

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
АРХИТЕКТОНСКИ ФАКУЛТЕТ

Андреј Б. Јосифовски

маст. инж. арх.

**НЕДЕСТРУКТИВНА *IN SITU*
ИСПИТИВАЊА КВАЛИТЕТА ДРВЕНИХ
КОНСТРУКЦИЈА АРХИТЕКТОНСКИХ
ОБЈЕКТА**

докторска дисертација

Београд, 2021.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF ARCHITECTURE

Andrej B. Josifovski

M.Arch.

**NONDESTRUCTIVE *IN SITU* QUALITY
ASSESSMENT METHOD USED FOR
TESTING WOODEN STRUCTURES IN
ARCHITECTURAL OBJECTS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2021.

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

Архитектонски факултет

Ментор

др Александра Крстић-Фурунцић, редовни професор
Универзитет у Београду, Архитектонски факултет

Чланови комисије

др Бранислав Жегарац, редовни професор – председник комисије
Универзитет у Београду, Архитектонски факултет

др Александра Крстић-Фурунцић, редовни професор
Универзитет у Београду, Архитектонски факултет

др Небојша Тодоровић, ванредни професор
Универзитет у Београду, Шумарски факултет

Датум одбране

Београд, 2021.

ИЗЈАВА ЗАХВАЛНОСТИ

„Тата, од доктора само ти и ја?!“

Београд, 1995.

Мојим родитељима, Нади и Борку који су се упознали у поликлиничком кабинету за ултразвучну дијагностику срца, Клиничког Центра Србије!

Велику захвалност за свесрдну помоћ приликом израде ове дисертације, пре свега дугујем своме оцу, који је непрекидно био уз мене и који ме је зналачки усмеравао кроз научни рад, од првог дана мојих докторских студија.

Инспирацију за почетак рада на овом истраживању добио сам подстицајем од стране професора др Ненада Шекуларца, чији сам био студент на Мастер академским студијама архитектуре и са којим сам први пут обишао радове на обнови манастира Хиландар. На чему сам му неизмерно захвалан.

Захваљујем се свом ментору, професорки др Александри Крстић-Фурунџић на великој пожртвованости и стрпљењу у раду са мном, као и мом професору др Браниславу Жегарцу који је био ту за подршку свих ових година.

Желим посебно да издвојим професора др Небојшу Тодоровића са Шумарског факултета, кога сам упознао на почетку рада на докторској дисертацији, а који ми је безрезервно пружио подршку од самог почетка и омогућио да све експерименте, као и саму идеју спроведем у дело.

Захваљујем се и свима чија помоћ ми је током израде рада пуно значила. Најпре својој драгој мајци Нади Јосифовски, уји Милану Кнежевићу, а затим редом: професору др Владимиру Маку, доценту др Марку Николићу, доценту Зорану Степановићу, професору Драгану Марчетићу, Милану Селаку, доценту др Мири Мирић Милосављевић, Бранку Хабушу, Обраду Кузмановићу, Драгану Јевтићу, професору др Зорану Мишковићу, асистенту Марини Ашкрабић, професору др Миомиру Мијићу, др Филипу Петровићу, асистенту Марку Веизовићу, лаборанту Горану Цвјетићанину, мр Горану Бабићу, Биљани Недић, Душану Милићевићу, Радославу Павловићу, Драгану Јанићијевићу, Весни Мулић и Тамари Живковић.

НЕДЕСТРУКТИВНА *IN SITU* ИСПИТИВАЊА КВАЛИТЕТА ДРВЕНИХ КОНСТРУКЦИЈА АРХИТЕКТОНСКИХ ОБЈЕКТА

Сажетак:

Процена квалитета дрвених конструкција је у суштини испитивање њихове статичке постојаности и стабилности. Задаци оваквих процена по својој природи захтевају *in situ* испитивања, а због техничких специфичности механичког тестирања, првенствено су усмерена на недеструктивне методолошке приступе. Високи стандарди који се постављају за испитивање архитектонских објеката од културно-историјског значаја, што се пре свега односи на очување њиховог интегритета и аутентичности, усмерили су и ово истраживање ка успостављању једне поуздане, недеструктивне методе која ће бити коришћена у те сврхе. Успостављање такве методе је подразумевало њено калибрисање, јер у досадашњој пракси није било директне еквивалације параметара механички и недеструктивно одређене чврстоће уграђеног дрвета. Ултразвучни и стрес-звучни таласи који се иначе примењују за недеструктивне процене механичких потенцијала дрвета – на основу брзине пропагације њихових таласа, давали су само могућност израчунавања динамичког модула еластичности. Добијање и статичког модула еластичности ради корелисања параметара различитих модалитета тестирања, подразумевало је и паралелно механичко испитивање датог дрвеног материјала. Баждарењем стрес-звучне методе испитивања дрвета – по аналогном принципу усмеравања силе притиска и звучних таласа, а у односу на правац тока дрвених влаканаца, постигнута је еквивалација параметара брзине пропагације звука и параметара чврстоће дрвета. Овим је била успостављена метода за *in situ* процену чврстоће носећих елемената дрвених архитектонских конструкција, поређењем са стандардом прописаним допуштеним напрезањима (JUS U.C9.200/300) који је дат спрам врсте, класе дрвета и њихових димензија. Узимајући у обзир да је баждарење стрес-звучне методе вршено на епруветама исецаним од здравог дрвета одређене хигроскопне влажности, *in situ* процена чврстоће носећих конструктивних елемената је могла да се врши и на основу познатих брзина пропагације звука кроз здраво дрво. Резултати рада овог истраживања, на основу спектралне анализе пропагације звучних таласа, показују да је њиховом применом могућа директна процена чврстоће носећих

дрвених греда, а тиме и стабилности конструкција, чиме је постигнут циљ овог истраживања.

Кључне речи: недеструктивно испитивање, *in situ* испитивање, дрвене кровне конструкције, механичка својства дрвета

Научно поље: Техничко-технолошке науке

Научна област: Архитектура и урбанизам

УДК број: 624.011.1:534.614(043.3)

NONDESTRUCTIVE *IN SITU* QUALITY ASSESSMENT METHOD USED FOR TESTING WOODEN STRUCTURES IN ARCHITECTURAL OBJECTS

Abstract:

Wooden structures' quality assessment is, basically, testing their static strength and stability. This kind of assessment, by its nature, requires *in situ* testing, and due to specific technical characteristics of mechanical testing, it is primarily based on using uninvasive methodological approaches. High standards set to test architectural objects of cultural and historical significance, which, above all, refer to preserving their integrity and authenticity, directed this research towards establishing a reliable uninvasive method which will be used for that purpose. Establishing such a method required its calibrating since there had not been a direct equalisation of mechanically and uninvasively set parameters for the hardness of inbuilt wood. Ultrasound and stress waves commonly used in uninvasive assessment of mechanical potentials of wood based on the speed of their waves' propagation only enabled calculating the dynamic elasticity modulus. Getting the static elasticity modulus, in order to correlate the parameters of different testing modalities, required parallel mechanical testing of that particular wooden material. The scaling of stress sound method for testing the hardness of wood, using the analogue principle of directing pressure force and sound waves in accordance with wood fibers direction, resulted in the speed of sound propagation and the hardness of wood parameters' equalisation. In this way a method for *in situ* assessments of the hardness of carrying elements in wooden architectural structures was established, by comparing it with the standard based on the strain limits (JUS U.C9.200/300), in accordance with the kind, class and dimensions of timber. Considering the fact that stress sound method scaling was done on test tubes cut out of healthy wood with particular hygroscopic moisture, *in situ* assessment of carrying structural elements could be done based on known speed values of sound propagation in healthy wood. The results of our research, based on the spectral analysis of sound wave propagation, show that their application enables a direct assessment of the carrying wooden beams' hardness and, therefore, a direct assessment of the structure stability itself, thus meeting the objective of this research.

Key words: nondestructive assessment, *in situ* assessment, wooden roof structures, mechanical properties of wood

Field of science: Technical — technological sciences

Scientific area: Architecture and urbanism

UDC: 624.011.1:534.614(043.3)

САДРЖАЈ:

<u>I УВОД</u>	12
<u>I 1. Уводне напомене о теми</u>	12
<u>I 2. Проблем и предмет истраживања</u>	14
<u>I 2.1. Полазни ставови о проблему истраживања</u>	14
<u>I 2.2. Предмет истраживања</u>	15
<u>I 2.3. Значај предмета истраживања</u>	16
<u>I 2.4. Операционо одређење предмета истраживања</u>	16
<u>I 3. Циљ истраживања</u>	17
<u>I 4. Задаци истраживања</u>	18
<u>I 5. Полазне хипотезе</u>	18
<u>I 6. Методологија истраживања</u>	20
<u>I 7. Очекивани резултати и њихова практична примена – научни допринос</u>	20
<u>I 8. Генерална структура докторске дисертације</u>	21
<u>II ДРВО КАО МАТЕРИЈАЛ – АНАЛИЗА СВОЈСТАВА</u>	24
<u>II 1. Дрво као материјал</u>	24
<u>II 1.1. Грађа дрвета</u>	24
<u>II 1.2. Макроскопска грађа</u>	24
<u>II 1.3. Хемијска грађа</u>	27
<u>II 1.4. Анатомска грађа</u>	28
<u>II 2. Анализа физичких својстава дрвета</u>	28
<u>II 2.1. Влажност дрвета</u>	30
<u>II 2.2. Густина дрвета</u>	32
<u>II 3. Анализа механичких својстава дрвета</u>	35
<u>III 3.1. Напон на притисак</u>	38
<u>III 3.2. Напон на затезање</u>	40
<u>III 3.3. Напон на смицање</u>	41
<u>III 3.4. Напон на савијање</u>	42
<u>III 3.5. Савитљивост</u>	43
<u>II 4. Грешке дрвета</u>	45
<u>II 5. Реолошки аспекти својстава дрвета</u>	46

<u>III ИСПИТИВАЊЕ СВОЈСТАВА ДРВЕТА</u>	50
<u>III 1. Испитивање механичких својстава дрвета</u>	50
<u>III 1.1. Успостављање недеструктивне <i>in situ</i> методе</u>	50
<u>III 1.2. Механичко испитивање дрвета – калибрација</u>	51
<u>III 1.2.1. Хуков закон</u>	51
<u>III 1.2.2. Јунгови модули еластичности</u>	51
<u>III 1.2.3. Статички напон на притисак – стандардизација епрувета</u>	52
<u>III 1.2.4. Одређивање густине дрвета огледних епрувета</u>	53
<u>III 1.2.5. Одређивање влажности дрвета</u>	53
<u>III 1.2.6. Оређивање напона на притисак</u>	54
<u>III 2. Недеструктивно испитивање дрвета</u>	55
<u>III 2.1. Инспекција</u>	56
<u>III 2.2. Полуинвазивне методе испитивања квалитета дрвета</u>	57
<u>III 2.3. Недеструктивне методе испитивања квалитета дрвета</u>	58
<u>III 2.4. Еквилизација параметара недеструктивних метода</u>	62
<u>III 2.4.1. Основни принципи – поступак</u>	63
<u>III 2.5. Рендгенски зраци</u>	64
<u>III 2.6. Ултразвучни таласи</u>	67
<u>III 2.7. Стрес-звучни таласи</u>	70
<u>IV ПРЕЛИМИНАРНА ИСТРАЖИВАЊА</u>	73
<u>IV 1.1. Приказ прелиминарних истраживања</u>	73
<u>IV 1.2. Ултразвучно испитивање</u>	76
<u>IV 1.2.1. Метод рада</u>	76
<u>IV 1.2.2. Резултати и дискусија</u>	78
<u>IV 1.3. Рендгенско испитивање</u>	88
<u>IV 1.3.1. Метод рада</u>	89
<u>IV 1.3.2. Резултати и дискусија</u>	92
<u>IV 1.4. Закључак</u>	98
<u>V УСПОСТАВЉАЊЕ НЕДЕСТРУКТИВНЕ МЕТОДЕ <i>IN SITU</i> ИСПИТИВАЊА</u>	
<u>V 1.1. Калибрација методе</u>	99
<u>V 1.2. Одређивање густине дрвета огледних епрувета</u>	102
<u>V 1.3. Одређивање влажности дрвета</u>	103
<u>V 1.4. Одређивање напона на притисак</u>	104

<u>VI</u>	<u>АРХИТЕКТОНСКЕ ГРАЂЕВИНЕ ОД КУЛТУРНО-ИСТОРИЈСКОГ</u>	
	<u>ЗНАЧАЈА</u>	109
	<u>VI 1.1. Принципи дијагностике – препоруке савремених повеља</u>	109
	<u>VI 1.2. Зграда Техничког факултета у Београду</u>	112
	<u>VII</u>	<u>ДИЈАГНОСТИКА СТРЕС-ЗВУЧНИМ ТАЛАСИМА – <i>IN SITU</i> ПРИМЕНА</u>
	<u>VII 1.1. Дефиниција и историјат</u>	114
	<u>VII 1.2. Шема мерења и опрема</u>	114
	<u>VII 1.3. Техника извођења методе</u>	114
	<u>VII 1.4. Спектрограм</u>	115
	<u>VII 1.5. Процена квалитета носећих елемената дрвених конструкција</u>	116
	<u>VII 1.6. Компаративна анализа табличних и измерених вредности оптерећења</u>	117
	<u>VIII</u>	<u><i>IN SITU</i> МЕРЕЊЕ ЧВРСТОЋЕ ЕЛЕМЕНАТА ДРВЕНИХ</u>
	<u>КОНСТРУКЦИЈА– ДИСКУСИЈА РЕЗУЛТАТА</u>	119
	<u>IX</u>	<u>ЗАКЉУЧАК</u>
		121
	<u>X</u>	<u>ЛИТЕРАТУРА</u>
		124
	<u>XI</u>	<u>СПИСАК ИЛУСТРАЦИЈА И ТАБЕЛА</u>
		132
	<u>XII</u>	<u>БИОГРАФИЈА АУТОРА</u>
		135
	<u>XIII</u>	<u>ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ</u>
		138
	<u>XIV</u>	<u>ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ</u>
	<u>ДОКТОРСКОГ РАДА</u>	139
	<u>XV</u>	<u>ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ</u>
		140

I УВОД

I 1. Уводне напомене о теми

Идеја о истраживању недеструктивних начина испитивања дрвених конструкција архитектонских објеката произилази из стално актуелне потребе обнове постојећих дрвених конструкција, при чему је посебан такав интерес за рестаурацију и обнову грађевина од културно-историјског значаја. За извођење радова на тим објектима прописана су посебна правила која подразумевају специфичан, неинвазиван методолошки приступ дијагностици оштећења. Обнова једног од најстаријих споменика наше културе, манастира Хиландар, којој сам, у једном тренутку присуствовао, иницирала је настанак идеје да би исти методолошки приступ требало примењивати и код рестаурације других објеката, јер је сваки од њих својеврстан споменик времена у коме је настао. Начин на који би се у таквим радовима поступало дефинисан је документом који је ICOMOS у процесу ажурирања усвојио на Генералној скупштини у Њу Делхију, децембра 2017. године. У њему су садржани принципи и за конзервацију градитељског наслеђа од дрвета, који апострофирају заштиту аутентичности и интегралне целовитости историјских грађевинских структура од дрвета. Напрезања која дрво трпи као саставни део различитих конструкција су врло комплексна и због тога сложена за истраживање. Препознавање најоптерећенијих тачака конструкције и откривање знакова пропадања, оштећења и грешака дрвета јесте примарни предуслов прављења адекватног санационог плана и спречавање настајања још већих оштећења. Пропадање и губитак архитектонских грађевина са дрвеном конструкцијом због оронолости материјала, захтева темељну дијагнозу стања елемената конструкције. При томе, када је реч о грађевинама од културно-историјског значаја методе испитивања морају бити недеструктивне. Такав принцип дијагностике намеће потребу за *in situ* испитивањем.

Решавање проблема конзервације и рестаурације захтева систематичност у приступу, а сам поступак би, по природи ствари требало да крене од откривања степена угрожености објекта. Начин на који би се то остваривало види се из дефиниције појма споменика културе,¹ која апострофира аутентичност и интегралну целовитост таквог објекта који је симбол сећања на једно прошло време. Из тога произилази да би и

¹Европска повеља: „Споменик културе је сведочанство људске историје и њеног развоја, за чије очување постоји јавни интерес.”

дијагностичке методе морале да буду недеструктивне како би се градитељски дух тог времена изгледом објекта у потпуности сачувао.

Фокус истраживања овог рада је био у успостављању методолошки новог, неинвазивног начина испитивања механичких особина дрвених конструкција архитектонских објеката. Ново у приступу испитивања тих особина је било то да се оне директно изразе неком од метода на основу којих се то претходно радило на посредан начин. Мерење брзине проласка стрес-звучног и ултразвучног таласа спадају у такве, широко примењиване методе у дијагностици квалитета дрвеног материјала. С обзиром на то да метод испитивања подразумева усмеравање и звучног и ултразвучног таласа, паралелно или нормално на ток механичких влаканаца дрвета, могла се успоставити аналогија са стандардним статичким испитивањима дрвета у лабораторијским условима. Поред ових метода у обзир је дошло и рендген испитивање дрвета, због могућности усмеравања рендгенских зрака на сличан начин како се то чини и са звучним, односно ултразвучним таласима. Имајући у виду да брзина простирања звучних и ултразвучних таласа зависи од густине материјала, дошло се до тога да би и различитост светлине рендгенске слике требало да буде одраз различитости структуралне густине материјала кроз који се пропуштају рендгенски зраци. Искуства из медицинске рендген дијагностике су била потврда да су оваква размишљања основана и да се густина дрвета, у хипотетичкој поставци истраживања овог рада, могла узети за заједнички именитељ све три поменуте методе. Такво размишљање наводило је на то, да би механичке коефицијенте експерименталних узорака дрвета који су добијени њиховом лабораторијском калибрацијом, било могуће претворити у њима одговарајуће звучне, ултразвучне или коефицијенте светлине рендгенске слике. Из тога је логично произашло да би на овај начин, свака од ових метода, могла једнако ефикасно бити примењена *in situ*, за испитивање квалитета елемената дрвених конструкција архитектонских грађевина – односно да би се свака метода могла сматрати новоуспостављеном и узети као репрезент у истраживању овог рада. Избор да то буде стрес-звучна метода је учињен због тога што је то била најстарија метода недеструктивног испитивања дрвета, која никад није била коришћена за испитивање квалитета елемената дрвених конструкција архитектонских објеката. Други део истраживања, који се односио на *in situ* испитивање, базирао се на претпоставци да између лабораторијски испитиваног дрвеног материјала, каквим би ми оперисали и оног из конструкцијског састава дуго експлоатисаног, постоји знатна квалитативна разлика створена временом (реологија). Стога је тражење могућности коришћења

лабораторијских података у циљу предикције заправо *in situ* решавање временске функције, што и јесте био наш задатак. Тако се дошло до тога, да би и потврду ваљаности новоуспостављене методе требало тражити испитивањем дрвених конструкција архитектонских грађевина од културно-историјског значаја, где се веома старе дрвене конструкције једино и могу срести. Отварала се и могућност да се разматрају не само физичка и механичка својства испитиваног уградног дрвета, него и дата конструктивна решења. На ово је наводило логично размишљање да статички најоптерећеније тачке дрвене конструкције временом трпе највеће квалитативне промене, без обзира на врсту и порекло уградног дрвета, као и на утицаје климатских фактора. Слична размишљања водила су ка томе да ако је дрво посебан материјал, онда ће и методе испитивања његовог квалитета, које су установљене у лабораторијским условима, бити једанко успешно и *in situ* применљиве. Претходна теоретска знања о анатомској грађи, својствима и методологији испитивања квалитета дрвета, као и основама статичког прорачуна дрвених конструкција архитектонских објеката, била су потребна да би се могло приступити истраживању овог рада. Фокус интересовања био је на оним подацима који су, према нашој процени, били релевантни за дијагностику и објашњење промена на елементима дрвене конструкције једног архитектонског објекта.

I 2. Проблем и предмет истраживања

I 2.1. Полазни ставови о проблему истраживања

Узимајући у обзир да истраживања механичких својстава елемената дрвених конструкција архитектонских објеката до сада нису стандардно вршена недеструктивним методама, **главни проблем** се може дефинисати питањем начина директног конвертовања резултата добијених механичким испитивањем у лабораторијским условима, на недеструктивно *in situ* истраживање. Прва различитост која се тиче тумачења и компарације тих резултата је што се лабораторијски резултати добијају под дејством статичке силе у трајању од неколико минута, док промене на уградним елементима настају у веома дугом временском периоду. У првом случају се резултати статичког тестирања добијају под тачно одређеним условима (врста дрвета, врста епрувете, температура, влажност), док у другом случају нису познате околности под којима оптерећење временом делује на елементе дрвене конструкције. Самим тим није дефинисано ни настајање, нити степен промена, тако да једноставном

компарацијом резултата таквих мерења, није могуће предвидети брзину пропадања квалитета уграђеног дрвета. У вези са успостављањем недеструктивне дијагностичке методе *in situ* испитивања, отвара се и питање њеног функционисања, јер се при томе механичке особине дрвета изражене у МРа, аналогно степену светлине рендген слике и брзине простирања ултразвука, сада треба конвертовати у параметре брзине простирања стрес-звучног таласа кроз уграђено дрво. **Полазиште** испитивања такође није исто, јер применом *in situ* методе треба да се испитује квалитет елемената дрвених конструкција, код којих, сасвим извесно, због дуготрајне употребе већ постоје структуралне промене, док се за статичко тестирање механичком силом огледни узорци дрвета – епрувете, израђују од некоришћеног, квалитетеног дрвета. Такође је проблематичан и одабир елемената дрвене конструкције, односно њихових сегмената за испитивање механичких квалитета, јер су у поређењу са средњевековном градњом или градњом с почетка XX века конструктивна решења, а тиме и приступ испитивању стабилности конструкције у данашње време другачији. Разлика у градњи је још израженија ако се пореде решења сакралних и световних објеката у односу на те исте временске периоде. Различита архитектонска решења намећу различите захтеве статичке поставке. Проблем одабира најоптерећенијег елемента дрвене конструкције, односно његовог дела је, што се то према концепту овог истраживања не врши на основу резултата статичког прорачуна градње, него ретроградно, на основу изгледа саме конструкције и прописаних стандарда чврстоће датог елемента (носеће греде). На крају, приступачност таквом месту може бити врло отежавајућа околност за технички поступак извођења испитивања.

I 2.2. Предмет истраживања

Предмет истраживања овог рада је неинвазивно, *in situ* испитивање механичких својстава елемената дрвених конструкција архитектонских објеката. Истраживање овог предмета захтевало је претходно увођење методе којом би се то реализовало. За то су била потребна прелиминарна истраживања којима је требало да се докаже основаност директног изражавања вредности механичких својстава дрвета – мерним јединицама неинвазивних метода које се примењују у процени квалитета дрвета. Ова прелиминарна истраживања изведена су применом рендгенских и ултразвучних таласа, при чему је до тада, за директно мерење квалитета дрвета било примењивано само ултразвучно испитивање. На основу позитивних резултата тих уводних истраживања, могло је да се приступи првој фази главног истраживања. Предмет те прве фазе главног

истраживања било је сада, аналогно претходним истраживањима, лабораторијско утврђивање могућности корелисања методе механичког испитивања дрвета и методе примене стрес-звучних таласа специфичне за испитивање дрвета. Потврда могућности таквог баждарења методе примене стрес-звучних таласа отворила је приступ процени елемената кровних конструкција архитектонских објеката, као најизложенијим дејству спољних утицаја, а уједно и најприступачнијим за испитивање. Према концепту овог истраживања, од интереса су промене које на елементима дрвене конструкције изазивају дуготрајна, константна оптерећења, а то су елементи који су заступљени у веома старим кровним конструкцијама, какве се сада срећу код архитектонских објеката од културно-историјског значаја. Најзаступљенији такви објекти код нас су старе цркве и манастири, али и старе куће које се везују за знаменитости наше историје.

I 2.3. Значај предмета истраживања

Стандардизација недеструктивне дијагностике механичких својстава дрвета, била би пре свега, од значаја за унапређење *in situ* дијагностике квалитета уграђеног дрвета. Потреба за брзом, тачном и при томе приступачном дијагностиком, значајна је са аспекта увођења норми квалитета елемената за градњу дрвених конструкција и категоризације архитектонских грађевина. Провера изведеног стања на основу таквих норматива била би могућа *in situ* применом овакве методе, којом се утврђује поклапање прорачунски дозвољених и стварних вредности оптерећења елемената дрвене конструкције. Под условом да такви налази буду озваничени законском регулативом и вредновали се код сертификације објеката, то би у многome подигло квалитет градње, јер би морали да се јасно дефинишу и каталози грађевинске физике. Овакви нормативи би истовремено важили и за архитектонске грађевине од културно-историјског значаја, што би увођењем прецизних критеријума рестаурације и периодичном провером знатно унапредило њихово очување. Према томе, предмет овог истраживања је и од друштвеног значаја, јер се њиме практично отвара питање гаранције квалитета, а тиме и бољих услова живота.

I 2.4. Операционо одређење предмета истраживања

Предмет овог истраживања може се дефинисати са аспекта успостављања методолошки нове недеструктивне *in situ* дијагностике квалитета елемената дрвених конструкција архитектонских објеката. У основи овог поступка су физички закони који

се односе на грађу дрвета и његова физичка и механичка својства. Одређење предмета истраживања концептом овог истраживања стављено је у оквире дијагностичке регулативе која се примењује за грађевине од културно-историјског значаја. Та регулатива односи се на очување аутентичности и инегритета, на начин формулисан *Законом о заштити споменика културе*. Пројектни принципи статичког прорачуна градње дрвених архитектонских конструкција су такође једна од кључних одредница предмета овог истраживања. С обзиром на могућности практичне примене новоуспостављене дијагностичке методе у контроли квалитета дрвеног материјала, која би се могла спроводити кроз систем ових препорука и мера, значајна операциона одредница овог истраживања је и општи друштвени интерес.

I 3. Циљ истраживања

Циљеви истраживања постављени су у складу са досадашњим искуствима, стеченим стандардним и неинвазивним испитивањем дрвета. Главни циљ је успостављање нове, недеструктивне *in situ* методологије испитивања елемената дрвених конструкција архитектонских грађевина. Ради остварења овог циља, најпре су спроведена прелиминарна истраживања како би се установила могућност директног корелисања вредносних параметара: метода лабораторијских испитивња дрвета механичком силом и метода неинвазивног испитивања дрвета стрес-звучним таласима. Дефинисање специфичности тог поступка, што ће омогућити надградњу и других неинвазивних метода – првенствено рендген и ултразвучне методе за исту такву примену, веома је важан циљ овог истраживања. Еквилизиација параметара ултразвучне методе, методе примене стрес-звучних таласа са рендген методом, важан је циљ успостављања основа за стандардизацију недеструктивне дијагностике дрвета, а такође и за перспективно остваривање директне визуелизације дрвета. Утврђивање корелације односа методе механичког испитивања дрвета и методе примене стрес-звучних таласа, односно ултразвучних таласа и рендген зрака, имало је за циљ промовисање таквог приступног принципа испитивању и других градивних материјала. Успостављање нове, недеструктивне методе *in situ* испитивања елемената дрвених конструкција архитектонских објеката, има за циљ унапређење извођења грађевинских радова, што подразумева примену дијагностике највишег стандарда, каква је сада прописана за радове рестаурације и обнове грађевина од културно-историјског значаја. Циљ је такође да ово истраживање послужи и као основа за даље унапређење недеструктивне дијагностике дрвета у оквиру индустријске прераде дрвета.

I 4. Задаци истраживања

Задаци овог истраживања формулисани су поставком циљева, а они који се односе на примену рендген и ултразвучног испитивања дрвета испуњени су овим претходним истраживањима. Како су при томе и теоретска разматрања и анализе добијених резултата потврдили основаност и одредили оквире корелисања параметара механичког и недеструктивног испитивања дрвета, то ће се прво дати упоредни приказ тих претходних истраживања. Даљи редослед задатака формиран је сходно концепту овог истраживања на следећи начин:

***дефинисање** услова лабораторијског испитивања огледних епрувета;

***калибрација** огледних епрувета на којима ће се затим вршити испитивање применом стрес-звучних таласа;

***испитивање** стрес-звучним таласима калибрисаних епрувета; упоредна анализа резултата испитивања огледних епрувета применом механичке силе и резултата испитивања применом стрес-звучних таласа;

***одређивање** критеријума одабира архитектонских објеката на којима ће се вршити *in situ* испитивање елемената дрвених конструкција;

***дефинисање** услова *in situ* примене стрес-звучних таласа;

***утврђивање** критеријума места примене стрес-звучних таласа за испитивање елемената дрвених конструкција;

***испитивање** елемената дрвених конструкција архитектонских објеката применом стрес-звучних таласа; статистичка анализа и валоризација добијених резултата;

I 5. Полазне хипотезе

Полазне хипотезе односе се на успостављање стандардизоване, недеструктивне методе за *in situ* испитивање дрвених елемената архитектонских конструкција од културно-историјског значаја. Оне су основ ових припремних истраживања, планираних да се аналогно одређеном усмеравању силе код механичког испитивања дрвета, примене адекватним усмерењем рендгенских зрака и ултразвучних таласа. Узимајући да је у условима успостављене равнотеже влажности спољне средине и унутрашње влажности дрвета, параметар чврстоће дрвета дефинисан његовом густином² и да промена карактеристика рендген зрака и ултразвучних таласа утиче на резултате испитивања,

²Б. Колин, „Утицај влаге и температуре на притисисну чврстоћу паралелно са влаканицама дрвета.” *Дрвна индустрија*, 7–8 (1988).

полазне хипотезе су аксиоматски биле постављене. Други део њихове поставке односио се на стандардизацију ових недеструктивних метода, односно на еквализацију механичких параметара чврстоће испитиваних узорака дрвета и њима аналогних, мерних параметара рендгена и ултразвука. Последњи услов поставке полазних хипотеза односи се на техничко извођење испитивања чврстоће носећих елемената дрвених архитектонских конструкција, које би сходно стандарду,³ требало да се изведе њиховом целом дужином, у правцу пружања дрвених влаканаца. У складу са тим полазне хипотезе би гласиле:

X 1. Под истим условима рендгенског снимања, најсветлије снимке ћемо добити код узорака дрвета са највећом вредношћу статичког отпора на притисак, усмеравањем зрака паралелно пружању механичких влаканаца.

X 2. При истим условима примене, највећу брзину ултразвука ћемо добити код узорака дрвета са највећом вредношћу статичког отпора на притисак, његовим усмеравањем паралелно пружању механичких влаканаца.

Главна хипотеза

Доказивањем полазних хипотеза испуњавају се услови за постављање главне хипотезе овог истраживања, да је применом недеструктивне методе, која дозвољава еквализацију њених мерних параметара са механичким параметрима дрвета, могуће добити адекватне статичке податке, који одражавају постојећу стабилност испитиване конструкције. Имајући у виду овакву стандардизацију недеструктивне *in situ* методологје испитивања дрвених елемената архитектонских конструкција, главна хипотеза би имала следећу формулацију:

X 3. Добијањем светлосних и ултразвучних еквивалената параметара механичких својстава дрвета, добијамо могућност недеструктивног, *in situ* испитивања дрвене конструкцијске грађе и стабилности саме конструкције.

³М. Gojković i D. Stojić, *Drvene konstrukcije* (Beograd : Građevinski fakultet : Grosknjiga, 1996), 158.

I 6. Методологија истраживања

Сходно изложеним циљевима и задацима методолошки приступ овом истраживању обухватао је следеће методе:

- *Успостављање недеструктивне методе за *in situ* испитивање стабилности дрвених конструкција архитектонских објеката;
- *Критичка анализа и систематизација података доступних за *in situ* утврђивање периода градње за одређене врсте црквених објеката, према меродавним критеријумима такве процене (архивски подаци, пројектни прорачуни, начин градње дрвених конструкција, досадашња испитивања – услови рестаурације и обнове), као и потенцијално применљивих метода недеструктивног испитивања дрвених конструкцијских елемената, на основу ових уводних истраживања;
- **In situ* процена оптерећености носећих елемената дрвених конструкција датих објеката;
- **In situ* испитивање квалитета елемената дрвених конструкција, стандардизованом методом примене стрес-звучних таласа;
- *Компаративна анализа прорачунских и експерименталних резултата оптерећености испитиваних елемената дрвених конструкција;
- *Критичка анализа и систематизација добијених резултата.

I 7. Очекивани резултати, њихова практична примена и научни допринос

Једноставност примене и тачност једне овакве методе, каква је стандардизована стрес-звучна дијагностика, приближава је свакодневној пракси испитивања квалитета дрвених конструкција и њихове стабилности. Успостављање квалитативне *in situ* дијагностике елемената дрвених конструкција грађевинских објеката, по стандардима испитивања објеката од културно-историјског значаја, свакако је од великог значаја за процену укупног потенцијала обнове тих објеката. Стандардизација критеријума рестаурације и обнове објеката који се сматрају споменицима културе, могућа је на основу једне овакве, егзактне и приступачне методе, што је значајан допринос очувању културно-историјског наслеђа.

Успостављање стандардизоване недеструктивне *in situ* дијагностике уграђеног дрвног материјала, где је постигнута директна еквилизација параметара недеструктивне методе, брзине стрес звучних таласа и параметара стандардних механичких испитивања статичког напона на притисак и савијање, научни је допринос који отвара

могућност значајног унапређења и грађевинске праксе уопште. Квалитетан избор дрвеног материјала за градњу гарант је дуготрајности његове експлоатације, тако да је примена недеструктивне *in situ* дијагностике у стандардизованој контроли механичких својстава дрвета од општег друштвеног значаја. Очекивано је, према томе, да резултати овог истраживања подстакну даље опште унапређење недеструктивне *in situ* дијагностике.

I 8. Генерална структура докторске дисертације

Рад се састоји из девет главних целина, подељених на увод, теоријски део (Дрво као материјал – анализа својстава, Испитивање својстава дрвета, Архитектонске грађевине од културно-историјског значаја), експериментални део (Прелиминарна истраживања, Успостављање недеструктивне методе *in situ* испитивања, Дијагностика стрес-звучним таласима – *in situ* примена, *In situ* мерење чврстоће елемената дрвених конструкција – дискусија резултата) и закључак.

Прво поглавље – *Уводно поглавље* садржи приказ уводних напомена о теми, објашњење проблема и предмета истраживања, у оквиру чега је дат концептуални план приступа предмету истраживања и дефинисању циљева, постављени су задаци истраживања и полазне хипотезе, изнете су методолошке поставке рада и истакнута је научна оправданост – са аспекта очекиваних резултата истраживања.

У **Другом поглављу** – *Дрво као материјал*, теоријски се разматрају предикциони потенцијали хемијског састава и грађе дрвета у односу на физичка и механичка својства дрвета као материјала, као и начини стандардног испитивања тих својстава, са аспекта аналогног успостављања недеструктивне *in situ* методе испитивања дрвених елемената архитектонских конструкција, применом стрес-звучних таласа. Циљ овог разматрања био је постављање теоријске основе за експериментални део истраживања – имајући у виду околности и степен утицаја физичких чинилаца, влажности, густине и акустичке проводљивости дрвета, на његова механичка својства. Анализом теоријских података везаних за интерактивност физичко-механичких чинилаца која се испољава код дрвета, долази се до тога, да се повећањем хигроскопне влажности дрвета смањује његова специфична густина, што доводи до слабљења акустичке проводљивости и смањења модула еластичности на притисак и савијање—односно чврстоће дрвета, што је одредило и концептуални приступ овом истраживању.

Теоријско разматрање о дрвету као материјалу наставља се **Трећим поглављем** –

Испитивање механичких својстава дрвета, у коме се говори о законитостима на којима се базира стандардно, деструктивно испитивање својстава дрвета применом механичке силе у условима деловања фактора промене физичких својстава дрвета.

Четврто поглавље, конципирано као *Прелиминарна истраживања стандардизованих узорака дрвета – епрувета*, потврђује аналогност недеструктивног испитивања дрвених узорака – епрувета, усмеравањем рендген зрака и ултразвучних таласа паралелно и управно на ток дрвних влаканаца и механичког испитивања напона на притисак и савијање – на основу апроксимације познатих табличних вредности за дату врсту дрвета. Резултати ове фазе истраживања показују да огледни узорци дрвета – епрувета, дају светлију структуралну рендген слику и брже пропуштају ултразвучне таласе уколико су им пројектоване табличне вредности статичког напона на притисак и савијање веће. Ово поглавље представља прву фазу експерименталног рада којом почиње успостављање *in situ* методе.

Друга фаза прелиминарног испитивања, **Поглавље 5** – *Успостављање недеструктивне in situ методе*, је усмерена на непосредно успостављање недеструктивне *in situ* методе калибрацијом методе стрес-звучних таласа, што је учињено најпре испитивањем дрвених узорака – епрувета, применом звука паралелно и управно на ток њихових дрвених влаканаца, аналогно примени статичке силе притиска, а затим и стандардним механичким одређивањем њиховог напона на притисак и савијање. Калибрацијом методе примене стрес-звучних таласа, учињеним у овој – другој фази прелиминарних испитивања, дошло се до резултата сличних трендова, онима добијеним у првој, прелиминарној фази испитивања, чиме се фактички успоставља метода за *in situ* недеструктивно испитивање елемената дрвених конструкција архитектонских објеката. Услови извођења *in situ* испитивања дати су у **Поглављу 6** – *Архитектонске грађевине од културно-историјског значаја*, који су прописани повељама и декларацијама о заштити споменика културе и по којима је дијагностички императив очување аутентичности и интегритета објеката од културно- историјског значаја.

Трећа фаза експерименталног рада се односи на *in situ* испитивање носећих елемената дрвених конструкција архитектонских објеката од културно-историјског значаја. Ова фаза је спроведена применом калибрисане методе стрес-звучних таласа, помоћу које је остварена еквилизација параметара брзине пропагације звука, изражена вредношћу динамичког модула еластичности (MOEd) на притисак и савијање и параметара статичког напона на притисак и савијање. Добром корелацијом ових параметара, потврђена је ваљаност примене методе стрес-звучних таласа за испитивање елемената

дрвених конструкција.

Овим је у **Поглављу 7** – *Дијагностика стрес-звучним таласима - in situ примена* показана могућност директне еквилизације параметара брзине звука и стандардних механичких параметара.

У **Поглављу 8** – *Дискусија резултата in situ мерења*, описује се само извођење *in situ* методе и даје приказ процене стабилности конструкције компарацијом непосредно добијених резултата мерења са табличним вредностима дозвољених напона на притисак и савијање за дату ситуацију.

У **Поглављу 9** – *Закључак*, се сумирањем резултата истраживања потврђује тачност хипотетичких поставки рада. Тиме су били испуњени задати циљеви, а овим истраживањем је остварен научни допринос и отворена могућност нових истраживања на унапређењу недеструктивних *in situ* метода испитивања квалитета уграђеног дрвета.

II ДРВО КАО МАТЕРИЈАЛ И АНАЛИЗА СВОЈСТВА

II 1. Дрво као материјал

II 1.1. Грађа дрвета

Иако посебна врста материјала, дрво се са становишта употребе може дефинисати као материјал хетерогене и анизотропне грађе, што подразумева његова различита својства у различитим анатомским правцима. Основни анатомски правци дрвета су аксијални, радијални и тангенционални, дуж којих се стварају распореди анатомских елемената, различитих по врсти, броју и димензијама.⁴ Као одраз структуралне различитости, у различитим правцима се испољавају различита механичка својства, различита проводљивост воде, звука, електрицитета и топлоте.

II 1.2. Макроскопска грађа

Макроскопска грађа дрвета је уочљива и голим оком на пресецима дебла и то: паралелно његовој уздужној оси – радијални пресек; управно на његову уздужну осу – попречни пресек и управно на његову уздужну осу изван анатомске средишне линије – тангенцијални пресек. На сваком од ових пресека оцртава се карактеристична структурална пројекција која грубо одражава механичке карактеристике дрвета. Сви структурални елементи дрвета се генерално сврставају у два система: аксијални и радијални, где су они у аксијалном систему оријентисани вертикално – паралелно главној оси стабла и његових грана, док су у радијалном систему елементи оријентисани хоризонтално у односу на главну осу, што је од значаја за испитивање његових механичких особина. Слика макроскопског развоја стабла се може сагледати на његовом уздужном и попречном пресеку чиме се, осим механичке структуре, осликава брзина раста и његова правилност. На попречном, кружном пресеку, се тако могу уочити: срж, срчевина, бељика и кора. Срж дрвета је јувенилно, меко дрво, док су бељика и срчевина структуре зрелог, чврстог дрвета. Прстенови прираста, зона раног и касног дрвета, као и траке дрвета, видљиви су такође на попречном пресеку, где се на основу боје, сјаја, ширине, облика, растојања и броја тих структура доносе прве

⁴S. Carlquist, *Comparative Wood Anatomy: Systematic, Ecological, and Evolutionary Aspects of Dicotyledon Wood* (Berlin: Springer, 1988), 58.

процене о квалитету дрвета. У основи ове процене је физиологија раста дрвета, а њено познавање је предуслов добре емпиријске процене квалитета, која се обавља инспекцијом и перкусијом. Прстенови прираста, у којима се огледа механички карактер дрвета, настају деловањем творног ткива – камбијума и формирају се сваке вегетационе сезоне у облику концентричних прстенастих слојева – година. У пролеће се, деобом ћелија камбијума, стварају ћелије танких зидова и широког лумена (рано дрво), а у јесен ћелије дебелих зидова и уског лумена (касно дрво). Граница између раног – ређег дрвета, и касног – гушћег дрвета је јасно изражена у прстену прираста. На радијалном пресеку се ови прелази виде као праве линије, а на тангенцијалном као параболе. Брзина раста дрвета, која се огледа у ширини прстена прираста, је према томе фактор који значајно утиче на његове механичке особине, а примарно је одређена климатским условима и саставом тла. За разлику од спорог раста, који дрвету даје чврстину, бржи раст ствара мекше и савитљивије дрво, што се коначно огледа и различитим изгледом макроскопске композиције датог преска дебла. Прва таква дијагностичка диференцијација врши се непосредно у шуми. Као показатељ за ширину годишњег слоја, односно за брзину раста, узима се број прстенова прираста на 1 cm дужине, одмерен у правцу радијуса на попречном пресеку дрвета, док се степен равномерности процењује према разлици у броју прстенова на два суседна дела једног комада дрвета. Технолошки такође важан податак је и садржај касног дрвета, који се изражава процентуалним количником збира ширина касног дрвета и укупног растојања целих прстенова измереног у радијалном смеру.⁵ На тај начин се на основу структуре прстенова прираста индиректно процењује способност дрвета на механичко напрезање, пропусност за течност и гасове, као и способност мењања димензија и облика, што указује на погодности његове употребе. Од начина исецања сортимента зависиће и резултати механичког испитивања дрвета, што је врло битно за њихово тумачење. Ове разлике у структури су јасно изражене међу лишћарима у зависности од врсте којој припадају, а још су израженије између лишћара и четинара. У основи ових различитости је анатомска специфичност поједине врсте дрвета, која у великој мери утиче како на појаву, тако и на врсту одређених неправилности у расту и развоју дрвета, што је дијагностички значајно.⁶ Структурне неједнакости су јасно изражене код

⁵Н. Лукић-Симоновић, *Познавање својства дрвета* (Београд: Шумарски факултет Универзитета у Београду 1988), 105.

⁶R. Wagenführ, *Anatomie des Holzes* (Leipzig: Fachbuchverlag, 1989), 68.

различитих vrста дрвета и настају услед различитости шупљина анатомских елемената и по природи су највеће у дрвету лишћарских vrста са крупним судовима. Веома је значајно да се исецање сортимента изводи паралелно са прстеновима прираста, јер су једино у том случају подаци добијени механичким испитивањем валидни за упоредну анализу међу појединим врстама дрвета. На тај начин ће се и у попречном пресеку самог сортимента задржати природан однос раног и касног дрвета, који иначе варира од врсте до врсте. Тако су код прстенасто порозних лишћарских vrста веома крупни судови на почетку сваког прстена прираста и дају им маркантан изглед, док су код дифузно порозних лишћара те разлике, у односу на ширину прстена прираста, једва изражене. Ово је значајно, јер у прстенасто порозних лишћара шири прстенови прираста имају веће учешће механичких елемената, а ужи прстенови већи проценат порозних анатомских елемената – трахеја, па је према томе и лакше дрво. Насупрот њима, у дифузно порозних лишћара однос ширине прстена прираста и заступљености механичких елемената, према густини и тврдоћи дрвета, није јасно испољен. Код ових vrста дрвета величина трахеја се постепено смањује према граници прстена прираста, а често је код њих граница само назначена узаном зоном на крају вегетационог периода. Те границе су видљиве и на попречном пресеку сортимента, што је од значаја за одређивање правца тока механичких влаканаца код планираног *in situ* неинвазивног испитивања дрвених елемената архитектонских конструкција.

Може се рећи да је код квалитета дрвета, од пресудне важности ширина прстена прираста и удео учешћа касног дрвета – у чему се огледа хетерогеност дрвета. На основу тога се у свакодневној шумарској пракси доноси процена о његовим физичким, механичким и технолошким својствима која одражавају анизотропност у његовом понашању. Равномерност у низању годишњих слојева током раста дрвета обезбеђује најбољи квалитет дрвета за обраду. У супротном обрадивост, односно употребна вредност, опада.⁷ Хетерогеност дрвета у хемијском и анатомском погледу се може сматрати основним фактором анизотропности која се испољава различитим понашањем дрвета у појединим правцима, под дејством физичких и механичких сила. Она је резултат различите синтетичке комбинаторике основних хемијских елемената и специфичности везивања тако насталих органских једињења, односно различитости

⁷A. J. Panishin and C. de Zeeum, *Textbook of Wood Technology : Structure, Identification, Properties, and Uses of the Commercial Woods of the United States and Canada* (New York: McGraw-Hill, 1980), 450–451.

распореда и врсте анатомских елемената у структури дрвета. И поред поменутих различитости које дрвету одређују таксономску категорију, оно се може сматрати јединственим материјалом. То се најбоље може видети из сличности његове хемијске и анатомске грађе.

II 1.3. Хемијска грађа

Дрвена материја је изграђена од органских елемената: угљеника, кисеоника и водоника, али и од извесног броја оних неорганских, који се при сагоревању дрвета издвајају као пепео. Најчешће су то калијум, натријум и магнезијум. Ови неоргански елементи чине 0,3 до 2% дрвене масе, али због своје велике густине имају значајан утицај на својства дрвета. Процентуално учешће хемијских елемената није примарно одређено врстом дрвета. Учешће угљеника у саставу дрвета је 49–50%, кисеоника 43–44% и водоника 6%. Ови елементи својим хемијским сједињавањем дају полисахариде: целулозу, хемицелулозу и лигнин – основна органска једињења која граде дрво и у највећој мери одређују његова својства. Садржај такозваних екстрактивних компоненти је веома мали (2–6 %). Дрво лишћара садржи 40–50% целулозе, 24–32% хемицелулозе (пратиоци целулозе – пентозани, хексозани) и 20–25% лигнина, док дрво четинара има 44–55% целулозе, 24–32% хемицелулозе и 25–30% лигнина.⁸

Разлике у својствима композитних једињења дрвета резултују разликама у анатомској и функционалној грађи. При томе је за тумачење различитог понашања дрвета под одређеним условима првенствено било значајно учешће оних једињења која одређују његова механичка својства, због чега се то овде и наводи. Значај **целулозе** за својства дрвета је конституциони. Она је скелетни део ћелијског зида и као таква у највећој мери утиче на понашање дрвета под утицајем физичких сила, као што су бубрење, утезање и проводљивост звука. Њено присуство у највећој мери одређује механичка својства дрвета.

Хемицелулоза спада у пратиоце целулозе. Сматра се да повећава афинитет према води, те знатно утиче на појаву бубрења и утезања, односно на промену димензија, запремине и облика дрвета, што има негативан утицај на његова механичка својства.

⁸G. Giordano, *Technologie del legno* (Mlano: U. Hoepli, 1981), 250.

Лигнин инкрустира зидове ћелија и њиховим очвршћавањем повећава механичка својства дрвета. Осим органских компоненти, дрво у извесној мери садржи још и танине, масти, смоле, шећере и етерична уља. Ово су екстрактивне компоненте дрвене грђе које чине око 6% њене укупне масе.

Смоле и танинске материје повећавају густину и трајност дрвета, јер смањују способност пријема воде и тако позитивно утичу на механичке особине дрвета.⁹

II 1.4. Анатомска грађа

Основна органска једињења образују анатомске елементе дрвета различите функционалне грађе: трахеје (спроводна функција), трахеиде (спроводна и механичка функција), механичка влаканца (механичка функција) и паренхиматичне ћелије (акумулациона функција). Микроскопска грађа јасно осликава природу хетерогености дрвета, која је посебно истакнута у односу на поједине врсте, а што јасно илуструју подаци који се овде наводе. Грађу **лишћара** чине трахеје (7–40%), трахеиде, прелазни облици које представљају трахео-трахеиде механичка влаканца (40–75%), паренхиматичне ћелије аксијалног паренхима (0–11%) и паренхиматичне ћелије радијалног паренхима – трака дрвета (8–29%).⁹ Код **четинара**, чија је грађа једноставнија, основни анатомски елементи су трахеиде, које чине 95% масе дрвета, док остали део припада паренхиматичним ћелијама. Код четинара је карактеристично да постоји велика разлика у тврдоћи раног и касног дрвета. За одабир дрвета је према томе подједнако важно да се испитивање његових особина врши како дуж анатомских праваца, тако и у односу на поједине врсте. На основу тих резултата је онда могуће технолошком обрадом правилно прилагодити дрво његовој употреби.¹⁰

II 2. Анализа физичких својстава дрвета

Одговарајуће специфичности у грађи дрвета доприносе разликама у својствима дрвета.¹¹ Са аспекта овог истраживања, својства дрвета су важна због понашања саставних елемената у дрвеним конструкцијама архитектонских објеката. Од посебног интереса нам је понашање носећих и потпорних елемената, јер су они под највећим оптерећењем. Модел тог понашања под дејством физичких и механичких сила

⁹R. Wagenführ, *Anatomie des Holzes* (Leipzig: Fachbuchverlag, 1989), 128.

¹⁰T. Janežić Stefanović, *Hemija drveta sa osnovama hemijske prerade drveta* (skripta u rukopisu) (Beograd, 1990), 7.

¹¹R. Wagenführ and C. Scheiber, *Holzatlas* (Leipzig: Fachbuchverlag, 1989), 650.

разматрамо на основу резултата испитивања дрвета у лабораторијским условима, каква смо и сами вршили. Подударност је очекивана, јер се дрво може сматрати јединственим материјалом. Другачија компаративност се и не може правити, јер до сада није било директних испитивања својстава саставних елемената дрвених конструкција, нити су механичка својства дрвета, осим са наше стране, истовремено испитивана и недеструктивним методама. Разматрањем резултата досадашњих испитивања својстава дрвета уједно показујемо и основаност успостављање недеструктивне методе, коју смо примењивали у овом истраживању. Појам својство дрвета подразумева физичке и механичке особине дрвета између којих влада значајна интеракција. Овде се разматра природа само оних особина које су биле у фокусу овог истраживања. По дефиницији, својства дрвета која су последица дејства сила физичке природе, називају се физичким својствима дрвета. У та својства убрајају се: влажност дрвета, густина дрвета, топлотна проводност дрвета, електрична проводност и отпорност, проводљивост звука, а природне силе које их могу модификовати су: влага, земљина тежа, електрицитет и звук. Ова својства зависе како од анатомске и хемијске грађе дрвета, тако и од саме природе физичких сила које дејствују на дрво. Хетерогеност анатомске грађе дрвета, као што је претходно показано, условљава његово различито, односно анизотропно понашање под дејством тих сила. Физичка својства су веома битна и за нас интересантна, јер умногоме могу мењати механичка својства дрвета.¹² Због анизотропности дрвета, посебно су значајни утицаји који доводе до промена његових димензија, запремине и облика, као што је то случај код појаве утезања и бубрења дрвета, јер је степен таквих деформација различит у различитим анатомским правцима датог сортимента. Са аспекта овог истраживања, од посебног интереса су они чиниоци који су од утицаја на промену отпорности дрвета при оптерећењу на притисак и савијање, какви се углавном срећу код дрвених конструкција архитектонских објеката.¹³ Познато је да је у основи оваквих дешавања промена густине дрвета под утицајем температуре и влажности ваздуха, те се из тог разлога, када је реч о физичким својствима дрвета, то и овде апострофира.¹⁴ Како су елементи дрвених конструкција изложени дуготрајном и константном оптерећењу, хроничне

¹²В. Šoškić i Z. Popović, „Prilog poznavanju fizičkih svojstava molike (Pinus peuce Gris.) Šumarstvo, XLII, 5 (1989): 25–34.

¹³Б. Закић, *Увод у механику дрвета* (Нови Сад; Београд: Факултет техничких наука; Институт за испитивање материјала СР Србије, 1985), 228.

¹⁴F. Kollmann and W. A. Cote, *Principles of Wood Science and Technology. Vol. I, Solid Wood* (Berlin: Springer, 1984), 480.

деформације настале такозваним течењем¹⁵ дрвета су под израженијим околним утицајем влажности и температуре због неједнаког изједначавања влажности деформисаног сортимента.¹⁶ Разумевање те проблематике је, следствено томе, једнако битно за дијагностику и рестаурацију предметног објекта код кога је то планирано да се ради. Утврђено је да је влажност, као атмосферски чинилац, од примарног утицаја на промене механичких својстава, јер се специфична густина дрвета мења сразмерно степену његове засићености водом. Иако су варирања густине дрвета изазвана повећањем његове влажности у просеку око 10%, она под оптерећењем, у зависности од врсте дрвета, могу довести до појаве знатно изражених деформација. Степен тих деформација је различит у различитим правцима што зависи и од градијента влажности на месту настанка деформације.¹⁷ С обзиром на то да је ова појава од потенцијално великог значаја за стабилност дрвених конструкција, разматрање физичких својстава дрвета је примарно усмерено на промене односа влажности и густине дрвета. Основни разлог томе је што густина дрвета, генерално узевши, има позитиван утицај на промену напона на притисак, док влажност дрвета, сваким процентом њеног раста, почев од тачке апсолутно сувог стања, па до тачке засићености влаканаца, има негативан утицај. Из тога произлази да је повећање влажности у том распону – такозване хигроскопне влажности, фактор који негативно утиче и на стабилност дрвених конструкција архитектонских грађевина.

II 2.1. Влажност дрвета

Испитивања су показала да промена димензија, запремине и облика дрвета настају у зависности од степена његове влажности, а са аспекта овог испитивања је важно утврђивање тог критичног момента када ова оштећења настају. Сматрамо да је разматрању и ове проблематике најбоље приступити од општих сазнања о промету воде на нивоу ћелије. Стање влажности дрвета дефинисано је садржајем воде у зидовима и лумену ћелије. На основу тога, у зависности од степена засићености водом, могуће је, почев од највећег, разликовати: **напојено стање** – са максималним

¹⁵ Б. Шошкић и З. Поповић, *Својства дрвета* (Београд: Шумарски факултет Универзитета у Београду, 2002), 237.

¹⁶R. Keylwerth, „Einfache Kontrollmessung bei der Holz Trocknung,” *Holz-Zentralblatt* 75 (1949): 307–309.

¹⁷F. Kollmann and W. A. Cote, *Principles of Wood Science and Technology. Vol. I, Solid Wood* (Berlin: Springer, 1984), 125.

засићењем у зидовима и луменима; **сирово стање** – са максималним засићењем зидова и непотпуном испуњеношћу лумена; **прелазно стање**– или тачку засићености влаканаца са максималним засићењем зидова и ваздухом у луменима и **просушено стање**– са извесним засићењем зидова, уравнотеженим са влажношћу околног ваздуха. Вода која се налази у ћелијском лумену је капиларна или слободна вода, а она у ћелијским зидовима је везана или хигроскопна вода. Процент хигроскопне воде креће се од 0– 16% и овде се то истиче, јер се његовим повећањем, због следствене промене густине дрвета, смањује и вредност његових модула еластичности, што је један од предмета разматрања у овом раду. То смањење је врло значајно и креће се од 1,5–4% по једном проценту повећања хигроскопне воде. Овде треба истаћи да дрво постиже константну густину једино сушењем при температури од $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ и то онда подразумева **апсолутно суво стање влажности**. Од овог стања па до тачке засићености влаканаца, сваким процентом повећања влажности, напон на притисак се смањује за 4%. Обрнуто се дешава смањивањем процента влажности од тачке засићености влаканаца.¹⁸ Ако се зна да у напрегнутом дрвеном носачу – греди, напон на савијање индукује напон на притисак, уз напон на затезање и напон на смицање, онда је јасно да су поремећаји тих односа у једној дрвеној конструкцији, због неуравнотежености њене апсорпције и десорпције (повећања и смањења влажности дрвета) и следствене појаве напрезања и деформација материјала, њен дестабилишући фактор. Тај равнотежни однос влажности дрвета одражава хистерезис сорпције дрвета, појаву коју карактерише разлика у садржају воде између апсорпције и десорпције дрвета. У основи ове појаве је раскидање физичко-хемијских веза молекула воде и молекула органских компоненти грађе дрвета, које се више не могу успоставити, али и успостављање нових водоничних веза са кисеоником приликом губитка воде из композитних органских једињења, које се више не могу раскинути.¹⁹ Ово резултује појавом градијента влажности, што доводи до напрезања и деформација дрвета. Од посебног значаја за стабилност једне дрвене грађевинске конструкције су, према томе, појаве утезања и бубрења дрвета, које повећавају ефекат анизотропности дрвета додатно мењајући његову чврстоћу и еластичност у одређеном анатомском правцу. У тангенцијалном правцу су те промене најизраженије (8,5%), у радијалном правцу су мање (4,5%), а најмање су аксијалном правцу (0,3%).²⁰ Закон о хигроскопној равнотежи дрвета дефинише правилност

¹⁸C. Skaar, *Water in Wood* (New York: Syracuse University Press, 1972), 199.

¹⁹Ibid.

²⁰A. Ugrrenović i I.Horvat, *Tehnologija drveta* (Zagreb: Nakladni zavod Hrvatske, 1950), 40.

успостављања равнотеже између садржаја воде у дрвету у односу на релативну влажност ваздуха.²¹ Осим од температуре ваздуха, овај равнотежни однос зависи и од брзине њеног успостављања, као и од самог квалитета дрвета, што природно важи и за дрво у саставу конструкције. Утврђено је да се оптимална равнотежа влажности успоставља код влажности дрвета од 6–16% при релативној влажности ваздуха од 20–80%. Важан податак који се може узети као параметар и за дешавања код елемената дрвене конструкције је да се гранична равнотежа поклапа са тачком засићености влаканаца, што се дешава при температури ваздуха од 20°C и релативној влажности ваздуха од 100%. У вези са тим је такође битно и то да се даљим повећањем температуре снижава граница хигроскопности, док се тачка засићености влаканаца не мења, што се дешава и спуштањем температуре испод 0°C. Према томе, очекивано је било да се и до резултата примене недеструктивне, *in situ* дијагностике, такође долази у складу са овим законитостима промена влажности. На основу изнетог, извесно је да се механички коефицијенти не могу разматрати без претходно установљеног процента влажности дрвета. Један од једноставних начина утврђивања влажности дрвета је помоћу електричног влагометра који функционише на принципу променљивости електричних својстава дрвета са променом њихове влажности.

II 2.2. Густина дрвета

Како од густине дрвета директно зависе његове механичке особине, калкулисања са подацима о степену влажности морају бити саставни део, како лабораторијских тако и *in situ* испитивања дрвета. Иако у овом истраживању не оперишемо директно са подацима о густини дрвета, она је као физичка величина у основи квалитета дрвета и његовог понашања под различитим утицајима. Концепт овог истраживања узима густину као заједнички именитељ за механичка својства дрвета и функционални принцип њиховог испитивања, те се аргументација тога овде износи. Густина дрвета се према физичкој формули изражава односом његове масе и запремине, најчешће при степену влажности која у хигроскопском подручју износи 12% када се достиже и тачка засићености влаканаца. Ова влажност се сматра стандардном влажношћу, али се густина дрвета може израчунавати у целом подручју влажности дрвета, почев од напојеног стања до апсолутно сувог стања, што указује на њену значајну променљивост у односу на влажност. Тако се повећањем влажности дрвета које у

²¹Keylwerth (1949), 150.

апсолутно сувом стању влажности има мању густину од густине воде, његова густина повећава, а за дрво са већом густином, она се смањује. Кључна одредница вредности густине дрвета је према томе, количина дрвне супстанце у јединици запремине. Ова специфична мера густине дрвета не зависи од врсте дрвета, а у пракси се најчешће користи њена вредност од $1,50 \text{ g/cm}^3$.²² Дрво природно веће густине је према томе чвршће и брже проводи стрес-звучне и ултразвучне таласе. Резултати претходних истраживања такође потврђују да дрво веће чврстине брже проводи ултразвучне таласе и више задржава рендгенске зраке, исто као и при усмеравању ултразвучних и рендгенских зрака у односу на правац тока механичких влаканаца, где су брзина ултразвука и задржавање зрака већи у аксијалном него у радијалном и тангенцијалном правцу. Због сродне природе ултразвучних и звучних таласа, било је очекивано да стрес-звучни таласи могу бити успешно примењени у овом истраживању за испитивање елемената дрвених конструкција архитектонских објеката. Могуће неправилности у грађи дрвета, као што су цеверавост, кврге и црљен дрво, због њихове знатно веће густине у односу на остало дрво, повећавају унутрашње напрезање због неједнаке расподеле оптерећења и доводе до унутрашњих оштећења дрвета. Повећањем влажности због стварања унутрашњег градијента, ова дешавања су код дрвета са грешком знатно израженија, што се негативно одражава на њихова механичка својства.²³ И у овом случају је било очекивано да стрес-звучни таласи брже пролазе кроз делове дрвених елемената са грешком у грађи и да их тако откривају. Порозност дрвета, која може бити површинска и запреминска, такође зависи од густине, што се види из формуле за математичко израчунавање процента запреминске порозности. Ова карактеристика грађе дрвета представља се односом запремине пора према укупној запремини, што уједно дефинише и механичка својства дрвета и његову обрадивост. Топлотно ширење се и код дрвета дешава по општем правилу понашања тела на топлоти, али су промене његових димензија, а тиме и утицај на густину и механичка својства, занемарљиве у поређењу са онима које настају при променама његове влажности. Промене димензија дрвета које настају његовим загревањем на одређеној температури, као и код других чврстих тела, изражавају се термичким коефицијентима и односе се на линеарно, површинско или запреминско ширење по

²²F. Kollmann and W. A. Cote, *Principles of Wood Science and Technology. Vol. I, Solid Wood* (Berlin: Springer, 1984), 138.

²³Ugolev, B. N. „Determination of the Rheological Properties of Wood.” *Derev. Prom.* 12, 2 (1963): 17–19.

једном степену (°C).²⁴ Генерално посматрано, промена димензија првенствено зависи од врсте дрвета, његове густине, влажности, анатомског правца и температуре. У вези са овим, са аспекта статике дрвених конструкција, овде се апострофира физичко својство промене димензија и запремине дрвета које се испољавају у хигроскопном подручју влажности, јер се настанком тих промена, сходно формули, мења и густина под утицајама влажности.²⁵ У овим условима долази до линеарног и запреминског повећања димензија код бубрења и њиховог смањивања код утезања дрвета. Величина те промене димензија, обрнуто је сразмерна коефицијенту густине, те самим тим и вредностима чврстоће дрвета.²⁶ Због тога то и није било у фокусу нашег интересовања, јер је било и очекивано да ће стрес-звучни таласи спорије пролазити кроз овако измењено дрво, него кроз наизглед здраво дрво. Непознаница је била какав је механички потенцијал наизглед очуваног дрвета које у конструкцији трпи стално и дуготрајно оптерећење. Одговор на то питање темељио се на чињеници да је утицај густине дрвета на његова механичка својства директан²⁷ и на претпоставци да је и звучна проводност, као физичко својство зависно од густине дрвета, значајан показатељ тог односа. Из тога је по природи ствари следило да се мера тог односа исказује брзином проласка звука кроз дрво. Ова дијагностичка метода се заснива на примени стрес-звучних таласа и звучној проводности дрвета, те се овде разматрање о утицају густине на својства дрвета тиме и завршава. Звучне таласе карактерише фреквенца осциловања која се креће у опсегу од 20 до 20000 осцилација у секунди и изражава се у херцима (Hz). Брзина проводности звука зависи од физичких карактеристика средине кроз коју пролази, а израчунава се из опште Њутнове једначине $C = \sqrt{E/\rho}$ m/s, где је у овом случају Е модул еластичности дрвета (N/m²), а ρ густина дрвета (kg/m³). Како повећање хигроскопне влажности смањује модул еластичности дрвета (мера односа силе и настале деформације), следи да је проводност звука обрнуто сразмерна густини дрвета и да ће сувље дрво брже проводити звук. Илустративно је овде навести да брзина провођења звука дуж дрвених влаканаца може бити и до четири пута већа него кроз воду и чак осамнаест пута већа у односу на брзину простирања кроз ваздух која износи 340 m/s. Брзину провођења звука знатно повећава и правилност структуре дрвета, што подразумева права и дуга дрвна влакна.

²⁴И. В. Крчетов, *Сушка дрвесине* (Москва: Лесная промышленность, 1980), 49.

²⁵Ю. Соболев, *Древесина как конструкционный материал* (Москва: Лесная промышленность, 1979), 17.

²⁶F. Wangaard and G. Garratt, *The Mechanical Properties of Wood* (New York: Wiley, 1950), 92.

²⁷ Ibid.

Управно на ток дрвених влаканаца провођење звука може бити и три до четири пута спорије у односу на брзину дуж влаканаца, што говори у прилог томе да сви ови фактори знатно утичу на резултате испитивања дрвета стрес-звучним таласима и одређују начин њиховог тумачења. На крају, као пример, наводимо да се за одређивање здравственог стања и квалитета дрвета користи и перкуторни метод који се заснива на промени звучне фреквенце, што такође указује на директну зависност акустичних својстава дрвета од вредности његове густине. Акустичка константа је иначе показатељ квалитета дрвета који се користи у производњи музичких инструмената, а за чије се израчунавање као параметри користе модул еластичности и густина дрвета. Она се израчунава по формули $K = \sqrt{E / \rho^3}$ (m^4 / kgs).

П 3. Анализа механичких својстава дрвета

Ово истраживање засновано је на подацима добијеним испитивањем механичких својстава дрвета, добијеним како директним дејством механичке силе, тако и недеструктивним методом применом стрес-звучних таласа, те се значај њихових вредности са тог аспекта овде и разматра. У складу са концептом овог рада, ова испитивања су била усмерена на оне механичке особине које у дрвеним конструкцијама имају предоминантни значај за њихову стабилност. Према општој дефиницији, механичка својства дрвета се испољавају развијањем унутрашњег отпора или напона на дејство механичких сила које теже да дрвету наруше интегритет, што се огледа настајањем деформација (дилатација) и оштећења. Силе које својим дејством доводе до промена димензија и запремине, при чему до извесне границе долази до стварања притисног, затезног и отпора на смицање, а даљим повећањем њиховог интензитета и до оштећења, испољавају своје дејство и на елементе дрвених конструкција.²⁸ Напрезања које дрво трпи у различитим грађевинским конструкцијама су међутим врло комплексна, тако да се ови напони најчешће јављају у оквиру сложеног напона на савијање. Будући да се и напон на притисак и напон на савијање развијају под притисним оптерећењем, то нам је отворало могућност да напон изазван притисном силом, који представља чврстоћу дрвета, буде репрезент и у овом интерпретирању стабилности дрвених конструкција. Налази других истраживања, изведених применом статичке силе под истим условима испитивања, установили су

²⁸Б. Закић, *Увод у механику дрвета* (Нови Сад; Београд: Факултет техничких наука; Институт за испитивање материјала СР Србије, 1985), 250.

тачне односе између ових напона у условима где се у оквиру напона на савијање индукују напони на притисак, затезање и смицање, што је ишло у прилог нашем размишљању.²⁹ Принцип функционисања методе испитивања стрес-звучним таласима и анизотропност дрвета, која се испољава у три анатомска правца, међусобно под правим углом (ортотропност), дозвољавала је успостављање аналогije између механичког и звучног испитивања дрвета. Потврда исправности овог приступа и разумевања проблематике истраживања захтева детаљно разматрање механичких особина дрвета, што на овом месту и чинимо. Унутрашњи напон којим се материјал супроставља дејству спољне силе се уобичајено изражава N/mm^2 или МРа, а настале деформације се јављају у уздужном и попречном правцу, чији се однос изражава Поасоновим коефицијентом. У зависности од интензитета силе, деформације могу бити привремене или трајне. У првом случају је реч о еластичним деформацијама, а у другом о пластичним. Када ниво спољашњег оптерећења пређе границу еластичности дрвета, долази до његове трајне деформације – лома, што у случају носећих греда може довести до урушавања конструкције. Моменат досезања границе лома је временски зависна појава,³⁰ и представља важну чињеницу на којој се базирају и наша разматрања резултата добијених у овом истраживању. Свако повећање спољашње силе, односно напона, до границе пропорционалности, изазваће пропорционалну деформацију, односно дилатацију. Ова пропорционалност у понашању дрвета је дефинисана Хуковим законом,³¹ а однос напона и дилатације у том подручју назива се модулом еластичности. Свако даље повећање силе изнад границе пропорционалности доводи до знатно израженијих, трајних деформација и на крају до лома. Максимални напон који се региструје у дрвету непосредно пре лома се назива чврстоћом или носивошћу дрвета.³² Пројектно прорачунавање статике дрвених конструкција подразумева и утврђивање вредности тог максималног напона носећих елемената, што је уједно и граница стабилности самог објекта која се лако прелази. Ова потенцијална опасност се

²⁹Е. К. Ашкенази, *Анизотропност дрвесице и дрвесних материјала* (Москва: Лесная промышленность, 1978), 86.

F. Kollmann and W. A. Cote, *Principles of Wood Science and Technology. Vol. I, Solid Wood* (Berlin: Springer, 1984), 101.

³⁰Б. Закић, *Увод у механику дрвета* (Нови Сад; Београд: Факултет техничких наука; Институт за испитивање материјала СР Србије, 1985), 258.

³¹Хуков закон еластичности https://sr.wikipedia.org/src/%D0%A5%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2_%D0%B7%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%BD Приступљено: јануар 2021.

³²Yu. M. Ivanov, „High Elastic Deformations of Wood,” *Comp. Wood* 5, 4 (1958): 51–56.

предупређује увођењем у прорачун коефицијената сигурности, на основу којих се максимални напон умањује, како би се дошло до радних напона који се налазе у границама пропорционалности носећег дрвеног елемента. Висина максималног напона на одређену врсту оптерећења, одређује се у лабораторији статичким тестом оптерећења и представља ону вредност која се бележи непосредно пре настајања лома експерименталног узорка дрвета. Ово умањење иде од 2–8 пута у зависности од врсте дрвета и типа конструкције.³³ Сходно доброј пракси, код градње објеката са дрвеном конструкцијом врши се претходно лабораторијско испитивање механичких особина дрвета за градњу, а затим се на основу тога врши и статички прорачун конструкције. За разлику од градње, рестаурацијски поступак полази од испитивања квалитета дрвених елемената који већ један дужи период чине конструкцију. У првом случају се на основу налаза лабораторијских испитивања узорака дрвета прави прорачун конструкције, а у другом се на основу типа конструкције долази до резултата тог прорачуна – који би требало да буде подударан са непосредно одређеним радним напоном датог дрвеног елемента. До тих података се, према примени постулата дијагностике уградних елемената архитектонских објеката од културно-историјског значаја, као и због очувања интегритета и целовитости објекта, може доћи само недеструктивном методом,³⁴ што такође подразумева *in situ* испитивање. Подаци који се траже морају бити потпуно егзактни, тако да и метода испитивања мора бити поуздана. Посматрано са аспекта дијагностике квалитета дрвета, деструктивна испитивања статичким оптерећењем и она недеструктивна – као што је испитивање стрес-звучим таласима, базирају своје налазе на густини дрвета. Осим тога, будући да су сва три међусобно нормална анатомска правца дрвета дуж којих се при испитивању механичких својстава дрвета стандардно примењује сила, онда то отвара могућност испитивање звуком у подударном правцу, што резултате испитивања чини погодним за упоредне анализе. Модули еластичности се и иначе испитују само код нормалних напона у које спадају напон на притисак, затезање и савијање, при чему су они, ако се одређују под истим условима, практично једнаки.³⁵ Такви приближно исти услови владају у дрвеним конструкцијама архитектонских грађевина, што говори у прилог томе да се напон на присак може сматрати репрезентом квалитета њихових елемената. Узимајући у обзир

³³М. Маџанов, *Tehnička mehanika : statika, otpornost materijala* (Beograd: Šumarski fakultet Univerziteta, 1996), 42.

³⁴М. Николић (2014), 28.

³⁵М. Маџанов, *Tehnička mehanika : statika, otpornost materijala* (Beograd: Šumarski fakultet Univerziteta, 1996), 42.

да је метода испитивања дрвета стрес-звучним таласима недеструктивна, једноставна за извођење и да даје податке о квалитету дрвета изражене скаларним вредностима, онда она задовољава критеријум да се *in situ* користи као финална дијагностичка метода. Самим тим, очекивано је да се том методом на лицу места одреди да ли је дрвена конструкција још увек под безбедним напонам.³⁶ За разлику од оптерећења која се у лабораторијским условима изводе применом силе тренутно или у року од неколико минута, када је реч о динамичким и статичким оптерећењима, у дрвеним конструкцијама су она дуготрајна. Оптерећења код којих се временом мења интензитет или карактер су променљива оптерећења и са аспекта стабилности конструкције могу бити веома значајна, посебно ако такве промене, као код појаве земљотреса, настају скоро тренутно. Механичке особине дрвета се углавном испитују под статичким оптерећењем, те се и истраживање овог рада једним делом базира на таквом начину испитивања. Како је истраживање овог рада тематски везано за дрвене конструкције архитектонских објеката, то се овде разматрају само напони који се ту јављају, да би се и појединачно приказао њихов утицај на стабилност конструкције, а уједно изнела и основаност применљивости лабораторијских резултата у процени дуготрајних оптерећења елемената конструкције. Методологија испитивања механичких особина у овом истраживању се изводи аналогно стандардном, лабораторијском начину одређивања напона на притисак, те се из тог разлога лабораторијски услови и резултати испитивања напона на притисак, као репрезента, посебно издвајају. Као својеврстан модел понашања елемената дрвених конструкција под дуготрајним оптерећењем, овде се разматра и савитљивости дрвета.

II 3.1. Напон на притисак

Напон на притисак се јавља у дрвету под дејством силе која настоји да га сабије управно или паралелно правцу пружања механичких влаканаца и спада у праве напоне.³⁷ Одређивање статичког напона на притисак, врши се у аксијалном, радијалном и тангенцијалном правцу, условном или максималном силом. Епрувете за испитивање напона на притисак имају призматичан облик и стандардних су димензија. Прелиминарна рендген и ултразвучна испитивања вршена су на истим таквим епруветама, усмеравањем рендген зрака и ултразвучних таласа, као што се стандардно

³⁶Ibid.

³⁷Шошкић и З. Поповић. *Својства дрвета*. (Београд: Шумарски факултет Универзитета, 2002), 152.

врши усмеравање механичке силе при статичком напрезању на притисак. Према томе, очекивано је било и да извођење испитивања стрес-звучним таласима буде попут претходних метода, једнако применљиво. Обично се за вредност овог напона у пракси узима она вредност која се добије на граници пропорционалности и означава се као условна вредност, док се за максимални напон на притисак узима вредност при којој је дошло до лома огледног узорка – епрувете. Максимална сила потребна да доведе до лома епрувете је већа уколико је брзина повећања те силе већа.³⁸

Испитивање се врши помоћу притискивача, постепеним повећањем силе притиска у току 2–5 минута. Према усвојеном стандарду (JUS D.A1.045) димензије епрувета за испитивање напона на притисак паралелно пружању механичких влаканаца износе 20x20x50 и 50x50x100 mm. Истраживања показују да се највеће вредности напона на притисак добијају у аксијалном правцу (паралелно току механичких влаканаца). У односу на вредности добијене дејством силе управно на ток механичких влаканаца, које су 6–23 пута веће од вредности када сила делује у радијалном смеру, а 11–40 пута веће када сила делује у тангенцијалном смеру. Максимални напон на притисак паралелно влаканцима код лишћара се креће од 45–109 МПа, а код четинара од 26–75 МПа. Када сила притиска делује управно на влаканца, максимални напон на притисак варира од 0,6–9 МПа, при чему код четинара од 2,2 – 7,7 МПа, а код лишћара од 0,6–9 МПа.³⁹

Резултати претходних рендген и ултразвучних истраживања пратили су тренд кретања ових резултата, тако да је било очекивано да и метода испитивања дрвета стрес-звучним таласима да резултате конкордантне претходним. Дате вредности потврђују да је најмањи степен анизотропије дрвета дуж аксијалног правца, односно паралелно току механичких влаканаца. Према табеларним вредностима, однос коефицијента анизотропије напона на притисак, при дејству силе паралелно влаканцима и управно на влаканца, приближно износи 10:1.⁴⁰ Влажност негативно утиче на напон и притисак, а коефицијент редуције напона, при једнопостотном повећању хигроскопне влажности дрвета износи 4%.⁴¹

³⁸F. Kollmann and W. A. Cote, *Principles of Wood Science and Technology. Vol. I, Solid Wood* (Berlin: Springer, 1984), 406.

³⁹Е. К. Ашкенази, *Анизотропија дрвесици и дрвесних материјалов* (Москва: Лесная промышленность, 1978), 98.

⁴⁰E.G. Jr. King, „The Strain Behavior of Wood in Tension Paralel to the Grain,” *Forest Products Journal* 8, 11 (1958): 330–334.

⁴¹Ibid.

За стабилност конструкције према томе, није толико проблематичан статус управних – потпорних греда, јер се у овом случају оптерећење преноси на њих паралелно току механичких влаканаца. Прорачуном се потпорне греде морају димензионисати тако да однос дужине греде и њеног пресека није већи од 11:1, јер у супротном долази до њиховог савијања. У дрвеним конструкцијама су попречне – носеће греде далеко оптерећеније, јер се притисак преноси управно на ток механичких влаканаца, с тим што се у овом случају напон на притисак развија у оквиру сложеног напона на савијање.

II 3.2. Напон на затезање

Напона на затезање је напон који се јавља при дејству сила паралелно или управно на влаканца, које теже да раскину дрво и овај као и напон на притисак спада у праве напоне. У дрвеним конструкцијама се овај напон, заједно са напонам на притисак углавном јавља у оквиру сложеног напона на савијање и дефинише његову величину, док је самостално незнатно присутан. Лабораторијско испитивање овог напона врши се на огледним епруветама правилног геометријског облика, при чијој изради механичка влаканца не смеју да се пресецају. И код напона на затезање, као и код напона на притисак, његове вредности су знатно веће при дејству силе паралелно току механичких влаканаца, у односу на оне при управном дејству силе. Код напона на затезање је анизотропно својство дрвета најизраженије. Тако вредности максималног напона на затезање, паралелно влаканцима варирају у опсегу од 10–225 МПа, док су оне управно на влаканца, у просеку од 9–20 МПа. Напон на затезање управно на влаканца код четинара је за 10–20% већи у радијалном правцу, а код лишћара је та разлика од 20–70%. Анизотропија напона на затезање се креће од 10 до 40 и као што се из наведеног види, она у многоме зависи и од врсте дрвета.⁴² Одређивање вредности притиска на затезање није могуће аналогном применом стрес-звучних таласа као код напона на притисак, јер се у овом случају фактички ради о симултном дејству супротних сила. Влажност такође негативно утиче на напон на затезање, с тим што је тај коефицијент редукације напона, при једнопостотном повећању хигроскопне влажности дрвета, сада 3% уместо 4% колико износи код напона на притисак.⁴³ У носећим гредама дрвених

⁴²J. Boding and B. A. Jayne, *Mechanic of Wood and Wood Composites* (New York: Van Nostrand Reinhold, 1982), 59.

⁴³Ibid.

конструкција напон на затезање у оквиру сложеног напона на савијање, јавља се паралелно току механичких влаканаца у ком смеру је та вредност највећа, и у поређењу са напоном на притисак, који се ту јавља управно на ток влаканаца, он је пропорционално знатно већи. Посматрано у односу на модул еластичности те разлике међу њима су практично занемарљиве за стабилност конструкције.

II 3.3. Напон на смицање

Напон на смицање се јавља у дрвету када на њега истовремено делују две силе истог правца, а супротног смера, тежећи да смакну две међусобно блиске површине.

Испитивање напона на смицање у лабораторисјким условима се врши на стандардизованим епруветама правилног геометријског облика чије су све странице под правим углом. У дрвеним конструкцијама овај напон се, заједно са напоном на присак и напоном на затезање, такође јавља као индуковани напон у оквиру сложеног напона на савијање. На усеченим спојевима елемената, као што је то случај код спојева рогова дрвених конструкција, где би се он природно могао јавити, то се практично не дешава, јер су таква места ојачана завртњима. За разлику од напона на притисак и напона на затезање, напон на смицање не спада у праве напоне који иначе одређују величину напона на савијање. Са тог аспекта, утицај овог напона на стабилност дрвених конструкција је практично занемарљив. Овај напон се изоловано јавља при смицању дрвета које може бити аксијално, при дејству сила паралелно току механичких влаканаца, попречно, када једна делује паралелно, а друга управно на механичка влаканца и код пререзивања, када обе силе делују попречно на влаканца.

Према наводима Уголева, напон на смицање паралелно са влаканцима је у просеку приближно пет пута мањи од напона на притисак у истом смеру влаканаца. Исти аутор наводи и то да је попречни напон на смицање паралелно влаканцима два пута већи од напона на смицање у радијалној равни. Анизотропност дрвета се у значајној мери испољава и код овог облика напрезања. Напон на смицање при дејству силе паралелно влаканцима је тако, у просеку око 1,6 пута већи код лишћара него код четинара. Док је код лишћара напон на смицање за око 10 до 30% већи у тангенцијалној него у радијалној равни, ти напони су код четинара скоро исти. Напон на смицање није могуће аналогно напону на притисак испитивати применом стрес-звучних таласа, јер се и у овом случају ради о дејству сила супротног смера. Величина напона на смицање у тангенционалној равни у великој мери зависи од места проласка равни смицања, па

ће тако код четинара са крупним прстеовима прираста и код прстенасто порозних лишћара овај напон бити мањи, ако раван смицања пролази кроз рани део прстена прираста, док код дифузно порозних лишћара овај утицај није изражен.²² Из овога се види да ширина прстена има доминантан утицај на напон на смицање у односу на све друге факторе који иначе утичу на величину напона. Иако о томе нема егзактних података, као што је то случај код напона на притисак и затезање, извесно је да влажност има негативан утицај на напон на смицање.⁴⁴

II 3.4. Напон на савијање

То је напон који се у дрвету супроставља сили која тежи да га сломи савијањем. Напон на савијање је сложени напон у оквиру кога се индукују напони на притисак, затезање и смицање. Његова појава је карактеристична код оптерећења носећих дрвених греда, ослоњених у конструкцији на једном или два ослонца. Горња страна греде изложена је тако дејству силе притиска, а њој паралелна доња страна изложена је напрезању на истезање, док се дуж греде јавља напон на смицање. Под дејством притиска, померање уздужне, неутралне осе, усмерава се ка зони затезања греде. Лабораторијско испитивање овог напона се стандардно изводи статичким напрезањем стандардизованих експерименталних узорака дрвета, али се често, због захтевне грађевинске употребе, процена квалитета дрвета изводи и динамичким тестирањем. Динамичко тестирање напона на савијање је веома поуздан параметар квалитета дрвета, јер је коефицијент варијације у овом случају 32%, чиме се откривају и најмањи знаци структуралних неправилности, грешака или болести дрвета.⁴⁵ Како је концепт истраживања овог рада заснован на дијагностици дуготрајних промена дрвета у конструкцији, где је доминантна појава напона на савијање, то су и подаци о овом напону били од великог интереса. Испитивање напона на савијање могуће је само у лабораторијским условима – применом механичке силе, те се директним путем до њих није могло доћи. Због сложености напона, није било могуће ни његово *in situ* испитивање недеструктивним путем. Позната сазнања о овом напону била су кључна у поставци експерименталног дела овог истраживања. Испитивање овог напона се стандардно врши у тангенцијаном правцу, односно паралелно прстеновима прираста, јер је то и уобичајен начин исецања дрвене грађе. За нашу врсту дрвета напон на

⁴⁴F. Kollmann and W. A. Cote, *Principles of Wood Science and Technology. Vol. I, Solid Wood* (Berlin: Springer, 1984), 405.

⁴⁵B. N. Ugolev, „Determination of the Rheological Properties of Wood,” *Derev. Prom.* 12, 2 (1963): 17–19.

савијање варира у распону од 70–150 МПа, при чему се узима да је максимални напон око 100 МПа у просеку и да је граница пропорционалности око 60–70% те вредности. Анизотропно својство дрвета је и у овом случају веома изражено, јер је напон код савијања дрвета знатно нижи у аксијалном и радијалном правцу и креће се од 5–20% његове стандардно измерене вредности. Ово својство се може сагледати и из односа напона на притисак и затезање који се индукују у оквиру напона на савијање, где њихова резултанта одређује степен померања неутралне осе експерименталног узорка дрвета. Из тог односа који паралелно току механичких влаканаца приближно износи 1:2,8 – произлази да је напон на савијање, у оквиру кога се јављају, приближно једнак њиховој средњој вредности. Код прстенасто порозних лишћара са крупним прстеном прираста, напони на притисак, савијање и затезање, стоје у односу 1:2:2,8, а код четинара 1:1,5:2,5. Постојање константног односа међу овим правим напонима, отворило је могућност узимања напона за притисак као репрезентативни параметар код испитивања саставних елемената дрвених архитектонских конструкција. И код напона на савијање густина дрвета има позитиван утицај, док на његову вредност негативно утичу влажност, температура и структуралне грешке.⁴⁶ Наведени подаци су са аспекта овог истраживања такође интересантни као модел недеструктивног *in situ* испитивања елемената дрвених конструкција, а на основу транспоновања резултата статичког испитивања дрвета добијених у лабораторијским условима..

II 3.5. Савитљивост

Савитљивост је специфично својство дрвета које је од примарног значаја за његову обраду, а овде се разматра као могући модел понашања елемената дрвених конструкција и структуралних промена које се јављају при њиховим дуготрајним деформацијама. Напрегнута носећа греда у конструкцији трпи овакво оптерећење, те је очекивано да се на основу лабораторијског испитивања и овде дође до поузданог критеријума за савитљивост дрвета. Сазнање да се дрвени елемент може трајно деформисати без настанка лома је свакако значајан податак за стабилност дрвене конструкције, али је ипак значајније знати када се та граница пропорционалности прелази и када ће доћи до лома. Савитљивост се управо односи на тај део у распону његове структуралне елеастичности, односно у подручју пластичности дрвета. Како је овај опсег веома мали, то би за један елемент дрвене конструкције требало да значи да

⁴⁶F. Kollmann and W. A. Cote, *Principles of Wood Science and Technology. Vol. I, Solid Wood* (Berlin: Springer, 1984), 407.

је изгубио свој механички потенцијал и да предствала ризик. Овакав след размишљања долази на основу података који се се добијају у лабораторијским условима на дрвету које није старо, нити је било експлоатисано под дуготрајним оптерећењем. Разматрање о савитљивости дрвета је заправо тражење одговора на то, колико су лабораторијски подаци валидни за једну такву квалитативну предикцију. Анализа познатих лабораторијских података о савитљивости дрвета, као и оних који се односе на структуралне промене дрвета које настају временом (течење дрвета), делује као начин на који би се до тог одговора дошло, те тако овде и поступамо. Савитљивост се у пракси стандардно проверава помоћу шаблона на којима се врши савијање опитних епрувета дрвета. Шаблон на коме се у одређеном тренутку појаве деформације на епрувети, представља меру савитљивости одређене врсте дрвета. Правац дејства силе је од нарочитог значаја за савитљивост дрвета, при чему се највећи ефекти добијају када је тај правац управан на правац протезања влаканаца и на правац ширења прстенова. Механизам савијања јасно указује на подударност оптерећивања експерименталног узорка дрвета и носеће греде дрвене архитектонске конструкције, какав је пример кровне конструкције. Метод израчунавања савитљивости – по параметрима жилавости је поузданији и са аспекта овог истраживања интресантан, јер се савитљивост израчунава по формули на основу напона на савијање и угиба епрувете на граници пропорционалности и у тренутку лома. Другим речима, овим се дефинише модул еластичности на савијање дрвета, исказан односом његове густине и еластичности.⁴⁷ Како је напон на савијање од доминантног утицаја у дрвеној архитектонској конструкцији то је онда на моделу савитљивости прихватљиво разматрање о структуралним дешавањима код елемената конструкције. Према датој формули, што је већа разлика између вредности напона на савијање на граници пропорционалности и максималног напона на савијање, степен угибања је мањи, јер је то дрво чвршће. Према томе, сигуран параметар за поређење квалитета дрвета је напон на чврстоћу. Правац дејства силе је од нарочитог значаја за савитљивост дрвета, при чему се највећи ефекти добијају када је тај правац управан на правац протезања влаканаца и на правац ширења прстенова, јер је у том смеру пропорционално најмањи садржај механичких влаканаца. И у овом случају се према томе потврђује да су грађа дрвета и правац тока механичких влаканаца фактори од општег утицаја на механичка својства дрвета. Температура као и влажност, у извесним границама позитивно утичу на повећање

⁴⁷F. Kollmann and H. Krech, „Dynamische Messung der elastischen Holzeigenschaften und der Dämpfung. Ein Beitrag zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung,“ *Holz als Rohund Werkstoff* 18 (1960): 41–54.

савитљивости дрвета, што се као правило такође може транспоновати и на елементе дрвених конструкција.⁴⁸ Тако влажност дрвета – од 16% хигроскопне влажности, има оптималан утицај на савитљивост дрвета, док њеним повећањем на 20–30% слободна вода, насупрот дејству притисне силе почиње да проваљује у слободне просторе и ствара пукотине у структури дрвета и слаби његову чврстоћу.

Код високих температура, растапањем лигнина, слабе кохезионе силе анатомских елемената дрвета. Уколико се трајање тог дејства прекомерно продужи, оно на крају исто води слабењу чврстоће.⁴⁹ На основу изнетог следи да нема јасног критеријума који би одредио тачну границу савитљивости дрвета. Сасвим је извесно да се дрво понаша као јединствен материјал и да за његово испитивање важе исти принципи, а да се само услови мењају. Ако би се рекло да на ово својство утичу и најмања одступања у структури дрвета, онда то може значити да је та чињеница утврђена под другим условима испитивања, односно да се до тога дошло испитивањем дрвета са грешком. Исто тако се може рећи и то да се до одступања од стандардног понашања дошло применом стандардне методологије. Из тога даље произлази да је и испитивање механичких својстава дрвених конструкцијских елемената могуће испитивањем метода које се могу користити и у лабораторијским условима. Анализом познатих чињеница у вези механичких својстава дрвета и методологије њиховог испитивања, показало се да им је заједнички именитељ количина дрвене супстанце у јединици запремине, односно густина дрвета. Такође је утврђено и то да је густина дрвета подложна утицајима, што се одражава резултатима испитивања његових механичких својстава. Под различитим условима дрво показује различита својства. Интерактивност утицаја је у овом случају веома изражена, те као пример тога овде разматрамо и грешке дрвета као и временски утицај на својства дрвета.⁵⁰

II 4. Грешке дрвета

За нас су инетресантне грешке дрвета које умањују његова механичка својства и то првенствено грешке грађе дрвета. Грешке грађе дрвета карактерише дрво аномалне хетерогености, односно веома велике неправилности у структури грађе. Као што је већ

⁴⁸K. Kitahara and N. Okabe, „The influence of Temperature on Creep of Wood by Bending Test,” *Journal of the Japan Wood Research Society* 5, 1 (1959): 12–18.

⁴⁹K. J. Friedley and R. C. Tang, „Thermal Effects on Load-Duration Behavior of Lumber. Part 11: Effect of Cyclic Temperature,” *Wood and Fiber Science* 22, 2 (1990): 204–216.

⁵⁰R. B. Hoadly, *Understanding Wood: a Craftsman's Guide to Wood Technology* (Newtown: Taunton Press, 1980), 62.

констатовано, такво дрво не захтева дијагностику каква се користи код нормалног дрвета, јер се такво дрво и макроскопски разликује, те су дијагностички услови у таквом случају другачији. За категоризацију таквог дрвета лошег квалитета довољан је само инспекцијски метод. Овде је од значаја да се покаже да и за такво дрво важе исти принципи одређивања његовог квалитета. Због тога је и апострофирана хетерогеност, јер се у поређењу са резултатима испитивања нормалног дрвета у истом анатомском правцу, очекује да код исте врсте дрвета са грешком грађе (уколико су остали услови исти), механички потенцијали буду знатно слабији. Ово се посебно односи на кврге, реакционо дрво и ломну срж. Овде се због разлика у грађи и густини – у односу на остали део дрвета, а под утицајем влажности на тим местима – јављају знатно израженија унутрашња напрезања, што доводи до структуралних оштећења. Пример реакционог дрвета је посебно интересантан, јер сликовито одражава интерактивност спољашњих и унутрашњих сила (статичке и динамичке природе у дрвету) која у стаблу дрвета резултује формирањем једног другачијег дрвета, које хемијским, анатомским и техничким својствима одступа од својстава осталог дела стабла.²⁷ Према томе, још једном се показује да густина дрвета одређује његов карактер и чини га јединственим материјалом. Грешке дрвета које настају под утицајем спољних фактора, такође указују на то да дрво на јединствен начин реагује на спољне утицаје. Илустрације ради, наводимо да се код таквих грешака, као што су палјивост, окружљивост и пукотине, то јасно види.⁵¹ Пример пукотина би се при томе, због сличности механизма настајања оштећења, могао узети и као биолошки модел за сагледавање спољних утицаја на елементе дрвених конструкција архитектонских објеката. Гледано са аспекта истраживања овог рада, очекивано је да примена дијагностике на принципу стрес-звучних таласа успешно детектује грешке грађе дрвета као и грешке услед дејства спољашњих фактора.⁵²

II 5. Реолошки аспекти својстава дрвета

Испитивање утицаја времена трајања оптерећења на механичка својства дрвета је од великог интереса, када се ради о стабилности дрвених грађевинских, односно архитектонских конструкција. Стабилност дрвене грађевине, поред њене прорачуном изведене статичке поставке, умногоме зависи и од чврстоће њених саставних

⁵¹E. König, *Fehler des Holzes* (Stuttgart: Holz-Zentralblatt Verlags-GmbH, 1957), 127.

⁵²Ibid.

елемената. То је особина чији се параметар вредности испитује лабораторијски – извођењем статичких тестова, применом притисне или савојне силе на огледне узорке дрвета. Тако добијени подаци односе се на време од свега неколико минута, колико стандардно износи трајање статичког тестирања дрвених узорака, на основу чега се даље врши пројектна процена носивости уградног материјала од дате врсте дрвета. Варирања напона регистрована код исте врсте огледног узорка могу бити веома изражена у односу на дејство трајања силе. Тако се нпр. скраћивањем времена дејства силе на само један секунд, добијају и до 25% веће вредности чврстоће него када се то чини у стандардним условима статичког тестирања.⁵³ Овај податак указује да транспоновање лабораторисјких параметара механичких вредности има смисла у предикцији понашања елемената дрвене конструкције. Са аспекта овог истраживања, примена *in situ* дијагностике квалитета елемената дрвене конструкције је заправо провера њене пројектне стабилности под дуготрајним оптерећењем. Како према поставци овог истраживања успостављање нове, недеструктивне методе такве провере подразумева њено калибрисање на основу лабораторијских података, основаност тога ћемо и овде размотрити. Утврђене законитости у понашању дрвета, о чему је већ било речи, у први план истичу густину као карактерни основ његове јединствености, исто као што се и операбилност свих дијагностичких метода испитивања механичких својстава дрвета заснива на вредности његове густине. Истраживањем и тумачењем механичких својстава дрвета у функцији времена као што су течења материјала, релаксације напона и замора материјала чиме се бави реологија (*rhéō* – ток, *logos* – наука) такође се дошло до законитости које дрво издвајају као јединствен материјал. Разумевање тих утврђених законитости у понашању, под дуготрајним оптерећењем експлоатисаног дрвета, допринело је и нашем усмеравању ка правилном утврђивању утицаја на стабилност дрвених конструкција. Гледано са друге стране, статички прорачуни таквих конструкција предвиђају оптерећења која на основу механичких својстава дрвета гарантују стабилност конструкције и саме грађевине. Утврђивањем постојања подударности математички и *in situ* добијених података провером квалитета елемената конструкције, на крају се сходно критеријумима долази и до одлуке о рестаурацији архитектонских грађевина са дрвеном конструкцијом. Из овога даље

⁵³R. B.Hoadly, *Understanding Wood: a Craftsman's Guide to Wood Technology* (Newtown: Taunton Press, 1980), 205.

следи да подаци статичког прорачуна, који дефинишу стабилност једне грађевинске конструкције, једнако узимају у обзир чврстоћу уградног материјала и величину максималног дејства силе, односно његово крајње оптерећење. Карактер промена које механичким тестирањем на експерименталним узорцима у лабораторији настају за највише неколико минута, идентичан је променама које се дуготрајним оптерећењем јављају на елементима дрвене конструкције, што дозвољава њихово поређење. Специфичност промена које настају услед дуготрајног, константног оптерећења испод границе лома, је да оне губе карактер привремене деформације, повећавају се и постају накнадне. Та појава је позната као вискозно течење или течење материјала. Она се запажа и при оптерећењу испод граница пропорционалности – када има тенденцију стабилизације, док под сталним, сразмерно већим оптерећењем, настају трајне деформације склоне лому. Овим се дефинише и сам проблем ове дијагностике. Смер тог дешавања одређен је величином напона који се у дрвету временом развија. Лимитна тачка прелаза, позната као граница течења, од кључног је значаја за стабилност грађевинске конструкције, јер се до тог момента дрво понаша као вискоеластични материјал.⁵⁴ Дрво ће се тако понашати уколико горња граница напона не прелази 50% вредности његове статичке чврстоће.⁵⁵ Сличне налазе, где под ниским напоном дрво показује добру апроксимацију линеарног модулирања, објављују и други аутори.⁵⁶ Сходно Хуковом закону,⁵⁷ којим се на основу постигнутог напона пре настанка лома дефинише чврстоћа материјала, односно његова носивост, следи да је и димензионисање елемената при статичком прорачуну дрвених грађевинских конструкција, по правилу одређено у оквиру граница пропорционалности датог уградног материјала. Због тога што је од границе пропорционалности до границе лома веома мало простора, пројектовање дрвених архитектонских конструкција на основу коефицијената сигурности предвиђа радне напоне који се налазе у еластичном подручју одређене врсте уградног материјала. Потребу за тим потврђује и чињеница да је сила потребна да изазове лом елемента, који је дуже време под константним оптерећењем, много мања од оне која то може да учини у стандардном статичком тесту

⁵⁴М. Muravljoy, *Reološke karakteristike drveta*. Prvi jugoslovenski naučno-stručni skup o projektovanju i izvođenju savremenih drvenih konstrukcija – SGIT Srbije (Cavtat, 1989), 4.

⁵⁵A. P. Schniewind, „Recent Progress in the Study of Rheology of Wood,” *Wood Science and Technology* 2 (1968): 18–206.

⁵⁶L. Bach, *Non-Linear Mechanical Behavior of Wood i Longitudinal Tension* (Ph.D. Disertation Syracuse University, State University College of Forestry, 1965), 69.

⁵⁷Роберт Хук <https://sr.wikipedia.org/srec/%D0%A0%D0%BE%D0%B1%D0%B5%D1%80%D1%82>
Пристапљено: јануар 2021.

код исте врсте дрвета. Сходно томе, лом дрвеног елемента који је 10 година био под константним савојним оптерећењем, изазива сила 40% слабија од оне, којом се то, у лабораторијским условима код исте врсте дрвета постиже за неколико минута.⁵⁸

Основаност поставке овог истраживања, да се *in situ* неинвазивним путем, применом стрес-звучних таласа, може тачно одређивати квалитет елемената дрвених архитектонских конструкција и компетентно разматрати о њихова стабилност, овим је на крају потврђена.

⁵⁸C. C. Gerhard, „Effects of Grade on Load Duration of Douglas-Fir Lumber in Bending,” *Wood and Fiber Science* 20, 1 (1988): 146–161.

III ИСПИТИВАЊЕ СВОЈСТВА ДРВЕТА

III 1. Испитивање механичких својстава дрвета

III 1.1. Успостављање недеструктивне *in situ* методе

Са аспекта истраживања овог рада, фокус интересовања био је на испитивању оних механичких својстава која дефинишу дрво као конструкциони материјал. Механичка својства дрвета су тако већ била и разматрана – као појавни феномени у оквиру конструкционе целине, макромодела унутрашњих напрезања уграђених дрвених елемената. С обзиром на то да се ово истраживање заснива на механичкој еквилибрацији брзине стрес-звучних таласа, којом је вршено испитивање елемената дрвених конструкционих елемената, то је захтевало претходно калибрисање огледних епрувета. У овим уводним истраживањима, где су били примењивани ултразвучни таласи и рендгенски зраци, то баждарење је вршено апроксимативно, узимањем табличних вредности статичког напона на притисак, за епрувете дате врсте дрвета. Како су резултати тих истраживања генерално потврдили правилност варирања брзине ултразвука и светлине рендгенске слике, у зависности од табличном апроксимацијом одређених вредности чврстоће огледних примерака дрвета, то је за успостављање нове методе вршена њихова стандардна, механичка калибрација. Поступак калибрације огледних епрувета сведен је на одређивање вредности статичког напона на притисак, због, како је већ образложено, могућности усмеравања стрес-звучних таласа, аналогно дејству силе притиска, онако како је то претходно било изведено, са ултразвучним таласима и рендгенским зрацима. Поступку механичке калибрације претходило је сушење узорака у комори и одређивање њихове густине, те ће овде бити изложено техничко извођење тих операција. Апсолвирање дрвета као конструкционог материјала, захтева и разматрање закона физике коме подлежу дешавања унутар структуре дрвета, односно, у преносном смислу – дешавања у конструктивном дрвеном склопу под дејством спољних механичких сила. О Хуковом закону који путем Јунгових модула еластичности и Поасонових коефицијената објашњава та унутрашња напрезања и њихово испољавање, већ је било речи када су разматрана механичка својства дрвета. Овде ће бити приказане само математичке формулације, због израчунавања најоптерећенијих конструкцијских тачака.

III 1.2. Механичко испитивање дрвета - калибрација недеструктивне методе

III 1.2.1. Хуков закон

Хуков закон дефинише односе притисног оптерећења дрвета (**N**) и последично настале деформације (**mm**), односно њиховим релативним вредностима, напоном и дилатацијом. По дефиницији овог закона тај однос, који је у механици познат као Јунгов модул еластичности (**E**) је унутар граница еластичности константан. Напон се изражава N/mm^2 $\epsilon = D/l \sigma$

III 1.2.2. Јунгови модули еластичности

На основу досадашњих искустава недеструктивног испитивања квалитета дрвета, могућност директног корелисања тих и механичких параметара, била је успостављена једино преко динамичког модула еластичности. Овај поступак је захтевао и накнадно упоређивање вредности динамичког и статичког модула еластичности испитиваног дрвета, због чега ћемо се овде осврнути на њихово одређивање и значај. Еластично понашање дрвета, као ортотропног материјала, може се сагледати на основу три модула еластичности одређених применом механичке силе: у аксијалном (лонгитудиналном), радијалном и тангенцијалном смеру; три модула смицања и шест Поасонових коефицијената (однос између попречних и уздужних деформација).⁵⁹ Као што је већ поменуто, модули еластичности се испитују само код нормалних напона (притисак, затезање и савијање), што је отварало могућност аналогног успостављања ове усвојене *in situ* методе. За интерпретацију резултата овог истраживања било је од значаја и то да су вредности модула еластичности који се добијају при дејству притисне, затезне и савојне силе приближно једнаки – ако су добијени на истој врсти дрвета, при истој температури и степену његове влажности и ако је усмерење силе вршено у истом правцу тока дрвних влаканаца. Тако се израчунавање модула еластичности код напона на притисак и затезање добијају помоћу истог обрасца: $E = \sigma / \epsilon$, где је σ – напон, а ϵ – резултујућа дилатација. Даљим развијањем ове једнакости долази се до облика обрасца којим се изражава Хуков закон: $E = Fx / A\Delta l$ где је **F** – притисна или затезна сила унутар еластичног подручја, изражена у **N**(Њутн), **A** – првобитна површина попречног пресека у **mm²**, **Δl** – линеарна деформација епрувете у

⁵⁹Б.Шошкић, „Еластичне константе код дрвета,” у *Својства дрвета*, (уред.) Б. Шошкић и З. Поповић (Београд: Шумарски факултет Универзитета, 2002), 180.

mm , l – почетна дужина епрувете. За израчунавање модула еластичности при развијању сложеног напона на савијање користе се два обрасца, у зависности да ли се ради о дејству једне или две концентрисане силе. С обзиром на то да су предмет овог испитивања дрвене архитектонске конструкције, где се овај напон развија у носећим гредама, и да он представља резултанту напона на притисак, затезање и смицање, овде ће бити приказана оба обрасца ради представљања међудејства тих компонентних сила и њиховог односа. При дејству концентрисане савојне силе (сила притиска) на носећу греду у опсегу подручја еластичности, модул еластичност се добија по следећем обрасцу: $E = Fx^3 / 4xbxh^3xf$, где је f – угиб носача, b – ширина носача у (mm), h – висина греде у (mm), l – растојање ослонаца у (mm). Када делују две концентрисане силе на греду – носач у опсегу подручја еластичности, на трећини растојања ослонаца, онда је израчунавање модула еластичности по следећем обрасцу: $E = 23x Fx^3 / 108xbxh^3xf$

За разлику од добијања статичког модула еластичности, величина динамичког модула еластичности се добија тренутним енергичним дејством силе. Овим се и једино могуће објашњава директно корелисање те величине, са параметрима брзине ултразвука или стрес-звучних таласа код недеструктивног испитивања квалитета дрвета.

Лабораторисјко калибрисање епрувета је, према томе имало за циљ, да у поступку успостављања *in situ* методе успостави директну корелацију динамичких параметара брзине простирања звучних таласа и параметара статичког напона на притисак.

III 1.2.3. Статички напон на притисак – стандардизација епрувета

Како је у овом истраживању примењена метода *in situ* стрес-звучног испитивања уграђеног дрвета, прво је следило њено лабораторијско баждарење. Да би се могла извршити еквилизација механичких и стрес-звучних параметара, на истим огледним узорцима – епруветама је требало извршити обе врсте тестирања. Тестирање стрес-звучним таласима је изведено пре механичког, јер су епрувете за то морале да буду интактне. Примена стрес-звучних таласа је у лабораторији изведена аналогно стандардној методи испитивања статичког напона на притисак, на исти начин како је то било замишљено да се уради и у *in situ* испитивању. За разлику од уводних истраживања, еквилизација параметара је у овом случају вршена на основу непосредно добијених механичких параметара. С обзиром на то да је принцип механичког тестирања дрвета већ претходно био објашњен, то ће овде бити дат само технички аспект његовог извођења. Калибрисање методе, као што је такође било апострофирано, подразумева одређивање стања влажности, јер оно директно утиче на густину дрвене

супстанце, а тиме и на чврстоћу испитиваног узорка. Гледано са аспекта овог истраживања, степен влажности дрвета је уједно био и параметар свођења лабораторијских и *in situ* услова испитивања квалитета дрвета, на заједнички именитељ. Из тог разлога се на овом месту излаже поступак одређивања густине и влажности, док ће поступак примене стрес-звучних таласа бити дат у оквиру приказа недеструктивних испитивања дрвета.

III 1.2.4. Одређивање густине дрвета огледних епрувета

У овом испитивању густина дрвета је одређивана у односу на 12% хигроскопну влажност огледних узорака – епрувета. Како се густина дрвета израчунава по формули, она је претстављена количником његове масе и запремине. Маса (m) узорка – епрувете сваке врсте дрвета, протоколарно је мерена електронском вагом и била изражена у грамама (g), а његова запремина је израчунавана по математичкој формули за призматично геометријског тело: $V=a \times b \times c$, где је a – дужина епрувете, b – ширина и c – њена висина. Како је у овом случају $b=c$, онда ће облик формуле бити $V=a \times b^2$ За ово испитивање, стандардне димензије епрувета су: 20x20x40 mm, тако да је вредност запремине сваког узорка израчуната према датој формули износила: $V=16000\text{mm}^3 = 16 \text{ cm}^3$ Пошто промена степена влажности, као што је показано, утиче на густину дрвета, а тиме и на његове механичке особине, ради коректне калибрације, епрувете су претходно биле просушене у комори до постизања њихове 12% хигроскопне влажности (стандардна влажност код тачке засићености влаканаца).

III 1.2.5. Одређивање влажности дрвета

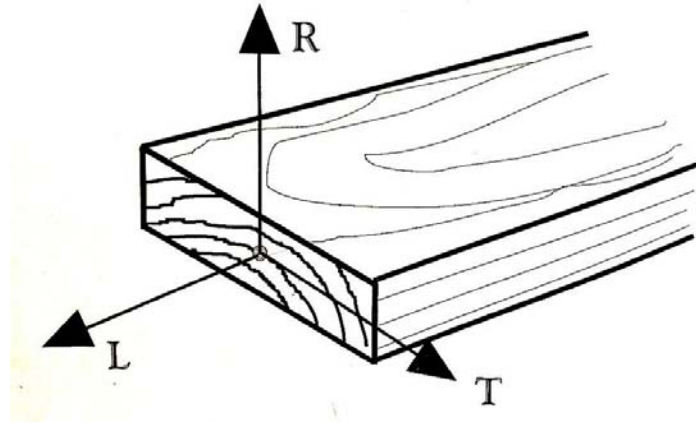
Иако су епрувете претходно биле просушене у комори, провера влажности била је учињена и непосредно пре њиховог калибрисања, тако да су под једнаком условима извођени и стрес-звучно испитивање и одређивање статичког напона на притисак . Влажност је била одређивана само код стандардно исецаних епрувета, да би и тај податак могао да се користи као репер, у другој фази истраживања, а приликом испитивања елемената дрвених конструкција стрес-звучним таласима. Одређивање влажности огледних епрувета и елемената дрвених конструкција, извођено је помоћу електричног влагомера марке GANN, због његове портабилности, једноставног руковања и мерног опсега до око 100% влажности. Овај апарат који функционише на принципу промене електричног отпора при промени степена влажности дрвета је велике поузданости у опсегу хигроскопне влажности од 7–25%, што је требало да буде

предност за ово *in situ* истраживање, јер се претпостављало да се и влажност елемената дрвених архитектонских конструкција креће у том опсегу. С обзиром на то да нам је у плану било испитивање масивних елемената дрвених конструкција, потенцијалним недостатком се могло сматрати једино то, што је мерне електроде у виду игала требало утиснути до $1/3$ дебљине датог елемента. Принцип мерења код ове врсте електричног влагомера састоји се у томе, да повећањем степена влажности – у опсегу од апсолутно сувог стања до тачке засићености влаканаца, долази до пада електричног отпора и обрнуто, што не захтева корекције у односу на врсту дрвета и његову густину, те је и због тога нама то било прихватљиво. Степен влажности је у процентима аутоматски читаван на дисплеју апарата.

III 1.2.6. Одређивање напона на притисак

За ово испитивање све епрувете су биле прописаног облика паралелепипеда и стандардних димензија (20x20x40cm). Странице паралелепипеда обележаване су почетним словом равни, у зависности од правца пружања механичких влаканаца (а – аксијална, г – радијална, т – тангенцијална), а примарни услов да буду селектоване за испитивање је био да ток механичких влаканаца буде правилан, што је одређивано на основу њиховог цртежа у тангенцијалној равни (слика 1). Вертикалан пресек кроз две наспрамне стране епрувете, одређивао је тако једну од анатомских оса тока дрвених влаканаца. Епрувете за баждарење су биле тако исецане да им се дужа страна поклапала са правцем пружања механичких влаканаца, тако да је раван која је уздужно и под правим углом пресецала епрувету, паралелно линијама цртежа, одговарала аксијалној равни. Пресеци које су замишљене равни правиле, пресецајући две уздужне суседне стране под правим углом, одговарале су радијалној, односно тангенцијалној равни епрувете. Епрувете су биле тако исецане да се на њиховим страницама осликавала одговарајућа пројекција дела прстена прираста дрвета, што је показивало правац тока механичких влаканаца, односно раван њиховог пресецања. Баждарење епрувета применом силе притиска је, као и у овом уводном истраживању, било вршено њеним усмеравањем паралелно и управно на правац тока влаканаца у радијалном и тангенцијалном смеру – попут усмеравања ултразвучних таласа и рендген зрака. За механичко испитивање напона на притисак, паралелно пружању механичких влаканаца, површина притискивача је по стандардној методи, покривала целу површину горње стране вертикално постављене епрувете. Код испитивања напона на притисак, управно на правац тока механичких влаканаца, притискивач је покривао

средњу трећину уздужне стране епрувете у радијалном и тангенцијалном смеру њиховог тока. Повећање интензитета силе притиска било је подешено да траје максималних 5 минута. Јачина силе притиска је била регистрована непосредно пре лома епрувете, еквивалентна напону на граници пропорционалности. Изражавање интензитета силе притиска било је стандардно у $N/cm/min$, а напона на притисак у МРа.



Слика 1: Три основна анатомска правца код дрвета (L– лонгитудинална (аксијална) оса, R– радијална оса, T – тангенцијална оса). Извор: Б. Шошкић и З. Поповић. *Својства дрвета* (Београд: Шумарски факултет Универзитета у Београду, 2002), 180.

III 2. Недеструктивно испитивање дрвета

Недеструктивно испитивање механичких својстава дрвета претпоставља *in situ* – тачно утврђивање како његовог механичког потенцијала, тако и обима и степена његових унутрашњих оштећења. Унапређење недеструктивне дијагностике је приоритет и овог истраживања, с обзиром на то да још увек нису дефинитивно установљене корелације параметара механичких потенцијала дрвета и њима еквивалентних параметара до којих се долази недеструктивним методама. Овде ће детаљно бити размотрене само оне методе чија примена, према овом апсолвирању дијагностике механичких својстава дрвета, основано пружа могућност такве корелације, а тиме и успостављање *in situ* методе каква је примењена у истраживању овог рада. Треба истаћи да неке полуинвазивне методе, у мањој или већој мери, пружају сличне могућности, које би под другачијим захтевима такође могле бити примењене за *in situ* испитивање елемената дрвених архитектонских конструкција. Приказ тих метода даје се као својеврстан увод у *in situ* истраживање спроведено у овом раду. Како свако испитивање

квалитета дрвета почиње инспекцијом, њена објективизација би као пример добре праксе требало да буде стандардизована, те се са аспекта дрвених архитектонских конструкција примарно износе ти принципи. Методолошка поставка ових уводних рендген и ултразвучних испитивања дрвета, суштински је иста испитивању квалитета елемената дрвених архитектонских конструкција примењеном у овом раду, те се и она овде износи, ради истицања и потпуног разумевања идејне замисли овог истраживања. Примена рендгенских зрака, као и ултразвучних и стрес-звучних таласа, с обзиром на њихову природу, може бити адекватно приступна методологија. Као таква би, сагласно поставци овог рада, у потпуности задовољавала критеријуме мерне еквилизације, јер се и вредности тако добијених параметара, попут механичких, заснивају на специфичној густини дрвне супстанце (специфична густина дрвета је у овом раду узета као јединични репрезент садржаја елемената анатомске грађе дрвета – трахеја, рахеида). У прилог томе говоре и резултати ових уводних, недеструктивних истраживања узорака дрвета, вршених применом ултразвучних таласа и рендгенских зрака, која ће овде и бити приказана. Приказ остале дијагностичке методологије дрвета, која се изводи лабораторисјки, дат је на крају, ради увида у могућности њиховог унапређења претходним механичким баждарењем експерименталних узорака.

III 2.1. Инспекција

Имајући у виду то да је крајњи интерес овог истраживања била стабилност дрвене конструкције архитектонског објекта, инспекција је сходно стандардима првенствено била усмерена на носеће елементе конструкције. Сагледавање и слободна процена квалитета носећег елемента – греде у целости, при чему је издвајање њених критичних делова понаособ био је први приступни корак овом *in situ* истраживању. Следеће је било да се, уколико се таква места уочавају, а њихова видљива површина није потпуна, донесе приближна процена о укупној величини потенцијалног дефекта спрам видљиве површине. Ово се првенствено односило на знаке трулежи и оштећења која су проузроковали инсекти. Инспекција дрвених конструкција архитектонских објеката од културно-историјског значаја може (користећи се дендрохронолошким методом) помоћи и у процени старости самог објекта. Како је са овог аспекта истраживања, један од битних интереса био утицај времена на механичка својства дрвета, могло се очекивати да ће се инспекцијом видљивог цртежа година на профилу носеће греде доћи до таквих података. Број видљивих година на профилном цртежу, њихов изглед и процентуални однос сразмерно ширини профила, били су претпостављени као

објективни показатељ врсте дрвета, чврстоће (ужи години – дрво веће чврстоће, прим. аутора) и минималне старости посматране греде. Узимајући уз то, на основу резултата истраживања, као компаратив и познате табличне вредности просечне чврстоће за дату врсту дрвета, инспекција се свакако може сматрати добром полазном основом за почетак *in situ* испитивања елемената дрвених конструкција архитектонских објеката. Како је инспекција једна емпиријска метода, стандардизација ове и недеструктивних метода уопште, је нешто на чему ће бити фокус даљих истраживања на унапређењу дијагностике материјала. То потврђује и податак да је на основу студије изведене у сарадњи са Еврокодом (Eurocodes), недеструктивна методологија испитивања материјала већ уведена у Чешке техничке стандарде (Czech Technical Standards).

III 2.2. Полуинвазивне методе испитивања квалитета дрвета

Методe полуинвазивног тестирања дрвета праве веома мала оштећења испитиваног узорка дрвета, те могу условно бити прихватљиве и за *in situ* извођење испитивања елемената дрвених конструкција архитектонских објеката од културно-историјског значаја. Испитивање отпорности дрвета на вађење вијака (*screw resistance*) и отпорност на бушење (*drilling resistance*) су две такве методе, које се помињу у складу са концептом овог рада. Вредности чврстоће добијене њиховом применом, резултат су калкулисања вредношћу густине испитиваног узорка дрвета – емпиријска формула по Феарчајлду (Fairchild), а то је корелација са којом се бавимо у концептуалној поставци овог истраживања. Ове методе, међутим, иако поуздане, не дају квалитативне податке који се односе на целокупну масу испитиваног елемента, какве захтевају статички прорачуни носивости једне конструкције. Примена вијка, односно бургије, даје податке који се односе на врло мали део испитиваног узорка (промер вијка 4,0 mm, а промер бургије 1,5–3,0 mm), те је због тога могућност успостављања корелације, густине и механичких својстава датог конструкционог елемента практично занемарљива и то захтева велики број проба и прављења мапинга структуре. Подаци добијени тим путем у пракси се користе за прорачун чврстоће спојева конструкционих елемената, односно за прорачун потребног броја и распоред вијака у споју, као и за откривање скривених дефеката и оштећења. Промена отпорности у односу на одређена својства дрвета, која се у овом случају испољава, дозвољава повлачење паралелизма са функционисањем ове методе, те самим тим отвара могућност њихове комбиноване примене и унапређења. Тако величина отпора вађењу вијка или продирања бургије зависи од правца дејства њихове акционе силе у односу на анатомски правац пружања дрвених

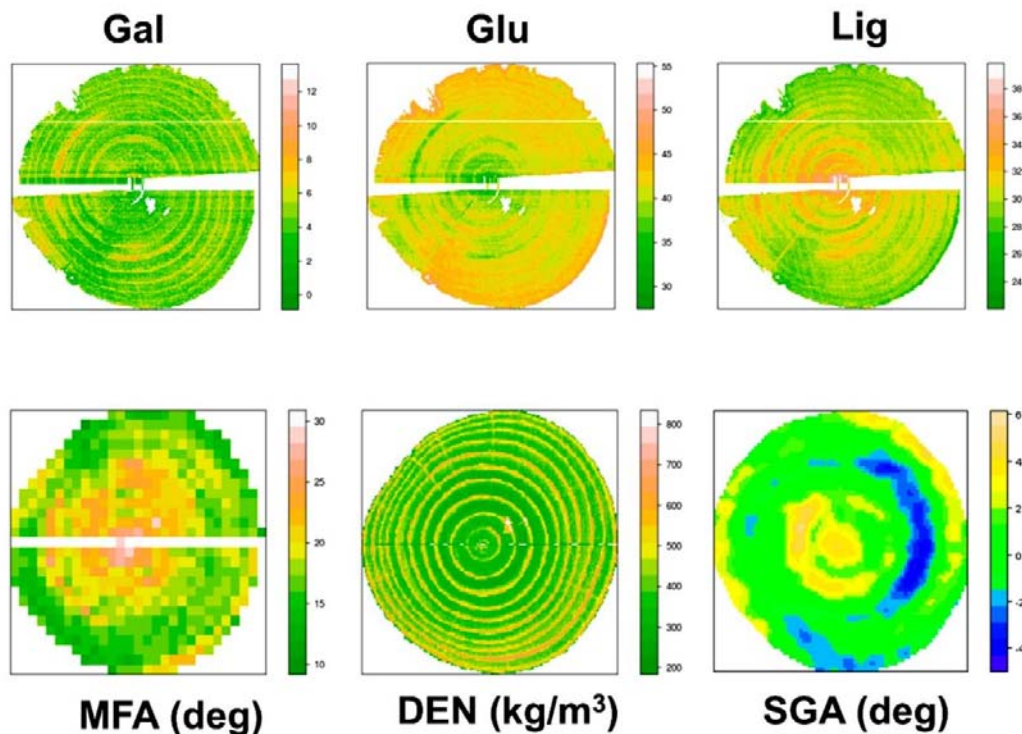
влаканаца, што је подударно са хипотетичком поставком овог рада. При томе је највећи отпор вађењу вијака у радијалном, а најмањи у тангенцијалном смеру. Потпуна подударност са поставком ове методе је да дрво веће густине у опсегу хигроскопне влажности пружа већи отпор извлачењу вијка, односно продирању бургије. Испитивање отпора путем извлачења вијака регулисано је код нас стандардом JUS D.A1.057. Апарати који су сада у широј употреби базирају се на мерењу отпорности материјала, попут *Pyloclin 6J*, портабилни су и веома лаки за руковање. Сличних карактеристика су и бушилице за испитивање отпорности дрвета на бушење као што је *IML-Resistograph F-Series Inspection Drill*.

Полуинвазивна метода за испитивање својстава дрвета коју овде посебно издвајамо је *Core Drilling* метода. Она се изводи помоћу бушилице која користи специјалне бургије за екстракцију ваљкастих узорака дрвета малог промера од око 5 mm, који се затим механички тестирају, да би се одредио напон на притисак и модул еластичности на притисак. Са аспекта истраживања овог рада она је интересантна, јер даје могућност *in situ* баждарења непосредно примењених, недеструктивних метода испитивања својства дрвета и усмервања њиховог даљег унапређења. И ова метода међутим, као и већ поменуте методе, има ограничење које се односи на њену техничку изводљивост, због неједнаке приступности свим деловима конструкције чију би стабилност требало процењивати.

III 2.3. Недеструктивне методе испитивања квалитета дрвета

Преглед метода недеструктивног испитивања дрвета, које су се нагло развиле у последњих десетак година, значајан је у смислу приближавања идејног развоја поставке овог истраживања. Оваква испитивања су најчешће методолошки комбинована, тако да се испитивани узорак дрвета може проучити са више аспеката. Пример *DiscBot* методе је карактеристичан за један такав приступ пручавању квалитета дрвета, где се на истом узорку дрвета примењује спекторскопија инфрацрвеним зрацима (*NIR spectroscopy*) мерење брзине пропуштеног звука кроз узорак дрвета управно на правац тока дрвних влаканаца (*radial sample acoustics*), дензитометрија (*densitometry*) и скенирање правца тока дрвних влаканаца (*grain angle scanning*). На тај начин се истовремено добијају подаци о хемијским, структуралним и физичким особинама испитиваног узорка дрвета (слика 2). Битно за ова испитивања је узорковање дрвеног материјала, што подразумева

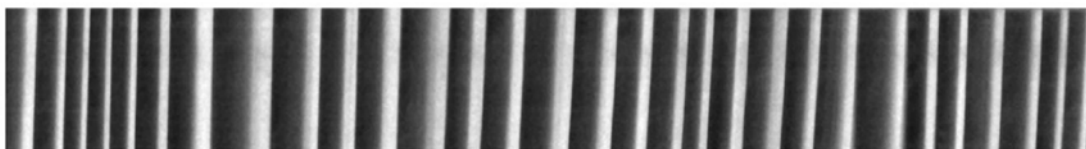
њихово лабораторијско извођење, а налазу даје обележје локалног значаја. С обзиром да се *NIR* спектроскопија примењује и са површине испитиваног узорка дрвета, она је потенцијално и *in situ* изводљива, те би са аспекта овог истраживања такође могла бити механички стандардизована и коришћена за испитивање елемената дрвених конструкција. Приказ *DiscBot* методе истиче суштински принцип замисли функционисања и ове усвојене методе, јер се на том примеру осликава основ могућег корелисања састава дрвета и његових карактеристика.



Слика 2: Примери приказа мапа дрвета које је произвео *Disc Bot* на садржај галктана (Gal), глукозе (Glu), лигнина (Lig), микрофибрила (MFA), густине (DEN), угао зрна (SGA). Извор: Schimleck, L. [et al.], „Non-Destructive Evaluation Techniques and What They Tell Us about Wood Property Variation,” *Forests* 10, 9 (2019): 26. <https://doi.org/10.3390/f10090728>

Тако се помоћу *NIR* спектроскопије регистровањем вибрација хемијских веза главних елемената дрвета визуелизује хемијска структура дрвета, скенирањем правца тока дрвених влаканаца – дрвена грађа, а дензитометријом – густина дрвета. Звучним испитивањем се прорачуном потом долази до динамичког модула еластичности на притисак MOE_{dyn} , односно механичких особина испитиваног узорка дрвета. Тај поступак се изражава помоћу формуле: $MOE_{dyn} = \rho AV^2$ где је MOE – модул еластичности, ρ – густина дрвета, а AV – брзина звучног таласа. *SilviScan* је слично претходном, систем повезаног, аутоматизованог испитивања дрвених узорака, исецаних управно на

прстенове прираста дрвета. У поступку тог испитивања оптички ћелијски скенер (*optical cell scanner*) даје податке о радијалном и тангенцијалном промеру трахеида и дрвних влаканаца, промеру и позицији проводних судова, граничну позицију прстенова прираста и оријентацију прстенова. Рендгенским дензитометром (*x-ray densitometer*) се затим, нијансирано профилише густина дрвне супстанце узорка и даје слика положаја влаканаца и граничног дела прираста у пресеку прстена – года. Рендгенским дефрактометром (*x-ray diffractometer*) се на крају одређује и угао микрофибриларног тока (*mfa*), 3D оријентација трахеида и дрвних влаканаца, као и ширина целулозних кристалита. На основу ових података се у даљем поступку може доћи и до брзине раста и односа раног и касног дрвета у прстену прираста, уздужног сужавања при расту, присуству компресионог и тензионог дрвета, као и до модула еластичности на основу густине дрвне супстанце. Овде треба напоменути да се и NIR спекторскопија повремено изводи у склопу овог система испитивања, када је потребан и хемијски аспект анализе квалитета дрвета. Ово се посебно односи на одређивање садржаја воде, смоле и етеричних уља. Како је дрвна супстанца саздана од једињења четири главна елемента (C, N, H, O), спекторскопија инфрацрвеним зрацима се увек може комбиновати са другим методама и калибрисати. Метод извођења калибрисања светлине рендгенске слике узорка, у оквиру рендген дензитометрије (*x-ray densitometry*) код *SilviScan* испитивања (слика 3), био је својеврсна потврда исправности замисли поставке овог уводног рендген истраживања, те ће из тог разлога тај методолошки поступак детаљније бити размотрен на овом месту.



Слика 3: Композитна слика густине узорка смрче (радијални / уздужни пресек). Осветљеност је пропорционална густини. Извор: Schimleck, L. [et al.], „Non-Destructive Evaluation Techniques and What They Tell Us about Wood Property Variation,” *Forests* 10, 9 (2019): 17. <https://doi.org/10.3390/f10090728>

Интензитет светлине рендгенске слике се тим поступком конвертује у густину дрвета (ρ) модификацијом Ламбер-Беров закона (*Lambert-Beer*), којим путем се до вредности густине дрвета долази на основу полихромазије рендгенског снимка помоћу следеће формуле: $(\rho)=1/\mu_{mt} \times \ln I_0/I$ где је (μ_m) – коефицијент атенуације рендген зрака при проласку кроз дрво, (t) – дебљина испитиваног узорка дрвета, (I_0) – иницијални

интензитет снопа рендгенских зрака, (I) – интензитет снопа рендгенских зрака пропуштених кроз испитивани узорак дрвета. На једном таквом композитном рендгенском снимку интензитет светлине одговара густини снимљене секвенце испитиваног узорка дрвета. Образлагање концепта овог истраживања захтева да се на овом месту као метод недеструктивног испитивања дрвета помене и примена ултразвучних таласа. Због сличног принципа примене у испитивању квалитета дрвета са стрес-звучним таласима, истичемо да се и код коришћења ултразвучних таласа, његова брзина проласка кроз дати узорак, узима као мерило модула еластичности кроз коју пролази. И овде би, према томе, модул еластичности био једнак производу густине испитиваног узорка и квадрата брзине пропуштеног ултразвучног таласа. По тој формули се модул еластичности добија и за многе друге материјале као што су бетон, базалт, керамика. Дрво је међутим, за разлику од од ових материјала, хетеротропан материјал, што подразумева увођење корекција у односу на факторе који су од утицаја на промену густине дрвета. Почетком примене оперативног програма артефицијалне неутралне мреже (ANN), знатно је унапређена могућност предикције у односу на врсту и број података који се узимају у разматрање. Принцип рада овог система своди се на регресиону функцију са циљем да се коначни резултат, модул еластичности, добије у оквиру толерантне грешке. Са аспекта планирања овог истраживања, била је од значаја врста податка која се кроз овај оперативни систем обрађује у оквиру ултразвучног тестирања. Тако се у улазни део (*input layer*) артефицијалне неутралне мреже уносе вредности густине огледног узорка, ширина и дебљина узорка, проценат влажности, брзина пропагације ултразвучног таласа, као и визуелно одређена категорија узорка. У даљем следу, трансформисањем података у регресиону функцију, кроз три нивоа мреже (*sub layer*) се на излазном нивоу (*output layer*) добија корелациони коефицијент датих података и модула еластичности. Статистика истраживања ове врсте (*Sylvatest Duo*) указује на веома ниске регресионе коефицијенте, што доказује релевантан утицај полазних параметара на крајњи резултат. Истраживање у коме су узорци дрвета испитивани *Sylvatest Duo* методом, а затим и механичким тестом на савијање, је показало да су предикциони резултати добијени рачунски, помоћу ANN система, били високо подударни са подацима добијеним деструктивном методом испитивања. Из овога произлази да се механичке особине дрвета као материјала заснивају првенствено на густини дрвне супстанце и да се недеструктивном методологијом испитивања може доћи директно до параметра његове густине. На основу тога се прорачуном може доћи и до вредности модула еластичности. За спровођење овог истраживања било је од

суштинског значаја то што таква корелација постоји и што је предиктивност механичких особина дрвета применом неструктивне методологије могућа. То је наводило на размишљање да потенцијално свака неструктивна метода може бити коришћена за мерење механичких особина дрвета, а да се деструктивна тестирања, која се сада као контролна изводе паралелно њима, могу примењивати за директно корелисање једних и других параметара, односно за баждарење неструктивних метода испитивања дрвета. Генерално се међутим може рећи, да је за сада актуелно мишљење да се неструктивним методама не могу директно мерити механичка својства дрвета, јер тако добијени параметри не корелишу добро са механичком силом. Предикција крајње силе отпорности материјала се, сходно томе изводи из модула еластичности, на основу сигнификантне екстраполације измерених параметара. Успостављање механички баждарене неструктивне методе, за *in situ* испитивање елемената дрвених архитектонских конструкција, било је у домену теорије и уједно велики изазов.

III 2.4. Еквилизација параметара неструктивних метода

Са овог аспекта, успостављање *in situ* неструктивне методе је требало прво да крене, условно речено, међусобним калибрисањем две суштински различите неструктивне методе. При томе би једна била она која се користи за одређивање густине дрвне супстанце, а друга за предикцију механичких својстава дрвета на основу те вредности. У складу са неструктивним концептом истраживања, од интереса је било да се и механичка провера тог поступка изврши без директног коришћења механичке силе. У складу са презентованим карактеристикама метода неструктивног испитивања дрвета, такав поступак могао је бити спроведен применом дензитометрије и мерењем брзине провођења (пропагације) ултразвука. Уместо контролног механичког тестирања екстрахованог узорка дрвета са места примене неструктивних метода, њихова калибрација, сходно задатом услову, могла је да се изведе и апроксимацијом из таблично датих вредности механичких особина за поједине врсте дрвета. На тај начин би се новоуспостављена метода добила претходном еквилизацијом светлосних, ултразвучних и механичких параметара, а сам поступак би се могао применити и на друге неструктивне методе. Задатак ових уводних истраживања био је да се то и докаже.

III 2.4.1. Основни принципи – поступак

Према поставци овог истраживања, механичка својства дрвета се заснивају на густини дрвне супстанце, а то је уједно и принцип функционисања методологије њиховог испитивања. По угледу на методолошку поставку дензитометрије и мерења брзине пропагације ултразвучних таласа код испитивања особина дрвета, вршена су и прелиминарна испитивања дрвета у оквиру поступка успостављања *in situ* методе испитивања квалитета елемената дрвених архитектонских конструкција.

Резултати ових уводних, недеструктивних истраживања узорака дрвета, применом ултразвучних таласа и рендгенских зрака, допринели су повлачењу паралела између механичког и недеструктивног испитивања и стварању концепта овог истраживања базираног на заједничком принципу њиховог функционисања, густини дрвне супстанце. Идеја водила била је та, да се недеструктивне методе којима се испитују еластичне особине дрвета, односно његова чврстоћа, могу механички баждарити и тако омогућити међусобну конверзију (еквализацију) њихових параметара. Тим уводним истраживањима показано је да је такво баждарење могуће извести и да је за то било потребно да техничка примена недеструктивних метода, у свом извођењу такође има извесних сличности са поступком механичког испитивања дрвета – у овом случају одређивањем статичког напона на притисак. Таква могућност нађена је у аналогiji усмеравања механичке силе притиска и усмеравања ултразвучних таласа и рендгенских зрака, паралелно пружању дрвених влаканаца и управно на њих. То је био кључни принцип функционалног повезивања механичке и недеструктивне методологије у поставци овог истраживања. Тим следом ишло се и према хипотетичком у овој поставци – да је могућност еквализације параметара опште применљива, што је био принцип избора методе примене стрес-звучних таласа за успостављање ове усвојене *in situ* методе. Увођење контролног испитивања функционисања методе, општи је принцип научног истраживања, што се у овом случају односило на начин механичког баждарења методе. На принципу заједничког, у функционисању суштински различитих метода, успостављена је и аналогija између директног и индиректног начина баждарења једне недеструктивне методе испитивања дрвета. Тако се у поставци дошло до тога да, ако се спрам густине дрвне супстанце, отпор у дрвету изражава јачином примењене силе, а бројем пиксела, односно брзином ултразвука и стрес-звучних таласа, густина дрвне супстанце, те да је параметре недеструктивних испитивања могуће изразити адекватном величином примењене силе.

Друга врста аналогije у вези баждарења методе, се због сродности ултразвучних и стрес-звучних таласа, односила на сам принцип *in situ* примене методе стрес-звучних таласа истовремено и као контролне методе. Ако је таблично баждарење рендгенских и ултразвучних таласа у овом уводном истраживању било меродавно у оперативном поступку еквализације параметара, онда је и примена механички баждарене методе стрес-звучних таласа, применљива за проверу табличних вредности установљених механичких стандарда, за носеће елементе дрвених конструкција. Разматрање природе ултразвучних таласа, рендген зрака и стрес-звучних таласа, свакако доприноси разумевању такве аналогije, те се из тог разлога оно на овом месту излаже.

III 2.5. Рендгенски зраци

За разлику од ултразвучних, механичких лонгитудиналних таласа, рендгенски или X зраци су електромагнетски таласи. Њихова таласна дужина варира између 0,1–10 nm, а фреквенца им је од 3×10^{16} до 3×10^{19} Hz. Од практичног значаја, поред X треба поменути и γ зраке који због своје портабилне природе и велике продорности (најмања таласна дужина) налазе примену у *in situ* испитивању квалитета дрвета. У физичком смислу иначе нема разлике између ове две врсте зрака. Ови зраци поседују велику енергију и због тога имају јонизујућу моћ. Њихова енергија се може изразити математичком формулом: $E = hc/\lambda$, где **h** представља Планкову константу (*Planck's constant*), **c** – брзину светлости, а λ – таласну дужину. Они су електрички поларизовани, а тиме и електромагнетски активни. X зраци настају када високоенергетски снап произведен у специјалним вакумским цевима, на негативној електроди – катоди, погоди површину позитивне електроде – аноде. За разлику од њих, γ зрци настају интеракцијама субатомских честица и за њихову генезу није потребна тако сложена опрема. Део овог уводног истраживања спроведен је у кабинету за медицинску рендген дијагностику, где је оштрина рендгенске слике од примарног дијагностичког значаја. За постизање тог квалитета слике потребно је прецизно подешавање ширине фокуса – места на аноди на које се усмерава електронски снап. За проучавање дрвне структуре (рефрактометрија) или за одређивање густине и влажности (дензитометрија), као и за детекцију грешака и оштећења дрвног материјала, у пракси се иначе користе рендгенски зраци јачине 20 mA и волтаже 35kV и дигиталне CCD (*charge-couple-device*) камере, оптичке резолуције 1392x1040 pix. са аутоматским анализатором слике. Интересантно је овде напоменути да су била

извођена и испитивања механичких својстава дрвета, али је озрачивање огледних узорака вршено употребом продорнијих γ зрака, при чему је нађено да након примене њихове велике дозе (10 kGy) долази до израженог пада напона на затезање и пада мањег степена напона на притисак. Највеће затамњење рендгенске слике огледних узорака дрвета добијено је употребом X зрака највеће јачине и волтаже (20 mA–35kV), што указује на то да би механичка својства дрвета могла да се и на овај начин процењују. Рендгенска слика каква се среће у медицинској пракси је у ствари пројекција сликаног објекта, и то је, када је реч о испитивању дрвета, било извесно ограничење структуралне детекције. Како је уводно истраживање имало за циљ потврду могућности директног баждарења рендген методе, тако је и модификована дензитометрија зависила од оптичких феномена, чији је утицај на изглед рендгенске слике требало узети у обзир приликом процене.

Настанак рендгенске слике подлеже законима оптике, те су тиме примарно потенцирани ефекти конусне пројекције, али и светлосни феномени настали апсорпцијом и атенуацијом зрака, према већ поменутом закону (*Lambert-Beer*). Зависно од упадног угла зрака, пројектована слика даје објекту другачији изглед од стварног, али су структуралне процене свакако значајније лимитиране суперпонирањем материјалног одраза на рендгенској слици, сходно распореду његове густине.

Простирање зрака је радијално и праволинијско и са тог аспекта рендгенска слика је аналогна светлосној слици, али је због суштинских различитости међу њима, њена интерпретација другачија. Када је о рендгенској слици реч, она, са фотографског аспекта представља негатив онога што се види на екрану. Због законитости апсорпције, она је сумарна пројекција свих слојева на путу проласка X зрака и њене специфичности су резултат такозваног феномена слојева. На ово губљење јасноће слике се, према томе, може гледати слично као и на промене упадног ултразвучног таласа, услед његовог слабљења, а приликом проласка кроз структуру дрвета.

Особеност рендгенског зрачног снопа је та да га чине зраци различитих таласних дужина. При проласку зрачног снопа кроз нехомогену структуру, то се одражава како величином, обликом и положајем, тако и контуром и тамнином слике снимљених елемената. Наведени ефекти дефинисани су, пре свега растојањем фокуса и филма, затим растојањем објекта и филма, упадним углом централног зрака према објекту и филму, и на крају обликом и положајем објекта у простору, односно према пројекцијској равни. Са аспекта овог уводног истраживања, тај однос централног зрака и пројекцијске равни је правац усмерења рендген зрака у односу на анатомски правац

тока дрвних влаканаца, аналогно усмерењу силе притиска при одређивању статичког напона на притисак. То уводно истраживање је показало да ефекат конусног деформисања периферних делова слике није дошао до изражаја, јер је поставка била малих димензија и груписана у средишту пројекционе плоче, при чему је фокус према медицинским критеријумима био постављен на оптималних 114 cm. За детекцију и димензионисање промена како у хуманој дијагностици, тако и код испитивања унутрашње структуре дрвета, најважнија је резолуција, а код рендгенографије оштрина слике. Оштрину рендгенске слике у бити дефинишу фактори геометријске пројекције, као и грађа самог објекта. На оштрину рендгенске слике, према томе, првенствено утичу величина фокуса цеви, растојање фокуса и објекта (F–O), растојање објекта и пројекцијске равни (O–Pr), упадног угла централног зрака (CZ) на пројекциону раван, просторни однос равни објекта према пројекционој равни, грађа сликаног објекта. Сходно томе, недовољно оштра рендгенска слика изражена је геометријском законитошћу, према којој је њен степен директно пропорционалан величини фокуса и O–Pr растојању, а обрнуто пропорционалан F–O растојању. Приказ перфорција начињених на епруветама коришћеним у уводном истраживању је имао већу оштрину када су се оне налазиле на врху, него када су се налазиле у средини или на дну шпила, непосредно на пројекционој плочи – што је ипак пре био ефекат апсорпције и дифракције, него пројекције. Суштински, овде је од примарног интереса поред светлине била и тамнина слике, јер интензитет затамњења, као што је раније показано, не одражава само распоред густине дрвне супстанце, већ и јачину рендгенских зрака којима се снимање врши.

Тамнина слике је рендгенографска карактеристика, која је такође репрезент закона апсорпције и директно одражава густину дрвне супстанце. У складу са законитостима физике, тамнина слике ће бити већа што је објекат ближи пројекцијској равни, односно филму. Исти је случај и када је густина објекта већа, односно ако је атомска тежина његовог елементарног састава већа, као и онда, када се повећава јачина протока у електронској цеви изражено у mAs, што се потврдило и овим уводним истраживањем – с напоменом, да се материјална целина на рендгенском снимку приказује у негативу. Разлика између максималне светлине и максималне тамнине чини контрастну ширину рендгенограма, која је веома битна за видљивост детаља слике. Према томе, уочавање контраста је условљено постојањем међусобно додирних структуралних целина – односно распоредом густине дрвне супстанце различитог степена апсорпције, што се такође показало уводним истраживањем. Иако је визуелно налаз овог истраживања био

потпуно убедљив, у погледу потврде принципа функционалне поставке калибрисања рендгенографске методе, интерпретација светлине рендгенске слике морала је имати нумеричко обележје, да би се у даљем поступку могла екстраполирати у параметре механичких особина дрвета. Аналогно увођењу CCD камере код дензитометријске методе, у оквиру уводног истраживања је на једном дигиталном снимку пробно тестирали софтверски програм *Osirix*, који је задовољавао критеријуме задате поставке. То је била још једна потврда ваљаности аналогне могућности извођења еквивалације параметара паралелног тестирања дрвета, механичким и недеструктивним путем. Из овога је даље следило да је следећи корак у развоју методе рендгенског *in situ* испитивања механичког потенцијала дрвета, осим техничког унапређења рендген апаратуре, условљен и усавршавањем аналитичког програма објективизације налаза.

III 2.6. Ултразвучни таласи

Испитивање квалитета дрвета се применом ултразвучних таласа врши на основу његове пропагационе брзине кроз испитивану структуру. Промена брзине ултразвучних таласа, аналогно промени светлине рендгенске слике, одражава распоред густине скениране материјалне средине. За разлику од рендгенског испитивања квалитета дрвета, ултразвучним испитивањем се помоћу формуле може доћи до модула еластичности дрвета, односно до његових механичких потенцијала. Идући том логиком дошли смо до хипотетичке поставке принципа заједничког именитеља у методологији испитивања дрвета. Доказивањем те поставке, показало би се да различите методе, на јединствен начин могу дефинисати различита својства дрвета. У том светлу се овде разматрају природа и функционална својства ултразвучних таласа. Звук је вид механичке енергије која се у виду таласа простире кроз материјалну средину, наизменичним згушњавањем и разређивањем њихових честица. Звучни талас се приказује у облику синусоиде, чији позитиван отклон одговара максималној, а негативан минималној густини честица материје. Ово је опште познати принцип функционисања методе примене ултразвука, који се односи и на испитивање дрвета, иако је оно због своје хетерогености врло специфичан материјал. Растојање између два суседна отклона, позитивног и негативног, претставља таласну дужину која се конвенционално означава се грчким словом (λ). Важно је овде истаћи да је таласна дужина од директног утицаја на резолутност ултразвучне методе, што значи да

непосредно одређује њену сензитивност, тако да детекција промене у структури није могућа ако је њена величина двоструко мања од величине таласа примењеног ултразвука. Број таласних дужина у 1 секунди представља фреквенцу звука (**f**), која се изражав бројем херца (**Hz**). Према томе, фреквенца од 1 Hz означава један циклус у 1 секунди. Повећавањем фреквенце се међутим, губи продорност ултразвучног таласа због његове све веће атенуације, продужењем времена протока. Паралелизам између електромагнетских и механичких таласа, који се у поставци овог истраживања објашњава заједничким принципом различитих метода испитивања дрвета, сходно овом податку, заснован је на физичком закону простирања таласа. Ултразвук је део звучног спектра изнад прага чујности људског уха, фреквенце изнад 20000 Hz. У уводном истраживању, за испитивање механичких потенцијала дрвета, коришћен је ултразвук фреквенце 50000Hz (50KHz). Као извори ултразвука користе се пиезоелектрични кристали, који претварају електрични напон у механичку енергију и обрнуто. Смештени у сондама, служе и као извор и као пријемник ултразвучних таласа. Такав пулсни принцип рада се заснива на врло краткој активацији кристала електричним напоном и стварању ултразвучног импулса, а одмах затим на њиховој пријемној трансформацији, што се дешава у интервалима од по једне микросекунде. Ту промену изазивају одбијена еха стварајући у кристалу електрични напон. Репетитивна моћ стварања импулса у кристалу, изражена је брзином таквог понављања и креће се у распону од 500 до 5000 у једној секунди. Према Фреснеловом закону (*Fresnel law*) о таласном кретању, простирање ултразвука кроз исту средину је увек исте брзине, која је одређена њеним еластичним особинама, односно њеном густином. Промена брзине ултразвучних таласа би према томе, указивала на промене у структури дрвета. Пад брзине пропагације ултразвучних таласа би сходно томе указивао на пад механичких потенцијала дрвета. Тако према објављеним подацима, пад брзине ултразвучних таласа за 30% указује на пад чврстоће дрвета за 50%, док пад брзине од 50% говори о јако пропалом дрвету. Брзина пропагације ултразвука кроз дрво се према тим подацима у лонгитудиналном правцу креће од 3500–5000 m/s, док је у радијалном правцу она знатно мања и износи од 1000–1500 m/s.⁶⁰ Резултати испитивања дрвета, добијени на огледним епруветама у уводном истраживању, указали су међутим, на променљивост

⁶⁰R. J. Ross, *Nondestructive Testing for Assessing Wood Members in Structures : a Review*. (Madison: U.S. Department of Agriculture Forest Service Forest Products Laboratory, 1991), 22.

брзине ултразвука, не само дуж различитих анатомских праваца тока дрвних влаканаца, већ и дуж једног истог правца. То је указивало на промену распореда густине дрвета с обзиом на опште правило да је брзина простирања ултразвука кроз неку средину једнака производу његове фреквенце и таласне дужине, из чега даље произлази, да је таласна дужина обрнуто пропорционална фреквенци ($V=\lambda \text{ ф}$). Ово уводно истраживање је такође показало да се хетерогеност и анизотропност дрвета применом ултразвука јасно испољавају, чиме је и са наше стране била потврђена корелативност брзине ултразвука и механичких особина дрвета. Како се простирање и електромагнетских и механичких таласа објашњава истим физичким законом, јасно је онда да се и приказивање хетерогености и анизотропности дрвета, њиховом применом, дешава по истом принципу. Слабљење почетне енергије таласа проласком кроз материјалну средину је феномен физичке природе и својствен је како за механичке, тако и за електромагнетне таласе. Када на свом путу наиђе на границу двеју средина различитих густина, један део ултразвучног таласа се одбија од њихове међуповршине (када је реч о рефлексији), док други део наставља пут под истим или другим углом. Ако дође до промене угла путање, реч је о ломљењу таласа, односно рефракцији. Са равне површине, ултразвучни талас се одбија под истим углом под којим на њу наилази, а колики део таласа ће се одбити, зависи како од особина средине, тако и од упадног угла. Наилажењем на неравну површину долази до расипања ултразвучног таласа. Оно што је заједничко и механичким и електромагнетним таласима је то, да пролажењем кроз материјалну средину талас губи своју енергију и постепено слаби, односно долази до његове атенуације. Енергија ултразвучног таласа се према томе, слично као и код рендгенских зрака, губи због његовог расипања, апсорбовања честица материје кроз коју пролази, или због појаве ширења, односно дивергенције – када се ради о ултразвучном снопу. Због ових дешавања, енергија упадног таласа је све мања, мерено од његовог извора, те се атенуација изражава растојањем од извора на коме је енергија таласа сведена на половину почетне. Ово слабљење таласа или атенуација, зависи како од карактеристика самог таласа, тако и од густине, односно еластичних својстава средине кроз коју пролази. За разлику од здравог дрвета, пад снаге таласа се код пропалог дрвета дешава тренутно, наилазком на место оштећења. Апсорпција је пропорционална фреквенци упадних таласа, из чега произлази да ултразвук мање фреквенце, слично рендгенским зрацима, има већу енергију, а тиме и већу продорност. На принципу одбијања ултразвука од препреке и детектовањем тог еха, уз познату брзину његовог простирања кроз одређену средину, мери се и удаљеност препреке од

које се улразвучни талас рефлектовао. На основу изнетих података, могло се закључити, да су функционални принципи рендген дијагностике, која детектује густину дрвне супстанце и улразвучне дијагностике, која на основу те густине, одражава механичке потенцијале дрвета, врло слични. Ако се при томе узме у обзир и то да су стрес-звучни таласи и улразвучни таласи по својој припадности звучном спектру сродни, онда је исправна и ова хипотетичка поставка о могућој еквилизацији њихових параметара, према оперативном принципу који узима густину као заједнички именоватељ. Из тога даље следи, да се параметри неструктивних метода испитивања дрвета, које се могу усмеравати аналогно испитивању применом механичке силе, могу директно конвертовати у механичке параметре.

III 2.7. Стрес-звучни таласи

Како до сада још увек није успостављена директна корелација између стрес-звучних таласа и механичких потенцијала дрвета, за нас је успостављање *in situ* методе таквих карактеристика био велики изазов. Ови таласи се већ дуго примењују у шумарству за испитивање квалитета стојећих и оборених стабала, што је такође била предност – с обзиром на то да је испитивање требало да се врши на масивним носећим елементима дрвених архитектонских конструкција. Стрес-звучни таласи су чујни и они припадају опсегу до 20000 Hz, за разлику од улразвучних таласа чија је фреквенца изнад те границе. Сама техника стварања ових таласа је врло једноставна и изводи се ударом чекића или неког тупог предмета у правцу тока дрвених влаканаца (лонгитудинално) или управно на њих (трансверзално). Детекција таласа и мерење времена њихове пропагације се при томе врши помоћу два акцелерометра који могу бити импактирани у дрво или прислоњени на његову површину са супротних предметних страна. Импактни апарати поседују интерни акцелерометар, који, када се на месту инпакције ударом изврши индукција, укључује тајмер, који се искључује онда, када акцелерометар на супротној страни региструје таласни фронт. Њихово преношење врши се осциловањем партикула унутрашње структуре којима се сударају и предају им своју енергију. Начин осциловања партикула зависи од усмеравања стрес-звучних таласа, тако да оно може бити лонгитудинално, када честице осцилују у правцу простирања таласа, док трансверзално усмеравање таласа доводи до осциловања честица, управно на правац његовог простирања. Звучне таласе, исто као и улразвучне, карактерише њихова фреквенца и таласна дужина. Као што је већ било

речено, фреквенцу дефинише број осцилација у јединици времена, док таласну дужину означава трајање једне осцилације. И у овом случају, као и код ултразвука, важи правило да је однос фреквенце и таласне дужине обрнуто пропорционалан, из чега произлази да се повећањем фреквенце смањује таласна дужина и обрнуто. Однос брзине и фреквенце звучног таласа исказује се истом математичком формулом као и код ултразвука: $\lambda = V / f$. Брзина и атенуација су, као и код ултразвука, значајни параметри калкулације при евалуацији резултата добијеним овом методом испитивања квалитета дрвета.⁶¹ Према математичкој формули, брзина стрес-звучног таласа (V) добија се из количника пређене дужине растојања (L) и времена (T) које је при томе протекло: $V = L / T$. Механичке особине се затим процењују путем корелисања модула еластичности на основу измереног времена пропагације таласа, или на основу израчунате брзине. Пошто је дрво по својој хетерогености и анизотропности врло специфичан материјал, формула која за израчунавање динамичког модула еластичности, осим густине дрвне супстанце, укључује и Поасонове коефицијенте (ν – *Poisson's ratio*), прави је репрезент пропагације таласа у тродимензионалном оквиру и има следећи облик: $MOE_{dyn} = \rho AV^2 * [(1 + \nu) (1 - 2\nu) / (1 - \nu)]$. Да би се сада, након одређивања модула еластичности, успоставила корелативност са механичким својствима дрвета, као могућност остаје емпиријско корелисање на основу механичког испитивања узоркованог материјала. Из овога следи да ће степен овакве корелативности зависити од броја узетих узорака, јер се на основу тих појединачних резултата тестирања врши предикција механичких особина за цео испитивани елемент. Објављени резултати испитивања дрвета применом стрес-звучних таласа указују на добру корелативност вредности динамичког и статичког модула еластичности, док је она између статичког модула еластичности и механичких својстава знатно нижа, што индицира на нетачну процену механичких својстава дрвета. Са аспекта овог истраживања, успостављање *in situ* методе испитивања елемената дрвених конструкција, захтевало је решавање управо овог проблема. Степен слабљења стрес-звучног таласа се такође може користити као показатељ квалитета дрвета и у корелацији је са механичким потенцијалом дрвета. Изражава се природним логаритмом опадања амплитуде путујућег стрес-звучног таласа по јединици дужине пређеног растојања, путем следеће једначине: $\alpha = 1/x \ln A_0 / A_x$, где је α – фактор атенуације, l – дужина пропагације таласа, A_0 – почетна амплитуда таласа и A_x –

⁶¹Bucur, V., and F. Feeney. „Attenuation of Ultrasound in Solid Wood.” *Ultrasonics* 30, 2 (1992): 76–81.

амплитуда таласа у тачци x на крају растојања l .⁶² Други вид испитивања дрвета применом стрес-звучних таласа је откривање промена у његовој структури помоћу спектралне анализе, слично структуралном скену код ултразвучног испитивања.⁶³ На основу изнетих подударности са начином примене ултразвучних таласа, могло се закључити да је принцип директног баждарења методе и у овом случају реално изводљив. Како до сада није било таквих истраживања, метода примене стрес-звучних таласа је изабрана за успостављање *in situ* методе испитивања елемената дрвених архитектонских конструкција.

⁶²R. Ross [et.al] „The Relationship Between Stress Wave Transmission Characteristics and the Compressive Strength of Biologically Degraded Wood.” *Forest Products Journal* 47, 5 (1997): 89–93.

⁶³R. F. Pellerin, R. Degroot, and G. Esenther. „Nondestructive Stress Wave Measurements of Decay and Termite Attack in Experimental Wood Units.” In *Proceedings of the 5th Nondestructive Testing of Wood Symposium* (Washington: USDA Forest Products Laboratory, 1986), 319–352.

IV ПРЕЛИМИНАРНА ИСТРАЖИВАЊА

IV 1.1. Приказ прелиминарних истраживања

Недеструктивно испитивање механичких особина дрвета је посебно значајно за припрему и планирање рестаураторских радова на архитектонским објектима који имају дрвену конструкцијску грађу. Дијагностиковање смањења чврстоће елемената дрвених конструкција, на граници пропорционалности, или скривених оштећења у њиховој структури, омогућило би благовремено санирање објеката, чиме би се избегло изненадно ремећење носивости конструкцијског склопа и његово урушавање. Редовна систематска дијагностика би, према томе, била предуслов очувања постојаности и аутентичне спољашњости објеката који се базирају на дрвеним конструкцијама. Почетак рестаурације у тренутку појаве видљивих деформација или оштећења на носећим елементима дрвених конструкција по правилу захтева велике радове на објекту, што условљава њихово дуготрајно извођење, а сходно томе и знатна финансијска улагања. Правовремено, недеструктивно откривање потенцијално слабих тачака дрвеног конструктивног склопа и њихово циљано санирање, било би од посебног значаја, пре свега за објекте од културно-историјског значаја, јер се код њих, као основни предуслов таквог подухвата, захтева очување њихове интегралне целовитости и аутентичности. Планирање рестаурацијских радова таквих објеката, подразумевало би, према томе, *in situ* примене недеструктивне дијагностичке методе.

Циљ рада је био да се процени могућност успостављања једне такве методе испитивања дрвене конструкцијске грађе, првенствено на објектима културно-историјског значаја. Овакав приступ би омогућио планску обнову, како ових тако и свих других архитектонских објеката који имају дрвену конструкцијску основу.

Први корак ка томе је да се аналогно деструктивном одређивању механичких карактеристика дрвета, а тиме и његове грађевинске примене, спроведе ултразвучно и рендгенско испитивање узорака дрвета познатих механичких карактеристика.

Истраживачки циљ је био доказивање основне хипотетичке поставке да дрво веће чврстоће брже проводи ултразвучне таласе и даје светлију рендгенску слику, те према томе и успостављање зависности механичких параметара својстава дрвета и физичких величина, које је могуће недеструктивним методама аналогно томе измерити и величина које се из њих могу даље изводити.

Како ултразвучна дијагностика није специфична само за испитивање механичких особина дрвета, а рендгенска метода се за то директно и не користи, доказивање основаности њихове примене у ту сврху, потврдило би и могућност успостављања нове методе – *in situ* испитивања елемената дрвених конструкција.

Методолошки концепт овог истраживања заснива се на томе да су механичка својства дрвета одраз његове густине, односно садржаја дрвне супстанце у саставу механичких влаканаца. Како је дрво хетерогене грађе и при оптерећењу анизотропног понашања, то је приступ истраживању био усмерен на испитивање у односу на распоред механичких влаканаца у грађи прстена прираста (год), специфично за врсту, као и генерално у односу на усмереност њиховог тока, спрам анатомских праваца дрвета. Гледано са аспекта дијагностике, методолошки приступ био је усмерен тиме да се ултразвучни таласи по својој природи брже простиру кроз гушћу средину, а да рендгенски зраци теже кроз њу продиру. Из овога произлази да је могуће недеструктивним путем, без примене механичке силе, доћи до механичких својстава дрвета, јер се на густини дрвне супстанце заснивају и механичко својство и функционални принцип недеструктивне дијагностике. У овом истраживању су рендгенски и ултразвучно вршена испитивања чврстоће дрвета, аналогно испитивању статичког напона на притисак, које се стандардно врши применом силе притиска. Главна поставка овог истраживања била је да ће дрво у правцу веће чврстоће брже пропуштати ултразвучне таласе и дати светлију рендгенску слику, а да ће се то показати и при апроксимацији механичких својстава експерименталних узорака дрвета – њиховим табеларним вредностима. Узимајући у обзир анизотропност дрвета, да је чврстоћа дрвета сходно општем испољавању механичких својстава највећа паралелно току дрвених влаканаца, а сразмерно мања управно на њих, испитивање је вршено усмеравањем рендгенских зрака и ултразвучних таласа у правцу аксијалне, радијалне и тангенцијалне анатомске осе експерименталних узорака дрвета. Могућност недеструктивног испитивања структуралних оштећења дрвета, тражена је путем перфорисања једног броја епрувета. Како прекомерно повећање температуре и влажности ваздуха могу негативно утицати на промену густине дрвета, а тиме и на његова механичка својства, овде се, при испитивању дрвета примарно водило рачуна о овим утицајима тако што су епрувете израђиване од резане грађе, а затим и испитиване под једнаким спољним условима. У овом истраживању испитивани су узорци наших врста дрвета, четинара, прстенасто порозних лишћара и дифузно порозних лишћара. То је учињено тако што су прво, за

ултразвучно испитивање, из сваке групе узети узорци (епрувете) по два примерка са табеларно датом, највећом и најмањом средњом вредношћу коефицијента статичког напона на притисак израженом у МРа и вредношћу њихове густине у просушеном стању дрвета. Затим су те исте епрувете и рендгенски испитиване, само што су сада у односу на врсту дрвета, биле индексиране и вредношћу статичког напона на савијање, израженом у МРа. Узето је у обзир да „влажност до тачке засићености дрвних влаканаца има негативан утицај на напон на притисак и у том подручју влажности, сваким процентом њеног повећања, напон на притисак се смањи за 4%”⁶⁴

Задаци рада:

1. Доказивање хипотезе да брзина проводљивости ултразвучних таласа и пропусност рендгенских зрака кроз дрво зависе од његове густине, односно чврстоће, те да дрво веће чврстоће брже проводи ултразвучне таласе и даје светлију рендгенску слику.
2. Доказивање хипотезе да дрво због своје анизотропности, аналогно својим механичким потенцијалима, неједнаком брзином проводи ултразвучне таласе и у различитом степену пропушта рендгенске зраке дуж својих анатомских оса.
3. Доказивање хипотезе да су величина брзине проласка ултразвука кроз дрво и степен светлина рендгенске слике дрвета, еквивалентне вредности његовог статичког напона на притисак, која је највећа код усмеравања силе притиска паралелно току његових механичких влаканаца, а мања управно на њих у радијалном и тангенцијалном смеру.
4. Доказивање хипотезе да величина проведене брзине ултразвука кроз дрво и степен светлине рендгенске слике дрвета, еквивалентно механичким особинама, директно одражавају степен анизотропије у односу на његову структуралну грађу, те да су најмање разлике у брзини и светлини слике, у односу на анатомски правац тока влаканаца, код дифузно порозних лишћара.
5. Доказивање хипотезе да се на основу брзине пропуштених ултразвучних таласа кроз дрво и светлине његове рендгенске слике долази до односа између статичког напона на притисак и статичког напона на савијање, еквивалентно његовом механичком потенцијалу.

⁶⁴Б. Шошкић и З. Поповић, *Својства дрвета* (Београд: Шумарски факултет Универзитета у Београду, 2002), 194.

6. Доказивање хипотезе да се на основу брзине пропуштених ултразвучних таласа кроз дрво као и на основу светлосних контраста рендгенске слике дрвета, могу детектовати механички потенцијали грешке и структуралних оштећења.

IV 1.2. Ултразвучно испитивање

IV 1.2.1. Метод рада

Свака врста дрвета била је за ово испитивање заступљена са по две епрувете – једна паралелног тока влаканаца дужи оси, а друга управног тока влаканаца на дужу осу. Управно сечена епрувета била је перфорирана кроз средину дуже стране у радијалном смеру чиме је симулирана деградација, односно оштећење дрвета. Баждарење епрувета вршено је апроксимативно, на основу референтне табеле максималних статичких напона на притисак, паралелно току дрвних влаканаца по Угољеву.⁶⁵ Према тој табели, вредности статичког напона на притисак (σ) за дату врсту дрвета, дате су у распону од минималне, средње до максималне вредности изражене у МПа. Узимајући у обзир да се радило о апроксимативном баждарењу, најприхватљивије је било да се користе средње вредности статичког напона на притисак. Држећи се концептуалне поставке истраживања да је чврстоћа дрвета примарно одређена густином дрвне супстанце уз вредности статичког напона на притисак, усвојене су вредности густине (ρ) према релевантној литератури.⁶⁶

Први скуп су чиниле епрувета дифузно порозних лишћара, **букве** (минималне вредности статичког напона на притисак σ_{\min} – 41 МПа, **средње вредности статичког напона на притисак σ_n – 62 МПа**, максималне вредности статичког напона на притисак σ_{\max} – 99 МПа) густине ρ – 720 g/cm³ у просушеном стању и **тополе црне** (минималне вредности статичког напона на притисак σ_{\min} – 26 МПа, **средње вредности статичког напона на притисак σ_p – 35 МПа**, максималне вредности статичког напона на притисак σ_{\max} – 56 МПа) густине ρ – 450 g/cm³.

Други скуп је био сачињен од епрувета прстенасто порозних лишћара, **багрема** (минималне вредности статичког напона на притисак σ_{\min} – 56 МПа, **средње вредности статичког напона на притисак σ_p – 73 МПа**, максималне вредности статичког напона на притисак σ_{\max} – 96 МПа) густине ρ – 770 g/cm³ и **храста лужњака** (минималне

⁶⁵ Б. Шошкић и З. Поповић, *Својства дрвета* (Београд: Шумарски факултет Универзитета у Београду, 2002), 190.

⁶⁶ Ibid., 281.

вредности статичког напона на притисак σ_{\min} – 54 МПа, **средње вредности статичког напона на притисак σ_p – 61 МПа**, максималне вредности статичког напона на притисак σ_{\max} – 67 МПа) густине ρ – 690 g/cm³.

Трећи скуп су чиниле епрувете **бора** обичног (минималне вредности статичког напона на притисак σ_{\min} – 35 МПа, **средње вредности статичког напона на притисак σ_p – 55 МПа**, максималне вредности статичког напона на притисак σ_{\max} – 94 МПа) густине ρ – 510 g/cm³ и **јеле** (минималне вредности статичког напона на притисак σ_{\min} – 31 МПа, **средње вредности статичког напона на притисак σ_p – 47 МПа**, максималне вредности статичког напона на притисак σ_{\max} – 59 МПа) густине ρ – 450 g/cm³.

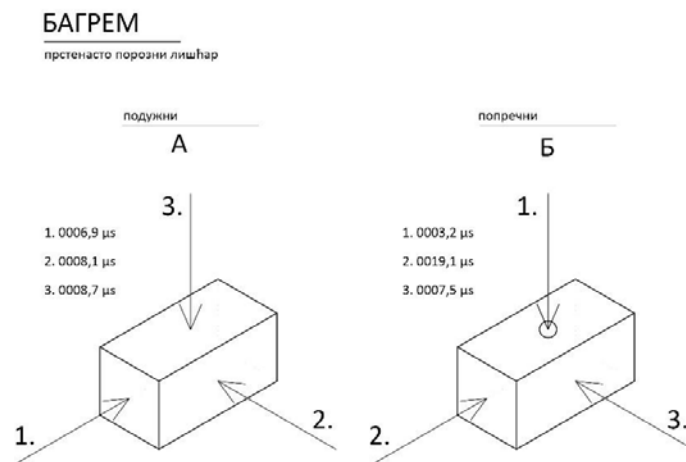
Епрувете контролног скупа биле су од **кестена** који припада врсти прстенасто порозних лишћара, при чему се није тачно знало којој врсти кестена припада сортимент од кога су били израђени узорци, због чега је њихово испитивање и узето као контролно. На основу брзине ултразвучних таласа измерених код узорака кестена (ρ – 620 g/cm³) требало је, поређењем са брзинама измереним код узорака исте врсте лишћара (багрема и храста) добити његову приближну вредност статичког напона на притисак, чиме би се одредило којој врсти кестена припадају узорци – дивљем или питомом. Овакво поређење било је могуће, јер су огледни примерци припадали врсти једричавог дрвета, где се према њиховој грађи очекивало слично варирање густине дрвне супстанце. Други разлог одабира дрвета кестена био је тај што су контролне епрувете биле исецане од остатака греда манастира Хиландар, за које се зна да су веома старе. Трећи разлог за исецање епрувета од старог дрвета био је сагледавање реолошког утицаја на механичка својства дрвета. Епрувете су биле стандардних димензија 20x20x40 mm (JUS D.A1.045) за одређивање напона на притисак, паралелно току влаканаца. До извођења испитивања, епрувете су држане на сувом месту и на собној температури.

Ултразвучно испитивање квалитета механичког својства дрвета, вршено је аналогно одређивању напона на притисак (чврстоћа дрвета), усмеравањем ултразвучних таласа паралелно току влаканаца – у аксијалном правцу и управно на ток влаканаца – у радијалном и тангенцијалном правцу епрувета. Испитивање је вршено ултразвучним таласом фреквенце 55 kHz, помоћу грађевинског ултразвучног апарата са две сонде, од којих је једна емитер, а друга пријемник таласа, при чему су оне апликоване на супротне паралелне стране призматичне епрувете. Резултати мерења су читавани у

временским јединицама (μs) које су затим према табеларним вредностима, претваране у механичке коефицијенте (МРа)

IV 1.2.2. Резултати и дискусија

Брзина проласка ултразвучних таласа била је већа кроз дрво веће густине у просушеном стању и сразмерно томе, његовој већој чврстоћи. Тако су код епрувета **прстенасто порозних лишћара**, паралелно току влаканаца дужој осе, највеће брзине ултразвука забележене његовим усмеравањем дуж аксијалне осе, а градуелно мање, у радијалном и тангенцијалном смеру.



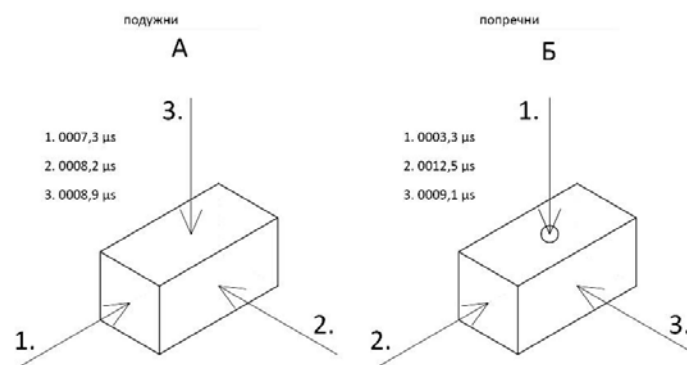
Слика 4: Епрувете багрема: А) подужни профил епрувета – аксијална оса (1) паралелна дужој страни паралелепипеда, радијална оса (3), тангенцијална оса (2); Б) попречни профил епрувета – аксијална оса (1.) управна на дужу перфорирану страну паралелепипеда, радијална оса (2), тангенцијална оса (3).

Код **багрема** вредности брзина су износиле: 1) аксијално – 6,9 μs ; 2) радијално – 8,1 μs ; 3) тангенцијално – 8,7 μs (слика 4А, слика 6), док су код **храста** оне биле: 1) аксијално – 7,3 μs ; 2) радијално – 8,2 μs ; 3) тангенцијално – 8,9 μs (слика 5А, слика 6).

Испитивањем епрувета багрема и храста управног тока влаканаца у односу на дужу осу, перфорираних на средини дуже стране, код **багрема** су забележене следеће брзине ултразвука: 1) аксијално – 3,2 μs ; радијално – 7,5 μs ; тангенцијално – 19,1 μs (слика 4Б, слика 7), док су код **храста** оне износиле: 1) аксијално – 3,3 μs ; 2) радијално – 9,1 μs ; 3) тангенцијално – 12,5 μs (слика 5Б, слика 7).

ХРАСТ

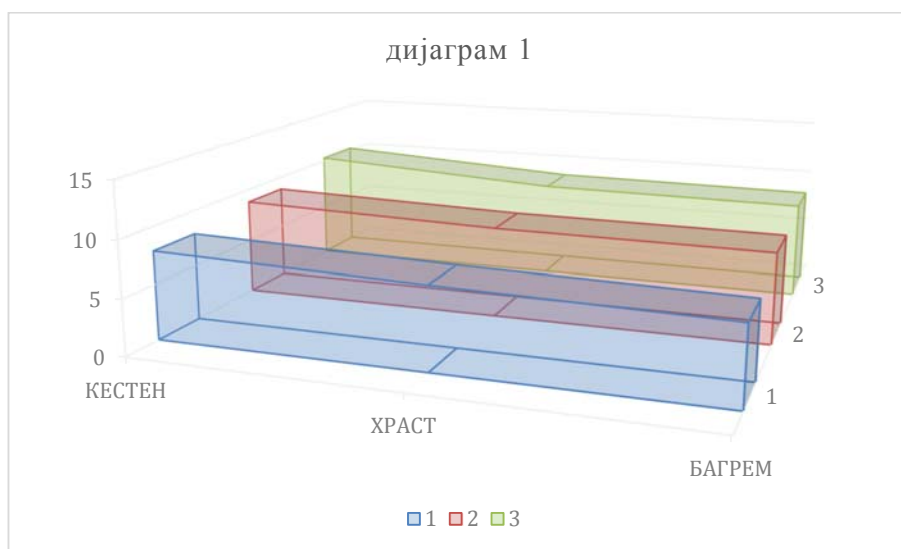
прстенасто порозни лишћар



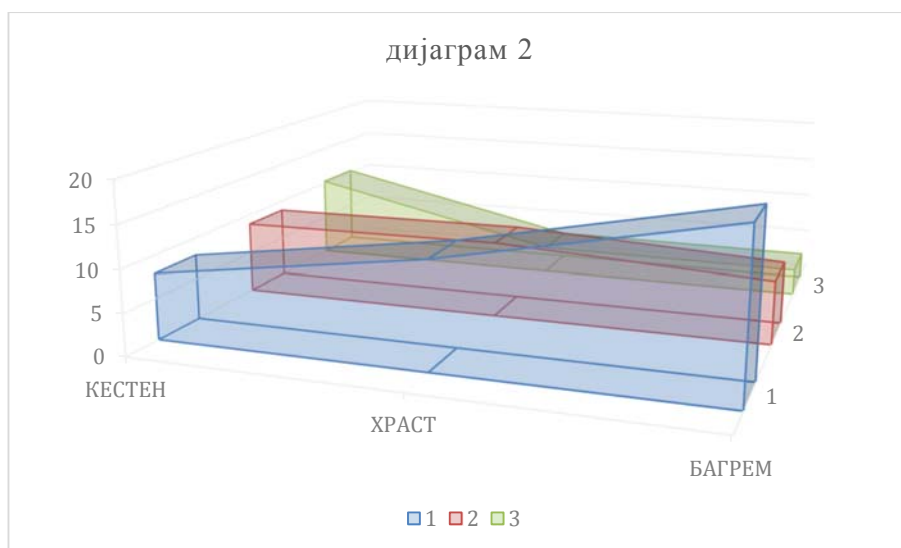
Слика 5: Епрувете храста: А) подужни профил епрувета – аксијална оса (1) паралелна дужој страни паралелепипеда, радијална оса (3), тангенцијална оса (2); Б) попречни профил епрувета – аксијална оса (1.) управна на дужу перфорирану страну паралелепипеда, радијална оса (2), тангенцијална оса (3).

Код епрувета ових лишћара, паралелног тока влаканаца дужој оси, биле су регистроване брзине у складу са просечном густином епрувета у просушеном стању дрвета и распоредом густине, као и у односу на механичке потенцијале дуж анатомских праваца тока дрвних влаканаца. Брзине ултразвука биле су највеће дуж аксијалне осе, нешто ниже у радијалном, а најниже у тангенцијалном смеру, што је било подударно односима вредности статичког напона на притисак, који карактеришу анизотропију дрвета. Брзине ултразвука код перфорираних епрувета, управног тока влаканаца на дужу осу, осим једног изузетка, пратиле су тренд кретања брзина уочен код уздужно сечених епрувета. Код перфориране епрувете багрема у радијалном смеру, је неочекивано била регистрована већа брзина, у односу на ону, која је била измерена код уздужно сечене епрувете. Управно исецање епрувета није стандардно, већ је било примењено због потреба овог истраживања, а у радијалном смеру је због тога могло доћи до нарушавања природног односа густине, гледано у односу на грађу прстена прираста, чиме би се овај парадокс могао објаснити. Брзине ултразвука у аксијалном смеру код ових епрувета биле су нешто веће, а у тангенцијалном смеру знатно веће него код уздужно сечених епрувета. Узимајући у обзир да код управно сечених епрувета, у аксијалном смеру влаканаца, дуж којих је механички потенцијал дрвета највећи, ултразвук прелази дупло краћи пут него код уздужно сечених епрувета, те су ту, због пропорционално мањег расипања његове енергије и мање пројекционе површине перфорације (круг $1,8 \text{ mm}^2$), очекивано биле регистроване и нешто веће

брзине. Обрнуто је било у тангенцијалном смеру, дуж кога је најмањи механички потенцијал, те су у овом случају, због веће пројекционе површине перфорације (правоугаоник 30 mm^2), регистрована и нешто већа успорења брзине.

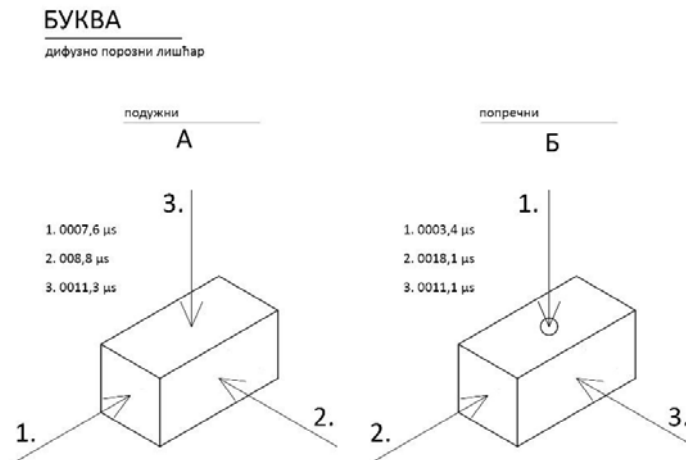


Слика 6: Дијаграм 1 – упоредни приказ брзина пропације таласа у милсекундама (μs) добијених испитивањем узорка прстенасто порозних лишћара багрема (десни крај модула дијаграма) и храста (средина модула дијаграма) и резултати контролног узорка кестена (леви крај модула дијаграма), усмеравањем ултразвука 1) паралелно току механичких влаканаца (аксијална оса) – најкраће време; 2) управно на њих у радијалном – сразмерно дуже време и 3) тангенцијалном смеру – најдуже време (x-оса врсте дрвета, z-оса брзина μs – милсекунде)



Слика 7: Дијаграм 2 – упоредни приказ брзина пропације у милсекундама (μs) добијених ултразвучним испитивањем попречно исецаних, перфорираних узорака багрема (десни крај модула дијаграма), храста (средина модула дијаграма) и кестена (леви крај модула дијаграма) усмеравањем ултразвука у 3) аксијалној равни – најкраће време; 2) радијалној равни – дуже време; 1) тангенцијалној равни – најдуже време (x-оса врсте дрвета, z-оса брзина μs – милсекунде).

Код епрувета **дифузно порозних лишћара**, паралелно току влаканаца дужој оси, измерене вредности ултразвука такође су вариране у односу на врсту дрвета и правац усмеравања ултразвука према току дрвних влаканаца.

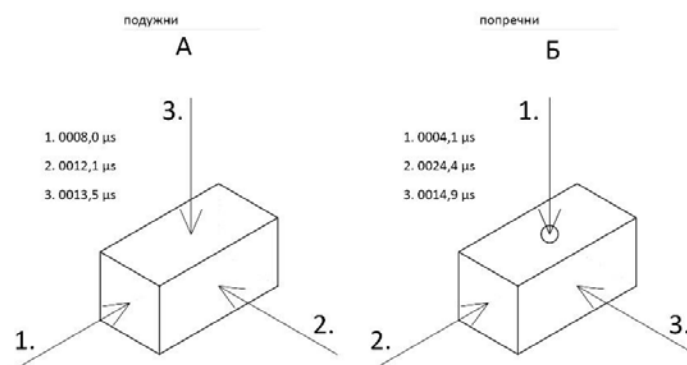


Слика 8: Епрувете букве: А) подужни профил епрувета - аксијална оса (1) паралелна дужој страни паралелепипеда, радијална оса (3) тангенцијална оса (2); Б) попречни профил епрувета – аксијална оса (1) управна на дужу перфорирану страну паралелепипеда, радијална оса (2), тангенцијална оса (3).

Код **букве** су забележене следеће вредности брзина: 1) аксијално – 7,6 μs ; 2) радијално – 8,8 μs ; 3) тангенцијално – 11,3 μs (слика 8А, слика 10), док су код **тополе црне** оне биле: 1) аксијално – 8,0 μs ; 2) радијално – 12,1 μs ; 3) тангенцијално – 13,5 μs (слика 9А, слика 10). Код перфорираних епрувета управно сечених на дужу осу, добијене су следеће вредности: код **букве**: 1) аксијално – 3,4 μs ; 2) радијално – 11,1 μs ; 3) тангенцијално – 18,1 μs (слика 8Б, слика 11), док су код **тополе црне** биле: 1) аксијално – 4,1 μs ; 2) радијално – 14,9 μs ; 3) тангенцијално – 24,4 μs (слика 9Б, слика 11).

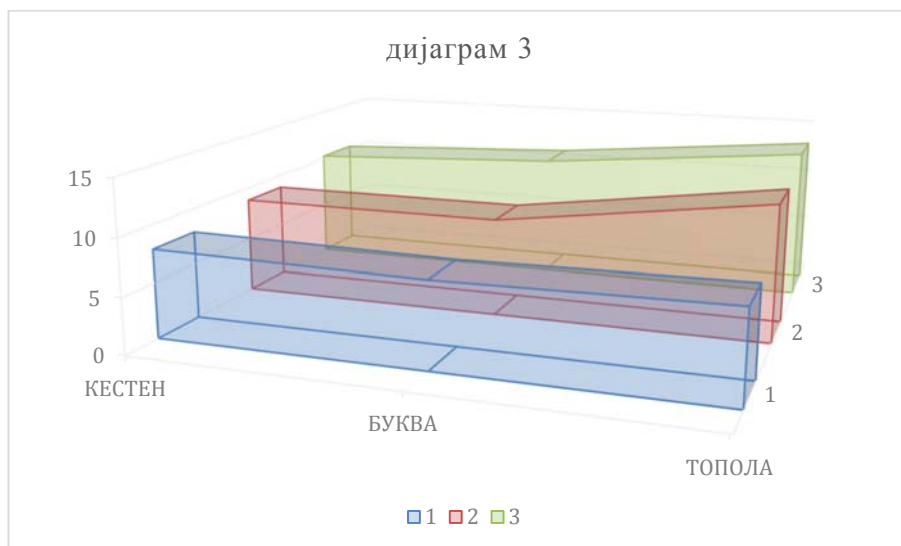
ТОПОЛА

дифузно порозни лишћар

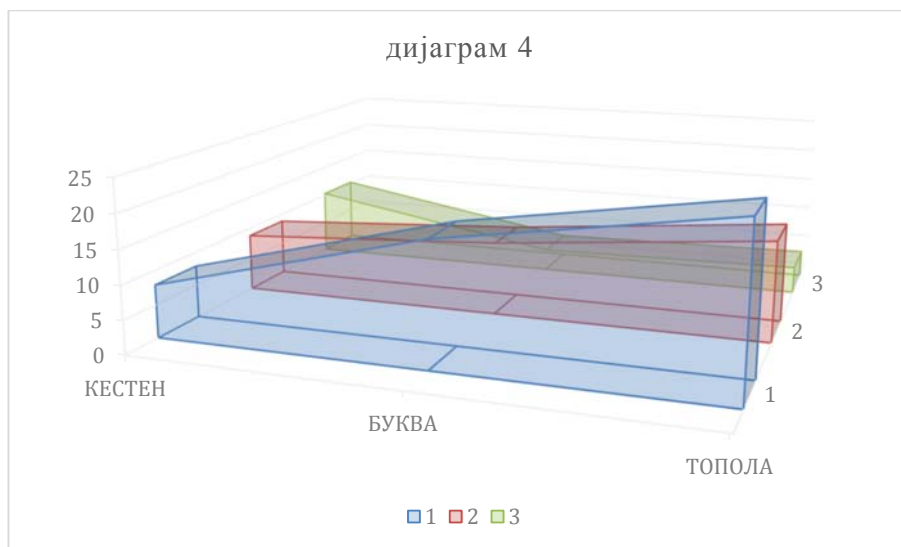


Слика 9: Епрувете тополе: А) подужни профил епрувета – аксијална оса (1) паралелна дужој страни паралелепипеда, радијална оса (3), тангенцијална оса (2); Б) попречни профил епрувета – аксијална оса (1) управна на дужу перфорирану страну паралелепипеда, радијална оса (2), тангенцијална оса (3).

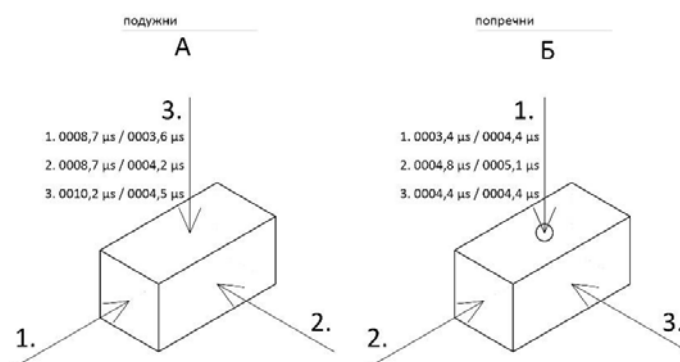
Забележене брзине ултразвука су и овде биле у складу са вредношћу густине дрвета и њеним распоредом својствено грађи, као и у односу на анатомске правце тока дрвних влаканаца. И код ове врсте лишћара је регистровано повећање брзине ултразвука дуж аксијалне осе перфорираних епрувета, а његово успорење дуж радијалне и тангенцијалне осе. При томе је успорење било знатно мање у радијалном него у тангенцијалном смеру, што је објашњено на исти начин као и код прстенасто порозних лишћара. Код епрувета четинара, паралелно току влаканаца дужој оси, највеће брзине ултразвука, слично лишћарима, биле су забележене његовим усмеравањем дуж аксијалне осе, а градуелно мање, у радијалном и тангенцијалном смеру.



Слика 10: Дијаграм 3 – упоредни приказ брзина пропације таласа у милисекундама (μs) добијених испитивањем узорка дифузно порозних лишћара букве (средина модула дијаграма) и тополе (десни крај модула дијаграма) и резултати контролног узорка, кестена (леви крај модула дијаграма), усмеравањем ултразвука 1) паралелно току механичких влаканаца (аксијална оса) – најкраће време; 2) управно на њих у радијалном – сразмерно дуже време и 3) тангенцијалном смеру – најдуже време (x-оса врсте дрвета, z-оса брзина μs – у милисекундама).



Слика 11: Дијаграм 4 – упоредни приказ брзина пропације у милисекундама (μs) добијених ултразвучним испитивањем попречно исецаних, перфорираних узорка букве (средина модула дијаграма), тополе (десни крај модула дијаграма) и кестена (леви крај модула дијаграма) усмеравањем ултразвука у 3) аксијалној равни – најкраће време; 2) радијалној равни – дуже време; 1) тангенцијалној равни – најдуже време (x-оса врсте дрвета, z-оса брзина μs – у милисекундама).

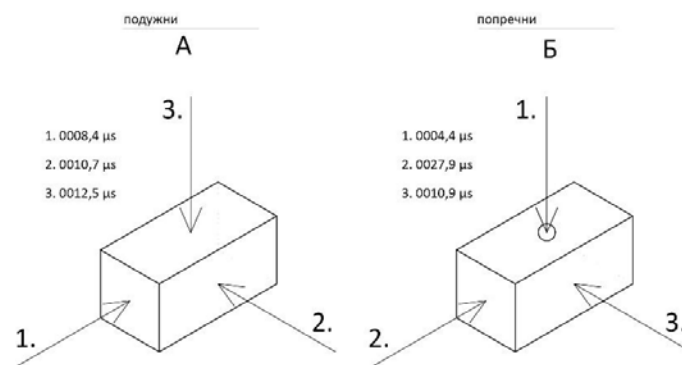


Слика 12: Епрувете бора: А) подужни профил епрувета – аксијална оса (1) паралелна дужи страни паралелепипеда, радијална оса (3), тангенцијална оса (2); Б) попречни профил епрувета – аксијална оса (1) управна на дужу перфорирану страну паралелепипеда, радијална оса (2), тангенцијална оса (3).

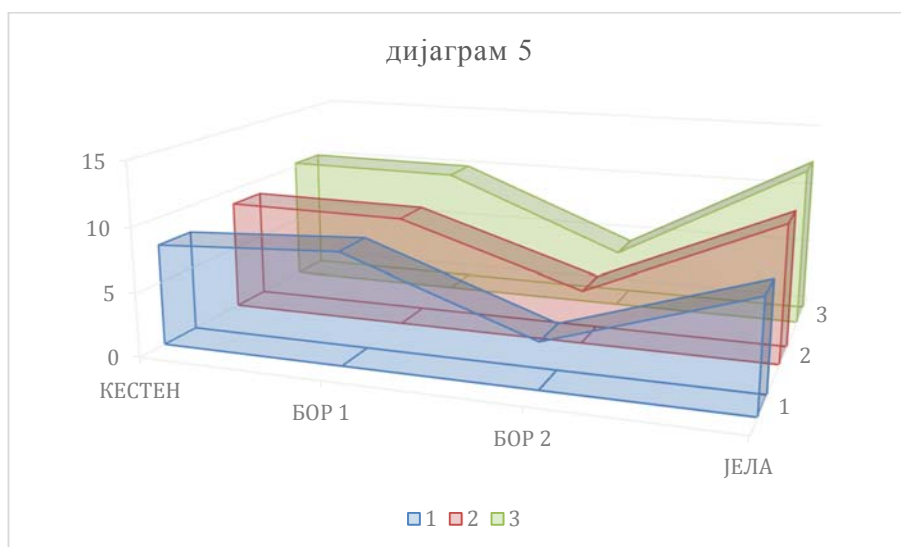
Код епрувета **четинара – бора** те вредности брзина су износиле: 1) аксијално – 3,6/8,7 μ s; 2) радијално – 4,2/8,7 μ s; 3) тангенцијално – 4,5/10,2 μ s (слика 12А, слика 14), док су код **јеле** оне биле: 1) аксијално – 8,4 μ s; 2) радијално – 10,7 μ s; 3) тангенцијално – 12,5 μ s (слика 13А, слика 14). Код перфорираних епрувета **бора, управно сечених на дужу осу**, добијене су следеће вредности: 1) аксијално – 3,4/4,4 μ s; 2) радијално – 4,4/4,4 μ s; 3) тангенцијално – 4,8/5,1 μ s (слика 12Б, слика 15), док су код **јеле** оне биле: 1) аксијално – 4,4 μ s; 2) радијално – 10,9 μ s; 3) тангенцијално – 27,9 μ s (слика 13Б, слика 15). Регистроване брзине ултразвука код узорка четинара, такође су биле у складу са њиховом густином и њеним распоредом и у односу на његово усмерење, према анатомским правцима дрвних влаканаца.

ЈЕЛА

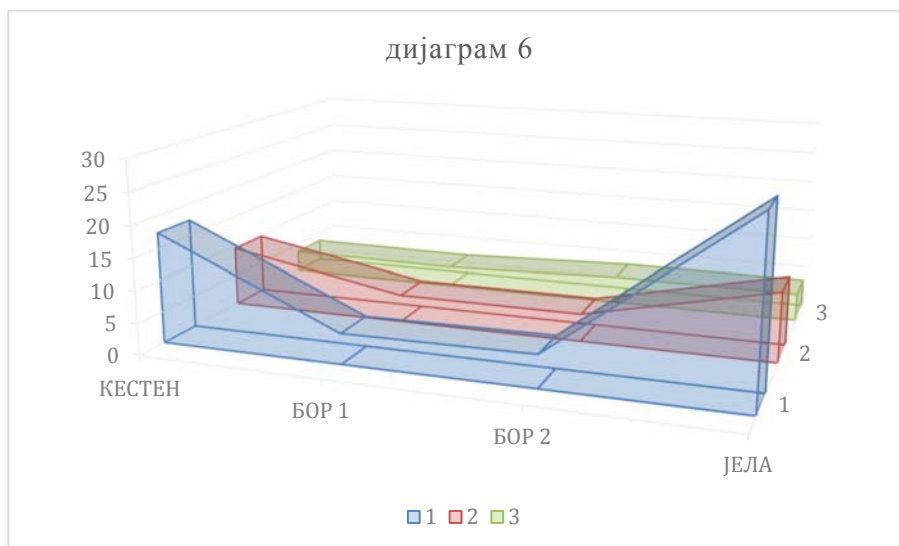
четинар



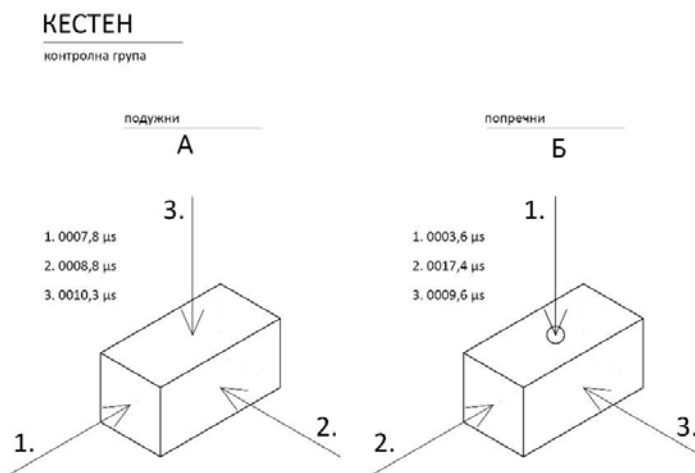
Слика 13: Епрувете јеле: А) подужни профил епрувета – аксијална оса (1) паралелна дужој страни паралелепипеда, радијална оса (3), тангенцијална оса (2); Б) попречни профил епрувета – аксијална оса (1) управна на дужу перфорирану страну паралелепипеда, радијална оса (2), тангенцијална оса (3).



Слика 14: Дијаграм 5 – упоредни приказ брзина пропације таласа у милсекундама (μs) добијених испитивањем узорка четинара јеле (десни крај модула дијаграма) и бора (средина модула дијаграма), и резултати контролног узорка, кестена (леви крај модула дијаграма), усмеравањем ултразвука 1) паралелно току механичких влаканаца – најкраће време; 2) управно на њих у радијалном – сразмерно дуже време и 3) тангенцијалном смеру – најдуже време (x-оса врсте дрвета, z-оса брзина μs – у милсекундама).



Слика 15: Дијаграм 6 – упоредни приказ брзина пропагације у милисекундама (μs) добијених ултразвучним испитивањем попречно исечаних, перфорираних узорака јеле (десни крај модула дијаграма), бора (средина модула дијаграма) и кестена (леви крај модула дијаграма) усмеравањем ултразвука у 3) аксијалној равни – најкраће време; 2) радијалној равни – дуже време; 1) тангенцијалној равни – најдуже време (x-оса врсте дрвета, z-оса брзина μs – у милисекундама).



Слика 16: Епрувете кестена: А) подужни профил епрувета – аксијална оса (1) паралелна дужој страни паралелепипеда, радијална оса (3), тангенцијална оса (2); Б) попречни профил епрувета – аксијална оса (1) управна на дужу перфорирану страну паралелепипеда, радијална оса (2), тангенцијална оса (3).

Измерене брзине ултразвука код контролне епрувете **кестена**, паралелног тока влаканаца дужој оси, биле су: 1) аксијално – 7,9 μs ; 2) радијално – 8,8 μs ; 3) тангенцијално – 10,3 μs (слика 16А, слика 6), док су код перфориране епрувете управног тока влаканаца на дужу осу, регистроване следеће брзине: 1) аксијално – 3,6

μs ; 2) радијално – 9,6 μs ; 3) тангенцијално – 17,4 μs (слика 16Б, слика 7).

Разлика у брзинама ултразвука код контролних узорака у односу на његово усмеравање паралелно и управно на ток влаканаца, била је изузев четинара бора, слична измереним разликама код других епрувета. Поређењем брзина измерених код епрувета кестена, с брзинама измереним код друга два примерка прстенасто порозних лишћара – багрема и храста, није се могло утврдити да ли су епрувете израђене од дрвета дивљег или питомог кестена (слика 6). Поређењем са брзинама измереним и код осталих епрувета, као и на основу апроксимација њихових табличних, средњих вредности статичког напона на притисак и средњих вредности густина у просушеном стању, утврдило се да се највероватније ради о узорцима питомог кестена. Поређењем тих параметра установљено је да је измерена брзина код стандардно исецаних епрувета кестена (7,9 μs), у аксијалном смеру, била мања од брзина измерених под истим условима код узорака: бора (3,6 μs), багрема (6,9 μs), храста (7,3 μs) и букве (7,6 μs), а већа од брзина измерених код: тополе (8,0 μs) и јеле (8,4 μs). Гледано у односу на специфичну густину у просушеном стању, та вредност је код кестена ($\rho = 620 \text{ g/cm}^3$) била мања од вредности густине багрема ($\rho = 770 \text{ g/cm}^3$), букве ($\rho = 720 \text{ g/cm}^3$) и храста ($\rho = 690 \text{ g/cm}^3$), а већа од вредности густине бора ($\rho = 510 \text{ g/cm}^3$), јеле ($\rho = 450 \text{ g/cm}^3$) и тополе ($\rho = 450 \text{ g/cm}^3$). Вредности статичког напона на притисак за кестен, требало би да буде мања од вредности за багрем (минималне вредности статичког напона на притисак $\sigma_{\min} = 56 \text{ МПа}$, **средње вредности статичког напона на притисак $\sigma_p = 73 \text{ МПа}$** , максималне вредности статичког напона на притисак $\sigma_{\max} = 96 \text{ МПа}$), букву (минималне вредности статичког напона на притисак $\sigma_{\min} = 41 \text{ МПа}$, **средње вредности статичког напона на притисак $\sigma_p = 62 \text{ МПа}$** , максималне вредности статичког напона на притисак $\sigma_{\max} = 99 \text{ МПа}$), храст лужњак (минималне вредности статичког напона на притисак $\sigma_{\min} = 54 \text{ МПа}$, **средње вредности статичког напона на притисак $\sigma_p = 61 \text{ МПа}$** , максималне вредности статичког напона на притисак $\sigma_{\max} = 67 \text{ МПа}$) и бор обичан (минималне вредности статичког напона на притисак $\sigma_{\min} = 35 \text{ МПа}$, **средње вредности статичког напона на притисак $\sigma_p = 55 \text{ МПа}$** , максималне вредности статичког напона на притисак $\sigma_{\max} = 94 \text{ МПа}$), а већа за тополу црну (минималне вредности статичког напона на притисак $\sigma_{\min} = 26 \text{ МПа}$, **средње вредности статичког напона на притисак $\sigma_p = 35 \text{ МПа}$** , максималне вредности статичког напона на притисак $\sigma_{\max} = 56 \text{ МПа}$) и за јелу (минималне вредности статичког напона на притисак $\sigma_{\min} = 31 \text{ МПа}$, **средње вредности статичког напона на притисак $\sigma_p = 47 \text{ МПа}$** , максималне вредности статичког напона на притисак $\sigma_{\max} = 59 \text{ МПа}$). Кестен би према

томе, требало да има вредност статичког напона на притисак између **средње вредности статичког напона на притисак $\sigma_p = 55$ МПа** (бор обични) и **средње вредности статичког напона на притисак $\sigma_p = 61$ МПа** (храста лужњака). Како је таблична **средња вредност питомог кестена била $\sigma_n = 41$ МПа**, а таблична **средња вредност дивљег кестена $\sigma_p = 30,5$ МПа**, то је она била ближа тим вредностима. И максимална вредност статичког напона на притисак питомог кестена ($\sigma_{max} = 47$ МПа), била је ближа горњој граничној вредности статичког напона за храст ($\sigma_p = 61$ МПа), него максимална вредност дивљег кестена ($\sigma_{max} = 33,5$ МПа). Једино одступање у поретку испитиваних узорака дрвета, у односу на ове параметре регистровано је према томе, код узорака бора, али узимајући да се радило о средњим вредностима, као и то да је постојала велика разлика између минималне и максималне вредности статичког напона на притисак, онда се може рећи да су измерене вредности брзине ултразвука и код узорака бора, такође биле еквивалентне његовим механичким потенцијалима. Могло се такође закључити и то да реолошки феномен течења дрвета⁶⁷ у овом случају није умањио механичке потенцијале контролних узорака – епрувета, што би се могло тумачити дуготрајном повољном утицају фактора медитеранске климе. Однос брзина ултразвука измерених код свих узорака испитиваних врста дрвета био је еквивалентан односу њихових табличних вредности густине у просушеном стању и вредности статичког напона на притисак. Добијени резултати се генерално могу сматрати поузданим, јер су за дате врсте дрвета коришћене просечне вредности статичког напона на притисак.

IV 1.3. Рендгенско испитивање

Рендгенско испитивање је вршено по истом принципу и на истим епруветама као и ултразвучно испитивање. Како је за ову сврху коришћен медицински рендген апарат, са опсегом рада од 40–125 kV и 0,50–360 mA/s, аналогно његовој уобичајеној примени у медицинској дијагностици, горњи лимити радног опсега овог истраживања 100 kV и 70 mA/s. Свака од поставки епрувета била је три пута сликана и то снагом од 40, 70 и 100 kV, односно јачином од 4, 37 и 70 mA/s, на раздаљини 114 cm фокуса, довољном да зрачни сноп покрије поставку епрувета на пројекционој равни.

⁶⁷ Б. Шошкић и З. Поповић, *Својства дрвета* (Београд: Шумарски факултет Универзитета у Београду, 2002), 237.

IV 1.3.1. Метод рада

Епрувете су овде, у једном броју биле исецане и управно на дужу осу и зајендо са осталима слагане у вертикалне троредне шпилове, да би се тако, на основу њихових механичких коефицијената, максимално истакли очекивани контрасти на рендгенским снимцима огледних поставки. При томе су појединачне поставке требале да истакну разлике због анизотропности дрвета, а заједничке поставке, разлике због хетерогености његове структуре. За ово испитивање, уместо вредности статичког напона на притисак, биле су сада узете средње табличне вредности статичког напона на савијање,⁶⁸ датих врста дрвета. Двоструко „баждарење” епрувета имало је за циљ истицање напонских међудејстава, јер је познато⁶⁹ да је напон на савијање сложени напон, који индукује напоне на притисак, затезање и смицање, при чему је величина напона на савијање приближна средњој вредности напона на притисак и напона на затезање. Ово је значајно са аспекта оптерећења дрвених конструкција, јер је ту напон на савијање најчешћи појавни напон. Епрувете и за ово испитивање биле су стандардних димензија за одређивање статичког напона на притисак, јер за разлику од механичких испитивања, оне нису од суштинског утицаја на резултате. Да би се могла правити компарација односа статичког напона на притисак и напона на савијање, на основу резултата ултразвучне и рендген методе, епрувете исте врсте дрвета су за оба испитивања биле сачињене од једног истог комада сортимента, као што су и индексне вредности ове две врсте напона биле узете из објаве исте студије. Сродна природа ултразвучних и стрес-звучних таласа, такође је с обзром на специфичност примене за испитивање дрвета, пружала могућност развијања нове *in situ* методологије испитивања елемената дрвених конструкција, архитектонских објеката.

Епрувете првог скупа, дифузно порозних лишћара, имале су следеће вредности статичког напона на савијање: буква (минималне вредности статичког напона на савијање $\sigma_{\min} - 74$ МПа, **средње вредности статичког напона на савијање $\sigma_p - 123$ МПа**, максималне вредности статичког напона на савијање $\sigma_{\max} - 210$ МПа) и топола канадска (минималне вредности статичког напона на савијање $\sigma_{\min} - 47$ МПа, **средње вредности статичког напона на савијање $\sigma_p - 65$ МПа**, максималне вредности

⁶⁸ Б. Шошкић и З. Поповић, *Својства дрвета* (Београд: Шумарски факултет Универзитета у Београду, 2002), 214.

⁶⁹F. Kollmann and W. A. Cote, *Principles of Wood Science and Technology. Vol. I, Solid Wood* (Berlin: Springer, 1984), 66.

статичког напона на савијање $\sigma_{\max} - 94$ МПа). Багрем (**јединствене вредности статичког напона на савијање $\sigma_p - 150$ МПа**) и храст лужњак (минималне вредности статичког напона на савијање $\sigma_{\min} - 74$ МПа, **средње вредности статичког напона на савијање $\sigma_p - 88$ МПа**, максималне вредности статичког напона на савијање $\sigma_{\max} - 105$ МПа) су представљали други скуп епрувета прстенасто порозних лишћара, а бор обични, (минималне вредности статичког напона на савијање $\sigma_{\min} - 41$ МПа, **средње вредности статичког напона на савијање $\sigma_p - 100$ МПа**, максималне вредности статичког напона на савијање $\sigma_{\max} - 206$ МПа) и јела (минималне вредности статичког напона на савијање $\sigma_{\min} - 47$ МПа, **средње вредности статичког напона на савијање $\sigma_p - 73$ МПа**, максималне вредности статичког напона на савијање $\sigma_{\max} - 118$ МПа) били су представници трећег скупа епрувета четинара. Епрувете контролног скупа биле су од кестена (минималне вредности статичког напона на савијање $\sigma_{\min} - 33$ МПа, **средње вредности статичког напона на савијање $\sigma_p - 41$ МПа**, максималне вредности статичког напона на савијање $\sigma_{\max} - 47$ МПа) који припада прстенасто порозним лишћарима. Епрувете су биле стандардних димензија 20x20x40 mm (JUS D.A1.045) за одређивање напона на притисак, паралелно влаканцима. Сваки скуп се према томе састојао од два подскупа са по 11+1 шпилова, а сваки шпил од три једне преко друге слагане епрувете. Један скуп чинило је тако, 66 епрувета, од којих су 32 биле са паралелним током влаканаца уздужној оси, при томе је 10 имало и перфорацију, а 34 их је било са током влаканаца управно на уздужну осу, при чему 12 са перфорацијом.

Поставка једног подскупа била је следећа:

A1 шпил – све три епрувете су паралелног тока влаканаца дужој оси, а перфорирна епрувета је на врху шпила;

B1– све три епрувете су паралелног тока влаканаца дужој оси, а перфорирна епрувета је у средини шпила;

C1– све три епрувете су паралелног тока влаканаца дужој оси, а перфорисана епрувета је на дну шпила;

D1– горње две епрувете су паралелног тока дужој оси, док је последња, уједно и перфорирна епрувета, управног тока влаканаца у односу на дужу осу;

E1 – горња епрувета је паралелног тока дужој оси док су наредне две управног тока влаканаца у односу на дужу осу, при чему је перфорирна епрувета у средини шпила;

F1– горња епрувета је паралелног тока дужој оси док су наредне две управног тока у односу на дужу осу, при чему је перфорирна епрувета на дну шпила;

G1–

горња и доња епрувета су управног тока влаканаца у односу на дужу осу, док је средишња уједно и перфорирана епрувета, паралелног тока влаканаца дужој оси;
Н1 – горња две епрувете су управног тока влаканаца у односу на дужу осу док је доња, уједно и перфорирана епрувета, паралелног тока влаканаца дужој оси;
К1 – све три епрувете су управног тока влаканаца у односу на дужу осу, а перфорирана епрувета је на врху шпила;
Л1 – све три епрувете су управног тока влаканаца у односу на дужу осу, а перфорирана епрувета је у средини шпила;
М1 – све три епрувете су управног тока влаканаца у односу на дужу осу, а перфорирана епрувета је на дну шпила;

Последњи шпил у свакој овој поставци сачињен је од епрувета контролне групе управног тока влаканаца у односу на дужу осу. По истом принципу били су слагани шпилови у свим подскуповима и формирану скупови.

До извођења испитивања епрувете су држане у затвореним пластичним кутјијама на собној температури (20°C)

На крају су биле дате и мешовите поставке скупа чији би рендгенски приказ имао изглед сиве (*gray*) скале. У првом случају поставка би требало да изгледа као „тонска палета”, у другом као „зебра”, а у трећем као „мозаик”. Поставка зевре компонована је тако да чини низ, почев од шпилова првог (А), другог (В), трећег (С), деветог (К), десетог (Л) и једанаестог (М) подскупа, почев од скупа са највећом табличном вредношћу статичког напона на притисак (епрувете багрема), који се завршавао епруветама контролног скупа (епрувете кестена). У овој поставци наизменично су, једни испод других, ређани шпилови епрувета уравног и паралелног тока влаканаца у односу на дужу осу. Следећу поставку – тонску палету чинио је низ који је почињао наизменичним ређањем троредних шпилова првог (А), другог (В) и трећег подскупа (С), почев од скупа највеће табличне вредности статичког напона на притисак (епрувете багрема), све до епрувета контролног скупа, где су све епрувете биле паралелног тока влаканаца дужој оси. Последња мешовита поставка која је на снимку требало да има изглед мозаика компонована је низањем седам редова са по шест шпилова у сваком реду. Редови су били компоновани произвољним ређањем, разнородних шпилова. Мешовите поставке биле су снимљене рендген зрацима средње јачине према медицинским критеријумима (70 кV, 37 mA/s).

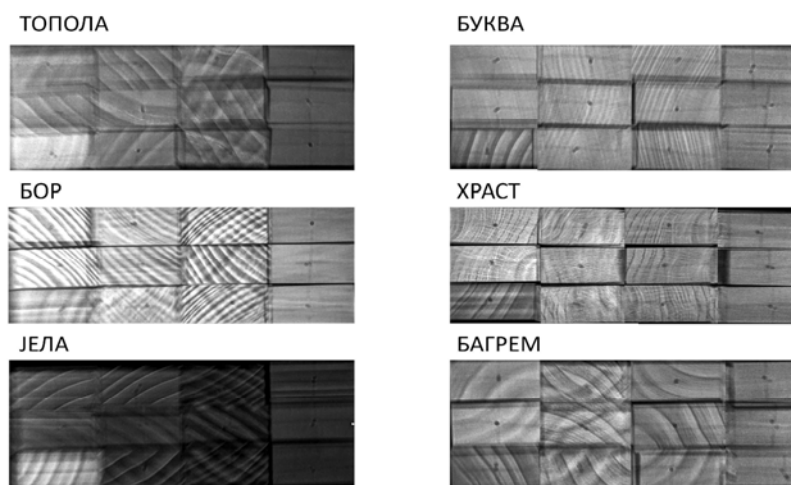
Перофорације начињене у појединим епруветама, моделарно су представљале

оштећења у дрвету, а оштрина њихове видљивости је по претопоставци требало да буде сразмерна дубини њихове позиције, чврстоћи дрвета у датом правцу тока влаканаца и јачини рендген зрака којом се снимало.

Испитивање структуралне грађе захтевало је, према томе, и примену снимања различитом јачином рендгенских зрака. То је учињено сходно медицинским нормама, рендген зрацима минималне, средње и максималне јачине. (40, 70 и 100 kV, односно 4, 37 и 70 mA/s) на раздаљини фокуса од 114 cm. Пошто су табеларне вредности механичких својстава испитиваних врста дрвета апроксимација њихових стварних потенцијала и пошто израда епрувета од резане грађе не осликава у потпуности унутрашњу структуру дрвета, то се уз извесну субјективност при компарирању светлине снимака поставки, сматрало ограничењима при доношењу закључака.

IV 1.3.2. Резултати и дискусија

Рендгенографисањем узорака све три врсте дрвета: дифузно порозних лишћара, прстенасто порозних лишћара и четинара, уочљива је разлика у светлини слике између хомогених шпилова епрувета паралелног тока влаканаца дужој оси и епрувета управног тока на ту осу, у првом и другом реду свих појединачних поставки (слика 17). Како је усмереност рендгенских зрака на други ред шпилова била паралелна пружању механичких влаканаца, то је аналогно статичком напону на притисак, односно чврстоћи дрвета која је у том смеру највећа, таква слика је и била очекивана.



Слика 17: Рендгенографисање узорака све три врсте дрвета: дифузно порозних лишћара (буква и топола), прстенасто порозних лишћара (багрем и храст), и четинара (бор и јела).

Најмања је била разлика у светлини слике међу шпиловима првог реда (где су епрувете биле паралелног тока влаканаца дужој оси) на које су рендгенски зраци падали под правим углом. Аналогно статичком напону на притисак који је у том смеру у просеку десет пута мањи у односу на напон изазван силом паралелно току влаканаца, било је разумљиво да у правцу тако мале чврстоће и међусобне разлике шпилова у светлини, слике буду најмање.

Разлика у светлини слике свих хомогених шпилова другог реда, у односу на остале нехомогене шпилове, је исто била уочљива. При томе је она била најмања у поставци дифузно порозног лишћара букве, где се уместо слике „мреже” појавила слика „трага метле”. Имајући у виду да је код дифузно порозних лишћара распоред механичких влаканаца подједнако распоређен у структури раног и касног дрвета прстена прираста, то је и било очекивано.

Такође је била уочљива значајна разлика у светлини слике контролног шпила у односу на суседне – нехомогене шпилове у поставци прстенасто порозног лишћара канадске тополе (минималне вредности статичког напона на савијање $\sigma_{\min} = 26$ МПа, **средње вредности статичког напона на савијање $\sigma_p = 35$ МПа**, максималне вредности статичког напона на савијање $\sigma_{\max} = 56$ МПа) и четинара јеле (минималне вредности статичког напона на савијање $\sigma_{\min} = 31$ МПа, **средње вредности статичког напона на савијање $\sigma_p = 47$ МПа**, максималне вредности статичког напона на савијање $\sigma_{\max} = 59$ МПа), док је та разлика била дискретнија у односу на прстенасто порозне лишћаре багрема (минималне вредности статичког напона на савијање $\sigma_{\min} = 56$ МПа, **средње вредности статичког напона на савијање $\sigma_p = 73$ МПа**, максималне вредности статичког напона на савијање $\sigma_{\max} = 96$ МПа) и храста (минималне вредности статичког напона на савијање $\sigma_{\min} = 54$ МПа, **средње вредности статичког напона на савијање $\sigma_p = 61$ МПа**, максималне вредности статичког напона на савијање $\sigma_{\max} = 67$ МПа), као и у односу на дифузно порозног лишћара букву (минималне вредности статичког напона на савијање $\sigma_{\min} = 41$ МПа, **средње вредности статичког напона на савијање $\sigma_p = 62$ МПа**, максималне вредности статичког напона на савијање $\sigma_{\max} = 99$ МПа) и четинар бор (минималне вредности статичког напона на савијање $\sigma_{\min} = 35$ МПа, **средње вредности статичког напона на савијање $\sigma_p = 55$ МПа**, максималне вредности статичког напона на савијање $\sigma_{\max} = 94$ МПа). Имајући у виду вредности њихових коефицијента статичког напона на притисак паралелно току влаканаца, дошло се до тога да је вредност статичког напона на притисак контролног узорка кестена

приближна њиховим вредностима, што се и потврдило на основу његове табличне вредности (минималне вредности статичког напона на савијање $\sigma_{\min} = 23$ МПа, **средње вредности статичког напона на савијање $\sigma_p = 52$ МПа**, максималне вредности статичког напона на савијање $\sigma_{\max} = 80$ МПа). На то су јасно указивале њихове максималне вредности у оквиру којих су, према рендгенској слици, односи тих узорака дрвета били корелисани.

Разлика у светлини слике између хомогених шпилова другог реда и нехомогених шпилова, била је објашњива тиме што су нехомогени шпилови били „омекшани” уметањем епрувета паралелног тока дужој оси. Разлике у светлини слике између појединих врста дрвета, могле су се објаснити и на основу претпостављених вредности њихових коефицијената статичког напона на притисак.

На основу разлика у светлини рендгенске слике појединачних поставки, могла се такође утврдити и чврста корелација односа вредности коефицијената статичког напона на притисак и статичког напона на савијање. Поредак који је међу испитиваним узорцима дрвета успостављен на основу вредности статичког напона на притисак и на основу разлика у светлини рендгенске слике огледних поставки, био је потврђен и вредношћу њихових коефицијената статичког напона на савијање. Тиме је и овим путем био потврђен њихов познати однос⁷⁰ установљен механичким тестирањем, који се развија у оквиру сложеног напона на савијање ($\sigma_p : \sigma_s : \sigma_z = 1.0 : 1,5-2 : 2,5 : 2,8$) из кога се види, да статички напон на савијање σ_s има неку средњу вредност статичког напона на притисак σ_p и статичког напона на затезање σ_z , где веће вредности одговарају крупно прстенасто порозним врстама, а мање четинарима. Како су и багрем и храст крупно прстенасто порозни лишћари, то се тај однос могао потврдити поређењем њихових коефицијената статичког напона на притисак и статичког напона на савијање. Према табличним средњим вредностима (статички напон на притисак $\sigma_p = 73$ МПа; статички напон на савијање $\sigma_s = 150$ МПа) које су у овом истраживању коришћене, показало се да је за багрем тај однос износио тачно 1:2, што је био резултат рачунски добијен на основу дате пропорције. Поредак епрувета према светлини рендгенске слике би према томе, био исти и да су уместо табличних вредности статичког напона на притисак, коришћене вредности статичког напона на савијање.

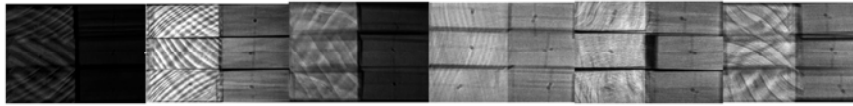
⁷⁰ Б. Шошкић и З. Поповић, *Својства дрвета* (Београд: Шумарски факултет Универзитета у Београду, 2002), 212.

Да је укупна светлина слике појединих поставки одраз вредности коефицијената статичког напона на притисак, показао је и последњи у низу, најтамнији од свих, снимак поставке четинара јеле (минималне вредности статичког напона на притисак $\sigma_{\min} - 31 \text{ МПа}$, **средње вредности статичког напона на притисак $\sigma_p - 47 \text{ МПа}$** , максималне вредности статичког напона на притисак $\sigma_{\max} - 59 \text{ МПа}$), који указује на најмање вредности тог коефицијента. Однос статичког напона на притисак и статичког напона на савијање на основу њихових средњих вредности (статичког напона на притисак $\sigma_p - 47 \text{ МПа}$: статички напона на савијање $\sigma_s - 73 \text{ МПа}$), такође је и у овом случају, био идентичан оном (1:1,5) који се рачунски добија према познатој пропорцији установљеној за четинаре. Рендгенска слика је, према томе, одражавала и вредности сложеног напона на савијање који се најчешће среће у дрвеним конструкцијама архитектонских објеката. Како је пропустљивост рендгенских зрака сразмерна густини, односно садржају дрвне супстанце у јединици запремине, то је у овом случају та пропусност била највећа, што је и резултовало највећим затамњењем слике. За четинаре је иначе карактеристична неједнакост у распореду густине, а код јеле је то нарочито изражено због њеног пропорционално бржег раста, те је због тога и заступљеност касног дрвета које одређује чврстоћу, у овом случају била мања.

Слика поставке епрувете бора изгледа знатно светлије у односу на слику поставку епрувете јеле (слика 17) него што би се то очекивало на основу њихових коефицијената чврстоће. У лумену анатомских елемената бора се складишти велика количина смоле која импрегнира зидове ћелија, што код дрвета јеле није случај.

Структурални пресек који представља пројекцију прстенова прираста дрвета, према очекивању је једино био уочљив на снимцима шпилова (два реда појединачних поставки) код којих су епрувете биле управног тока влаканаца у односу на дужу осу, односно тамо где је усмеравање рендген зрака било паралелно току пружања механичких влаканаца. Разлике у светлини снимака биле су у том правцу најизраженије, те је и било очекивано да се у мешовитој поставци низањем тих шпилова према коефицијенту статичког напона на притисак добије **модел зебре** (слика 18).

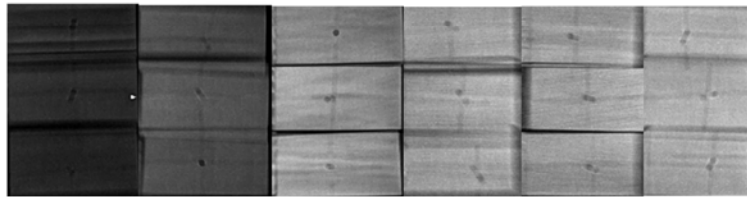
ЗЕБРА



Слика 18: Модел зебре

За разлику од овог модела низањем шпилова (један ред шпилова појединачних поставки) компонованих од епрувета које су биле паралелног тока влаканаца у односу на дужу осу, усмеравањем рендген зрака управно на њих, аналогно механичком испитивању и најнижим механичким коефицијентима у том смеру, добијен је визуелни модел **тонске палете** (слика 19).

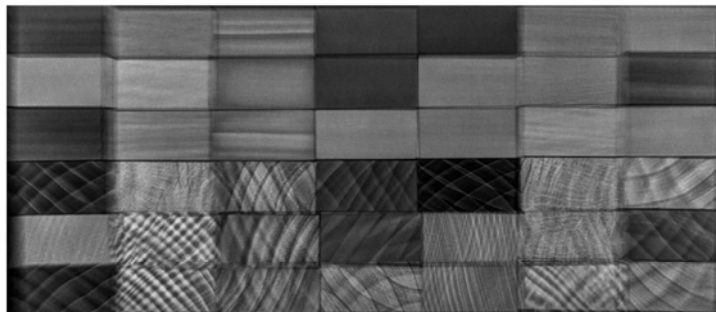
ТОНСКА ПАЛЕТА



Слика 19: Тонска палета

Овај модел се очекивано појавио и у појединачним поставкама где су шпилови били нехомогени, састављени од обе врсте епрувета, а где се светлина слике појачавала (3–7 редова појединачних поставки) повећањем заступљености попречно исецаних епрувета. Епрувете паралелног тока влаканаца у односу на њихову уздужну осу, омекшавале су слику, јер је светлина слике при усмеравању рендген зрака управно на влаканца знатно слабија, аналогно отпору који се у том смеру развија при дејству силе притиска. Разлике у светлини слике шпилова компонованих од различито оријентисаних епрувета, очекивано су биле врло изражене код **модела мозаика** (слика 20)

МОЗАИК



Слика 20: Модел мозаика

Перфорације епрувета, које су представљале унутрашња оштећења, очекивано су се могле најбоље видети на сликама у редовима појединачних поставки (2. ред), где су били хомогени шпилови компоновани од епрувета управног тока на дужу осу, да би затим њихова видљивост даље слабила у зависности од учешћа епрувета паралелних влаканаца у односу на њихову дужу осу. Интензитет контраста између ваздухом испуњеног перфоративног каналића епрувете и светлине шпила је очекивано био највећи где је механички потенцијал шпила био највећи и тамо где је у композицији шпила перфорирана епрувета била ближе врху (слика 19). Разлике у интензитету овог контраста биле су очекивано уочене и на сликама истих поставки у зависности од јачине примењених рендгенских зрака.

Разлике у светлини и оштрини слика поставки очекивано су уочене и у односу на јачину примењених рендгенских зрака. Примена зрака најмање јачине (40 kV, 4 mA/s), дала је најмање светлу и нејасну слику поставки дијагностике, док је оптимална оштрина слике очекивано постигнута применом рендгенских зрака средње јачине (70 kV, 37 mA/s). Применом рендгенских зрака максималне јачине (10 kV, 70 mA/s) добијена је потпуно затамњена слика где се само једним делом назирао обрис поставке дијагностичким критеријумима (70 kV и 37 mA/s). Како се радило о истим поставкама, различитост светлине њихових слика је била објашњива једино другачијим условима снимања, односно од примењене снаге и јачине рендгенских зрака. Према томе, ово је била потврда претпоставке да је продорност рендгенских зрака управно пропорционална њиховој снази и јачини, а обрнуто пропорционална густини дрвне

супстанце.⁷¹ Тако је применом рендгенских зрака највеће снаге и јачине, њихова пенетрантност била максимална и добијена је скоро потпуно тамна слика. Овим је било показано да механички потенцијал дрвета директно зависи од густине дрвне супстанце и да се на томе заснива општи принцип функционисања дијагностике његовог квалитета.

IV 1.4. Закључак

Испитивање дрвета ултразвучним таласима и рендген зрацима и њиховим усмеравањем, аналогно усмеравању силе притиска код испитивања статичког напона на притисак, показало се успешним. Дрво веће чврстоће, сходно табличној вредности статичког напона на притисак је брже проводило ултразвучне таласе и давало светлију рендген слику, као што се то дешавало и њиховим усмеравањем паралелно току механичких влаканаца у односу на друге анатомске правце. Тиме је било показано да механички потенцијал дрвета директно зависи од густине дрвне супстанце и да се на томе заснива општи принцип функционисања дијагностике његовог квалитета.⁷² И рендгенским испитивањем се у овом случају показало да реолошки феномен течења дрвета није умањио механичка својства контролног узорка кестена, имајући у виду светлину његове слике, у односу на узорке осталих испитиваних врста дрвета (слика 17). Такође се показало и то да је калибрисање и комбиновање недеструктивних метода начин унапређења *in situ* дијагностике, којим би се директно могли добијати параметри механичких својстава дрвених елемената, уз реалну визуелизацију њихове структуралне грађе. То би отворило перспективу примене недеструктивне дијагностике и код најделикатнијих захтева испитивања квалитета дрвета, као што је случај код рестаурације и обнове објеката од културно-историјског значаја, који се темеље на конструкцијама од дрвене грађе. Очување културно-историјске баштине несумњиво би добило значајан допринос унапређењем недеструктивне *in situ* дијагностике дрвета. Оваквом дијагностиком, правим одабиром и редовном контролом квалитета уграђеног дрвета, свакако би се могла унапредити и целокупна дрвена градња.

⁷¹Б. Шошкић и З. Поповић, *Својства дрвета* (Београд: Шумарски факултет Универзитета у Београду, 2002), 188.

⁷²*Ibid.*

V УСПОСТАВЉАЊЕ НЕДЕСТРУКТИВНЕ МЕТОДЕ *IN SITU* ИСПИТИВАЊА

V 1.1. Калибрација методе

Калибрација стрес-звучне методе вршена је механичким испитивањем статичког напона на савијање и притисак, на стандардним епруветама лишћара и четинара, исецаним из дасака које су претходно испитиване стрес-звучним таласима. Ради провере исправности поступка, у овом испитивању није био коришћен исти сет епрувета из прелиминарних истраживања. Због расипања звука и немогућности да се ово испитивање изврши на узорцима малих димензија, звук је пропуштан кроз даске од здравог дрвета (табела 1) да би се затим правиле перфорације на њима које симулирају девастацију и поново пропуштао звук (табела 2). Епрувете су потом биле исецане тачно из оних делова дасака кроз које је био усмераван стрес-звучни талас, да би се калибрисање методе вршило на истој структури кроз коју је ишао и сам звучни талас. То је учињено тако што је прво у центру квадрата (димензија 4x4 cm), уцртаног на крајњој страници даске пуне дужине инициран стрес-звучни талас, да би се затим дуж његових оса симетрије исецале епрувете дужине 40 cm. Од ових епрувета су исецане мање (дужине 3 cm и 4 cm) које су служиле за одређивање влажности, густине и напона на притисак (слика 21). Пре звучног тестирања, влагометром је био проверен степен влажности дасака које су до тог момента биле у просторији у којој је њихов степен влажности долазио до висине од око 10–12% и где је температура била око 21°C. Поступак стрес- звучног тестирања у принципу је сличан оном, који је у прелиминарним истраживањима био вршен применом ултразвучних таласа. Вредности статичког напона на притисак добијене механичким тестирањем огледних узорака, биле су близу горњих табличних вредности (табела по Угољеву)⁷³ за дату врсту дрвета. На основу ових вредности биле су рачунски изведене вредности статичког напона на савијање, на основу односа установљеног између сложеног напона на савијање и резултантних напона на притисак и затезање. Каснијим директним испитивањем напона на савијање добијене су вредности сличне рачунским, што је уједно била и потврда ваљаности закључака доношених у уводним истраживањима. Резултати маханичког баждарења стрес-звучних таласа презентовани су у датим табелама.

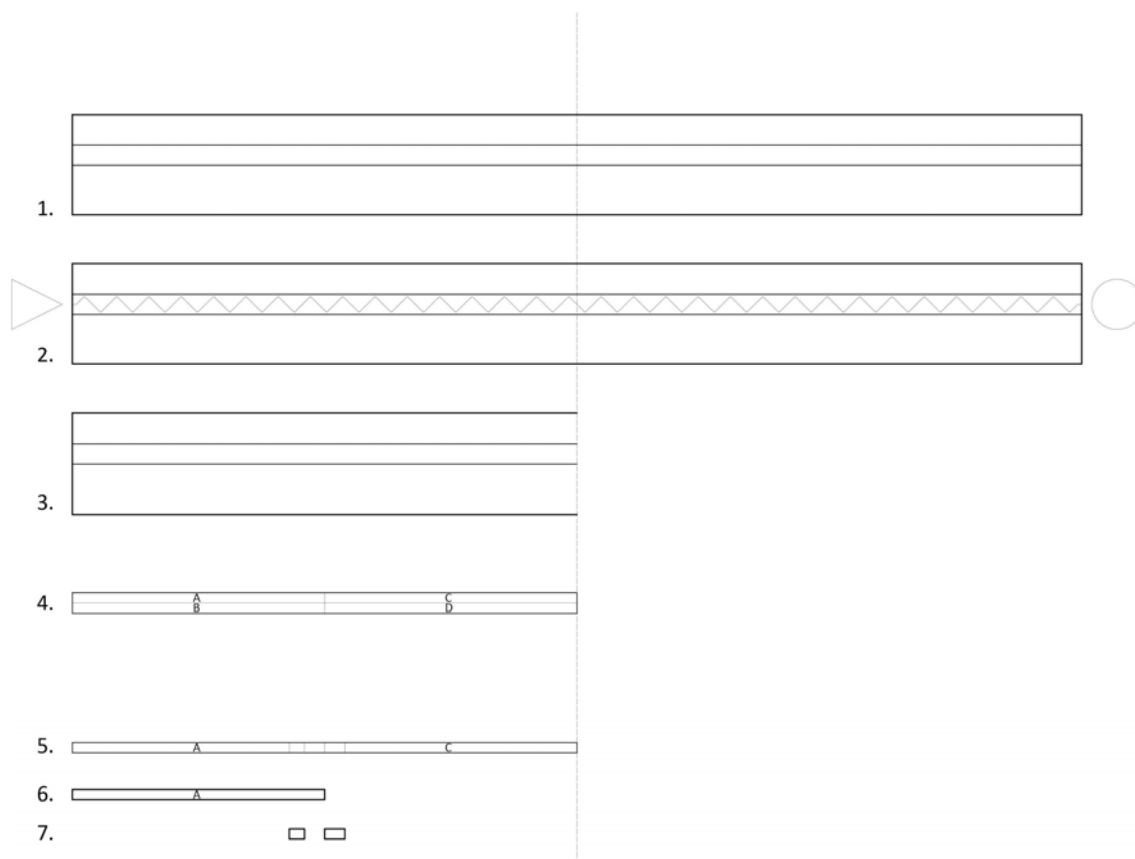
⁷³ Б. Шошкић и З. Поповић, *Својства дрвета* (Београд: Шумарски факултет Универзитета у Београду, 2002), 212.

Табела 1: Брзина пропације стрес-звучних таласа код дасака здравог дрвета.

	број узорка	врста дрвета	дужина [m]	број одбирака	време прелета [μ s]	брзина [m/s]	дебљина [mm]	ширина [cm]	маса [kg]	влажност [%]
ЧЕТИНАРИ	1	СМРЧА	2,055	131	0,000682292	3011,908397	47,29	20,2	8,39	10,3
	1	ЈЕЛА	1,9965	153	0,000796875	2505,411765	46,44	23,9	8,955	9,6
	2	ЈЕЛА	1,795	88	0,000458333	3916,363636	47,29	20,1	7,985	9,6
	1	БОР	2,141	136	0,000708333	3022,588235	49,44	23,9	14,38	7,9
	2	БОР	2,1225	161	0,000838542	2531,180124	52,39	23,9	15,685	7,7
ЛИШЋАРИ	1	ХРАСТ	2,04	108	0,0005625	3626,666667	27,61	17,25	6,665	10,4
	2	ХРАСТ	2,02	111	0,000578125	3494,054054	26,81	21,25	9,03	9,8
	1	БАГРЕМ	1,543	103	0,000536458	2876,271845	29,08	12,4	4,115	10
	2	БАГРЕМ	1,505	65	0,000338542	4445,538462	28,42	10,6	3,485	9,3
	1	БУКВА	2,066	101	0,000526042	3927,445545	51,03	15,6	12,46	7,3
	2	БУКВА	2,099	100	0,000520833	4030,08	50,09	16,1	11,96	6,4

Табела 2: Брзина пропације стрес-звучних таласа код перфорираних дасака.

оштећење	број узорка	врста дрвета	дужина [m]	број одбирака	време прелета [μ s]	брзина [m/s]	дебљина [mm]	ширина [cm]	маса [kg]	влажност [%]
1	1	ЈЕЛА	1,9965	141	0,000734375	2718,638298	46,44	23,9	8,955	9,6
1	1	ЈЕЛА	1,9965	90	0,00046875	4259,2	46,44	23,9	8,955	9,6
1	1	ЈЕЛА	1,9965	94	0,000489583	4077,957447	46,44	23,9	8,955	9,6
0	1	ХРАСТ	2,04	108	0,0005625	3626,666667	27,61	17,25	6,665	10,4
1	1	ХРАСТ	2,04	115	0,000598958	3405,913043	27,61	17,25	6,665	10,4
2	1	ХРАСТ	2,04	109	0,000567708	3593,394495	27,61	17,25	6,665	10,4
1+1	1	ХРАСТ	2,04	110	0,000572917	3560,727273	27,61	17,25	6,665	10,4
2	1	ХРАСТ	2,04	107	0,000557292	3660,560748	27,61	17,25	6,665	10,4
3	1	ХРАСТ	2,04	108	0,0005625	3626,666667	27,61	17,25	6,665	10,4
5	1	ХРАСТ	2,04	107	0,000557292	3660,560748	27,61	17,25	6,665	10,4
5	1	ХРАСТ	2,04	117	0,000609375	3347,692308	27,61	17,25	6,665	10,4
5+5	1	ХРАСТ	2,04	131	0,000682292	2989,923664	27,61	17,25	6,665	10,4

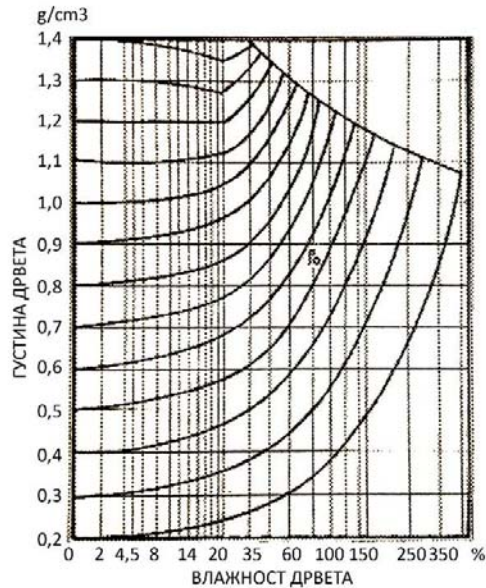


Слика 21: Принцип форматирања даски кроз који је вршено стрес-звучно испитивање

1. Даска пуне дужине на којој је означена зона ширине 4cm
2. Зона ширине 4 cm кроз коју су пуштани стрес-звучни таласи
3. Даска скраћена на половину дужине
4. Извучена половина дужине зоне од 4 cm
5. Направљене епрувете за испитивање из означене зоне обележене са А, В, С, D дужине 40 cm
6. Одабране епрувете на којима су испитивани напони на савијање
Од употребљених извлаче се мање димензија 3 cm и 4 cm
7. Епрувете за мерење влажности, густине и напона на притисак

V 1.2. Одређивање густине дрвета огледних епрувета

У овом испитивању густина дрвета је одређивана у односу на 12% хигроскопну влажност огледних узорка – епрувета. Како се густина дрвета израчунава по формули, она је представљена количником његове масе и запремине. Маса (m) узорка – епрувете сваке врсте дрвета, протоколарно је мерена електронском вагом и била изражена у грамама (g), а његова запремина је израчунавана по математичкој формули за призматично геометријско тело: $V = a \times b \times c$, где је a – дужина епрувете, b – ширина и c – њена висина. Како је у овом случају $b = c$, онда ће облик формуле бити $V = a \times b^2$. Стандардне димензије епрувета су за ово испитивање 20 x 20 x 40 mm, тако да је вредност запремине сваког узорка израчуната према датој формули износила: $V = 16000 \text{ mm}^3 = 16 \text{ cm}^3$ (табела 1). Пошто промена степена влажности, као што је показано, утиче на густину дрвета, а тиме и на његове механичке особине, ради коректне калибрације епрувета, оне су претходно биле просушене у комори до постизања њихових 12% хигроскопне влажности. Промена густине дрвета у односу на влажност може се изразити експоненцијалном функцијом, а за практичну примену се користи Колманов графикон (Kollman) из кога се види да су густина и влажност у границама до 20% хигроскопне влажности у релативно стабилном односу (слика 22). Ово је важно за *in situ* испитивање, јер се у тим границама, променом степена влажности, не мења значајно ни механички потенцијал дрвета.



Слика 22: Графикон за одређивање густине дрвета при различитим влажностима по Колману (Kollmann). Извор: Б. Шошкић и З. Поповић. *Својства дрвета* (Београд: Шумарски факултет Универзитета у Београду, 2002), 101.

V 1.3. Одређивање влажности дрвета

Иако су епрувете претходно биле просушене у комори, влажности је била проверена и непосредно пре њиховог калибрисања, тако да су под једнаком условима извођени и стрес-звучно испитивање и одређивање статичког напона на притисак. Влажност је била одређивана само код стандардно исецаних епрувета како би и тај податак могао да се користи као репер приликом испитивања елемената дрвених конструкција стрес-звучним таласима, у другој фази истраживања. Одређивање влажности огледних епрувета и елемената дрвених конструкција, извођено је помоћу електричног влагомера марке GANN – због његове портабилности, једноставног руковања и мерног опсега до 100% влажности. Овај апарат функционише на принципу промене електричног отпора при промени степена влажности дрвета и веома је поуздан у опсегу хигроскопне влажности од 7–25% што је требало да буде предност за ово *in situ* истраживање, јер се претпостављало да се и влажност елемената дрвених архитектонских конструкција креће у том опсегу (табела 3). С обзиром на чињеницу да нам је у плану било испитивање масивних елемената дрвених конструкција, потенцијалним недостатком се могло сматрати једино то што је мерне електрорде у виду игала требало утиснути до 1/3 дебљине датог елемента. Принцип мерења код ове врсте електричног влагомера

састоји се у томе да повећањем степена влажности у опсегу од апсолутно сувог стања до тачке засићености влаканаца долази до пада електричног отпора и обрнуто. Ово не захтева корекције у односу на врсту дрвета и његову густину, те је и из овог разлога за нас то било прихватљиво. Степен влажности је у процентима аутоматски читаван на дисплеју апарата.

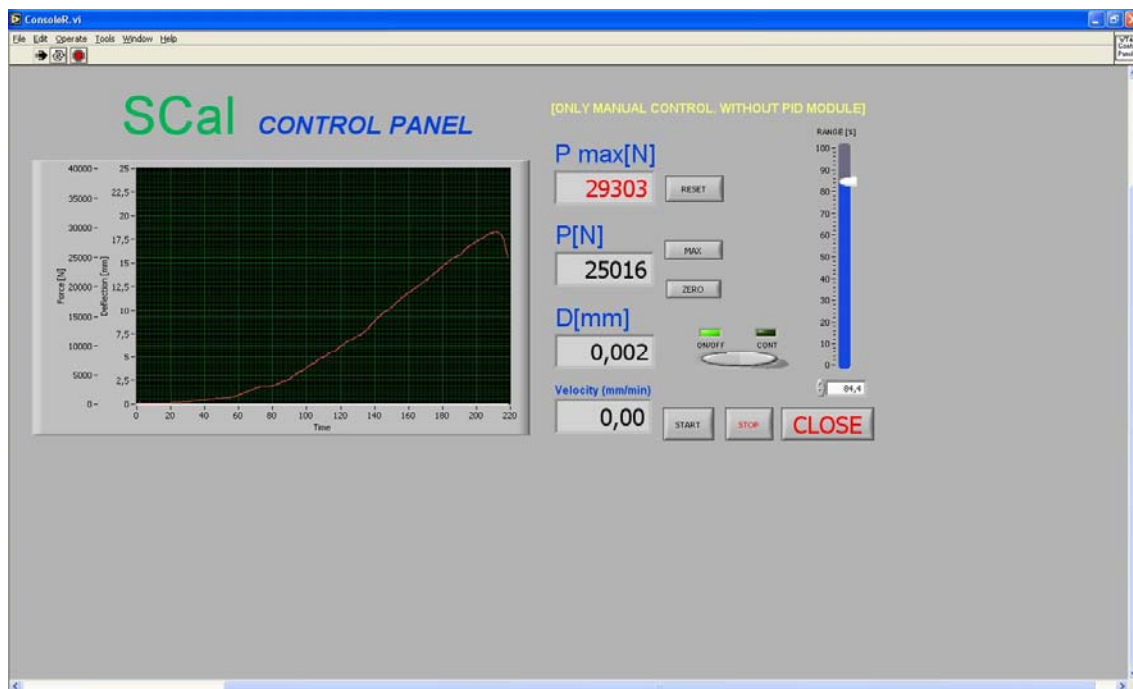
Табела 3: Вредности хигроскопне влажности и густине епрувета одређиване у поступку баждарења методе примене стрес звучних таласа

	ЧЕТИНАРИ					ЛИШЋАРИ							
	ЧАМОВИНА					ПРСТЕНАСТО ПОРОЗНИ				ДИФУЗНО ПОРОЗНИ			
	СМРЧА 1	ЈЕЛА 1	ЈЕЛА 2	БОР 1	БОР 2	ХРАСТ 1	ХРАСТ 2	БАГРЕМ 1	БАГРЕМ 2	БУКВА 1	БУКВА 2		
А	аксијално	30,19	28,94	28,81	29,24	28,66	28,94	29,32	29,18	28,08	29,42	29,35	mm
	радијално	19,77	19,82	19,75	20,05	19,99	19,93	19,92	19,74	20,12	19,95	19,75	mm
	тангенцијално	19,73	19,78	19,81	20	19,84	19,83	19,94	19,9	20,35	19,94	19,81	mm
	маса при влажности	5,46	4,72	4,82	7,84	6,45	7,73	9,55	8,55	8,67	9,1	8,02	g
	аксијално	30,08	28,92	28,81	29,18	28,58	28,94	29,24	29,14	28,03	29,35	29,28	mm
	радијално	19,33	19,39	19,36	19,61	19,77	19,65	19,68	19,37	19,72	19,66	19,49	mm
	тангенцијално	18,89	19,31	19,29	19,56	19,53	19,47	19,49	19,33	19,78	19,35	19,41	mm
	маса при 0 % влажности	4,92	4,33	4,42	7,19	5,91	7,08	8,81	7,86	8,02	8,4	7,41	g
	влажност	10,9756	9,00693	9,04977	9,04033	9,13706	9,18079	8,39955	8,77863	8,10474	8,33333	8,23212	%
	густина у апсолутно сувом стању	0,44794	0,39988	0,41081	0,64239	0,53557	0,63945	0,78553	0,7204	0,73353	0,75233	0,66897	g/cm ³

V 1.4. Оређивање напона на притисак

За ово испитивање све епрувете су биле прописаног облика паралелепипеда и стандардних димензија (20x20x40 mm). Странице паралелепипеда обележаване су почетним словом равни у зависности од правца пружања механичких влаканаца (а – аксијална, r – радијална, t – тангенцијална), а примарни услов да буду селектоване за испитивање је био тај да ток механичких влаканаца буде правилан, што је одређивано на основу њиховог цртежа у тангенцијалној равни. Вертикалан пресек кроз две наспрамне стране епрувете одређивао је тако једну од анатомских оса тока дрвених влаканаца. Епрувете за баждарење су биле тако исецане да им се дужа страна поклапала са правцем пружања механичких влаканаца, тако да је раван која је уздужно, под правим углом пресекала епрувету, паралелно линијама цртежа – одговарала аксијалној равни. Пресеци које су замишљене равни правиле пресецајући две уздужне суседне стране под правим углом, одговарале су радијалној, односно тангенцијалној равни епрувете. Епрувете су биле тако исецане да се на њиховим страницама осликавала одговарајућа пројекција дела прстена прираста дрвета, што је показивало правац тока механичких влаканаца, односно раван њиховог пресецања. Баждарење

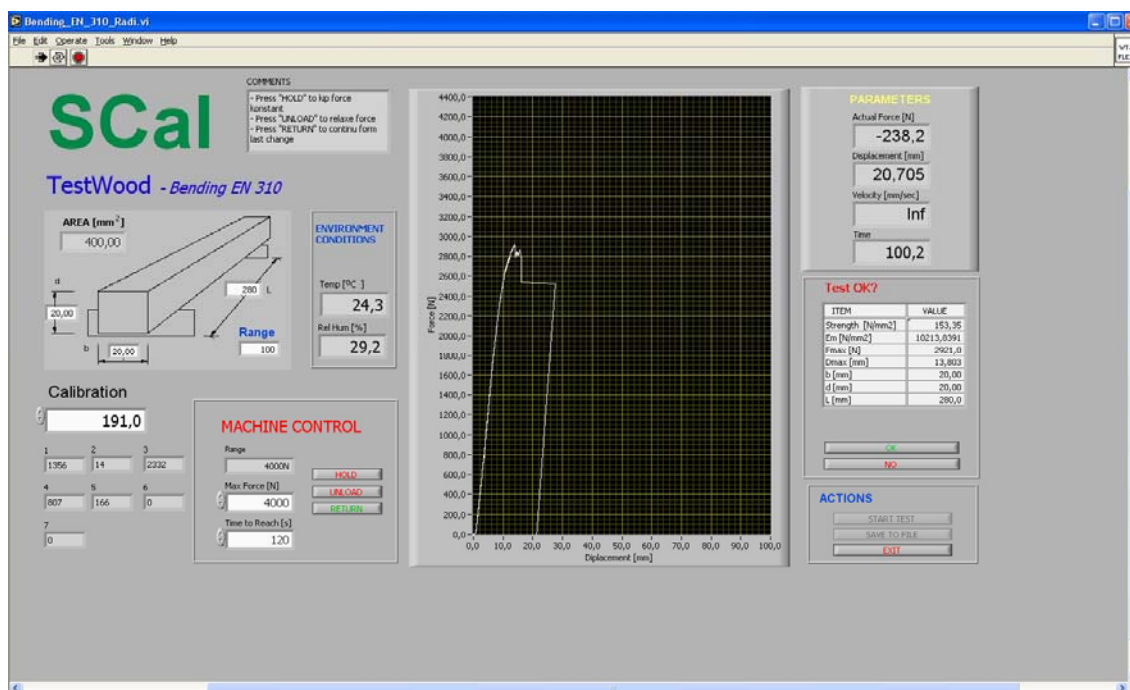
епрувета применом силе притиска је као и у овом прелиминарном истраживању, било вршено њеним усмеравањем паралелно и управно на правац тока влаканаца у радијалном и тангенцијалном смеру, попут усмеравања ултразвучних таласа и рендген зрака. За механичко испитивање напона на притисак, паралелно пружању механичких влаканаца, површина притискивача је по стандардној методи покривала целу површину горње стране вертикално постављене епрувете. Код испитивања напона на притисак управно на правац пружања механичких влаканаца, притискивач је покривао средњу трећину уздужне стране епрувете у радијалном и тангенцијалном смеру њиховог тока. Повећање интензитета силе притиска било је подешено да траје максималних 5 min., а била је регистрована јачина силе притиска, непосредно пре лома епрувете, еквивалентна напону на граници пропорционалности. Изражавање интензитета силе притиска било је стандардно у N/cm/min, а напона на притисак у МРа (слика 23, табела 4). Апарат на коме је вршено испитивање је *Wood tester WT4*.



Слика 23: Графикон односа величина примењене силе (N/cm^2) и напона (МРа) приказан на дисплеју контролног панела мерног инструмента приликом одређивања статичког напона на притисак, у поступку баждарења методе примене стрес-звучних таласа.

Табела 4: Вредности напона на притисак одређиваних на огледним епруветама у поступку баждарења методе примене стрес-звучних таласа.

	ЧЕТИНАРИ					ЛИШЋАРИ						
	ЧАМОВИНА					ПРСТЕНАСТО ПОРОЗНИ				ДИФУЗНО ПОРОЗ.		
	СМРЧА 1	ЈЕЛА 1	ЈЕЛА 2	БОР 1	БОР 2	ХРАСТ 1	ХРАСТ 2	БАГРЕМ 1	БАГРЕМ 2	БУКВА 1	БУКВА 2	
А	дужина аксијална	39,72	40,2	39,13	39,37	39,1	39,04	39,3	39,32	39,3	39,48	39,57
	ширина	20,18	20,16	19,96	20,12	19,93	19,92	19,86	19,79	20,27	19,94	19,8
	дебљина	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
	сила за притисак - трансферзални (бочни)	3113	1883	1648	13129	4979	4149	4621	5839	4736	4624	4760
	сила за притисак - аксијални (попечни)	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
	напон трансферзални код границе пропорцијалности	3,88373	2,32345	2,11002	16,5744	6,38937	5,33512	5,92058	7,50376	5,94519	5,87375	6,07541
	напон аксијални	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
С	дужина	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
	ширина	19,75	19,86	19,94	20,08	20,29	19,84	19,84	19,93	20,02	19,82	19,96
	дебљина	19,86	19,85	19,89	20,09	20,08	19,77	19,79	19,9	20,12	19,79	19,9
	сила за притисак - трансферзални (бочни)	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
	сила за притисак - аксијални (попечни)	19550	21166	21212	34214	27739	24223	27742	39241	37842	31563	29053
	напон трансферзални	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
	напон аксијални	49,8426	53,6907	53,4837	84,8126	68,084	61,7561	70,6562	98,9418	93,9468	80,469	73,1438

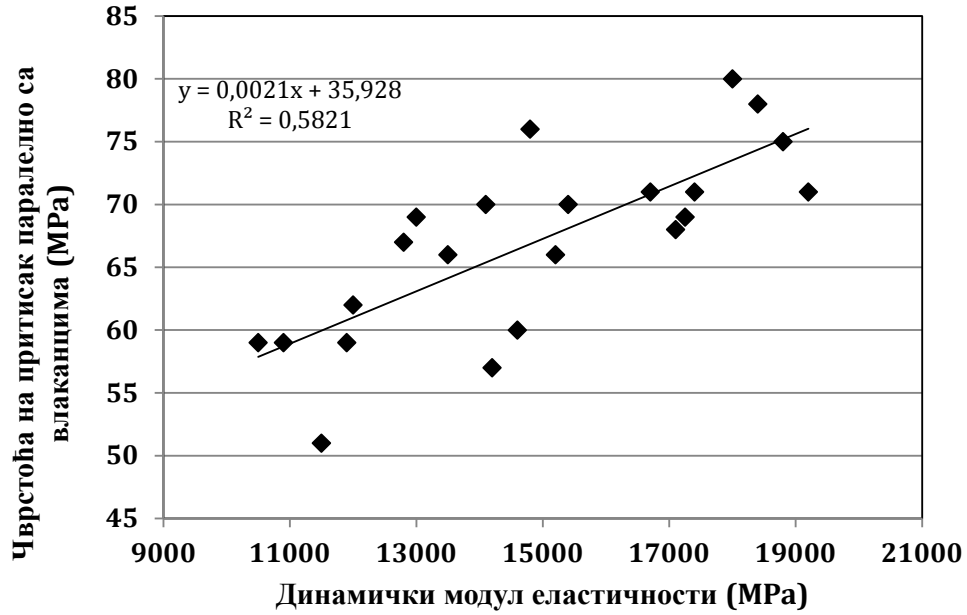


Слика 24: Графикон односа величина примењене силе (N/cm²) и напона (Мра) приказан на дисплеју контролног панела мерног инструмента приликом одређивања статичког напона на савијање, у поступку баждарења методе примене стрес-звучних таласа.

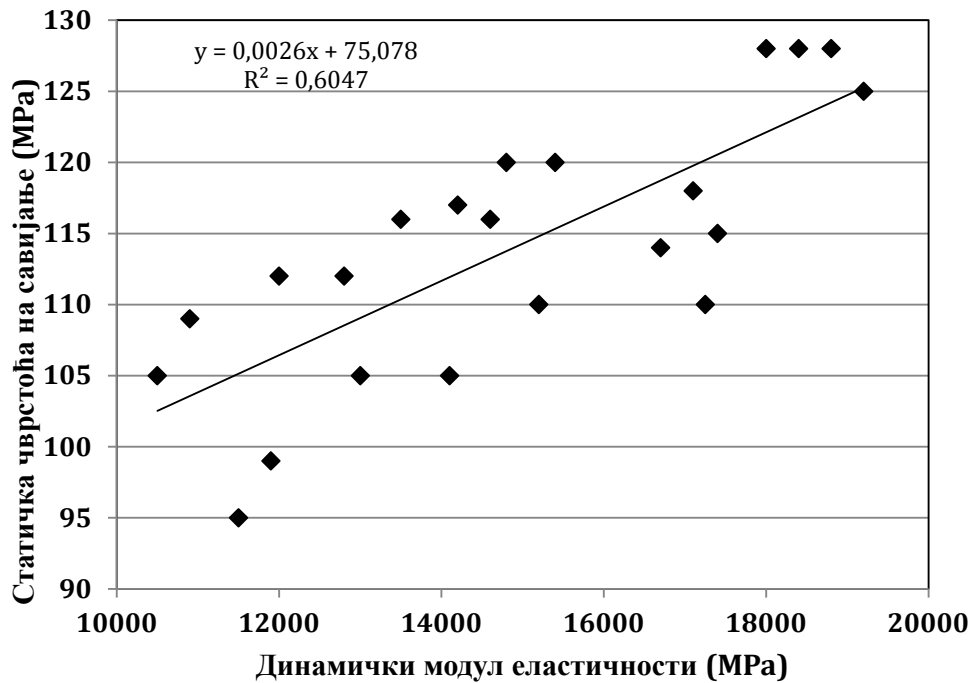
Табела 5: Вредности напона на савијање одређиваних на огледним епруветама у поступку баждарења методе примене стрес-звучних таласа.

	ЧЕТИНАРИ					ЛИШЋАРИ						
	ЧАМОВИНА					ПРСТЕНАСТО ПОРОЗНИ		ДИФУЗНО ПОРОЗ.				
	СМРЧА 1	ЈЕЛА 1	ЈЕЛА 2	БОР 1	БОР 2	ХРАСТ 1	ХРАСТ 2	БАГРЕМ 1	БАГРЕМ 2	БУКВА 1	БУКВА 2	
А	h (mm)	19,74	19,86	19,84	20,1	19,78	19,89	19,85	19,79	20,1	19,88	19,91
	b (mm)	19,72	19,83	19,88	20,11	19,91	19,88	19,84	19,94	20,06	19,92	19,81
	чврстоћа на савијање МПа (N/mm ²)	88,91	79,93	71,61	132,96	102,81	91,09	124,46	86,36	170,33	169,76	128
	модул еластичности МПа (N/mm ²)	6108	8137	7905	11567	7448	6792	8232	11020	14788	11982	9145
	F max сила (N)	1627	1488	1334	2572	1907	1706	2316	1605	3288	3182	2393
	D max угиб (mm)	13,85	11,78	10,28	9,39	17,95	16,58	15,04	10,27	14,5	12,64	16,67
В	h (mm)	19,74	19,83	19,89	19,98	20,03	19,85	19,94	19,9	20,07	19,9	19,8
	b (mm)	19,78	19,79	19,86	19,92	20,14	19,83	19,85	19,92	20,31	19,84	19,8
	чврстоћа на савијање МПа (N/mm ²)	84,14	81,28	76,87	152,12	119,11	103,28	105,75	200,92	185,21	135,91	133,34
	модул еластичности МПа (N/mm ²)	8784	8262	7304	12778	10337	7722	6882	15175	13920	10315	9722
	F max сила (N)	1544	1506	1438	2880	2291	1921	1987	3773	3607	2542	2464
	D max угиб (mm)	12,58	11,26	11,06	18,21	12,6	17,36	20,05	13,16	14,74	11,61	12,59

У циљу сагледавања предикционог потенцијала стрес-звучне методе, коришћен је динамички модул еластичности на савијање (слика 24, табела 5), као значајан показатељ акустичког својства дрвета, који се по формули израчунава на основу брзине пропагације стрес- звучног таласа. Његовим корелисањем са параметрима статичке чврстоће на притисак и статичке чврстоће на савијање (слика 25, слика 26), добијени су коефицијенти корелације $r=76$ и $r=77$, који се с обзиром на то да је дрво анизотропан материјал, могу сматрати веома добрим. Како брзина звука, када се ради о дрвету, није у јакој зависности од густине ($c=\sqrt{E/\rho}$), то се онда динамички модул еластичности (МОЕd) може сматрати бољим предиктором утицаја сила савијања и притисака на дрво.



Слика 25: Однос динамичког модула еластичности и чврстоће на притисак паралелно са влаканицима



Слика 26: Однос динамичког модула еластичности и статичке чврстоће на савијање

VI АРХИТЕКТОНСКЕ ГРАЂЕВИНЕ ОД КУЛТУРНО-ИСТОРИЈСКОГ ЗНАЧАЈА

Успостављање недеструктивне *in situ* методе испитивања елемената дрвених архитектонских конструкција објеката од културно-историјског значаја је фактичка примена принципа заштите градитељског наслеђа на овим просторима. Дијагностика која се врши у оквиру припреме за рестаурацију и обнову таквих објеката регулисана је повељама и јасно дефинисана препорукама међународних организација које се баве очувањем културно-историјске баштине. Нова методологија испитивања квалитета уграђених дрвених елемената, која се темељи на постулатима тих повеља, значила би очување континуитета заштите и онога што једног дана може бити проглашено спомеником културе. Критеријуми заштите културно-историјских споменика, на којима се базира и концепт ове недеструктивне *in situ* методе, установиле су организације чије оснивање је иницирао UNESCO. Прва таква организација, формирана 1959. године била је ICROM, а затим је на конфернцији одржаној у Венецији 1964. године основан и ICOMOS. Њихов задатак је да развијају доктрине, методе и средства за заштиту културно-историјских добара и да на светском нивоу координишу активности које су ка томе усмерене. Одлуком министара Света Европе, 1962. године је основан и *Савет за културну сарадњу* који креира културну политику, финансира и координише рад на остваривању њених програма.

VI 1.1. Принципи дијагностике – препоруке савремених повеља

Атинска повеља је усвојена на *Првом међународном конгресу архитеката и техничара за историјске споменике* 1931. године у Атени. Том приликом је дата препорука да споменици културе треба да се користе ради континуалности њиховог живота, али у складу са њиховом историјском и уметничком вредношћу. *Венецијанска повеља* је усвојена 1964. године у Венецији, на *Другом конгресу архитеката и техничара историјских споменика*, а коју је као свој полазни документ преузео ICOMOS – након свог оснивања 1966.године. Начелна препорука те повеље је да принципи рада на конзервацији и рестаурацији културно-историјских споменика морају бити: „заједнички истакнути и формулисани на међународном плану, остављајући у потпуности свакој нацији бригу да им осигура примену у оквиру своје властите културе и традиције.” Као резултат многих предлога националних комитета, 1977. године створена је редигована *Венецијанска повеља* која сада прецизно

објашњава појмове: историјски споменик и предео, као и појмове: конзервација и рестаурација и споменички предели рестаурација.⁷⁴ Са аспекта примене ове *in situ* методе испитивања квалитета елемената дрвених конструкција архитектонских објеката, важно је истаћи да појам историјског споменика, по дефиницији ове повеље, подразумева „архитектонско остварење, као и урбани или рурални предео, који садржи сведочанство једне посебне цивилизације, значајне еволуције или историјског догађаја.”⁷⁵ Овим се утврђује, што је за ово истраживање концептуално било веома битно, да се рестаурацијом морају сачувати посебна обележја, односно да се мора „уважавати некадашња суштина и аутентичност докумената.”⁷⁶ Ово истраживање је одређено становиштем да је аутентичност пресудни чинилац у оцењивању вредности културног наслеђа. Потврда таквог става добијена је и декларативно у *Конвенцији о светском наслеђу*, усвојеној 1972. године на Генералној конференцији, којом се аутентичност дефинише као „апсолутна вредност културног добра, која га препоручује за упис у листу светског наслеђа...”⁷⁷ Аутентичност је суштински овако окарактерисана и *Венецијанском повељом* из 1964. године, у делу који концептуално дефинише појам споменика културе, где се наводи „да он не подразумева само велика уметничка дела, него и скромнија дела прошлости, која су стекла културни значај током времена.”⁷⁸ Према томе, ово гледиште да успостављање недеструктивне *in situ* методе испитивања елемената дрвених архитектонских конструкција треба базирати на принципима заштите културно-историјских споменика као највишем стандарду, било је потпуно оправдано. Када је реч о историјским споменицима, аутентичност се наине односи на „креативни процес који их је произвео, као и веродостојне производе свог времена, укључујући и последице проласка кроз време.”⁷⁹

Узимајући ово у обзир, рестаурацији културно-историјског споменика мора се приступити креативно, стваралачки. У складу са *Унесковом конвенцијом о светском наслеђу*, на ово упућују и параметри из усвојеног правилника који дефинишу културно-историјско наслеђе на основу његовог карактера и значења, а односе се на концепцију,

⁷⁴С. Вученовић, *Урбана и архитектонска конзервација. Том 1, Свет – Европа*. (Београд : Друштво конзерватора Србије, 2004), 150.

⁷⁵ Ibid.

⁷⁶ Ibid.

⁷⁷ Convention Concerning the Protection of the World Cultural and Natural Heritage

<http://whc.unesco.org/archive/convention-en.pdf> Приступљено: мај 2019.

⁷⁸J. Jokileto, „Конзервација између праксе и теорије,” *Гласник Друштва конзерватора Србије* 27 (2003), 10.

⁷⁹ Ibid.

материјале, извођење и амбијент.⁸⁰ У првом плану је дакле истакнута природа културно-историјског споменика и његов контекст, што подразумева да аутентичност одређује различитост информација. Према *Документу из Наре*, усвојеном 1994. године на XX Генералној скупштини ICOMOS-а у Јапану, извори тих информација „садрже концепцију и форму, материју и суштину, коришћење и функцију, традицију и технику, ситуацију и положај, дух и израз, оригинално стање и историјско настајање...”⁸¹ Овај приступ испитивању квалитета елемената дрвених конструкција био је дакле, у складу са концептом аутентичности према дефиницији коју је дао Пол Филип која каже да је „аутентичност једног уметничког дела, унутрашње јединство менталног процеса и материјалне реализације дела”.⁸² Из тога произлази да разумевање аутентичности има основну улогу у планирању заштите и рестаурације културно-историјских споменика, чиме смо се руководили у овом истраживању. Наше разумевање „недодирљивости” (*untouchable*) културно-историјског наслеђа, о чему се разматра у *Документу из Наре*⁸³ и неопходности веродостојног прикупљања и верификовања информација, довело је до концептуалне поставке успостављања ове *in situ* методе. Ако је став да је аутентичност „суштински квалитативни фактор у односу на веродостојност расположивих извора информација”,⁸⁴ онда је и ова усвојена метода била успостављена на принципима који наглашавају концепт аутентичности. Метода је према томе морала да буде неинвазивна да се не би нарушавао интегритет културно-историјског добра и да буде егзактна да би се у поступку рестаурације користили веродостојни подаци. Гледано са тог аспекта провера методе је морала да крене од испитивања елемената дрвених архитектонских конструкција културно-историјских споменика. С обзиром на то да наша земља има богато културно-историјско наслеђе, одлучено је да истраживање крене од споменика културе на којима почива наша духовност. Испитивање дрвеног уграђеног материјала, било је свакако од примарног интереса овог истраживања због феномена течења дрвета, односно утицаја дуготрајног, константног оптерећења на чврстоћу носећих елемената дрвених конструкција. Имајући у виду и то, да су грађевине од културно-историјског значаја с времена на

⁸⁰ Ibid.

⁸¹ *Dokument o autentičnosti iz Nare* (Pariz: ICOMOS, 1994) <https://www.icomos.org/charters/nara-e.pdf>

⁸² J. Jokileto, „Аспекти аутентичности,” *Гласник Друштва конзерватора Србије* 26 (2002), 12.

⁸³ J. Jokileto, „Аспекти аутентичности,” *Гласник Друштва конзерватора Србије* 26 (2002), 11.

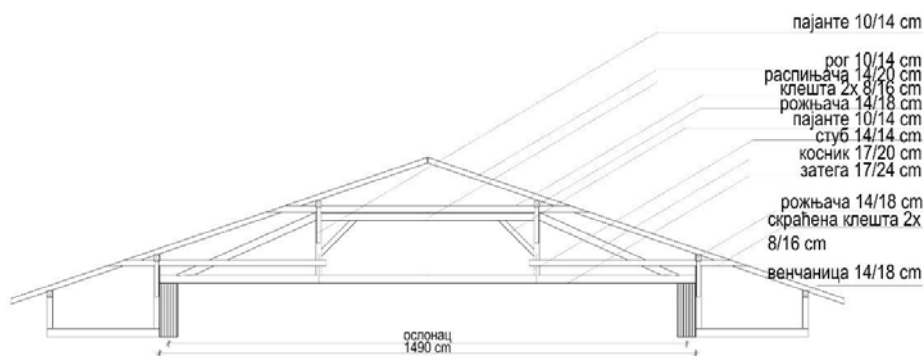
⁸⁴ Ibid.

време обнављање, тај податак је оријентационо могао да послужи и као параметар трајности одређене врсте дрвеног материјала.

VI 1.2. Зграда Техничког факултета у Београду

Према концепту овог истраживања, *in situ* испитивање дрвене конструкције је спроведено на архитектонском објекту од културно-историјског значаја. Зграда Техничког факултета је својеврсно сведочанство историјског и културног развоја Србије и као прва зграда изграђена за потребе Техничког факултета спада у споменике културе. Имајући у виду да за очување ове грађевине постоји јавни интерес, она и формално – по дефиницији, испуњава услов да се нађе у регистру историјских објеката.

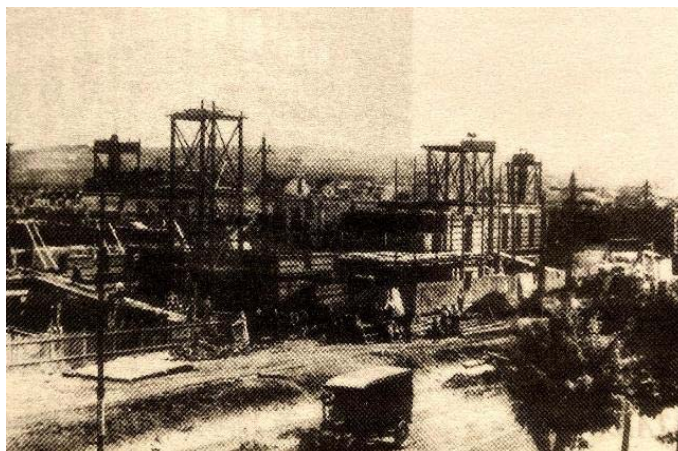
Према пројекту архитеката Николе Несторовића и Бранка Таназевића, зграда Техничког факултета Велике школе је грађена у периоду од 1925–1931. године. После Другог светског рата – 1948. године, а по пројекту Михаила Радовановића, овом здању је, у позицији североисточно од Универзитетске библиотеке, дозидан трећи спрат. Кровна конструкција изнад ауле факултета је била изведена као кров на вешалке, савладавајући тако распон од 15 m (слика 27).



Слика 27: Кровни носач – везач, сегмент конструкције крова на вешалке

Објекат је монументалних димензија и као слободностојећа грађевина има четири унутрашња дворишта. Стил градње је у духу академизма са доминантним класицистичким елементима. Главна фасада на којој се истиче ризалит је доминантно украшена, док су бочне стране сведене и једноставније украшене. Прочелје је

украшено скулптурама и рељефном пластиком – радом академских вајара Илије Коларевића и Ивана Лучева, док је аутор орнаменталне пластике у вештачком камену Бедрих Зелени. Зграда се налази у Београду у Булевару краља Александра бр. 73 (слика 28) и под управом је Републичког завода за заштиту споменика културе (Службени гласник РС бр. 73/07). Узимајући у обзир ове податке, сви критеријуми за извођење *in situ* испитивања на дрвеној кровној конструкцији Техничког факултета у Београду, које је овај концепт захтевао, су били испуњени.



Слика 28: Почетак изградње зграде Техничког факултета Велике школе 1926. Извор: Високошколска настава архитектуре у Србији 1846–1971 (Београд, Архитектонски факултет Универзитета у Београду), 198.

VII ДИЈАГНОСТИКА СТРЕС-ЗВУЧНИМ ТАЛАСИМА – *IN SITU* ПРИМЕНА

VII 1.1. Дефиниција и историјат

Стрес-звучни таласи спадају у механичке таласе и примењују се за недеструктивно испитивање квалитета дрвета, путем мерења њихове брзине провођења. Могло би се рећи да је до развоја ове дијагностичке методе дошло по угледу на перкусионо испитивање дрвета, где се на основу одзвањања перкутованог дрвета закључује о његовом квалитету. За разлику од перкуторне методе која је субјективна и првенствено се базира на искуству, метода дијагностике стрес-звучним таласима је софистицирана и потпуно егзактна.

VII 1.2. Шема мерења и опрема

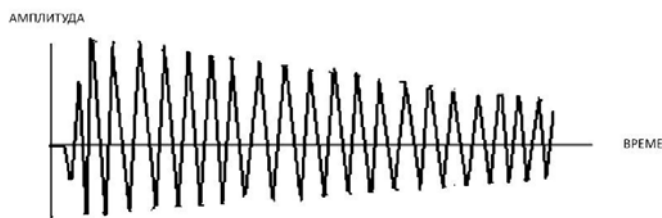
У овом истраживању мерена је брзина стрес-звучних таласа. У првом делу истраживања је то мерење вршено на епруветама, паралелно току дрвних влаканаца и управно на њих у радијалном и тангенцијалном смеру, на сличан начин како је то било изведено и у уводном истраживању применом ултразвучних таласа. Таласи су са једне, на контра страну епрувете преношени механички, преко емисивног трансдјусера, а регистровани су преко пријемног трансдјусера. При томе су функцију трансдјусера вршили микрофони, повезани преко тјунера са компјутерским програмом за анализу сигнала. За овакву врсту испитивања (када се ради са узорцима малих димензија) би због лакшег позиционирања знатно били бољи иглични трансдјусери – при томе је код неких апарата емисиони трансдјусер у готовом склопу са чекићем.

VII 1.3. Техника извођења методе

Произвођење таласа вршено је ударом емисионог трансдјусера о површину испитиваног узорка, са супротне стране од оне на којој се налазио пријемни трансдјусер. С обзиром на мале димензије епрувета за одређивање статичког напона на притисак, звучно испитивање је вршено на епруветама већих димензија, за одређивање статичког модула еластичности на притисак. Јачина улазног сигнала подешавана је преко тјунера. Таласна дужина је одређивана према истој формули коришћеној и за одређивање брзине провођења ултразвука.

VII 1.4. Спектрограм

Спектрална анализа фреквенце стрес-звучних таласа у овом истраживању је примењена и у посутку баждарења методе и у самом *in situ* испитивању елемената дрвене конструкције. Како фреквенца пропадајућег звучног таласа директно зависи од структуралних особина дрвета и директно је пропорционална квадратном корену чврстоће, а обрнуто пропорционална маси испитиваног узорка, имали смо објективне параметре за процену чврстоће дрвених конструкцијских елемената. Процена се заснивала на томе да дрво пропадањем губи своју масу, а тиме и чврстоћу, тако да је било очекивано да пропација звучног таласа кроз оштећено дрво (слика 30) буде знатно ниже фреквенце од оне која се бележи код здравог дрвета (слика 29). Ова *in situ* мерења вршена су у три стандардна правца испитиване носеће греде. Резултати тих мерења представљени су графички – у облику спектралне криве која илуструје квантитативни однос здравог и оштећеног дрвета.



Слика 29: Облик таласа у узорку доброг дрвета



Слика 30: Облик таласа у узорку оштећеног дрвета

VII 1.5. Процена квалитета носећих елемената дрвених конструкција

Пристап који је у овом истраживању коришћен за *in situ* процену статичке ситуације једне дрвене архитектонске конструкције, заснован је према нормативима допуштеног оптерећења који су дати према врсти и квалитету дрвета (JUS U.C9200/300). За савремене решеткасте дрвене кровне конструкције, у употреби су вредности прописане Еврокодом (ENV 1991), прорачунате на основу тежине самог носача и свих дрвених елемената носећег склопа. Димензионисање елемената код прорачуна дрвених конструкција је концепт који користи вредности њихових граничних стања и то: гранично стање еластичности – граница лома; и гранично стање употребљивости. Сам поступак је заснован на сазнањима техничке механике, као и на експерименталним проверама. Како је према овом усвојеном концепту за процену стања носеће греде коришћен механички еквивализовани параметар брзине прогресије звучног таласа, добијен на узорку дрвета првог квалитета, то је за ово *in situ* испитивање узета таблична вредност за дозвољено притисно оптерећење, управно на дрвна влаканца, дато за дрво прве класе. Еврокод (ENV 1991)⁸⁵ прописује нормативне вредности сличне овим, те се тако за решеткасте носаче распона до 20 m предвиђа оптерећење до $q = 0,25 \text{ kN/m}^2$, за распоне од 20–25 m та вредност је, $q = 0,35 \text{ kN/m}^2$ и за распоне преко 25 m предвиђена је вредност $q = 0,45 \text{ kN/m}^2$. Вредности допуштеног оптерећења носећих греда према (JUS U.C9200/300) стандарду приказани су у **табели 6**. Процена квалитета носећих греда дрвених архитектонских конструкција вршена је компарацијом директно добијеног, механички еквивализованог, параметра брзине пропагације стрес-звучног таласа и стандардом прописане одговарајуће табличне вредности дозвољеног оптерећења у N/cm^2 .

⁸⁵M. Gojković i D. Stojić, *Drvene konstrukcije* (Beograd : Građevinski fakultet : Grosknjiga, 1996), 429.

Табела 6: Основни допуштени напони за влажност дрвета од 18% и 15% у [N/cm²] за конструкције од пуног – масивног дрвета и лепљеног ламелираног дрвета (ЈУС U.C9200/300)

Основни допуштени напони		Монолитно дрво w=18%					Лепљено ламелирано дрво w=15%			
Врсте напрезања	Ознака	Четинари (европски)			Храст, буква		Четинари		Храст, буква	
		Класа			Класа		Класа		Класа	
		I	II	III	I	II	I	II	I	II
Савијање	σ_{md}	1300	1000	700	1400	1200	1400	1100	1620	1370
Затезање	$\sigma_{ d}$	1050	850	0	1150	1000	1050	850	1800	1080
Притисак	$\sigma_{\perp d}$	1100	850	600	1200	1000	1100	850	1500	1200
Притисак управно на влакна	$\sigma_{\perp d}$	200	200	200	300	300	200	200	490	430
		250*	250*	250*	400*	400*	250*	250*		
Смицање	$\tau_{ d}$	90	90	90	120	120	90	90	150	150
Смицање од Т сила	$\tau_{m d}$	90	90	90	120	120	120	120	130	110
Пресецање влакна	$\tau_{\perp d}$	350	300	250	400	350	350	300	250	400

VII 1.6. Компаративна анализа табличних и измерених вредности оптерећења

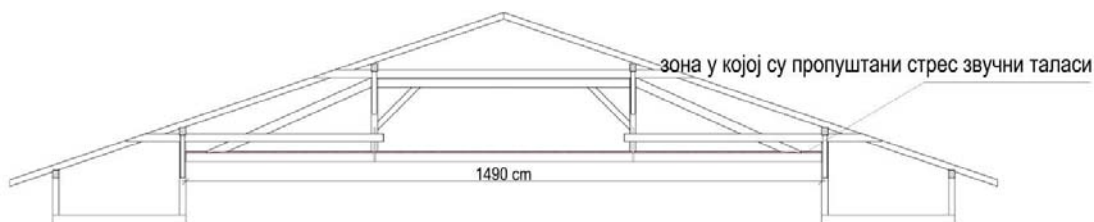
Овај део истраживања разматра гранично стање статичке равнотеже дрвених конструкција архитектонских објеката на основу датих вредности дестабилизујућег и стабилизујућег оптерећења. Вредности ових оптерећења индиректно су одређиване (лабораторијски) приликом испитивања статичког напона на притисак у поступку калибрације експерименталних епрувета. Поређењем се према томе проверава, да ли је измерено оптерећење (дестабилизујуће оптерећење) носећег елемента конструкције прекомерно, сходно лабораторијским и према стандарду нормираним вредностима (стабилизујуће оптерећење) за дрвене конструкције (ЈУС U.C9200/300).⁸⁶ На основу резултата претходних истраживања, дошло се до рендгенских и ултразвучних еквивалената статичког напона на притисак, односно напона на затезање и смицање у оквиру сложеног напона на савијање. По истом принципу сведени су и параметри брзине простирања стрес-звучних таласа, с тим што је том поступку претходила механичка калибрација експерименталних епрувета, чиме је постигнуто успостављање методе реалним компарирањем механичких и стрес-звучних параметара. Основни принцип који се користио при процени статичке равнотеже био је тај, да је меродаван

⁸⁶М. Gojković i D. Stojić, *Дрвене конструкције* (Београд : Грађевински факултет : Grosknjiga, 1996), 158.

онај случај где је резултат измерен на елементу највећег попречног пресека. Сходно препоруци и узимајући у обзир да је *in situ* истраживање спроведено на објекту са дрвеном конструкцијом (старом преко 70 година), било је прихватљиво да се изузев основних оптерећења, друге комбинације деловања могу апстраховати. У та основна оптерећења конвенционално се убрајају вертикална оптерећења (стално и покретно) и хоризонтална оптерећења, те се у складу са тим дозвољеним оптерећењем конструкције могло прихватити оно које је за 15% веће од прописаног за испитивану врсту дрвета. Да би се донекле рачунски компензовао утицај апстрахованих допунских оптерећења (трење на лежиштима, температурне промене, скупљање и бубрење) и нарочитих оптерећења (потреси, размицање, пожарно оптерећење) у разматрање су узете вредности допуштених напона најквалитетније класе испитиваног дрвета. С обзиром на чињеницу да је стандардизација допуштених напона установљена у односу на влажност дрвета и да је испитивање вршено у Београду, то је у овом раду прорачунски узет модел прве експлоатационе класе (табела 6). Образложење огледног поступка је дато у складу са стандардизованим прорачунима основних допуштених напона.⁸⁷

⁸⁷ M.Gojković i D. Stojić. *Drvene konstrukcije*. (Београд : Грађевински факултет : Grosknjiga, 1996), 157.

VIII *IN SITU* МЕРЕЊЕ ЧВРСТОЋЕ ЕЛЕМЕНАТА ДРВЕНИХ КОНСТРУКЦИЈА ДИСКУСИЈА РЕЗУЛТАТА



Слика 31: Кровни носач – везач, сегмент конструкције крова на вешалке кроз који је пропуштан стрес-звучни талас

Резултати *in situ* испитивања квалитета носеће греде дрвене кровне конструкције, указују да је брзина пропагације стрес-звучних таласа, идентично измереној у лабораторијским условима, била највећа у смеру паралелно аксијалној осовини носеће греде, а сразмерно мања дуж њеног радијалног и тангенцијалног правца. С обзиром на то да је непосредно измерени степен влажности греде износио 10% (мерење влаге је спроведено универзалним ручним влагометром *Nigos-elektronik RVD-904*, 13. фебруара 2021. године), то је значило да влажност неће бити од утицаја на смањење њене густине, а самим тим неће ни умањивати механички потенцијал који је требало да се процени. Измерена максимална брзина стрес -звучног таласа дуж аксијалне осовине греде (14,9 m) одговарала је 5721m/s и одговарала је времену проласка звука кроз здраво дрво у распону од 2,6 μ s–3,14 μ s. Снимањем пропагације таласа аксијалне осе у горњем делу попречног пресека носеће греде (слика 31), бележено је постепено смањење његове амплитуде што је указивало на здраво дрво. Том коефицијенту брзине стрес-звучног таласа при аксијалној пропагацији, одговарао је MOEd од 14744 MPa, што је добијено по формули: $MOEd = \rho V^2$, где је ρ вредност густине дрвета у апсолутно сувом стању (табела 3), а V брзина пролаза звука кроз материјал. Овој вредности MOEd је према графикону (слика 25) одговарао коефицијент дозвољеног

статичког напона на притисак од 680 N/cm^2 (68 Мра). Сходно табличном односу (табела 6) та вредност је била троструко већа и у складу са прописаним, допуштеним оптерећењем управно на дрвна влаканца греде од 250 N/cm^2 или 25 МРа .

Провокацијом звука у горњем делу попречног пресека, дуж једне линије аксијалног правца, забележено је дуже време ($3,31354 \mu\text{s}$) у односу на ону максималну ($2,6 \mu\text{s}$), забележену у доњем делу пресека, што је указивало на дефект у структури на тој линији пропагације таласа. То је указивало на дефект у структури, што није било уочено на основу аксијалне пропагације. Инспекцијском провером греде је уочена благо искошена пукотина при горњој површини греде, што је захтевало звучно мапирање површине пресека и локализацију промене. Технички међутим, то није било могуће извести на целој површини, због приступне ограничености. Већина резултата звучних проба је ипак указивала на здраво дрво, те се могло закључити да је механички потенцијал греде у границама допуштених оптерећења.

In situ испитивање је спроведено са акцелерометром (*Brüel & Kjaer*) којим се на једној страни греде вршила провокација звучних таласа и са мерним микрофоном (*NTi*) којим се на другој страни регистровао долазни стрес-звучни талас. Аудио интерфејс био је апарат (*Steinberg*) са фреквенцијом одабирања 192000 Hz .

Минимални интервал који се овим апаратом може регистровати износи $\Delta t = 1/192000 \text{ s}$. Време које је потребно да звук прође кроз материјал рачуна се тако што се број одбирака који бележи аудио интерфејс помножи са минималним интервалом Δt .

Најдуже време проласка кроз структуру дрвене греде било је $1/192000 \text{ s} \times 602 = 0,00313541 \text{ s}$ —односно $3,1354 \mu\text{s}$, док је најкраће забележено време проласка било $1/192000 \text{ s} \times 500 = 0,00260416 \text{ s}$ —односно $2,6041 \mu\text{s}$.

IX ЗАКЉУЧАК

У циљу успостављања недеструктивне *in situ* методе испитивања квалитета елемената дрвених конструкција архитектонских објеката, били су испуњени сви задати услови сходно постулатима научног истраживања. Ова тврдња се базира на доследно цитираним научним чињеницама које се односе на хемијску и анатомску структуру дрвета, као и на физичке и механичке особине дрвета – према томе и на законитости у понашању дрвета као материјала, на чему је конципиран план и спроведено ово истраживање.

Са аспекта методолошког приступа, прво се може рећи да је ова недеструктивна *in situ* метода испитивања дрвених архитектонских конструкција у потпуности била постављена у складу са важећим конвенционалним постулатима за архитектонске грађевине од културно-историјског значаја.⁸⁸ Узимајући у обзир да је ово испитивање под таквим условима успешно изведено на кровној конструкцији зграде Техничког факултета у Београду, може се закључити да такав приступ тестирању гарантује поштовање задатог принципа очувања аутентичности и интегритета заштићеног објекта, као и да је опште применљив.

Изношење осталих закључака се односи на само испитивање маханичких својстава дрвета и засновано је на резултатима прелиминарних истраживања, лабораторијског успостављања *in situ* методе, као и њене непосредне примене. Примена рендген зрака и ултразвучних таласа, аналогно стандардном усмеравању силе притиска дуж тока дрвених влаканаца или управно на њих, потврдила је реалну могућност вршења еквализације, перцептивне градације светлине рендгенске слике и параметара брзине пропагације ултразвучних таласа кроз структуру дрвета, са просечним табличним вредностима параметара статичког напона на притисак и статичког напона на савијање⁸⁹ узетих за дате недеструктивно испитиване узорке – епрувете, одређених врста дрвета.

На основу једне овакве нумеричке симулације механичког испитивања дрвета, где је дрво таблично веће чврстоће⁹⁰ давало светлију рендгенску слику и брже пропуштало

⁸⁸ М. Николић. *Примена принципа заштите и презентације градитељског наслеђа на средњевековним утврђеним градовима у Србији*. Докторска дисертација. (Београд: Архитектонски факултет Универзитета у Београду, 2014), 53–73

⁸⁹Б. Шошкић и З. Поповић, *Својства дрвета* (Београд: Шумарски факултет Универзитета у Београду, 2002), 214.

⁹⁰*Ibid.*

ултразвучне таласе, могло се рећи да је изводљиво калибрисање сваке недеструктивне методе која се може примењивати аналогно стандардном усмеравању силе код испитивања нормалних напона.

Калибрисање методе примене стрес-звучних таласа за испитивање квалитета дрвета, потврдило је да је та метода сродна ултразвучној методи и да се резултати добијени њеном применом могу тумачити по истом принципу као и у уводном истраживању. Ово је значило да ће и у овом случају, према физичкој законитости простирања таласа⁹¹ дрво веће густине дрвне супстанце, односно веће вредности статичког напона на притисак (чврстоће) и већег динамичког модула еластичности (MOEd), брже пропуштати стрес-звучне таласе.

Како је баждарење стрес-звучне методе вршено у условима стандардне хигроскопне влажности (12%) огледних узорака – епрувета, слично баждарењу ултразвучне методе на основу табличне апроксимације,⁹² то је онда био успостављен један нови стандард за *in situ* испитивање елемената дрвених архитектонских конструкција.

На основу овога коначно следи и то, да ће у изједначеним условима хигроскопне влажности, испитиване дрвне структуре пропуштати стрес-звучне таласе сразмерно њиховој чврстоћи, одражавајући тако своје реалне механичке потенцијале.

Резултати *in situ* испитивања били су потпуно у складу са очекивањима да се на основу еквивалације параметара брзина пропагације стрес-звучних таласа, изведеног (MOEd) и параметара статичког напона на притисак и савијање, добијених код епрувета од здравог и веома старог дрвета, може компаративно испитивати механички потенцијал носећих греда дрвених архитектонских конструкција. При томе су се оба начина компарације (рендген и ултразвук) показала поузданим, како у односу на брзину стрес-звучних таласа код здравог дрвета, тако и према стандардом допуштеним напонима на притисак за носеће дрвене греде. Потврдом полазних хипотетичких поставки, долази се тако и до главног одговора траженог кроз ово истраживање – да се баждареном стрес-звучном методом испитивања може *in situ* директно испитивати механички потенцијал носећих дрвених греда, а тиме и стабилност саме конструкције.

Успостављање оваквог дијагностичког принципа, заснованог на еквивалацији динамичког параметра брзине пропагације звука, односно MOEd и параметра

⁹¹ L.Ostrovsky and A. Potapov. *Modulated Waves: Theory and Application*. (Baltimore: Johns Hopkins University Press, 2001)

⁹²Б. Шошкић и З. Поповић, *Својства дрвета* (Београд: Шумарски факултет Универзитета у Београду, 2002), 190–214.

статичког напона на притисак и савијање, може се сматрати научним доприносом, што отвара могућности даљег усавршавања методе.

Прелиминарна истраживања овог рада показују и то, да се принцип еквилизације може примењивати и код других недеструктивних метода, код којих се дијагностички поступак врши аналогно усмеравању притисне силе код испитивања статичког напона на притисак.

Свакако је од посебног интереса развојна перспектива рендген дијагностике, због могућности директне визуелизације структуре дрвета.

Други аспект унапређења методологије *in situ* дијагностичког приступа испитивања квалитета дрвених конструкција се односи на увођење степена хигроскопне влажности као експоненцијалног фактора у функцији брзине простирања таласа кроз дрвени материјал.

Овим се параметри недеструктивног и механичког испитивања дрвета своде на заједнички именоване, што повећава прецизност мерења, а тиме и поузданост процене квалитета уграђених дрвених елемената.

Практична примена механички баждарене методе стрес-звучних таласа би могла да унапреди процес рестаурације и обнове архитектонских објеката од културно-историјског значаја – као и сам процес градње, најпре због начина примене, као и због једноставнијег избора правог дрвног материјала.

Х ЛИТЕРАТУРА

Референтна литература

(попис цитиране и позиване литературе у дисертацији)

Ашкенази, Е. К. *Анизотропия дрвесины и дресных материалов*. Москва: Лесная промышленность, 1978.

Bach, L. *Non-Linear Mechanical Behavior of Wood i Longitudinal Tension*. Ph.D. Disertation
Syracuse University, State University College of Forestry, 1965.

Boding, J. and B. A. Jayne. *Mechanic of Wood and Wood Composites*. New York: Van Nostrand Reinhold , 1982.

Bucur, V., and F. Feeney. „Attenuation of Ultrasound in Solid Wood.” *Ultrasonics* 30, 2 (1992): 76–81.

Вученовић, С. *Урбана и архитектонска конзервација. Том 1, Свет – Европа*. Београд : Друштво конзерватора Србије, 2004.

Gerhard, C. C. „Effects of Grade on Load Duration of Douglas-Fir Lumber in Bending.” *Wood and Fiber Science* 20, 1 (1988): 146–161.

Gojković, M i D. Stojić. *Drvene konstrukcije*. Beograd : Građevinski fakultet : Grosknjiga, 1996.

Закић, Б. *Увод у механику дрвета*. Нови Сад; Београд: Факултет техничких наука; Институт за испитивање материјала СР Србије, 1985.

Ivanov, Yu. M. „High Elastic Deformations of Wood.” *Comp.Wood* 5, 4 (1958): 51–56.

Jokileto, J. „Конзервација између праксе и теорије.” *Гласник Друштва конзерватора Србије* 27 (2003): 9–14.

Jokileto, J. „Аспекти аутентичности.” *Гласник Друштва конзерватора Србије* 26 (2002): 11–16.

Keylwerth, R. „Einfache Kontrollmessung bei der Holztrocknung.” *Holz-Zentralblatt* 75 (1949): 307–309.

King, E.G. Jr. „The Strain Behavior of Wood in Tension Parallel to the Grain.” *Forest Products Journal* 8, 11 (1958): 330–334.

Kitahara.K., and N. Okabe. „The influence of Temperature on Creep of Wood by Bending Test.” *Journal of the Japan Wood Research Society* 5, 1 (1959): 12–18.

Колин, Б. „Утицај влаге и температуре на притисисну чврстоћу паралелно са влаканцима дрвета.” *Дрвна индустрија*, 7–8 (1988).

Kollmann, F. and H. Krech. „Dynamische Messung der elastischen Holzeigenschaften und der Dämpfung. Ein Beitrag zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung.” *Holz als Rohund Werkstoff* 18 (1960): 41–54.

- Kollmann, F., and W. A. Cote. *Principles of Wood Science and Technology. Vol. I, Solid Wood*. Berlin: Springer, 1984.
- König, E. *Fehler des Holzes*. Stuttgart: Holz-Zentralblatt Verlags-GmbH, 1957.
- Крчетов, И. В. *Сушка древесины*. Москва: Лесная промышленность, 1980.
- Лукић-Симоновић, Н. *Познавање својства дрвета*. Београд: Шумарски факултет Универзитета у Београду, 1988.
- Marjanov, M. *Tehnička mehanika : statika, otpornost materijala*. Beograd : Šumarski fakultet Univerziteta u Beogradu, 1996.
- Muravljov, M. *Reološke karakteristike drveta*. Prvi jugoslovenski naučno-stručni skup o projektovanju i izvođenju savremenih drvenih konstrukcija – SGIT Srbije. Cavtat, 1989.
- Nara dokument o autentičnosti*. Paris: ICOMOS, 1994.
<https://www.icomos.org/charters/nara-e.pdf>_Приступљено: фебруар 2020.
- Николић, М. *Примена принципа заштите и презентације градитељског наслеђа на средњевековним утврђеним градовима у Србији*. Докторска дисертација. Београд: Архитектонски факултет Универзитета у Београду: 2014.
- Ostrovsky, L. and A. Potapov. *Modulated Waves: Theory and Application*. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 2001.
- Panishin, A. J., and C. de Zeeum. *Textbook of Wood Technology : Structure, Identification, Properties, and Uses of the Commercial Woods of the United States and Canada*. New York : McGraw-Hill, 1980.
- Pellerin, R. F., R. Degroot, and G. Esenther. „Nondestructive Stress Wave Measurements of Decay and Termite Attack in Experimental Wood Units.” In *Proceedings of the 5th Nondestructive Testing of Wood Symposium*, 319–352. Washington: USDA Forest Products Laboratory, 1986.
- Ross, R. J., *Nondestructive Testing for Assessing Wood Members in Structures : a Review*. Madison: U.S. Department of Agriculture Forest Service Forest Products Laboratory, 1991.
- Ross, R. J., R. C. Degroot, W. J. Nelson, and P. K. Lebow. „The Relationship Between Stress Wave Transmission Characteristics and the Compressive Strength of Biologically Degraded Wood.” *Forest Products Journal* 47, 5 (1997): 89–93.
- Skaar, C. *Water in Wood*. New York: Syracuse University Press, 1972.
- Schniewind, A. P. „Recent Progress in the Study of Rheology of Wood.” *Wood Science and Technology* 2 (1968): 188–206.
- Соболев, Ю. *Древесина как конструкционный материал*. Москва: Лесная промышленность, 1979.
- Ugolev, B. N. „Determination of the Rheological Properties of Wood.” *Derev. Prom.* 12, 2 (1963): 17–19.

- Ugrenović, A. i I. Horvat. *Tehnologija drveta*. Zagreb: Nakladni zavod Hrvatske, 1950.
- Friedley, K. J., and R. C. Tang. „Thermal Effects on Load-Duration Behavior of Lumber. Part 11: Effect of Cyclic Temperature.” *Wood and Fiber Science* 22, 2 (1990): 204–216.
- Hoadly, R. B. *Understanding Wood: a Craftsman's Guide to Wood Technology*. Newtown: Taunton Press, 1980.
- Carlquist, S. *Comparative Wood Anatomy: Systematic, Ecological, and Evolutionary Aspects of Dicotyledon Wood*. Berlin: Springer, 1988.
- Convection Concerning the Protection of the World Cultural and Natural Heritage, <http://whc.unesco.org/archive/convention-en.pdf>
- Шошкић, Б. и З. Поповић. *Својства дрвета*. Београд: Шумарски факултет Универзитета у Београду, 2002.
- Šoškić, B. i Z. Popović. „Prilog poznavanju fizičkih svojstava molike (*Pinus peuce* Gris).” *Šumarstvo*, XLII, 5 (1989): 25–34.
- Wagenführ, R. *Anatomie des Holzes*. Leipzig: Fachbuchverlag, 1989.
- Wagenführ, R., and C. Scheiber. *Holzatlas*. Leipzig: Fachbuchverlag, 1989.
- Wangaard, F., and G. Garratt. *The Mechanical Properties of Wood*. New York: Wiley, 1950.

Коришћена литература

(попис литературе која је коришћена током рада на дисертацији)

- ACSYS *Acoustic Control Systems*. Moscow, Russia, 2005.
- Anthony, R. W. „Use of Portable X-Ray Equipment to Investigate Historic Timber Structures.” *Proceeding of the Workshop on Historic Roof Timber Frames*, Trest Castle, Czech Republic, 2004.
- Armstrong, L. D., and G. N. Christensen. „Influence of Moisture Changes on Deformation of Wood Under Stress.” *Nature* 191 (1961): 869–870.
- Armstrong, L. D. „Effects of Moisture Changes of Creep in Wood.” *Nature* 185 (1965): 862–863.
- Armstrong, L. D. „Deformation of Wood Compression During Moisture Movement.” *Wood Science* 5, 2 (1972): 81–86.
- Бабић, Р. *Радиологија*. Београд: Медицинска књига, 2002.
- Bazant, Z. P., and S. Meiri. „Measurements of Compression Creep at Humidity Changes.” *Wood Science and Technology* 19 (1985): 179–182.
- Bach, L. „Static Fatigue of Wood Under Constant Strain.” *Forest Products Laboratory Information Report VP-X-24* (1967).
- Beall, F. C. „Overview of the Used of Ultrasonic Technologies in Research on Wood

- Properties.” *WoodScience and Technology* 36 (2002): 197–212.
- Bozhang, S., and R. Pellerin. „Nondestructive Evaluation of the Degree of Deterioration in Wood.” In *Proceedings of the 10th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood*, 99–115. Lausanne: Polytechnique et Universitaires Romandes, 1996.
- Bucur, V., and I. Böhnke. „Factors Affecting Ultrasonic Measurements in Solid Wood.” *Ultrasonics* 32, 5 (1994): 385–388.
- Bucur, V. *Nondestructive Characterization and Imaging of Wood*. Berlin: Springer, 2003.
- Bucur, V. „Techniques for High Resolution Imaging of Wood Structure: a Review.” *Measurement Science and Technology* 14 (2003): 91–98.
- Васильевић, С. *Анатомија шумског дрвећа : општи део*. Београд: Завод за издавање уџбеника Социјалистичке Републике Србије, 1968.
- Vorreiter, L. *Holztechnologisches Handluch*. Wien: Georg Fromme, 1949.
- Galligan, W. J., and R. W. Courteau. „Measurement of Elasticity of Lumber with Longitudinal Stress Waves and the Piezoelectric Effect of Wood.” In *Proceedings of the 2nd International Symposium of Nondestructive Testing of Wood*, 223–244. Washington: Washington State University: National Science Foundation, 1965.
- Gerhards, C. C. „Time Related Effects of Loading on Wood Strength: a Linear Cumulative Damage Theory.” *Wood Science* 11 (1979): 139–144.
- Gerhards, C. C. „Bending Creep and Load Duration of Douglas-Fir 2 by 4s under Constant Load.” *Wood and Fiber Science* 23 (1991): 384–409.
- Giordano, G. *Tecnologia del legno*. Milano: U.Hoepli, 1951.
- Gressel, P. „Prediction of Long-term Deformation Behavior from Short-term Creep Experiments.” *Holz als Roch-und Werkstoff* 42 (1984): 293–301.
- Deplazes, A. *Arhitektonske konstrukcije: od sirovine do građevine: priručnik*. Beograd: Građevinska knjiga, 2008.
- Grossman, P. U. A., and R. S. T. Kingston. „Some Aspects of the Rheological Behavior of Wood,III Tests of Linearity.” *Australian Journal of Applied Science* 14, 4 (1963): 305–317.
- Grossman, P. U. A., L.D. Armstrong and R.S.T. Kingston. „An Assessment of Research in Wood Rheology.” *Wood Science and Technology* 3 (1969): 324–328.
- Grossman, P. U. A., and T. Nakai. „Deflection of Wood under Intermittent Loading:Part 2: Cycles of Two Days and of 14 Minutes.” *Wood Science and Technology* 21 (1987): 349–360.
- Dinwoodie, J. M. *Timber, Its Nature and Behaviour*. 2.ed. London; New York: E&FN Spon, 2000.
- Emerson, R. N.[et. al.]. „Nondestructive Testingof Large Bridge Timbers.” In *Proceedings of 11th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood*, 175–184. Madison, 1999.
- Erteld, W., H. J. Mette and Achterberg, W. *Holzfehler in Wort und Bild. Mit 188 Bildern*.

Leipzig: Fachbuchverlag, 1963.

Закић, Б. и З. Поповић. „Реолошка својства дрвета.” *Материјали и конструкције* 3–4 (1995): 22–41.

Закић, Б. *Механика дрвета*, Београд: Српска академија наука и уметности, 1999.

Zobel, B. J., and J. P. van Buijtenen. *Wood Variation*. Springer: Berlin, 1989.

Zombori, B. “In situ” Nondestructive Testing of Built in Wooden Members.” *NDT.net* 6, 3 (2001) <http://www.ndt.net/article/v06n03/skatter/skatter.htm> ПРИСТУПЉЕНО: фебруар 2020.

Ivanov, Yu. M. „The Strain Behaviors of Wood.” *Forest Products Journal* 8, 11 (1958): 41.

Kasal, B., and R. Anthony. *Advances in in situ Evaluation of Timber Structures. Progres in Structural Engineering and Materials*. London: John Wiley &, 2004.

Karahasanović, A. *Tehnička svojstva bosanske prašumske jelovine*. Doktorska disertacija. Zagreb: Sveučilište, Poljoprivredno-šumarski fakultet: 1958.

Karahasanović, A. *Nauka o drvetu*. Sarajevo: Svjetlost, 1988.

King, E. G. Jr. „Creep and Other Strain Behavior of Wood in Tension Parallel to the Grain.” *Forest Products Journal* 7, 10 (1957): 324–330.

King, E. G. Jr. „The Strain Behavior of Wood in Tension Parallel to the Grain.” *Forest Products Journal* 8, 11 (1958): 330–334.

Knuchel, H. *Das Holz: Entstehung und Bau, Physikalische und Gewerbliche Eigenschaften, Verwendung, Holzarten-Lexikon*. Frankfurt: Aarau, 1954.

Kopitovic, S., B. Klasnja and V. Guzina. „Importance of Structural, Physical and Chemical Properties of Robina Wood (*Robna Pseudoacacia L.*) for its Mechanical Characteristics.” *Drevarsky Vyskum* 122 (1989): 13–30.

Krzysik, F. *Nauka o drewnie*. Warszawa: PWN, 1974.

Lang, J. *Middelton. Radiography of Cultural Material*. Burlington: Butterworth-Heinemann Ltd, 1997.

Lempriere, B. M. *Ultrasound and Elastic Waves: Frequently Asked Questions*. San Diego: Academic Press, 2002.

Лукић Симоновић, Н. *Упоредна истраживања технолошких својстава дрвета Picea omorika Panč. и Picea excelsa Lin. у вези са утицајем станишта*. Докторска дисертација. Београд: Шумарски факултет Универзитета: 1961.

Mukudai J., and S. Yata. „Further Modeline and Simulation of Viscoelastic Behavior (Bending Deflection) of Wood under Moisture Change.” *Wood Science and Technology*, Vol 21, (1987): 49–64.

Maack, S., and M. Krause. „Diagnostic Investigations of Wooden Structures Using Ultrasonic-echo Technique.” In *Proceedings of the 1st International RILEM Conference, on*

Site Assessment of Concrete, Masonry and Timber Structures (SACoMaTiS), 1081–1090. Paris: RILEM Publications, 2008.
https://www.rilem.net/publication/publication/63?id_papier=2399 Приступљено: јун 2019.

Macchioni N., and Piazza M. „Italian Standardisation Activity in the Field of Diagnosis and Restoration of Ancient Timber Structures.” In *Structural Analysis of Historical Constructions*, P.B.Lourenco, P.Roca, C.Modena, and S. Agrawal (Eds.), New Delhi, University of Minho, 2006.

Мурављов, М. *Грађевински материјали*. Београд: Грађевински факултет; Гроскњига, 1995.

Muravljov, M. [et al.]. *Praktikum za vežbe iz građevinskih materijala*. Beograd : Građevinski fakultet Univerziteta, 2007.

Narayanamurti, D. R., C. Gupta and V. „Narayanamurti. „Influence of Loading on the Rigidity Modul and Plastic Flow of Wood.” *Applied Scientific Research, Section A7*, 213 (1958): 145–148.

Newman, A. *Structural Renovation of Buildings : Methods, Details, and Design Examples*, 2001.

Novelline, R. *Squire's Fundamentals of Radiology*. 5th ed. London: Harvard University Press, 1997.

Николић, М. *Зависност физичко-механичких својстава евроамеричких топола (Populus robusta i Populus serotina) и домаће црне тополе од неких спољашњих и унутрашњих фактора*. Докторска дисертација. Београд, Шумарски факултет, Универзитета у Београду: 1974.

Panishin, A. J., and C. de Zeeum. *Textbook of Wood Technology : Structure, Identification, Properties, and Uses of the Commercial Woods of the United States and Canada*. New York: McGraw-Hill, 1980.

Pentoney R. E., and R. W. Davidson. „Rheology and the study of wood.” *Forest Products Journal* 12 (1962): 243–248.

Поповић, З. *Утицај влажности и температуре на модул еластичности и Савитљивост буковог дрвета*. Магистарски рад. Београд, Шумарски Факултет Универзитета у Београду: 1990.

Пурић, Ј. и И. Дојчиновић. *Физика атома*. Београд: Завод за уџбенике, 2013.

Raj. B., T. Jayakumar, and M. Thavasimuthu. *Practical Non-Destructive Testing*. 2nd ed. New Deli: Narosa Publishing House, 2002.

Rile, H. [et al.]. *Prostorne krovne konstrukcije: njihove pojedinosti: njihovo izvođenje*. Beograd: Građevinska knjiga, 1977.

Richardson, B. *Wood in construction*. Lancaster: The Construction Press, 1976.

Savada, M. „Studies on the Mechanics of Wood Beams(Report 4): Bending Creep in Wood Under Dead Loading.” *Bulletin of the Government Forest Experiment Station* 98 (1957): 85–116.

Sachsse, H. „Holzqualität von Birken.” *Holz als Roch-und Werkstoff* 47 (1989): 23–30.

Szabo, T., and G. Ifju. „Influence of Stress on Creep and Moisture Distribution in Wooden Beams Under Sorption Conditions.” *Wood Science* Vol 2 (1970): 159–168.

Сисојевић, Д. *Анатомија дрвета : ауторизована скрипта*. Београд: Шумарски факултет Институт за прераду дрвета, 1987.

Sisojević, D. „Juvenlno drvo bukve sa područja planine Goč.” *Šumarstvo* XXXX, 6 (1987): 9–15.

Skaar, C. *Wood-Water Relations*. Berlin: Springer, 1988.

Skakić, D. „Prilog istraživanju gustine i utezanja bukovog drveta.” *Šumarstvo* XLI, 4 (1988): 29–36.

Sugiyama, H. „The Effect of Sustained Strenght Propertes of Wood Under Short-term Loading.” *Transactions of Architectural Institute of Japan* 58 (1958): 21–27.

Sugiyama, H. „The Creep Deflection of Wood Subjected to Bending Under Constant Loading.” *Transactions of Architectural Institute of Japan* 55 (1957): 60–70.

Susuki, M. and K. Nakato. „Diffusion of Water Wapor in Wood and Dynamic Viscoelasticity” *Journal of the Japan Wood Research Society* 9, 3 (1963): 90–96.

Susuki, M. and K. Nakato. „Temperature Dependence of Dynamic Viscoelasticity.” *Journal of the Japan Wood Research Society* 10, 3 (1964): 89–95.

Ugrenović, A. *Upotreba drveta i sporednih produkata šume*. Zagreb: Nakladni zavod Hrvatske, 1948.

Thomas [et al.]. *Timber Construction Manual*. Munch: Birkhäuser, 2004.

Fengel, D., and G. Wegener. *Wood: chemistry, ultrastructure, reactions*. Springer: Berlin, 1983.

Hasenstab, A., B. Hillemeier, and M. Krause. „Defect Localisation in Wood With Low Frequency Ultrasonic Echo Technique.” In *Proceedings of 14th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood*, 329–337. Aachen: Shaker Verlag, 2005.

Hasenstab, A., K. Osterloh, and M. Krause. „Testing of Wooden Construction Elements with Ultrasonic Echo Technique and X-ray. In: *Proceedings of 9th European Conference on NDT, Berlin Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. BB 103-CDTh.2.4.1, September 25-29, 2006*.

https://www.researchgate.net/profile/Kurt_Osterloh/publication/267691612_Testing_Of_WoodenConstruction_Elements_with_Ultrasonic_Echo_Technique_and_XRay/links/5460ad940cf27487b451be0c/Testing-Of-Wooden-Construction-Elements-with-Ultrasonic-Echo-Technique-and-X-Ray.pdf Приступљено: фебруар 2020.

Hasenstab, A. "Ultraschall-Echo zur Ortung von Rissen in Brettschichtholz (BSH)." In *Tagungsband DGZfP Jahrestagung*, Berlin: DGZfP, 2007.

Hearmon, R. F. S., and J. M. Paton. „Moisture Content Changes and Creep in Wood.” *Forest Products Journal* 14, 8 (1964): 357–379.

Holzer, M. S., R. J. Loferski, and A. D. Dillard. „A Review of Creep in Wood: Concept Relevant to Develop of Long-Term Behavior Predictions of Wood Structures.” *Wood and Fibre Science*, Vol 21, (1989): 376–392.

Chantler, C.T., [et al.] *X-Ray Form Factor, Attenuation and Scattering Tables*, 2005. Available at: <http://physics.nist.gov/ffast>

Шекуларац, Н. *Дрвени решеткасти носачи: пројектовање, прорачун и извођење кровних конструкција*. Београд: Архитектонски факултет Универзитета у Београду, 2017.

Шошкић, Б. „Утицај реакционог дрвета на својства мунике (*Pinus heldreichii* Christi).” *Гласник Шумарског факултета* 68 (1987).

Šoškić, B. „Истраживање утицаја интензитета сила и метода испитивања на тврдоћу дрвета букве.” *Šumarstvo* XXXIX, 5/6 (1986): 29–35.

Šoškić, B. „Promena oblika rezanih sortimenata u zavisnosti od tehnološkog procesa pilanske prerade i njen značaj za finalnu preradu drveta.” *Šumarstvo*, 39, 3/4 (1986): 31–38.

Стандарди:

ISO 13822:2001(E). *Bases for Design of Structures – Assessment of Existing Structures*. Geneva: International Standard Organisation, 2001.

UNI 11161:2005. *Cultural Heritage – Wooden Artefacts – Guidelines for Conservation, Restoration and Maintenance*. Milano: UNI, 2005.

UNI 11118:2004. *Cultural Heritage – Wooden Artefacts – Criteria for the Identification of Wooden Species*. Milano: UNI, 2004.

UNI 1119-2004. *Cultural Heritage – Wooden Artefacts – Load Bearing Structure of Buildings – On Site Inspection for the Diagnosis of Timber Members*. Milano: UNI, 2004.

UNI 11141-2004. *Cultural Heritage – Wooden Artefacts – Wood Dendrochronological Dating Guidelines*. Milano: UNI, 2004.

XI СПИСАК ИЛУСТРАЦИЈА И ТАБЕЛА

Слика 1: Три основна анатомска правца код дрвета (L– лонгитудинална (аксијална) оса, R – радијална оса, T – тангенцијална оса)

Извор: Б. Шошкић и З. Поповић. *Својства дрвета* (Београд: Шумарски факултет Универзитета у Београду, 2002), 180.

Слика 2: Примери приказа мапа дрвета које је произвео *Disc Bot*

Извор: Schimleck, L. [et al.]. "Non-Destructive Evaluation Techniques and What They Tell Us about Wood Property Variation," *Forests* 10, 9 (2019): 26.

<https://doi.org/10.3390/f10090728>

Слика 3: Композитна слика густине узорка смрче (радијални / уздужни пресек).

Осветљеност је пропорционална густини.

Извор: Schimleck, L. [et al.]. "Non-Destructive Evaluation Techniques and What They Tell Us about Wood Property Variation," *Forests* 10, 9 (2019): 17.

<https://doi.org/10.3390/f10090728>

Слика 4: Епрувете багрема: А) подужни профил епрувета – аксијална оса (1) паралелна дужој страни паралелепипеда, радијална оса (3), тангенцијална оса (2); Б) попречни профил епрувета – аксијална оса (1) управна на дужу перфорирану страну паралелепипеда, радијална оса (2), тангенцијална оса (3).

Слика 5: Епрувете храста: А) подужни профил епрувета – аксијална оса (1) паралелна дужој страни паралелепипеда, радијална оса (3), тангенцијална оса (2); Б) попречни профил епрувета – аксијална оса (1) управна на дужу перфорирану страну паралелепипеда, радијална оса (2), тангенцијална оса (3).

Слика 6: Дијаграм 1 – упоредни приказ брзина пропагације таласа у (μs) добијених испитивањем узорака прстенасто порозних лишћара багрема и храста и резултати контролног узорка кестена, усмеравањем ултразвука 1) паралелно току механичких влаканаца (аксијална оса) – најкраће време; 2) управно на њих у радијалном – сразмерно дуже време и 3) тангенцијалном смеру – најдуже време (x-оса МРа, y-оса брзина μs)

Слика 7: Дијаграм 2 – упоредни приказ брзина пропагације у (μs) добијених ултразвучним испитивањем попречно исецаних, перфорираних узорака багрема, храста и кестена у 3) аксијалној равни – најкраће време; 2) радијалној равни – дуже време; 1) тангенцијалној равни – најдуже време.

Слика 8: Епрувете букве: А) подужни профил епрувета - аксијална оса (1) паралелна дужој страни паралелепипеда, радијална оса (3), тангенцијална оса (2); Б) попречни профил епрувета – аксијална оса (1) управна на дужу перфорирану страну паралелепипеда, радијална оса (2), тангенцијална оса (3).

Слика 9: Епрувете тополе: А) подужни профил епрувета – аксијална оса (1) паралелна дужој страни паралелепипеда, радијална оса (3), тангенцијална оса (2); Б) попречни профил епрувета – аксијална оса (1) управна на дужу перфорирану страну паралелепипеда, радијална оса (2), тангенцијална оса (3).

Слика 10: Дијаграм 3 – упоредни приказ брзина пропагације таласа у (μs) добијених испитивањем узорака дифузно порозних лишћара букве и тополе и резултати

контролног узорка, кестена, усмеравањем ултразвука 1) паралелно току механичких влаканаца (аксијална оса) – најкраће време; 2) управно на њих у радијалном – сразмерно дуже време и 3) тангенцијалном смеру – најдуже време (x-оса МРа, y-оса брзина μs)

Слика 11: Дијаграм 4 – упоредни приказ брзина пропагације у (μs) добијених ултразвучним испитивањем попречно исецаних, перфорираних узорака букве, тополе и кестена у 3) аксијалној равни – најкраће време; 2) радијалној равни – дуже време; 1) тангенцијалној равни – најдуже време.

Слика 12: Епрувете бора: А) подужни профил епрувета – аксијална оса (1) паралелна дужој страни паралелепипеда, радијална оса (3), тангенцијална оса (2); Б) попречни профил епрувета – аксијална оса (1) управна на дужу перфорирану страну паралелепипеда, радијална оса (2), тангенцијална оса (3).

Слика 13: Епрувете јеле: А) подужни профил епрувета – аксијална оса (1) паралелна дужој страни паралелепипеда, радијална оса (3), тангенцијална оса (2); Б) попречни профил епрувета – аксијална оса (1) управна на дужу перфорирану страну паралелепипеда, радијална оса (2), тангенцијална оса (3).

Слика 14: Дијаграм 5 – упоредни приказ брзина пропагације таласа у (μs) добијених испитивањем узорака четинара јеле и бора и резултати контролног узорка, кестена, усмеравањем ултразвука 1) паралелно току механичких влаканаца – најкраће време; 2) управно на њих у радијалном – сразмерно дуже време и 3) тангенцијалном смеру – најдуже време (x-оса МРа, y-оса брзина μs).

Слика 15: Дијаграм 6 – упоредни приказ брзина пропагације у (μs) добијених ултразвучним испитивањем попречно исецаних, перфорираних узорака јеле, бора и кестена у 3) аксијалној равни – најкраће време; 2) радијалној равни – дуже време; 1) тангенцијалној равни – најдуже време.

Слика 16: Епрувете кестена: А) подужни профил епрувета – аксијална оса (1) паралелна дужој страни паралелепипеда, радијална оса (3), тангенцијална оса (2); Б) попречни профил епрувета – аксијална оса (1) управна на дужу перфорирану страну паралелепипеда, радијална оса (2), тангенцијална оса (3).

Слика 17: Рендгенографисање узорака све три врсте дрвета: дифузно порозних лишћара, прстенасто порозних лишћара и четинара

Слика 18: Модел зебре

Слика 19: Тонска палета

Слика 20: Модел мозаика

Слика 21: Принцип форматирања даски кроз који је вршено стрес-звучно испитивање

Слика 22: Графикон за одређивање густине дрвета при различитим влажностима по Колману

Извор: Б. Шошкић и З. Поповић. *Својства дрвета* (Београд: Шумарски факултет Универзитета у Београду, 2002), 101.

Слика 23: Графикон односа величина примењене силе (N/cm^2) и напона (MPa) приказан на дисплеју контролног панела мерног инструмента приликом одређивања статичког напона на притисак, у поступку баждарења методе примене стрес-звучних таласа.

Слика 24: Графикон односа величина примењене силе (N/cm^2) и напона (MPa) приказан на дисплеју контролног панела мерног инструмента приликом одређивања статичког напона на савијање, у поступку баждарења методе примене стрес-звучних таласа.

Слика 25: Однос динамичког модула еластичности и чврстоће на притисак паралелно са влаканцима

Слика 26: Однос динамичког модула еластичности и статичке чврстоће на савијање

Слика 27: Кровни носач – везач, сегмент конструкције крова на вешаљке

Слика 28: Почетак изградње зграде Техничког факултета Велике школе 1926. године
Извор: Високошколска настава архитектуре у Србији 1846–1971 (Београд, Архитектонски факултет Универзитета у Београду), 198.

Слика 29: Облик таласа у узорку доброг дрвета
Извор: https://www.springer.com/gp/book/9789400705593_стр.14 Приступљено: мај 2019.

Слика 30: Облик таласа у узорку оштећеног дрвета
Извор: https://www.springer.com/gp/book/9789400705593_стр.14 Приступљено: мај 2019.

Слика 31: Кровни носач – везач, сегмент конструкције крова на вешаљке кроз који је пропуштан стрес-звучни талас

Табела 1: Брзина пропагације стрес-звучних таласа код дасака здравог дрвета.

Табела 2: Брзина пропагације стрес-звучних таласа код перфорираних дасака.

Табела 3: Вредности хигроскопне влажности и густине епрувета одређиване у поступку баждарења методе примене стрес звучних таласа

Табела 4: Вредности напона на притисак одређиваних на огледним епруветама у поступку баждарења методе примене стрес-звучних таласа.

Табела 5: Вредности напона на савијање одређиваних на огледним епруветама у поступку баждарења методе примене стрес-звучних таласа.

Табела 6: Основни допуштени напони за влажност дрвета од 18% и 15% у [N/cm^2] за конструкције од пуног – масивног дрвета и лепљеног ламелираног дрвета (ЈУС U.C9200/300)

XII БИОГРАФИЈА АУТОРА

Андреј Б. Јосифовски, рођен је 06. 10. 1990. године у Београду. Одрастао је у Земуну, где завршава Основну школу „Лазар Саватић”, а потом и средњу школу, Девету гимназију „Михаило Петровић–Алас” на Новом Београду. Архитектонски факултет Универзитета у Београду уписује 2009. године, где завршава Основне академске студије (2012) са просечном оценом 9,28 и Мастер академске студије – Архитектура (2014) са просечном оценом 9,74. Од 2012. године је активан учесник у настави, а од 2014. године докторанд на овом Факултету.

Од 2015. године је асистент на Департману за Архитектонске технологије, Универзитета у Београду – Архитектонског факултета. У периоду од 2015. године до данас, ангажован је у настави на предметима из области архитектонских конструкција и Студио-пројектима у оквиру програма Основних академских студија Архитектура, Интегрисаних академских студија Архитектура, као и Мастер академских студија Архитектонске технологије.

Од 2018. године је истраживач научно-истраживачког пројекта *Развој методе израде пројектне и извођачке документације инсталационих мрежа у зградама компатибилне са ВИМ процесом и релевантним стандардима* (ТР 36038) Министарства просвете, науке и технолошког развоја. Као учесник више научних скупова међународног и националног значаја, аутор је научних радова, као и чланака у часописима међународног значаја.

Учествовао је на великом броју стручно-уметничких манифестација и конкурса, међу којима треба издвојити, да је као члан радне групе и као студент, добио специјално признање на 23. Међународном салону урбанизма у Београду за пројекат „Нови модели становања за угрожене у поплавама” у категорији студентских радова. Са истим радом је у марту 2015. године добио специјалну препоруку Савета Салона архитектуре као архитектонски догађај године у категорији студентских радова. Као део ауторског тима, освојио је друго место за пројекат за представљање Републике Србије на Бијеналу архитектуре у Венецији 2020. године.

У оквиру стручно-уметничких остварења издвајају се бројне публикације у којима су објављивани његови радови. Као коаутор, објавио је двојезични помоћни уџбеник из области архитектонских конструкција под називом „Синтеза класичних дрвених кровних конструкција и конструктивног склопа”. У оквиру доприноса широј академској заједници учествује у реализацији радионица, изложби и пројеката у оквиру Архитектонског факултета. Члан је неколико факултетских комисија.

Од 2018. године поседује лиценце одговорног пројектанта (300 Р905 18) и одговорног извођача радова (400 L108 18). Поред професионалног усавшавања у области архитектуре, активан је и у области примењене и уличне уметности. Осликао је велики број мурала у земљи и иностранству, а његов рад је пропраћен у еминентним светским медијима за уличну уметност.

Излагао је на дванаест колективних смотри, и пет самосталних изложби, међу којима су посебно важне *Face au mur*, организована у Културном центру Србије у Паризу / Centre culturel de Serbie, *Бијенале архитектуре у Венецији* – где је представио свој рад „Златни контејнер” и самостална изложба *Пијаниста - пет година на улици: зид и дело* у Студентском културном центру у Београду, где је представљена и његова истоимена монографија. Његов рад „Златни цвет”, одабран је за излагање на престижној светској изложби *Arte Laguna Prize*, која ће се одржати у октобру 2021. године. Оснивач је и уметнички директор Интернационалног фестивала уличне уметности *Runaway* Добитник је великог броја награда и признања.

Научна библиографија кандидата Андреја Јосифовског релевантна за тему предложене докторске дисертације:

Радови у националним часописима међународног значаја (M24):

Josifovski, A. and D. Savanović. „Non-destructive testing of wood structures by x-rays” *SAJ*, 9, 1(2017), 51–64.

Радови у часописима међународног значаја (M22):

Milovanović, A., M. Kostić, A. Zorić, A. Đorđević, M. Pešić, J. Bugarski, D.Todorović, N. Sokolović and A. Josifovski. „Transferring COVID-19 Challenges into Learning Potentials: Online Workshops in Architectural Education” *Sustainability* 12, 17(2020), 7024.

Радови у часописима националног значаја (M53):

Milovanović, A., M.Pešić, M. Kostić, A. Đorđević, J. Bugarski, A. Zorić, D. Todorović, A. Josifovski & N. Sokolović. „Architettura dell'emergenza riveduta: Sfide nella ricerca, nella pratica e nell'educazione (Emergency architecture revised: Challenges in research, practice and education).” *A&A è una rivista di architettura* 47(2020), 72–79.

Саопштења са међународних скупова штампана у целини (M33):

Andrej Josifovski, Neda Džombić i Igor Svetel. „Non-Destructive Determination Of Mechanical Properties Of Wood“ In *Proceedings of 14th International Scientific Conference on Planning, Design, Construction and Renewal in the Civil Engineering “INDIS 2018”*, (Eds.) V. Radonjanin, R. Folić, 117-123. Novi Sad: Department of Engineering and Geodesy, Department of Architecture and Urban Planning, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad, 2018.

Savanović, D., A. Krstić-Furundžić i A. Josifovski. „Textile membrane structures in refurbishment of built heritage” In *Proceedings of the 6th International Academic Conference on Places and Technologies: Keeping up with Technologies to turn built heritage into the places of future generations*, (Eds.) T. Molnár, A. Krstić-Furundžić, E. Vaništa Lazarević, A. Djukić, G. Medvegý, B. Bachmann and M. Vukmirović, 529–537. Pécs: University of Pécs Faculty of Engineering and Information Technology, 2019.

Саопштења са међународних скупова штампана у изводу (М34):

Marčetić, D i A. Josifovski. „The Concept of Smart Architecture in Serbia – One Belgrade Experience” *In 3rd International Academic Conference Places and Technologies: Book of Abstracts*, 134. Belgrade: Faculty of Architecture, 2016.

Josifovski, A., N. Džombić i I. Svetel. *Non-destructive determination of mechanical properties of wood*, Scientific conference iNDiS: Planning, design, construction and building renewal, Book of Abstracts. Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka, 2018.

ХИИ ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора: Андреј Б. Јосифовски

број индекса: 2014 /Д9

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

НЕДЕСТРУКТИВНА *IN SITU* ИСПИТИВАЊА КВАЛИТЕТА ДРВЕНИХ
КОНСТРУКЦИЈА АРХИТЕКТОНСКИХ ОБЈЕКТА

- резултат сопственог истраживачког рада;

да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;

да су резултати коректно наведени и

да нисам кршио ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, _____

**XIV ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ
ДОКТОРСКОГ РАДА**

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме Андреј Б. Јосифовски

Број индекса: 2014/Д9

Студијски програм: Докторске академске студије / Архитектура и урбанизам

Наслов рада: НЕДЕСТРУКТИВНА *IN SITU* ИСПИТИВАЊА КВАЛИТЕТА ДРВЕНИХ
КОНСТРУКЦИЈА АРХИТЕКТОНСКИХ ОБЈЕКТА

Ментор: др Александра Крстић-Фурунцић, редовни професор

Универзитет у Београду – Архитектонски факултет

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао ради похрањивања у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива 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 аутора

У Београду, _____

XV ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић” да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

НЕДЕСТРУКТИВНА *IN SITU* ИСПИТИВАЊА КВАЛИТЕТА ДРВЕНИХ
КОНСТРУКЦИЈА 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 Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио.

1. Ауторство (CC BY)

2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)

3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)

5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)

6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци. Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, _____

1. Ауторство. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. Ауторство – некомерцијално – без прерада. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. Ауторство – без прерада. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. Ауторство – делити под истим условима. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.