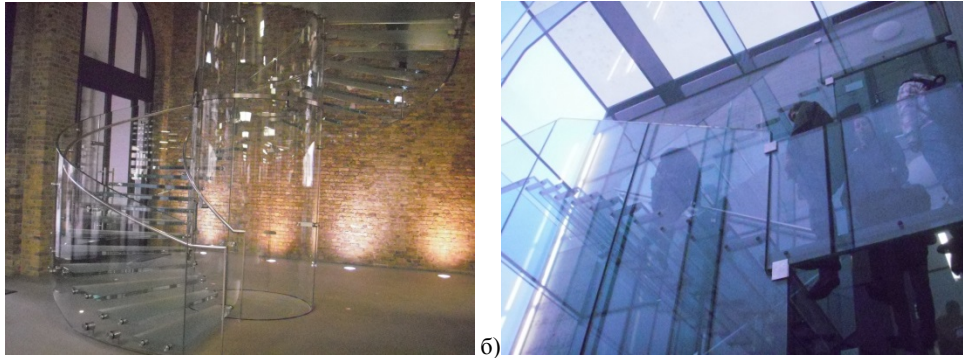
- **Бојан Стојановић:** Предузеће Конкав Конвекс у просеку годишње произведе 1-2 закривљене фасаде, али њихова форма је, до сада, подразумевала примену само једноструко- закривљеног стакла.

Примена закривљених форми омотача је све већа, нарочито у последњих 10 година. Правци развоја су смањење економске цене, укидање оптичких дисторзија на закривљеном стаклу и постизање већих димензија. Може се рећи да се и даље најбоља решења постижу кроз сарадњу пројектаната са консултантима/извођачима фасада и произвођачима стакла.

3. Која су главна разматрања приликом примене закривљених стаклених елемената?

- **Френсис Еш (Francis Aish) и Стефан Веркуилен (Stephan Verkuijlen):** Перформансе самог стакла, као и соларни фактор и начини засенчења стаклених панела. На једноструко закривљено стакло могуће је применити око 80% доступних премаза.

- **Тим Мекфарлејн (Tim Macfarlane)**: Главни параметар је увек димензија панела. Једна од компанија која производи комплексне форме и уједно технички веома квалитетно стакло јесте *Cristacurva* из Тексаса, САД.
- **Питер Ленк (Peter Lenk)**: Димензије панела, конструктивни систем, величина напона у стаклу, технике обликовања (савијања) стакла, капацитет издржљивости након лома, као и визуелни квалитет стакла.
- **Неша Гопал (Neesha Gopal) и Абикуниа Осунде-Огбебор (Aibiokunla Osunde-Ogbebor)**: Карактеристике које се узимају у обзир су: тип стакленог панела (једноструко застакљење, двоструко и троструко застакљење - ТИ панели), могућност примене ламинираног стакла и одређених боја, премаза и фолија, визуелна дисторзија, рационализација геометрије, смањење економске цене, као и све већа предност технике хладног савијања у односу на термичко савијање стакла. Такође, важно је обезбедити могућност замене панела, без угрожавања стабилности целокупне конструкције омотача.
- **Ђенади Василченко-Малишев (Gennady Vasilchenko-Malishev)**: Главна разматрања односе се на 1. сигурност (конструкције); 2. визуелни и амбијентални квалитет; 3. детаље веза; 4. могућности производње (технике обликовања) и извођења.
- **Јурген Нојгебауер (Jürgen Neugebauer)**: Основ представља геометрија стаклене површи која треба да укаже на тип стакла и остале карактеристике.
- **Проф. Миодраг Мирковић**: Неопходно је имати у виду да је сваки пројекат у потпуности специфичан. Стакло може бити примењено за надстрешнице, лантерне, фасаду а посебно су интересантна решења када је стакло примењено као елемент конструкције (примарни и секундарни конструктивни елементи). То се може уочити на примеру у потпуности стакленог степеништа (Слика П2.8а и б).



Слика П2.8. Стаклено степениште: а) Спирално степениште у потпуности од стаклених елемената, продавница *Apple, Coven Garden*, Лондон; б) Стаклено степениште и омотач улазног дела административног објекта фабрике *Glas Trösch Holding AG*, Швајцарска; конструкцију степеништа димензија 5,5 x 8 m у основи, висине скоро 12 m чине стаклени стубови и греде, док се омотач састоји од структурално застакљених ТИ панела од ламинираног сигурносног стакла висине 9 m, чија дебљина износи 74 mm – 2 x12 + 28 + 2 x10, а тежина 3 тоне; (Извор: Аутор, 2014)

- **Драган Тасковић:** Сви аспекти примене закривљеног стакла су подједнако важни.

- **Бојан Стојановић:** Димензије панела и полупречник закривљења. Такође, неопходно је нагласити, да стакло са малим садржајем ферооксида (енгл. *ultra-clear*), у односу на стакло са већим садржајем ферооксида (енгл. *extra-clear*), се не савија добро.

Сви аспекти примене закривљеног стакла подједнако су важни, а од самог пројектанта зависи редослед којим он приступа разматрању аспеката.

4. Како се ова разматрања разликују од примене равног стакленог елемента?

- **Тим Мекфарлејн (Tim Macfarlane):** Разлика се уочава првенствено у дебљини стакла, с обзиром на то да закривљење стакла доприноси смањењу његове дебљине услед веће крутости. Такође, приликом примене закривљених ТИ панела неопходно је узети у обзир постојање унутрашњег притиска, односно постојање разлике у климатским условима у којима је панел произведен и склопљен у фабрици, од климатских услова који владају на градилишту односно месту њихове монтаже, а који може допринети лому стакла. То је посебно могуће у случају панела од пливајућег (*float*) стакла.

- **Дамјан Роган (Damian Rogan):** Тежња је да се све што се може произвести са равним стакленим панелима примени и на закривљена стакла. Међутим, све је много теже и представља већи изазов у случају примене закривљеног стакла почев од коришћења његових конструктивних карактеристика, бушења рупа, ламинирања, а посебно је значајан начин фиксирања

закривљених стаклених панела. Контрола визуелног квалитета је, такође, веома важна. Свега неколико типова нискоемисионих премаза (тврдих) се може применити на закривљена стакла.

- **Питер Ленк (Peter Lenk)**: Уколико архитекта постави захтев за визуелним квалитетом закривљене стаклене структуре и самих стаклених панела испред осталих захтева, то обично повећава економску цену целокупне стаклене структуре.
- **Неша Гопал (Neesha Gopal) и Абикуниа Осунде-Огбебор (Aibiokunla Osunde-Ogbebor)**: Када је у питању у потпуности слободна форма омотача, однос економских карактеристика је такав да економска цена стакла добијана процесом термичког савијања уз помоћ калупа, 20 пута је већа од економске цене равног стакла, док је економска цена стакла добијеног процесом хладног савијања, 5 пута већа од економске цене равног стакла. Пример који говори томе у прилог јесте пројекат Захе Хадид за чију израду је био предвиђен буџет од 15 милиона евра, а цена трошкова је на крају износила 115 милиона евра од чега је само за калупе за израду различитих форми панела било неопходно 7 милиона евра.
- **Јурген Нојгебауер (Jürgen Neugebauer)**: За примену равног стакла могу се релативно лако направити све анализе, као и прорачун трошкова, док у случају закривљеног стакла, поред важне анализе конструктивних карактеристика (методом коначних елемената), неопходно је одредити најпогоднији начин обликовања (производње) с циљем добијања жељене форме.
- **Проф. Миодраг Мирковић**: Примена закривљеног стакла има своја ограничења: минимални полупречници закривљености, прецизност извођења, начин ношења панела, монтажа и слично. У том смислу, знатно се разликује од примене равног стакла.
- **Драган Тасковић**: Највећа разлика је у економској цени производа (закривљено стакло) која је у Србији за око 2-3 пута већа за закривљено стакло.
- **Бојан Стојановић**: Разматрају се на исти начин, разлика је само у полупречнику закривљености.

Разлика је првенствено у економској цени која је знатно већа за закривљено стакло, док су истовремено све остале техничке катактеристике и прорачуни комплекснији.

5. Који су кораци у процесу пројектовања и израде закривљеног стакленог омотача архитектонских објеката и како су они повезани ?

- **Френсис Еш (Francis Aish)** и **Стефан Веркуилен (Stephan Verkuijlen)**: У одређеним фазама пројектовања и израде закривљеног стакленог омотача неопходно је обезбедити разне врсте тестирања.

- **Дамјан Роган (Damian Rogan)**: Процес оптимизације стаклених панела је неопходно предвидети у фази израде оквирног или детаљног пројектног решења.

- **Неша Гопал (Neesha Gopal)** и **Абикуниа Осунде-Огбебор (Aibiokunla Osunde-Ogbebor)**: Неопходно је укључити извођача фасаде што раније у процес пројектовања и израде закривљеног стакленог омотача. Такође, неопходно је обезбедити узорке на самом почетку пројектовања и у каснијој фази (израда модела-макете) који пажљиво треба сагледати и анализирати са различитих аспеката, а посебно у погледу визуелно-обликовних карактеристика (из свих углова).

- **Проф. Миодраг Мирковић**: Ако стаклене површине омотача прате закривљену форму објекта, веома често није економично применити закривљена стакла због чега је неопходно у неким случајевима прећи на полигоналну форму.

Цео процес пројектовања и израде закривљеног стакленог омотача архитектонских објеката представљен је помоћу дијаграма који су коментарисани са испитаницима, а горе наведени одговори представљају само додатне коментаре.

6. Који су изазови и могућности за примену и инжењеринг закривљеног стакленог омотача?

- **Тим Мекфарлејн (Tim Macfarlane)**: Изазов представљају нови начини његовог обликовања и производње као што је хладно савијање и савијање у специјалним машинама на производној траци уз помоћ притиска ваздуха. У

том смислу можда "будућност треба тражити у прошлости" односно у старом начину производње стакла дувањем којим је могуће постићи цилиндрично стакло које би затим могло бити сечено на елементе одговарајућих димензија.

- **Дамјан Роган (Damian Rogan)**: Значајно је што је применом закривљеног стакла могуће смањити његову дебљину. Савијена стакла добијена процесом термичког савијања на производној траци уз помоћ ваздушног јастука, а затим и каљења у пећи, бољег су визуелног квалитета него стакла добијена процесом термичког савијања на производној траци уз помоћ ваљака. Стакла добијена на овај начин могу бити ширине 2-3 m и то, с друге стране, представља ограничење овог начина производње као и минимални полупречник од 0,5 m. Хемијски каљено стакло има много већу економску цену него термички каљено стакло. Такође, веома често се траже решења која је могуће постићи полиетиленским плочама (*ETFT-Ethylene Tetra Fluoro Ethylene*), материјалом који је сличан стаклу и који је због те своје особине веома брзо постао један од најинтересантнијих и истовремено "најузбудљивијих" материјала у данашњој индустрији дизајна и изградњи због великих могућности и потенцијала за примену. Такође, посебан изазов представља примена Горила стакла (*Corning Gorilla Glass*), чија могућност примене у архитектонским објектима је у фази истраживања. Горила стакло, које је лаган, елегантан, савитљив, оптички чист и веома издржљив производ, дебљине само 0,5-2 mm, добијено је технолошким процесом хемијског полукаљења. Ограничење представља његова максимална димензија, која износи 2,5 x 1,7 m.

- **Питер Ленк (Peter Lenk)**: Изузетне разлике постоје у примени двоструко закривљеног стакла, због чега је неопходно посветити пажњу оптимизацији закривљене површине стакленог омотача с циљем панелизације (поделе на панеле) која ће омогућити да већи проценат буду равни и једноструко закривљени панели, а мањи проценат двоструко закривљени панели. Пример стакленог омотача у виду 12 стаклених једара, (3.600 стаклених панела укупне површине 13.000 m²) на објекту фондације Луј Витон у Паризу (Слика П2.9а), архитекте Френк Герија показао је могућност примене само

цилиндричних панела различите закривљености на комплексном омотачу континуалне закривљености. Изазов је представљала геометријска оптимизација која је требало да одреди најбоље међусобно уклапање цилиндричних панела на свакој од 12 предвиђених површина (Слика П2.9б), односно најмања могућа одступања.



Слика П2.9. Различита закривљеност стаклених панела (3.600 елемената) омотача објекта фондације Луј Витон, Париз: а) Изглед стакленог омотача; б) Одговарајућа панелизација показује континуалну закривљеност сваког цилиндричног панела; (Извор: а) Преузето са *Frank Gehry Biography*, <http://www.achievement.org/autodoc/page/geh0bio-1>, 21. 1. 2016; б) Raynaud, 2014: 60)

- **Ђенади Василченко-Малишев (Gennady Vasilchenko-Malishev):** Нове могућности се истражују у оквиру међународног пројекта европске истраживачке мреже о примени конструктивног стакла (*COST Action TU0905 Structural Glass – Novel Design Methods and Next Generation Products*, www.glassnetwork.org) са посебном пажњом на примену концепта хладног савијања (ограничена закривљеност); такође је ограничена мрежа произвођача закривљеног стакла (најпознатији европски снабдевачи су *Sunglass* из Италије и *Cricursa*, Шпанија као и *Cristacurva* из Америке. Такође, неопходно је обезбедити контролу и осигурање квалитета након процеса монтаже, нарочито у погледу толеранција и померања.
- **Проф. Миодраг Мирковић:** Данас је тешко је изаћи из оквира комерцијалних решења у изобиљу продукције савремене архитектуре, пре свега због ограничења у погледу инвестиционих трошкова. У богатим срединама и за објекте од изузетне важности и значаја, чини се да нема инвестиционих ограничења. То је и прилика да архитекте понуде посебно оригинална решења. Закривљене форме пружају далеко веће могућности обликовања.

- **Драган Тасковић:** У Србији је присутна могућност примене закривљеног стакла са већим полупречником закривљења за угао савијања и до 90°, док је закривљена стакла мањег полупречника теже произвести. Максимална димензија панела, које може да обради предузеће Павле без могућности каљења али са могућношћу примене тврдог нискоемисионог премаза (стакла произвођача *Guardian* и *AGC*), а која су произведена процесом термичког савијања уз помоћ калупа у стандардној пећи износи 1,9 x 2,9 m, дубине око 50 cm и дебљине од 4-19 mm. С друге стране, термичко савијање у ручно израђеној пећи омогућава димензије панела од 2,2 x 3,8 m, дубине око 50 cm и дебљине од 4-19 mm, као и већи полупречник закривљења.

- **Бојан Стојановић:** Тржиште у Србији је потпуно неистражено за примену закривљеног стакла. Максимална димензија панела, које може да обради предузеће Конкав Конвекс без могућности каљења али са могућношћу примене тврдог ниско-емисионог премаза (стакло произвођача *Guardian* и *AGC*), а која су произведена процесом термичког савијања уз помоћ калупа износи 2,0 x 3,5 m, дубине око 70 cm.

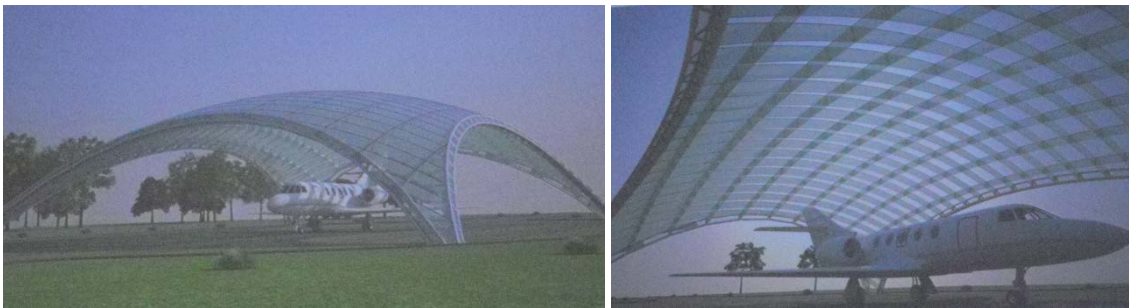
Свака примена представља нови изазов, с обзиром на то да су захтеви архитеката још увек ван техничких услова извођења, те се произвођачи труде да приближе технику производње захтевима архитеката, као и да едукацијом архитекте упознају с техничким могућностима производње.

7. Који конструктивни системи су најпогоднији (челични решеткасти носачи, јарболосте решетке, кабловски решеткасти носачи, носачи великих димензија, стаклени стубови (енгл. *glass fins*), просторни решеткасти системи, тансегрити конструкције, мрежасте системи (од крутих штапова и мреже каблова) за примену закривљених стаклених панела и зашто?

- **Дамјан Роган (Damian Rogan):** Значајна одлика примене закривљеног стакла је коришћење његове геометријске крутости, с циљем постизања већих распона и смањења броја елемената носеће конструкције која се обично израђује од полираног нерђајучег челика.

- **Питер Ленк (Peter Lenk):** Питање је само шта је могуће постићи применом одређеног конструктивног система.

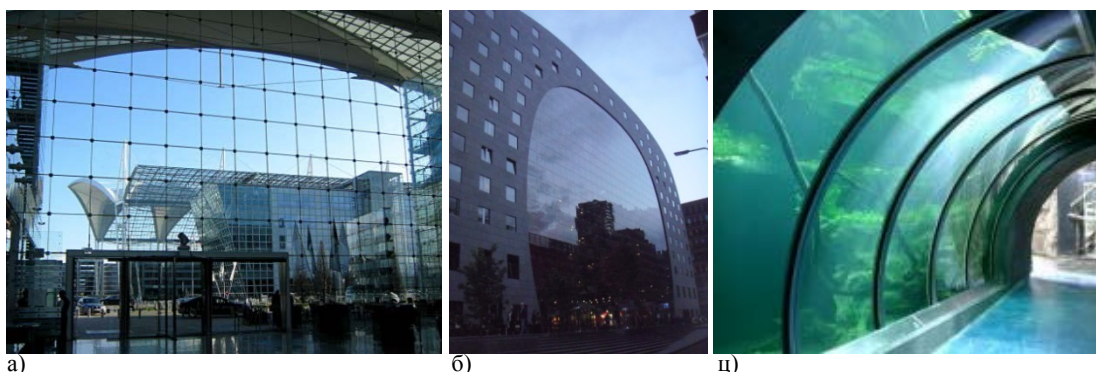
- **Неша Гопал (Neesha Gopal)** и **Абикуниа Осунде-Огбебор (Aibiokunla Osunde-Ogbebor)**: Нису сви погодни, с обзиром на то да њихова примена у директној зависности од комплексности геометрије, односно типа закривљености. Такав пример представљају у потпуности стаклене конструкције (стаклени стубови, греде, ребра) или просторне структуре великог распона (Слика П2.10), које није могуће применити у случају великог закривљења.



Слика П2.10. Истраживање могућности материјализације просторне структуре великог распона скоро у потпуности од стакла – технички изводљиве и економски одрживе; структура се састоји из три дела: мреже стаклених елемената (уплетена ламинирана стаклена ребра у виду лукова), једноструко закривљених панела, и челичне структуре по ивицама површи која преноси оптерећење на темељне стове (Извор: Nieri & Trösch, 2014: 622, 623)

- **Јурген Нојгебауер (Jürgen Neugebauer)**: Најбољи су рамовски системи за ношење стаклених панела, с обзиром на то да применом осталих система постоје већа ограничења. Тако, у случају примене кабловских мрежа треба имати у виду флексибилност материјала, док се стакло ипак сматра крућим материјалом. Пример стаклене фасаде хотела Кемпински на аеродрому у Минхену (Слика П2.11а) показао је да, у случају великих стаклених површина и у овом случају мрежасте кабловске конструкције, неопходно је предвидети могућност и одредити максимално извијање, које у овом случају износи ± 20 cm. Други случај велике површине стаклене фасаде објекта тржнице у Ротердаму (Слика П2.11б) димензија 34 x 42 m, чију конструкцију чине 26 вертикалних и 22 хоризонтална кабла, као и стаклени панели димензија 1485 x 1485 mm, показује да за сценарио највећег предвиђеног оптерећења од ветра, предвиђено извијање износи чак ± 70 cm. С друге стране, може се сматрати импресивним, колико карактеристична закривљеност стаклених панела може допринети смањењу дебљине стакла, упркос великом оптерећењу (30 kN/m^2). То је постигнуто на стакленом тунелу акваријума *Vivarium*, Марија Хоф, у Аустрији (Слика П2.11ц),

захваљујући активирањем "мембранских снага" у савијеном стаклу које је фиксирано уз помоћ специјалних хоризонталних профила конструкције. Тунел дужине 6 m састављен је од 5 цилиндрично закривљених стаклених панела, ширине 1,2 m, чија дужина лука износи 3,6 m и полупречник закривљења око 2 m. Стаклени панели су произведени од сигурносног, ламинираног стакла дебљине 48 mm (4 × 12 mm). Такође, на овом примеру је приказана могућност фиксирања стаклених панела по хоризонтали у случају једноструког закривљења панела које је постављено у вертикалном правцу.



Слика П2.11. Различите карактеристике стаклених омотача у односу на примењен конструктивни систем: а) Стаклена фасада кабловске мрежасте конструкције хотела Кампински, Минхен; б) Стаклена фасада кабловске мрежасте конструкције објекта тржнице, Ротердам; ц) Акваријум *Vivarium Mariahof*, Аустрија; (Извор: а) Преузето са: <https://www.flickr.com/photos/14646075@N03/4515378143/in/photostream>, 23. 1. 2016; б) Аутор, 2015; ц) Преузето са: <http://www.pointoo.de/poi/Mariahof/Vivarium-196138.html>, 23. 1. 2016)

- **Ђенади Василченко-Малишев (Gennady Vasilchenko-Malishev), Драган Тасковић и Бојан Стојановић:** Могуће је применити све конструктивне системе у случају закривљеног стакла.

- **Проф. Миодраг Мирковић:** Стакло је материјал који не трпи велике деформације. Тачније, оно има своје перформансе и дозвољене максималне вредности напрезања у односу на различите статичке утицаје. Основну конструкцију објекта, обично пројектант одређује водећи се другим захтевима. На деловима објекта где је предвиђено застакљење накнадно се проверава и евентуално коригује конструкција, док је ређе обрнуто.

С обзиром на велики број различитих конструктивних система, може се закључити да не постоји систем који би свеобухватно био најбољи за примену на закривљеним стакленим омотачима већ све зависи од захтева и услова примене.

8. Који системи веза/фиксирања стаклених панела су најпогоднији, односно не одговарају (оквирни системи – класични, полуструктурални и структурални

и безоквирни системи – тачкасто фиксирање бушењем и помоћу завртња или уметнутим држачем, тачкасто фиксирање помоћу спона и тачкасто фиксирање лепљеном везом) за примену закривљених стаклених панела и зашто?

- **Френсис Еш (Francis Aish)** и **Стефан Веркуилен (Stephan Verkuijlen)**: Прави изазов увек представљају спојеви и везе између различитих стаклених елемената.
- **Дамјан Роган (Damian Rogan)**: У случају примене закривљених стаклених елемената који су тачкасто ношени помоћу потконструкције, неопходно је узети у обзир редослед активности: 1. бушење рупа на стакленом панелу; 2. његово савијање уз помоћ неке од техника обликовања; 3. каљење стакленог панела.
- **Питер Ленк (Peter Lenk)**: Велика је предност нове технике обликовања стакла која подразумева процес хладног савијања, којим је омогућено савијање панела у жељену форму директно на потконструкцију на градилишту или у фабрици.
- **Ђенади Василченко-Малишев (Gennady Vasilchenko-Malishev)**: Везе и начин фиксирања у случају примене закривљених стаклених панела морају се претходно анализирати и проверити нумерички, с обзиром на то да форма панела доприноси да се оптерећење преноси на различите начине (различитим путем).
- **Јурген Нојгебауер (Jürgen Neugebauer)**: Оквирни системи представљају најбоље решење из разлога равномерног преноса оптерећења. Такође, добро решење представља и стакло залепљено на елементе потконструкције (структурална спојница), посебно када се такав панел претходно постави на оквир у фабрици након чега следи његова монтажа на градилишту. Овај поступак се сматра бољим због могућности лоших временских услова на градилишту који могу да утичу на структуралну спојницу. За тачкасто ношење и фиксирање панела неопходно је да стакло буде каљено (преднапрегнуто). Такво стакло није могуће да буде слободно закривљене форме с обзиром на то да процес хлађења, током производње, подразумева његово кретање на производној траци. У том смислу, могуће је произвести

једноструко закривљену форму (цилиндричну и коничну), која кретањем у правцу изводница (правих линија) не утиче на промену форме. На европском тржишту су доступне велике машине за термичко каљење и савијање стакла истовремено у току процеса производње.

- **Проф. Миодраг Мирковић:** Системи фиксирања стаклених панела и њихов избор зависе од случаја до случаја. Сам избор пројектант доноси у сарадњи са извођачем, па је за питање типа и рационалног избора компетентан извођач да предложи решење.

- **Драган Тасковић:** Могуће је применити све системе фиксирања и веза који су познати за формирање веза равних панела и потконструкције, такође, и у случају закривљених стаклених панела.

- **Бојан Стојановић:** Оквирни системи представљају најједноставније решење из разлога равномерног преноса оптерећења стаклених панела.

Рамовски систем се истиче као најбољи али захтев архитеката за неоптерећеношћу транспарентне површине омотача елементима носеће конструкције и даље поставља изазове пред извођаче.

9. Да ли узимате у разматрање термичке перформансе приликом примене закривљених стаклених панела?

- **Френсис Еш (Francis Aish), Стефан Веркуилен (Stephan Verkuiljen), Тим Мекфарлејн (Tim Macfarlane) и Ђенади Василченко-Малишев (Gennady Vasilchenko-Malishev):** Термичке перформансе се увек разматрају, па и у случају закривљеног стакла.

- **Дамјан Роган (Damian Rogan):** Велики проблем закривљеног стакла је тај што је могуће применити само мали број нискоемисионих премаза у линијској производњи и што није могуће постићи добру g -вредност.

- **Питер Ленк (Peter Lenk):** Важно је да консултант или произвођач фасаде обезбеди контролу и сигурност квалитета у погледу спречавања грешака и оштећења како у процесу производње тако и приликом транспорта и монтаже, без обзира на то да ли се савијање стаклених панела врши у фабрици или на лицу места, на градилишту.

- **Неша Гопал (Neesha Gopal) и Абикуниа Осунде-Огбебор (Aibiokunla Osunde-Ogbebor):** Упркос комплексној геометрији неопходно је обезбедити

неку врсту застора или одабрати стакла са соларном контролом у циљу задовољења енергетских перформанси закривљеног стакленог омотача.

- **Јурген Нојгебауер (Jürgen Neugebauer):** Морају се узети у разматрање термичке карактеристике, нарочито због могућности термичког шока услед кога може доћи до лома стакла.
- **Проф. Миодраг Мирковић:** Свакако да су термичке перформансе значајан фактор за димензионисање панела (величина и дебљина), као и за креирање детаља њихових спојева. Код примене једноструког стакла, мањи су проблеми који се односе на међусобне спојеве панела, толеранције и одступања док је код двоструких, термоизолационих панела, а посебно закривљених, нужно истраживати и пројектовати нова решења. За разлику од примене равних стаклених елемената, у пракси се далеко мање примењује закривљено стакло за које не постоје већ готови индустријски произведени системи.
- **Драган Тасковић:** Термичке карактеристике које се узимају у обзир када је у питању примена термоизолационих панела јесу коефицијент пролаза топлоте (U -вредност), светлосна пропустљивост и соларни фактор. Сматра се да су добре карактеристике у погледу топлотне проводности када је U -вредност око 0,5-0,6 W/(m²K) за троструко застакљење и око 1,0-1,1 W/(m²K) за двоструко застакљење. Такође, вредност соларног фактора испод 40% сматра се веома повољном. Примена троструког застакљења у односу на уштеде исплати се у веома кратком року с обзиром на то да је њихова економска цена за око 1,5 пута већа од економске цене двоструког застакљења. За нискоемисиони премаз уобичајена је позиција 2 и 5 у случају троструког застакљења. Проблем је што се све ове карактеристике односе на равно стакло.
- **Бојан Стојановић:** Примена нових пвц лајсни као дистанцера за формирање термоизолационих панела, с циљем побољшања њихових термичких карактеристика може бити значајна.

Термичке перформансе се узимају у обзир без могућности добијања тачних резултата. Такође, ради се на истраживању техника за прецизан прорачун термичких карактеристика закривљеног стакла.

БИОГРАФИЈА АУТОРА

Татјана Косић је рођена 01.07.1962. године у Београду, где је завршила основну школу и трећу београдску гимназију (Усмерено образовање - природно математички смер). Архитектонски факултет Универзитета у Београду уписала је 1981. године и дипломирала 1990. године са оценом 9 на дипломском раду (средња оцена 8,77). Током студија, од 1985. године, започиње са активним радом у пракси, а убрзо по дипломирању, од 1991. године, запошљава се у предузећу за пројектовање и инжењеринг “Модус” у звању пројектанта сарадника, а од 1992. године у предузећу за пројектовање и инжењеринг “Станком” са седиштем у Београду, у звању самосталног пројектанта. Стручни испит положила је 1992. године.

Од 1993. године борави у Милану, Италија, где је запослена као самостални пројектант у приватној фирми *Camar Srl* која се бави пројектовањем и опремањем ентеријера, а од 1994. године запослена је у мултинационалној компанији *Ramoil Engineering Spa* из Милана где ради као пројектант.

Од 1998. године запослена је на Архитектонском факултету Универзитета у Београду, као асистент приправник, на предметима Архитектонске конструкције 2 и 3, а 2004. године изабрана је у звање вишег стручног сарадника, на истим предметима. Од 2009. године ради као асистент на Департману за Архитектонске технологије Архитектонског факултета Универзитета у Београду, за ужу научну односно уметничку област *Архитектонске конструкције материјали и физика зграда*, на предметима Архитектонске конструкције 2 и 3, Студио пројекат 2 и Студио пројекат АТ на мастер студијама.

Докторске студије на Архитектонском факултету Универзитета у Београду уписала је 2008. године.

Од 02. до 06. априла 2012. године похађа *Cost Action TU0905 Structural Glass Training School*, у Генту, Белгија, субвенционирано од *COST Action TU0905*, што је допринело одабиру теме докторске дисертације. У складу са потребама истраживања за одабрану тему докторске дисертације, од 17. до 24. марта 2014. године била је на студијском боравку на Универзитету у Кембриџу (*Department of Engineering, University of Cambridge*), Велика Британија, код професора Маура

Оверенда (Prof. Dr Mauro Overend), а од 27. априла до 5. маја 2014. године на Универзитету за примењену науку *Fh Joannet* и Технолошком универзитету у Грацу, Аустрија код професора Јургена Нојгебауера (Prof. Dr Jürgen Neugebauer) и професора Др Милене Ставрић, субвенционирано од Cost Action TU0905.

Године 2013. одобрен јој је рад на теми докторске дисертације под насловом: *Примена стакла у материјализацији геометријски комплексних форми омотача архитектонских објеката.*

Током читаве своје професионалне каријере, бави се паралелно и научним, и стручно уметничким радом. Учествоје у националним и међународним научно-истраживачким пројектима (*TUD COST TU0905 Action - Structural Glass-Novel Design Methods and Next Generation Products; TUD COST TU1205 - Building integration of Solar Thermal Systems (BISTS); TUD COST TU1403 - Adaptive Facades Network*). Као коаутор и као члан ауторског тима има радове публиковане у више монографских издања и значајан број научних радова објављених у зборницима међународних и националних конференција. Аутор је великог броја пројеката и изведених ентеријера. Поседује знање енглеског и италијанског језика.

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписана: Татјана Д. Косић

Број индекса: 2007/17

Изјављујем

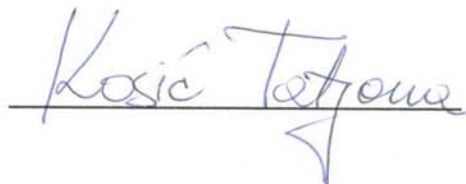
да је докторска дисертација под насловом

**ПРИМЕНА СТАКЛА У МАТЕРИЈАЛИЗАЦИЈИ ГЕОМЕТРИЈСКИ
КОМПЛЕКСНИХ ФОРМИ ОМОТАЧА АРХИТЕКТОНСКИХ ОБЈЕКТА**

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршила ауторска права и користила интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 10. 8. 2016.



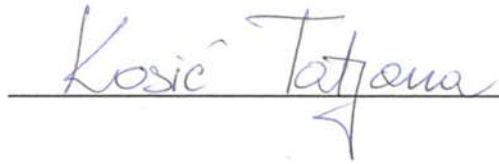
Kosic Tatjana

Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора: Татјана Д. Косић
Број индекса: 2007/17
Студијски програм: Докторске академске студије архитектура и урбанизам
Наслов рада: **ПРИМЕНА СТАКЛА У МАТЕРИЈАЛИЗАЦИЈИ
ГЕОМЕТРИЈСКИ КОМПЛЕКСНИХ ФОРМИ
ОМОТАЧА АРХИТЕКТОНСКИХ ОБЈЕКТА**
Ментор: Проф др Александра Крстић-Фурунџић

Потписана:



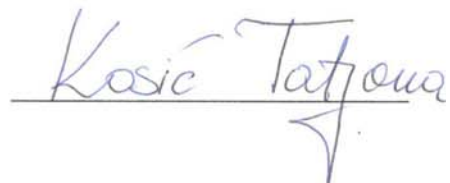
Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 10. 8. 2016.



Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

ПРИМЕНА СТАКЛА У МАТЕРИЈАЛИЗАЦИЈИ ГЕОМЕТРИЈСКИ КОМПЛЕКСНИХ ФОРМИ ОМОТАЧА АРХИТЕКТОНСКИХ ОБЈЕКТА

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

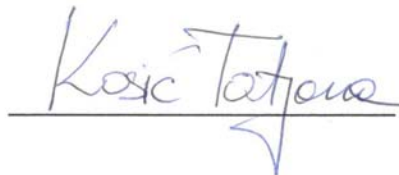
Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

У Београду, 10. 8. 2016.

Потпис докторанда



Kosić Tatjana