

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

САОБРАЋАЈНИ ФАКУЛТЕТ

Милана В. Косијер

**ОПТИМИЗАЦИЈА ТРАСЕ
ЖЕЛЕЗНИЧКЕ ПРУГЕ**

докторска дисертација

Београд, 2013

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF TRANSPORT AND TRAFFIC ENGINEERING

Milana V. Kosijer

RAILWAY ROUTE OPTIMIZATION

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2013

ОПТИМИЗАЦИЈА ТРАСЕ ЖЕЛЕЗНИЧКЕ ПРУГЕ

докторска дисертација

Милана В. Косијер
Универзитет у Београду
Саобраћајни факултет

МЕНТОР: Проф. др Срђан Русов, редовни професор,
Универзитет у Београду - Саобраћајни факултет

Чланови Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације:

Проф. др Срђан Русов, редовни професор,
Универзитет у Београду - Саобраћајни факултет

Проф. др Милош Ивић, редовни професор,
Универзитет у Београду - Саобраћајни факултет

Проф. др Милорад Станојевић, редовни професор,
Универзитет у Београду - Саобраћајни факултет

Проф. др Зденка Поповић, ванредни професор,
Универзитет у Београду - Грађевински факултет

ДАТУМ ОДБРАНЕ: _____

Милана В. Косијер
ОПТИМИЗАЦИЈА ТРАСЕ ЖЕЛЕЗНИЧКЕ ПРУГЕ
докторска дисертација
Београд, 2013
Универзитет у Београду
Саобраћајни факултет

Кључне речи: планирање и пројектовање, траса железничке пруге, избор најповољније варијанте трасе, вишекритеријумско одлучивање, метода ВИКОР

Научна област: Техничко-технолошке науке, подручје Саобраћај

Ужа научна област: Планирање, пројектовање и одржавање железничке инфраструктуре

УДК број: 625.1 (043.3)

САЖЕТАК

Предмет истраживања у овој дисертацији је траса железничке пруге у појединим фазама њеног планирања и пројектовања, односно анализа варијантних решења трасе, њихово вредновање и рангирање. Циљ истраживања је дефинисање методологије за одређивање најповољније варијанте трасе железничке пруге са аспекта захтева који се постављају савременој саобраћајној инфраструктури.

Многе анализе, везане за објекте железничке инфраструктуре настале у прошлости, указују на честе инвестиционе промашаје и појаву негативних последица у току њихове изградње и експлоатације. Постоји више разлога који су доводили до ових појава, а један од њих везан је за недостатке тада примењиваних како методологија планирања и пројектовања, тако и методологије вредновања варијантних решења ових објеката.

Методологија предложена у овој дисертацији предвиђа примену системског приступа и итеративног оптимизационог процеса који осим финансијско-економског критеријума укључује и примену техничко-технолошких, саобраћајних, просторних и еколошких критеријума. Разлог за примену оваквог процеса је што железничке пруге припадају скупу дискретних система за чији опис се не може формулисати свеобухватни математички модел, него се морају генерисати варијантна решења трасе железничке пруге. То захтева да се у оквиру овог процеса, на основу усвојеног општег циља и листе критеријума, примени прво прелиминарно одлучивање (рангирање и избор допустивих варијантних решења), а затим и финално одлучивање (избор најповољнијег решења). За решавање избора најповољније трасе железничке пруге у оквиру дисертације коришћена је метода ВИКОР, метода заснована на компромисном програмирању.

Предложени модел за оптимизацију трасе железничке пруге тестиран је на примеру рангирања креираних варијантних решења за реконструкцију деонице постојеће једноколосечне пруге Инђија - Нови Сад и потврдио је своју практичну примену и употребљивост.

КЉУЧНЕ РЕЧИ: планирање и пројектовање, траса железничке пруге, избор најповољније варијанте трасе, вишекритеријумско одлучивање, метода ВИКОР

ABSTRACT

The subject of the research in this Doctoral Dissertation is the railway route in its phases of planning and designing, the analysis of alternatives, its assessment and ranking. The aim of the research is defining the methodology for finding the most favourable alternative of railway route from the aspect of demands for the contemporary transport infrastructure.

Many analyses of railway infrastructure objects built in the past indicate often investment failures and its negative consequences during its construction and exploitation. There are many reasons that brought to these consequences and one of them is linked to the applied methodologies for planning and designing and also methodology for finding the most favourable alternative of railway route.

The suggested methodology implies the application of systematic approach and iterative optimization process that, apart from the financial-economic criterion applies technical-technological, traffic, spatial and ecological criteria. The reason for such process application is that railroads belong to the set of discreet systems that the general mathematical model can not be formulated for, but alternatives for the railway routes must be generated. It demands that within this process, and based on the generally adopted aim and the list of criteria, the preliminary decision making is firstly applied (ranking and the choice of permissible variant solutions) and than the final decision making is applied (the choice of the most favourable solution). For choosing the most favourable railway route, VIKOR method based on the compromise programming is used in this thesis.

The suggested model for the railway route optimization is tested on the example of ranking created variant solutions for reconstruction of the existing part of the one-track railroad Indjija-Novı Sad and confirmed its practical application and usefulness.

KEYWORDS: planning and designing, railway route, the choice of the most favourable route variant, multicriteria decision making, VIKOR method

САДРЖАЈ:

1	УВОД	1
2	ДОСАДАШЊА ИСТРАЖИВАЊА	6
3	КОНЦЕПТ ОДРЖИВОГ РАЗВОЈА И ЖЕЛЕЗНИЧКИ САОБРАЋАЈНИ СИСТЕМ	11
4	ОСНОВНИ ПАРАМЕТРИ ЖЕЛЕЗНИЧКИХ ПРУГА	20
	4.1 Основни саобраћајни параметри железничких пруга.....	22
	4.2 Основни технички параметри железничких пруга	25
	4.3 Основни експлоатациони параметри железничких пруга.....	29
5	ТРАСА ЖЕЛЕЗНИЧКЕ ПРУГЕ И ЊЕНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ	30
	5.1 Пројектни елементи трасе железничке пруге.....	32
	5.2 Утицај избора величине полупречника кривине.....	45
	5.3 Технички показатељи трасе железничке пруге	56
6	ПРЕГЛЕД ОСНОВНИХ ТЕОРИЈСКИХ ПРИНЦИПА ОПТИМИЗАЦИЈЕ	58
	6.1 Генерисање варијантних решења	61
	6.2 Критеријуми и критеријумске функције.....	61
	6.3 Вредновање варијантних решења.....	63
	6.4 Релативне тежине критеријума.....	65
	6.5 Методе за оптимизацију	67
	6.6 Матрица одлучивања за избор најповољнијег варијантног решења.....	70
	6.7 Доношење одлуке о најповољнијем варијантном решењу	71
7	МОДЕЛ ЗА ОПТИМИЗАЦИЈУ ТРАСЕ ЖЕЛЕЗНИЧКЕ ПРУГЕ	73
	7.1 Алгоритам оптимизације трасе железничке пруге.....	78
	7.1.1 Ниво I – Основни програмски услови за оптимизацију.....	78
	7.1.2 Ниво II – Генерисање могућих варијантних решења трасе железничке пруге.....	80
	7.1.3 Ниво III – Прелиминарна оптимизација.....	82
	7.1.4 Ниво IV – Утврђивање функционалних показатеља варијаната трасе.....	83
	7.1.5 Ниво V – Вредновање варијаната трасе	85
	7.1.6 Ниво VI – Рангирање варијаната трасе	86
	7.1.7 Ниво VII – Финална оптимизација	87

7.2	Посебни циљеви и критеријуми за оптимизацију трасе железничке пруге	88
7.2.1	Модел за одређивање критеријума <i>Инвестициона улагања</i>	91
7.2.2	Модел за одређивање критеријума <i>Трошкови одржавања и управљања</i>	94
7.2.3	Модел за одређивање критеријума <i>Квалитет саобраћајне услуге</i>	97
7.2.4	Модел за одређивање критеријума <i>Последице на просторни развој</i>	100
7.2.5	Модел за одређивање критеријума <i>Утицај на животну средину</i>	107
7.3	Избор методе за рангирање и одлучивање	117
8	ТЕСТИРАЊЕ МЕТОДОЛОШКОГ ПОСТУПКА И МОДЕЛА ЗА	
	ОПТИМИЗАЦИЈУ	120
8.1	Анализа постојећег стања пруге Инђија – Нови Сад.....	121
8.2	Предлог варијантних решења реконструкције	124
8.3	Вредновање варијантних решења реконструкције	129
8.3.1	Минимум инвестиционог улагања.....	130
8.3.2	Минимални трошкови одржавања и управљања	131
8.3.3	Максималан квалитет саобраћајне услуге.....	132
8.3.4	Минимум последица на просторни развој	132
8.3.5	Минимум утицаја на животну средину	134
8.3.6	Рангирање варијантних решења реконструкције	135
8.3.7	Финална матрица за одлучивање и ранг листе	138
8.3.8	Анализа резултата	139
9	ЗАКЉУЧАК	141
10	ЛИТЕРАТУРА	145
	ПРИЛОЗИ	151
	<i>Биографски подаци о кандидаткињи</i>	157

ЛИСТА СЛИКА У РАДУ:

Слика 3.1	Ланац деловања производних система на окружење	12
Слика 3.2	Расподела загађивача у континенталном саобраћају	17
Слика 3.3	Специфична потрошња енергије и пренос штетних материја према врсти превозних средстава у континенталном саобраћају	17
Слика 4.1	Веза категоризације пруга и фиктивног оптерећења	23
Слика 4.2	Елементи стандардног попречног профила железничке пруге на насипу.....	27
Слика 4.3	Елементи ситуационог плана и уздужног профила железничке пруге	28
Слика 5.1	Веза категоризације пруга и брзине	33
Слика 5.2	Дужина међуправе и кружног лука хоризонталне кривине у функцији брзине.....	34
Слика 5.3	Веза између полупречника хоризонталне кривине R , преломног угла α и рачунске брзине V_r	35
Слика 5.4	Минимална вредност полупречника R_{min} кружне кривине за усвојену рачунску брзину V_r и бочно убрзање p	37
Слика 5.5	Област избора полупречника кривине R у функцији рачунске брзине.....	38
Слика 5.6	Дијаграм промене померања f у зависности од полупречника кружне кривине.....	40
Слика 5.7	Минимална дужина прелазне кривине у функцији полупречника хоризонталне кривине R и рачунске брзине V_r	42
Слика 5.8	Функционална веза величине нагиба нивелете i , растојања одабраних тачака L и њихове висинске разлике H	44
Слика 5.9	Веза између величине полупречника вертикалне кривине ρ и рачунске брзине V_r	45
Слика 5.10	Дужина хоризонталне кривине у функцији величине полупречника R и преломног угла α	46

Слика 5.11	Приказ хоризонталних кривина са различитим полупречницима и преломним угловима	47
Слика 5.12	Скраћење дужине кривине ΔL при промени величине полупречника ΔR и преломног угла α	49
Слика 5.13	Повећање дужине бисектрисе ΔS при промени величине полупречника ΔR и преломног угла α	50
Слика 5.14	Последица промене дужине бисектрисе на обим земљаних радова на траси.....	51
Слика 5.15	Последица промене дужине бисектрисе на величину објеката на траси	52
Слика 5.16	Повећање брзине ΔV при промени величине полупречника R	53
Слика 5.17	Уштеда времена вожње Δt при промени брзине у кривинама.....	54
Слика 5.18	Смањење времена вожње Δt при повећању полупречника R_{min}	54
Слика 6.1	Приказ поступка оптимизације.....	60
Слика 6.2	Хијерархијски поредак циљева, критеријума и показатеља.....	62
Слика 6.3	Веза критеријума са методама оптимизације.....	65
Слика 6.4	Активности у поступку оптимизације	72
Слика 7.1	Структура модела за оптимизацију трасе железничке пруге	75
Слика 7.2	Нивои процеса оптимизације у оквиру модела за оптимизацију трасе железничке пруге	77
Слика 7.3	Синтезна карта ограничења	80
Слика 7.4	Почетна матрица за оптимизацију и одлучивање.....	86
Слика 7.5	Однос трасе железничке пруге према просторним целинама	102
Слика 7.6	Однос трасе железничке пруге према површинама различите намене	103
Слика 7.7	Однос трасе железничке пруге према културно-историјском и природном наслеђу	105
Слика 7.8	Степен раздвајања центара активности од гравитационих подручја	106
Слика 7.9	Степен раздвајања просторно-функционалних целина	107
Слика 7.10	Степен угрожености буком и вибрацијама у насељеним срединама од железничког саобраћаја.....	109

Слика 7.11	Степен загађења и деградације тла као последица изградње трасе и железничког саобраћаја	111
Слика 7.12	Степен загађења зона за водоснабдевање као последица изградње пруге	112
Слика 7.13	Степен угрожености заштићених биљних и животињских врста од утицаја трасе железничке пруге	114
Слика 7.14	Степен промене климатских и микроклиматских услова услед утицаја трасе железничке пруге	115
Слика 7.15	Степен промене морфологије терена и састава вегетације услед утицаја трасе железничке пруге	116
Слика 8.1	Брзине по деоницама – постојеће стање	123
Слика 8.2	Графички приказ ненормализованих вредности тежинских кофицијената за предложена сценарија	138

ЛИСТА ТАБЕЛА У РАДУ:

Табела 4.1	Веза категоризације пруга и фиктивног оптерећења	23
Табела 4.2	Веза класификације пруга и дозвољеног оптерећења.....	24
Табела 4.3	Категоризација пруга према TSI	24
Табела 4.4	Технички услови према TSI категоризацији.....	24
Табела 5.1	Веза између граничне дозвољене вредности полупречника R_{min} кружне кривине и усвојене рачунске брзине V_r у кривинама са прелазном кривином.....	37
Табела 7.1	Листа циљева, критеријума и критеријумских функција за оптимизацију трасе железничке пруге	90
Табела 8.1	Службена места на деоници пруге Инђија – Нови Сад	122
Табела 8.2	Преглед полупречника хоризонталних кривина – постојеће стање.....	122
Табела 8.3	Преглед лаганих возњи на прузи по деоницама.....	124
Табела 8.4	Технички параметри за геометријско обликовање варијантних решења реконструкције.....	125
Табела 8.5	Број кривина по деоницама	128
Табела 8.6	Приказ карактеристика траса по варијантама.....	129
Табела 8.7	Посебни циљеви, критеријуми и критеријумске функције за вредновање варијантних решења реконструкције.....	129
Табела 8.8	Приказ коштања грађевинских радова на варијантним решењима реконструкције	130
Табела 8.9	Приказ укупних инвестиционих улагања за варијантна решења реконструкције	131
Табела 8.10	Приказ укупних трошкова одржавања и управљања за варијантна решења реконструкције	131
Табела 8.11	Приказ времена путовања за варијантна решења реконструкције	132
Табела 8.12	Приказ капацитета трасе пруге-пропусне моћи за варијантна решења реконструкције.....	132

Табела 8.13	Приказ нумеричких вредности последица на просторни развој за варијантна решења реконструкције	133
Табела 8.14	Приказ последица на просторни развој за варијантна решења реконструкције исказане бодовима	133
Табела 8.15	Приказ нумеричких вредности утицаја на животну средину за варијантна решења реконструкције	134
Табела 8.16	Приказ утицаја на животну средину за варијантна решења реконструкције исказане бодовима	135
Табела 8.17	Почетна матрица за одлучивање	136
Табела 8.18	Нормализација почетне матрице за одлучивање	136
Табела 8.19	Ненормализоване вредности тежинских коефицијената за предложена сценарија	138
Табела 8.20	Матрице за одлучивање на основу мера Q_j , QS_j и QR_j	139
Табела 8.21	Финална матрица за одлучивање на основу мере Q_j	139
Табела 8.22	Ранг листе варијанти трасе за предложена сценарија и $v = 0.5$	139

1 УВОД

Општи тренд сталног повећања брзина возила у саобраћају и пораст интезитета саобраћаја, настао из савремених друштвених збивања, тенденција и интеграционих процеса, повлачи, са једне стране, захтеве за повећавањем квалитета превозних услуга, а са друге стране, захтеве за рационалним коришћењем и очувањем квалитета животне средине, у складу са прихваћеним концептом одрживог развоја. Ови захтеви су у постојећим Белим књигама транспорта [18, 19, 28] уграђени у основне ставове саобраћајне политике и примарне циљеве развоја саобраћајног система на простору Европе. Актуелна збивања и процеси указују усредсређеност на подизање квалитета саобраћаја до нивоа који ће да задовољи постављене циљеве. Зато се у оквиру саобраћајних система стално истражују и уводе нова техничка и технолошка решења, како би системи остварили унапред тражени и дефинисани квалитет саобраћаја. Заправо, циљ ових решења је да унапреде превозне процесе, модернизују и остваре боље техничко-експлоатационе карактеристике саобраћајне инфраструктуре и возних капацитета и да смање или отклоне негативне ефекте саобраћајних система у домену простора и животне средине.

Како брзина превоза, технички ниво изграђености инфраструктуре и квалитет услуге код многих постојећих железничких саобраћајних система није у складу са горе постављеним захтевима, то намеће потребу да се и железничке управе укључе у процесе промена и прилагођавања, односно повећања квалитета саобраћаја. Први корак прилагођавања су радикалне структурне промене, односно спровођење процеса реструктуирања железничког саобраћаног система, а огледа се у издвајању железничке инфраструктуре као посебне целине. У Директивама Европске Уније [29-34] постављене су основе и смернице за реструктуирање ових система, односно железничких компанија. На основу ових смерница постојеће компаније се раздвајају на најмање два привредна друштва, а то су: „управљач инфраструктуром“ и „железнички превозник“ (једно или више). Овим структурним променама очекује се стварање тржишних услова, независан положај на тржишту и либерализација транспортног тржишта. Неке железничке управе су

већ реализовале ове процесе, а код неких су они тек у почетној фази. Осим ових процеса, железничке управе усвајају и савремену концепцију даљег развоја железничког система, која ће бити усаглашена са општом саобраћајном политиком и која ће имати стратешке циљеве: увођење нових технологија у организацији процеса превоза, примену новог система управљања, модернизацију постојеће инфраструктуре и возних средстава, развој инфраструктурних и возних капацитета који ће омогућити веће брзине возова ($160\text{--}350\text{ km/h}$). Реализацијом наведених процеса и спровођењем савремене концепције даљег развоја система остварио би се: брз, безбедан, сигуран, ефикасан, комфоран, поуздан, економичан, рентабилан, конкурентан и еколошки прихватљив железнички саобраћај. Тако би се искористиле све предности које пружа железнички систем, а уједно би се побољшао положај овог система на транспортном тржишту.

Како су железничке пруге техничко средство железничке инфраструктуре и један од кључних чинилаца организације саобраћаја [41] неопходно је да се и оне прилагоде концепту интероперабилности железничког система [26, 33], са аспекта техничких захтева [23, 25, 27] и повећања квалитета [20, 22, 24, 34, 35, 70, 71, 72]. Ово је проистекло из чињенице да су се постојећи, до сада примењивани, модели развоја железничких пруга заснивали углавном на методама које су у први план стављале само техничке и економске параметре и показатеље. Овим методама, формирана варијантна решења трасе железничке пруге, упоређивана су на основу трошкова инвестиција и трошкова експлоатације, без потпуног сагледавања и вредновања и других (економских, саобраћајних, социолошких, просторних, ергономских и еколошких) ефеката. У овим моделима је одлучивање, односно доношење одлука о избору најповољнијег решења трасе железничке пруге, најчешће било интуитивно и искуствено, а превасходно недовољно документовано. Зато су последице реализације овако неадекватног вредновања, упоређивања и одлучивања у моделима, могући инвестициони промашаји, споро, скупо, непоуздано и некомфорно одвијање железничког саобраћаја са низом негативних последица на простор и околину, настали самом изградњом железничке пруге и у току њене експлоатације.

Анализа резултата до сада примењених модела развоја железничких пруга указује на недостатке ових модела, али и потребу да се за будуће подухвате,

везане за изградњу нових и реконструкцију постојећих железничких пруга или деоница железничких пруга, примени савремени системски приступ у решавању проблема избора трасе железничке пруге. Наиме, ако железничку пругу посматрамо као један сложени техничко-технолошки систем, онда се овим системским приступом, односно свеобухватном анализом, могу сагледати и утврдити односи и везе између свих техничких, саобраћајних и експлоатационих параметара пруге. На овај начин добиће се реалнија основа за вредновање, упоређивање и избор најповољнијег решења трасе. Да би се то остварило, осим системског приступа, неопходно је дефинисање и формирање новог модела развоја железничких пруга.

Зато је предмет истраживања у овој дисертацији избор трасе железничке пруге у фазама њеног планирања и пројектовања, односно анализа њених реалних варијантних решења, њихово вредновање и оптимизација уз примену метода вишекритеријумског рангирања. Варијантна решења трасе се формирају - генеришу варирањем њених основних техничких елемената, а проблем који је потребно решити у току оптимизације је избор и доношење одлуке о најповољнијој варијанти трасе из скупа конкурентних решења. Овај избор и одлучивање реализоваће се на основу унапред усвојених циљева, критеријума и постављених ограничења за грађење и експлоатацију нове трасе или реконструкцију постојећих траса железничке пруге и уз примену метода вишекритеријумског одлучивања. Најповољније варијантно решење трасе, као резултат овог избора, биће она траса која на најбољи начин испуњава техничке, саобраћајне, економске и еколошке захтеве који се постављају савременој саобраћајној инфраструктури. Овако изабрано решење трасе најуспешније усклађује сва улагања и трошкове, обезбеђује брз, безбедан, ефикасан, комфоран, поуздан, економичан, рентабилан, конкурентан и еколошки прихватљив железнички саобраћај. Тако се ствара и развија оригинални модел за оптимизацију трасе железничке пруге, што је и крајњи циљ истраживања ове докторске дисертације.

Моделом који је развијен у оквиру ове дисертације биће омогућено да се у сваком конкретном саобраћајном, економском, социолошком, просторном и еколошком окружењу, из скупа конкурентних решења, уз примену метода

вишекритеријумске оптимизације може добити најповољније варијантно решење трасе железничке пруге. Та реализација је могућа, јер се пре физичке градње железничке пруге, односно у току њеног планирања, могу објективно проценити: последице изградње исказане кроз будуће загађење животне средине, измене просторне структуре, безбедност саобраћаја, ниво услуге и пропусну моћ, потребна финансијска средства и друго.

Како су излазни резултати оптимизације ранг листе варијантних решења трасе, за различита сценарија тежинских вредности критеријума, тада овај модел представља подршку доносиоцима коначне одлуке у процесу одлучивања. Одлучивање у овом моделу мора бити објективно - непристрасно, неполитичко, поуздано и документовано. Само доношење коначне одлуке мора бити остварено кроз процес јавног одлучивања уз учешће свих заинтересованих структура. Доносиоци одлуке имаће могућност да се на крају процеса одлучивања одреде за једно (коначно) или за неколико варијантних решења (сужен скуп решења), која ће бити додатно анализирана, како би било омогућено да се по истом моделу у поновљеном поступку дође до коначне одлуке. Тако ће бити изабрано најповољније варијантно решење трасе железничке пруге.

Да би се остварио постављени циљ истраживања потребно је:

- анализирати све техничке, саобраћајне и експлоатационе параметре железничке пруге,
- утврдити основне полазне услове за формирање - генерисање варијантних решења трасе: граничне вредности елемената трасе, организацију и управљање саобраћајем, синтезну карту ограничења,
- генерисати скуп свих могућих варијантних решења трасе варирањем њених основних техничких елемената,
- извршити прелиминарну оптимизацију (из скупа генерисаних варијантних решења изабрати допустива решења трасе, односно решења за даље разматрање која испуњавају услове који се односе на елементе трасе и пропусну моћ железничке пруге),
- дефинисати циљеве, критеријуме и критеријумске функције за вредновање варијантних решења,
- усвојити методе за рангирање варијантних решења трасе,

- утврдити релативне важности појединих критеријума и дефинисати могућа сценарија за тежинске вредности критеријума,
- извршити финалну оптимизацију (формирати коначну ранг листу као излазни резултат процеса вредновања и рангирања варијанти трасе за различита сценарија вредности тежинских критеријума),
- тестирати развијени модел.

На основу наведеног, може се уочити да је оптимизација трасе и избор најповољнијег варијантног решења трасе железничке пруге комплексан проблем у области железничке инфраструктуре из чега проистиче неопходност и важност истраживања и решавања овог проблема, како са практичног тако и са научног аспекта.

2 ДОСАДАШЊА ИСТРАЖИВАЊА

Приликом планирања и пројектовања нове, односно реконструкције постојеће трасе железничке пруге, по правилу се јавља више могућности, односно реалних варијантних решења трасе. (На прузи Београд - Бар на деоници Бијело поље – Подгорица, дужине око 150 km, проучено је 1500 km кроз разне варијанте [44]). Када се таква реална варијантна решења трасе са њиховим битним елементима и карактеристикама утврде могуће је извршити избор једног, најповољнијег. Оцењивање и вредновање реалних варијантних решења трасе планиране железничке пруге коју треба изградити могуће је извршити, у основи, на нивоу генералног и идејног пројекта, па чак и на нивоу главног пројекта, када су у питању микролокацијска варијантна решења. У случају реконструкције постојеће трасе избор је могуће применити, првенствено, на нивоу идејног пројекта, а не искључују се могоћности примене ни у осталим фазама у зависности од тога колики је захват у плану.

Овај избор најповољнијег варијантног решења трасе врши се на основу опште важећег критеријума, који се од постанка железнице па до данас није мењао, а то је да се до жељеног циља дође са најмањим утрошком средстава и енергије, а водећи рачуна о друштвеној користи и утицају на животну средину. То значи да најповољнија варијанта мора да обезбеди тражени квалитет како саме железничке пруге тако и целокупног транспортног ланца уз најнижи ниво цене грађења и трошкова експлоатације, односно да најповољнија варијанта није она која најмање кошта, већ она која остварује највеће добити сразмерно цени грађења и трошковима експлоатације.

Ово је условило и потребу да се варијантна решења међу собом вреднују и упоређују. Развој метода и техника за вредновање и упоређивање варијаната трасе железничке пруге, као и поступка доношења одлука о најповољнијој траси, прошао је кроз више фаза. У почетку су се примењивале методе и поступци са приближним економским прорачунима, односно методе које су се заснивале на анализи само оних показатеља који су се могли исказати новчаним јединицама, а то су: *Метода виртуалних дужина*, *Метода виртуалних висина* и *Метода Кирила Савића* [76].

Принцип метода виртуалних дужина и виртуалних висина је у томе да се поређење варијантних решења трасе остварује посредно преко виртуалних коефицијената. Ови коефицијенти су у функцији од дужине, односно нагиба трасе и исказују само вредност превозних трошкова, односно део трошкова експлоатације, који зависе искључиво од елемената плана и профила трасе пруге. Варијантно решење код кога су ови трошкови мањи него код других решења, усваја се као најповољније решење трасе. Недостатак ових метода је у томе што могу бити примењиване само за трасе пруге са непроменљивим, једноставним успонима.

Метода Кирила Савића, за разлику од претходних, директно пореди варијантна решења трасе, а као меру за поређење узима величину укупних годишњих трошкова: годишњи трошкови експлоатације (превозни трошкови, саобраћајни трошкови и трошкови за одржавање пруге и постројења) и годишњи трошкови за грађење трасе пруге (амортизација, отплата кредита, камата и инвестиционо одржавање). Према овој методи трошкови експлоатације зависе како од елемента трасе у плану и профилу тако и од времена. Упоредјујући на овај начин могућа варијантна решења трасе, најповољнија траса је она чији су укупни годишњи трошкови за грађење и експлоатацију најмањи.

Доношење одлуке о најповољнијој траси, применом ових метода, најчешће је интуитивно и недовољно документовано, а заснива се на поступку који само описује појаве, али их не анализира, већ само упозорава на могуће тешкоће које се могу јавити у току грађења или експлоатације железничких пруга и не открива њихове законитости. Предлажу се могућа решења, али се у потпуности и до краја технички не тестирају, нити вреднују сви економски, саобраћајни, просторни и еколошки ефекти. Због тога резултат примене ове методе може да доведе до инвестиционог промашаја као и до низа негативних последица на окружење након саме изградње и у току експлоатације железничке пруге.

Следећа фаза развоја метода и техника за вредновање и одлучивање се везује за време великих улагања у саобраћајне инфраструктурне пројекте и кредитне аранжмане са међународним финансијским институцијама (Светска и Европска банка за обнову и развој). У овој фази наведене институције су увеле у примену нове, финансијски прецизније, стандарде, односно дефинисале одређену процедуру

[45, 75, 93], која је морала да се испуни и спроведе за одобравање тих кредитних аранжмана. Ово је захтевало развијање и примену сложенијих и свеобухватнијих методолошких поступака, метода и софтверских апликација за процену и вредновање улагања [105].

Новодефинисане методе за припрему, реализацију и процену јавних инвестиција, па и железничких инфраструктурних пројеката, коју примењују међународне финансијске институције базирају се на *Cost-Benefit* анализи, односно анализи трошкова и користи [45, 67, 98]. При оцењивању инфраструктурних пројеката применом *Cost-Benefit* анализе користе се искључиво економски и финансијски критеријуми, који у разматрање узимају мерљиве елементе и који могу утицати на избор решења при доношењу коначне одлуке.

Ове методе припадају групи метода за економско вредновање, јер у процес вредновања варијантних решења трасе укључују само оне критеријуме који се могу изразити новчаним јединицама, што је у сваком случају ограничен број критеријума. Зато ове методе осигуравају само основу да се донесе закључак о вредностима предложених пројеката и да се процени њихова оправданост.

Ово је условило потребу за развојем и применом метода вредновања којима би било обухваћено што више потребних и релевантних критеријума, како оних који се могу исказати новчаним јединицама (трошкови и користи), тако и оних који се могу исказати неким другим показатељима немонетарне природе (време путовања, капацитет, безбедност, приступачност, бука, загађење ваздуха и воде, трајно заузимање земљишта, однос са другим видовима саобраћаја и др.).

До крупног напредка у усавршавању метода и поступака за вредновање и упоређивање траса железничке пруге дошло је након потребе и тежње за: постизањем све већих брзина на пругама, покретањем возова све веће масе, повећавањем квалитета превозних услуга, као и за очувањем непосредног окружења и рационалним коришћењем свих природних ресурса, због смањења квалитета животне средине.

Зато се у оквиру железничког саобраћајног система развијају и уводе нова техничка и технолошка решења (савремена конструкција горњег строја пруге и железничких возила, савремена телекомуникациона и сигнално-сигурносна постројења, нови систем управљања и организације саобраћаја и превоза у складу

са захтевима интероперабилности железничког система) која ће одговорити овим потребама, али и да се примени и један нови, свеобухватни приступ у процесу планирања траса железничких пруга (нових или предвиђених за реконструкцију). То се постиже применом оптимизационог поступка. Овај поступак се реализује кроз итеративно истраживање (прелиминарна и финална оптимизација варијатних решења трасе) и то на основу квантитативног вредновања са више становишта и по много ширим критеријумима, често међусобно супростављеним, од којих су неки техничке и економске природе, а неки другачије. Задатак вредновања, у овом раду, је у контексту објективне процене свих позитивних и негативних ефеката трасе, који се могу јавити не само изградњом већ и у току експлоатације саме пруге.

На основу наведеног следи да најповољније варијантно решење трасе железничке пруге није оно које изискује најниже инвестиционе или експлоатационе трошкове или оно које има најмање време путовања, већ оно које испуњава и довољан капацитет, пружа највећу безбедност саобраћаја и комфоран превоз, као и оно које има најмање последице по простор и животну средину. Зато је упоређивање варијантних решења у оквиру оптимизационог поступка веома важна, али и сложена активност која се састоји од вредновања решења по свим усвојеним критеријумима и затим њиховог рангирања. На крају оптимизационог поступка, на основу оствареног ранга за различита сценарија тежинских вредности критеријума, доносиоци одлуке имају могућност да врше избор најповољнијег - коначног варијантног решења трасе железничке пруге.

Из наведеног проистиче неопходност истраживања и формулисања поступка за оптимизацију варијантних решења трасе железничке пруге, односно дефинисање критеријума за њихово вредновање и рангирање као и постављање и дефинисање модела за оптимизацију.

Ова проблематика до сада није у потпуности научно и теоријски сагледана. О томе сведочи и (мали) број радова из ове области. Заправо, искуства постоје код решавања сличних проблема у области железничког саобраћаја или при примени метода вишекритеријумске анализе у процесу планирања и пројектовања путне мреже, што је приказано у радовима [2, 7, 10, 11, 17, 40, 46, 47, 55, 58, 60, 73, 74].

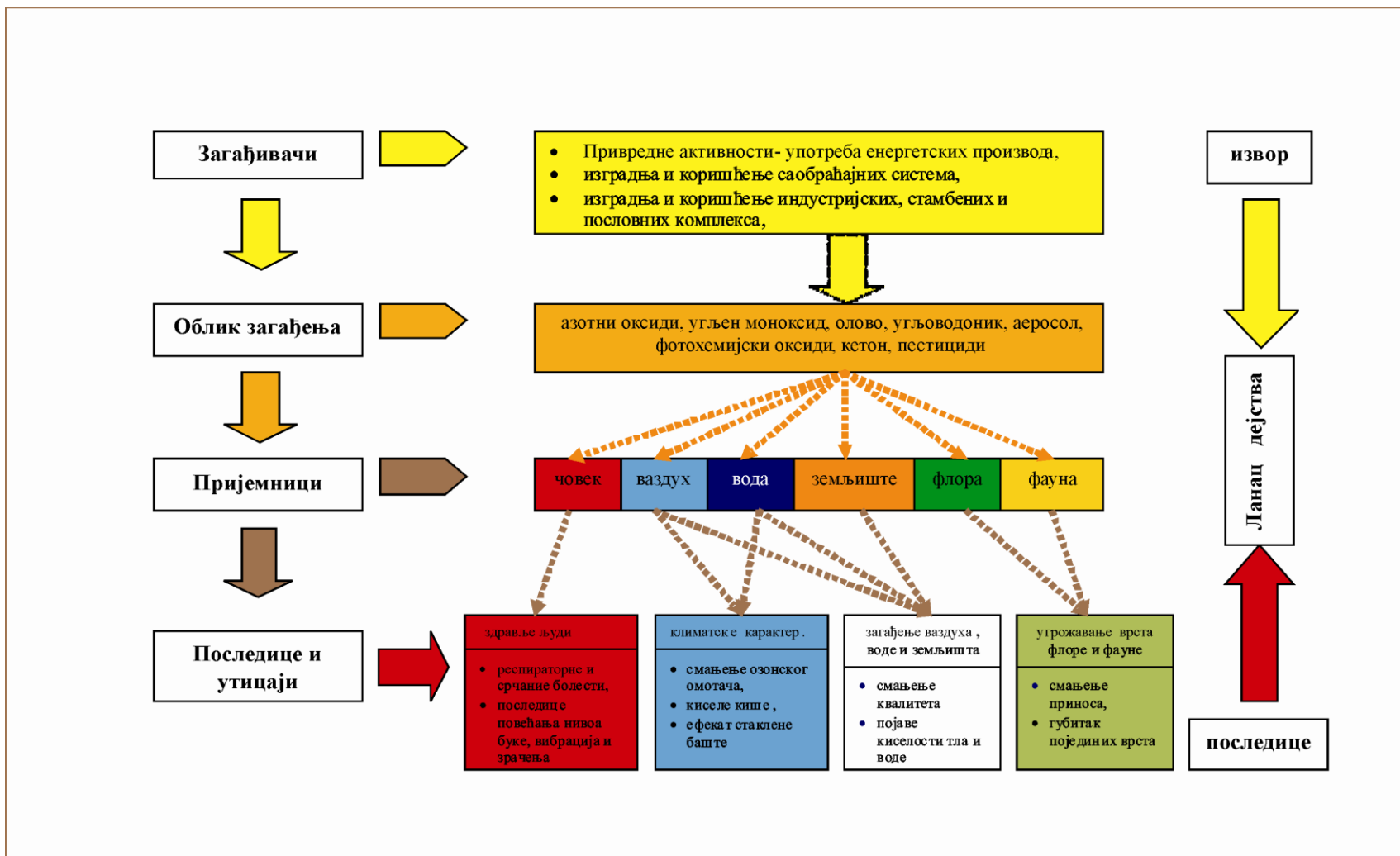
Први корак у решавању проблема оптимизације трасе, вредновање варијантних решења железничке пруге, приказан је у радовима [39, 49, 50, 99, 102, 103]. Иако се ови радови баве проблематиком пруга за велике брзине, у њима је учињен покушај да се увођењем више критеријума за вредновање створи поуздана методологија за даљи развој процеса оптимизације и избора најповољнијег варијантног решења трасе и за конвенционалне железничке пруге [3, 4, 5, 43, 53, 54].

На основу изнетих чињеница може се закључити да проблем оптимизације трасе железничке пруге није довољно истражен, а поготову сегмент који се односи на прелиминарну оптимизацију, када се врши избор допустивих варијантних решења трасе, из чијег се скупа касније, кроз финалну оптимизацију уз увођење јасније и прецизније утврђених вредности критеријума за вредновање, врши избор и одлучује о коначном - најповољнијем варијантном решењу трасе железничке пруге. Зато, истраживања спроведена у овом раду као и дефинисање оригиналног модела за оптимизацију представља допринос и прилог решавању проблема оптимизације трасе железничке пруге.

3 КОНЦЕПТ ОДРЖИВОГ РАЗВОЈА И ЖЕЛЕЗНИЧКИ САОБРАЋАЈНИ СИСТЕМ

Убрзани развој савременог друштва па и самих саобраћајних система, који по својој суштини припадају глобалној индустрији, довео је до нежељених утицаја и последица по природу и животну средину (биосфера) у виду: огромне потрошње енергетских ресурса, који су највећим делом необновљиви, трајног заузимања и коришћења простора и до нарушавања устаљене еколошке равнотеже непосредног окружења. При томе потрошња енергетских ресурса ствара штетне продукте који непосредно загађују окружење и излажу основне елементе животне средине неповољним утицајима. Тако се формира и успоставља један ланац деловања и узрочно-последичних веза, што је приказано на слици 3.1, који се састоји од следећих карика и нивоа:

- **загађивачи** – активности и процеси као узрочници промена или извори загађења,
- **облик загађења** – стварање и ослобађање гасова, опасних и штетних материја (азотни оксиди, угљен-моноксид, сумпор-диоксид, угљен-диоксид, олово, метан, аеросол, кетон, фотохемијски оксиди и пестициди), бука, вибрације и зрачења,
- **пријемници** – човек, флора, фауна, вода, ваздух, земљиште,
- **последнице и утицаји:**
 - на квалитет живота и здравље људи (ометање животних и радних активности, повећан број респираторних и срчаних болести),
 - загађење (промене у физичко-хемијском и биолошком саставу основних компоненти) ваздуха, воде и земљишта,
 - промене климатских карактеристика (смањење озонског омотача, киселе кише и ефекат стаклене баште) [92],
 - угрожавање вегетације и смањење приноса,
 - губитак појединих врста флоре и фауне,
 - повећање нивоа буке, вибрација и зрачења.



Слика 3.1 Ланац деловања производних система на окружење

Све ове активности и процеси имају за последицу смањење квалитета животне средине. Како животна средина не може да прими сва загађења и није неисцрпна у погледу енергетских ресурса, с обзиром да су они највећим делом необновљиви, то се њено загађивање и исцрпљивање мора зауставити и ограничити. Ово ограничење мора бити „**одрживо**“, односно мора се свести на ниво који је рационалан и прихватљив како за друштво тако и за само непосредно окружење. Из ових начела је и проистекла *Концепција одрживог развоја* [1, 90] дефинисана у виду 27 принципа, са основним циљем: заштите и очувања животне средине и побољшања њеног квалитета, заштите човековог здравља, спречавања уништења природе, опрезног и рационалног коришћења природних добара и ресурса.

Из овог следи да Концепт одрживог развоја подразумева равнотежу између потрошње ресурса и способности природних система да задовоље и потребе будућих генерација, односно да одлуке које се доносе данас не би требало да угрожавају перспективе за очување и побољшање животног стандарда у будућности.

Међусобна условљеност и повезаност економске, социјалне, културне и еколошке компоненте друштвеног развоја и животне средине чине главне ослонце одрживог развоја и зато оне морају остварити одговарајући баланс. На тај начин се одрживи развој третира као процес промена у којем искоришћавање ресурса и оријентација технолошког развоја бивају усклађени са начелима заштите животне средине (сачувати и унапредити квалитет средине). Такав приступ условљава и потребу за заштитом и управљањем животном средином при формирању стратегија у свим битним подручјима човековог деловања и контролу загађивања животне средине почев од локалног, преко националног па до глобалног нивоа.

Да би се овакав сложен и вишедимензионалан приступ могао применити, потребно је да се заштита и управљање животном средином заснивају на следећим начелима:

- контрола квалитета животне средине,
- будућност и квалитет живота,
- правичност и предостројност.

Поред поменутих начела заштите и управљања животне средине потребно је спровести следеће принципе: загађивач плаћа, корисник плаћа, интегралност, превенција и предострожност, очување природних вредности, алтернативна решења, рационално и штедљиво коришћење сировина, смањење нивоа ризика, регулативне контроле, основна употребљивост, процена утицаја на животну средину.

Овако настала потреба за заштитом и очувањем животне средине и побољшањем њеног квалитета, утицала је да се дефинише и нова стратегија развоја саобраћаја *Концепт одрживог саобраћаја* [48, 68]. Концепт одрживог саобраћаја се може дефинисати на бази економске, еколошке и друштвене димензије одрживости, односно као „способност саобраћајног система да одговори на данашње саобраћајне потребе, без угрожавања могућности истог за будуће генерације“ [48]. Прве студије везане за Одржив саобраћај покренула је Организација за економску сарадњу и развој (OECD) у оквиру међународног пројекта EST (*Environmentally Sustainable Transport*). Концепт одрживог саобраћаја је постављен на бази циљева стратегије одрживог развоја и као такав:

- омогућава да појединци као и привредни чиниоци задовоље основне потребе за приступом услугама, локацијама и активностима у складу са здрављем становништва и екосистема, поштујући једнакост између садашње и наредних генерација,
- функционише правично и ефикасно јер је свима доступан, нуди могућност избора вида превоза и обезбеђује конкурентну привреду, као и уравнотежени регионални развој,
- ограничава емисију и количину отпада на ниво који одговара могућностима окружења да их апсорбује, користи обновљиве ресурсе до нивоа њихове регенерације и користи необновљиве ресурсе до нивоа могућности развоја обновљивих супституата, минимизирајући утицај на заузимање земљишта и стварање буке,
- ствара услове за прераспodelу учешћа појединих саобраћајних система на саобраћајном тржишту, односно даје приоритет оним системима који оставрују најмање последице на животну средину.

Европска саобраћајна политика подржава концепт одрживог саобраћаја. У документу [28] дефинисано је следећих десет циљева за конкурентан и ресурсно ефикасан европски саобраћајни систем:

- Развој и примена нових и одрживих горива и погонских система
 1. До 2030. године смањити на 50% број путничких возила са конвенционалним типовима горива у градском саобраћају; потпуно искључити такве врсте возила у градовима до 2050. године. Успоставити снабдевање у градовима без емисије CO₂ у већим градским центрима до 2030. године.
 2. Смањити емисију CO₂ од погонских горива за авио превоз за 40% до 2050. године, и до 2050. смањити емисију CO₂ од тешких горива (тзв, „бункер горива“) која се користе у прекоморском саобраћају за 40% (ако је могуће и за 50%).
- Оптимизација капацитета мултимодалних ланаца транспорта интензивнијом применом енергетски ефикасних видова саобраћаја.
 3. 30% друмског теретног саобраћаја (дужина транспорта преко 300 km) треба пребацити на друге видове саобраћаја, као што су железнички и водни саобраћај до 2030. године, а више од 50% до 2050. Постизање овог циља захтева прелазак на коридоре теретног саобраћаја, који су енергетски ефикасни и имају минимални утицај на животну средину.
 4. До 2050. завршити мрежу европских пруга за саобраћај возова великих брзина. Утростручити дужину постојећих пруга за велике брзине до 2030. године, развити мрежу у свим државама чланицама ЕУ. До 2050. године већину путничког саобраћаја на средњим растојањима треба преусмерити на железницу.
 5. Успостављање функционалног језгра мултимодалне TEN-T мреже на простору ЕУ до 2030. године уз обезбеђење високог квалитета и капацитета мреже до 2050. године и развој одговарајућих информационих сервиса.
 6. До 2050. године, повезивање свих аеродрома у оквиру основне мреже са мрежом железничког система, превасходно са мрежом за саобраћај возова великих брзина; осигурати да су све морске луке основне мреже

са одговарајућим капацитетима повезане са железничком мрежом за теретни саобраћај, по могућству и на систем унутрашњих водних путева.

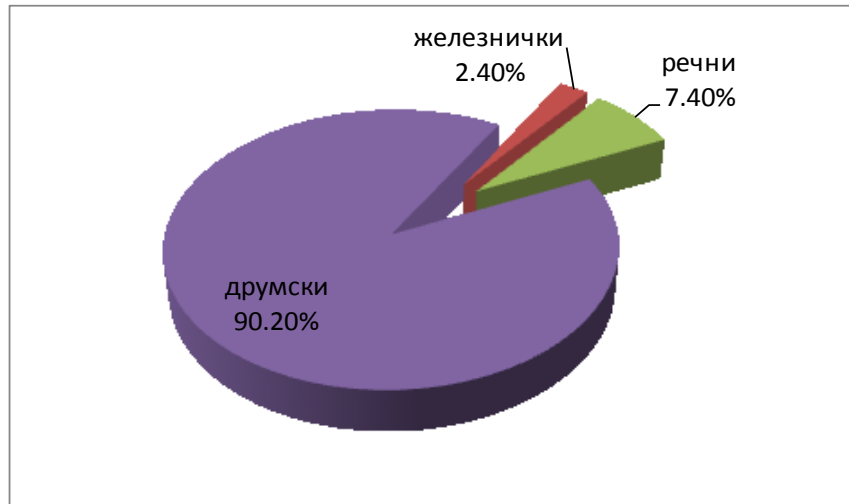
- Повећање ефикасности транспорта и коришћење инфраструктуре са информационим системима и тржишним подстицајима.

7. Примена модернизоване инфраструктуре за управљање ваздушним саобраћајем (SESAR) у Европи до 2020. године и успостављање заједничког простора за ваздушни саобраћај у Европи. Увођење система за управљање сувоземног и водног саобраћаја који су засновани на истим принципима (ERTMS, ITS, SSN и LRIT, RIS). Увођење европског глобалног система за сателитску навигацију (*Galileo*).
8. До 2020. године успоставити оквир за европски мултимодални информациони систем, менаџмент и систем плаћања.
9. До 2050. године смањити број смртно страдалих у друмском саобраћају на приближно 0%. У складу са овим циљем до 2020. године преполовити губитке. Уверити се да је ЕУ светски лидер у сигурности и безбедности саобраћаја у свим видовима.
10. Померање ка пуној примени „корисник плаћа“ и „загађивач плаћа“ и ангажовање приватног сектора да елиминира поремећаје, укључујући штетне субвенције, генерише приходе и обезбеди инвестиције за будуће транспортне иницијативе.

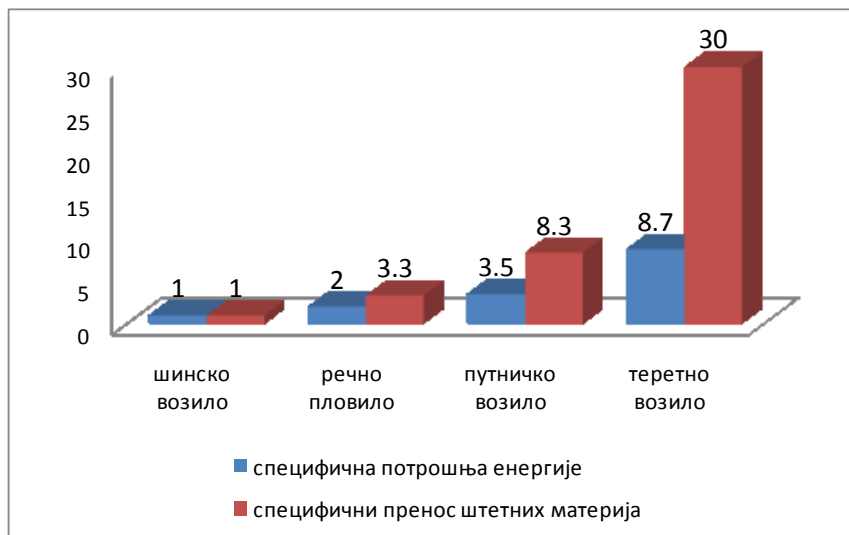
Како су неповољни утицаји и последице експлоатације саобраћајних система неминовни, а у потпуности се не могу елиминисати, тада се предност даје еколошки прихватљивијим системима, односно системима који остављају најмање негативне утицаје и последице на непосредно окружење. На слици 3.2 је приказана расподела загађивача у континенталном саобраћају, где се издваја железнички саобраћајни систем, кога карактерише:

- велики транспортни капацитет,
- трајно ангажовање мањих површина за инфраструктуру (савремена двоколосечна пруга има ширину појаса само 13,7 m, док аутопут са четири траке приближно истог транспортног капацитета захтева два пута шири појас),

- мала специфична потрошња енергије по јединици превоза која ствара и знатно мања загађења, што је приказано на слици 3.3,
- примена савремених конструкција колосека и возила доводи до редукације буке и вибрација,
- унапред дефинисани пут кретања који у многоме утиче на смањење саобраћајних загушења.



Слика 3.2 Расподела загађивача у континенталном саобраћају ^{извор [49]}



Слика 3.3 Специфична потрошња енергије и пренос штетних материја према врсти превозних средстава у континенталном саобраћају ^{извор [49]}

Све ове карактеристике указују да железнички саобраћајни систем треба да искористи еколошке предности које има у односу на остале системе и тако обезбеди себи конкурентну позицију на транспортном тржишту, односно да врати старе, али да привуче и нове кориснике.

Изградња железничке инфраструктуре и њена експлоатација у циљу реализације саобраћаја, изазива низ промена на природним и створеним структурама у простору и излаже основне елементе околине неповољним утицајима. Ове промене и утицаји јављају се у три основна облика:

- **стални** - настају „тренутно“, као последица саме изградње железничке инфраструктуре и одвијања саобраћаја, а делују трајно и манифестују се у виду: заузимања грађевинског, пољопривредног и земљишта са вишегодишњим културама, могућих загађења и промене у режиму површинских и подземних вода, промени климе, рељефа и пејзажа, као и појави буке, вибрација и зрачења,
- **привремени (тренутни)** - настају током грађења и одржавања инфраструктуре (бука, вибрације, загађење ваздуха, ангажовање простора за смештање радника, опреме, механизације и материјала, као и привремени приступни путеви) и пролазног су карактера, као последица реализације и одвијања саобраћаја, а манифестују се у виду: буке, вибрација, зрачења, загађења ваздуха, земљишта, подземних и површинских вода, као и промене у биоценози,
- **случајни** - акцидентни, настају као последица ванредних догађаја и тешко их је унапред предвидети.

Све ове промене и утицаји се не могу елиминисати, али се неки могу значајно смањити и довести до прихватљивих граничних вредности које важе за основне елементе животне средине (ваздух, вода, земљиште, флора и фауна), а дефинисане су законским актима [79, 80, 82, 83, 84, 85, 86].

Одржавање прописаног квалитета животне средине и рационално коришћење природе од стране железничког саобраћајног система могуће је остварити ако се напусти досадашњи концепт примене мера заштите и приступи новом начину решавања заштите животне средине. Наиме, досадашње мере су подразумевале само проверу стања и контроле квалитета средине, а затим

отклањање већ насталих последица. Нови начин заштите животне средине се заснива на принципу да се довољно рано идентификују, односно унапред предвиде и процене све могуће промене које ће се јавити од уочених извора и узročника, како би се предузеле одговарајуће мере заштите и проценио ефекат тих мера. То се може постићи правовременим укључивањем захтева за заштиту животне средине и просторних структура у све процесе планирања, пројектовања и експлоатације железничког система, а нарочито је важно да се то оствари у почетним фазама његове реализације [6, 16, 51, 52]. У тим фазама пресудну улогу могу да имају критеријуми који се укључују у процес оптимизације, односно вредновања и избора најповољнијих варијантних решења. Због тога је веома битно да ови критеријуми, дефинисани из захтева за заштиту животне средине и просторних структура, буду правилно одабрани како њихова примена не би довела до погрешних решења.

Ово је још једна потврда да се мења однос према непосредном окружењу, али и неопходност укључивања нових критеријума у оптимизациони поступак приликом планирања железничке инфраструктуре са циљем очувања и заштите животне средине и просторних структура.

4 ОСНОВНИ ПАРАМЕТРИ ЖЕЛЕЗНИЧКИХ ПРУГА

Захтев, који савремено друштво поставља пред саобраћајне системе је брзина, односно што краће време путовања, учесталост, комфор у складу са захтевима корисника, приступачност, повезивање са другим видовима саобраћаја, одржавање високог нивоа безбедности и сигурности, као и минимум негативних последица по простор и животну средину. Како брзина директно одређује ефикасност саобраћаја, па и железничког, тада се захтевани висок квалитет понуде и услуга у савременом железничком саобраћајном систему постиже тако да инфраструктура и возна средства морају бити на високом техничком и технолошком нивоу, односно техничке карактеристике железничких пруга и свих пратећих постројења, система за управљање, као и конструкције возних средстава морају бити прилагођене траженим брзинама.

Железничке пруге се према пројектној брзини деле на конвенционалне пруге и пруге за возове великих брзина. У складу са техничким условима интероперабилности за конвенционалне пруге из 2011. године [27], највећа пројектна брзина, на основу које се могу одредити гранични елементи ситуационог плана и профила ових пруга износи 200 km/h. С друге стране, технички и други услови за пројектовање и грађење железничких пруга и постројења, уређаја и објеката на магистралним пругама у Републици Србији разматрају пројектну брзину до 220 km/h. Ова разлика у погледу највеће пројектне брзине настаје као резултат практичног става да се реконструкцијом постојеће пруге могу оспособити за брзине највише до 200 ± 20 km/h.

Треба напоменути да је раније [96] брзина 160 km/h сматрана граничном брзином конвенционалног система пруга у односу на пруге за велике брзине.

Избор пројектне брзине је у функционалној зависности са категоризацијом железничких пруга, према саобраћајном значају у унутрашњем и међународном саобраћају [81, 88] (магистралне, регионалне или локалне) и класификацијом на основу њене носивости, односно дозвољеног осовинског оптерећења и дозвољеног оптерећења по дужном метру [95] (класа А, В, С, D или Е), а утврђује

се према намени и значају у оквиру унутрашње и међународне железничке мреже и према обиму саобраћаја и носивости.

Реализација савременог железничког саобраћајног система са одређеним квалитетом превозних услуга и одговарајућом меродавном брзином условљава и одговарајуће техничке и експлоатационе параметре целокупне железничке инфраструктуре. Ово значи да се и основни, а то су: саобраћајни, технички и експлоатациони параметри железничких пруга морају ускладити са траженим захтевима, односно морају испунити све прописане програмске услове у погледу: брзине возње, врсте и обима саобраћаја, осовинског оптерећења, конструктивних елемената, граничних елемената трасе, нивоа техничке опремљености, пропусне и превозне моћи, степена безбедности и сигурности у одвијању саобраћаја као и друге услове. Ови програмски услови се усвајају у оквиру дугорочне концепције развоја железничког саобраћаја и целокупне железничке мреже.

Из овог следи да се за планирање сваке нове железничке пруге или за планирање реконструкције или модернизације постојећих пруга најпре мора дефинисати њихова улога и саобраћајни значај у оквиру железничке мреже, затим услови које оне морају да испуне. На основу ових услова одређују се и усвајају основни параметри (саобраћајни, технички и експлоатациони) према којима се дате пруге планирају и касније пројектују.

1. Основни саобраћајни параметри обухватају:

- токове возова на гравитационом подручју железничке пруге,
- способност железничке пруге у погледу носивости,
- способност железничке пруге у погледу брзина.

2. Основни технички параметри обухватају:

- природно-топографске карактеристике гравитационог подручја железничке пруге,
- попречни профил железничке пруге,
- геометријске карактеристике плана и уздужног профила железничке пруге.

3. Основни експлоатациони параметри обухватају:

- систем вуче и организацију саобраћаја,
- техничку моћ железничке пруге.

4.1 ОСНОВНИ САОБРАЋАЈНИ ПАРАМЕТРИ ЖЕЛЕЗНИЧКИХ ПРУГА

Токови возова на гравитационом подручју железничке пруге је параметар који показује саобраћајне потребе датог подручја, тренутне или предвиђене. Ови токови се добијају на основу анализе привредног потенцијала (постојећег и перспективног) подручја којег опслужује пруга и тада се према саобраћајним потребама, односно токовима возова дефинише:

- обим и структура путничког саобраћаја, који се исказује преко укупног броја превезених путника или бројем путничких возова који ће саобраћати на датој прузи,
- обим и структура теретног (робног) саобраћаја, који се исказује у бруто-тонама превезене робе или бројем теретних возова који ће саобраћати на датој прузи.

Ако се остварени обим путничког и теретног саобраћаја изрази преко фиктивног оптерећења T_f (*brt/dan*), које се може налазити у следећим границама $5000 \text{ brt/dan} \leq T_f < 130000 \text{ brt/dan}$, тада ово оптерећење постаје меродавни параметар за категоризацију дате пруге [81, 96]. Начин рангирања-разврставања је приказан у табели 4.1 и на слици 4.1.

Способност пруге у погледу њене носивости је параметар који показује колико оптерећење од возних средстава може дата пруга да прими. Носивост пруге је у функционалној зависности од типа и техничког стања конструкције доњег и горњег строја и исказује се преко:

- дозвољеног оптерећења возних средстава по осовини са следећим граничним вредностима: $160 - 250 \text{ kN}$,
- дозвољеног осовинског оптерећења возних средстава по дужном метру са следећим граничним вредностима: $50 - 88 \text{ kN}$.

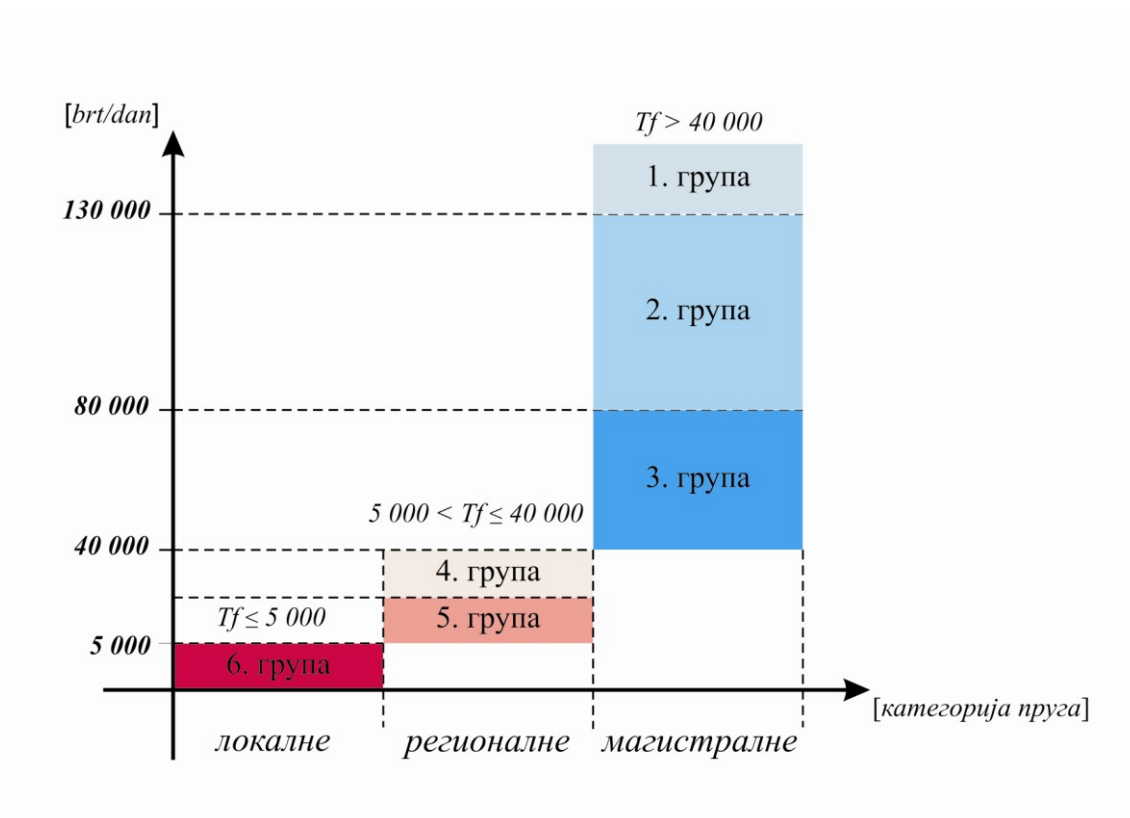
Дозвољено оптерећење по осовини и по дужном метру је меродавни параметар за класификацију (класа А, В, С, D и Е, односно 1, 2, 3, 4 и 5) дате пруге [95], што је приказано у табели 4.2.

За конвенционалне пруге које су укључене у мрежу европских коридора [21] обавезна је класификација пруга према [31], што је приказано у табели 4.3.

Табела 4.4 даје преглед захтеваних техничких услова које пруге морају задовољавати у циљу остваривања интероперабилности за подсистем инфраструктуре.

Табела 4.1 Веза категоризације пруга и фиктивног оптерећења

магистралне пруге	
група 1	$T_f > 130000 \text{ brt/dan}$
група 2	$80000 \text{ brt/dan} < T_f \leq 130000 \text{ brt/dan}$
група 3	$40000 \text{ brt/dan} < T_f \leq 80000 \text{ brt/dan}$
регионалне пруге	
група 4	$20000 \text{ brt/dan} < T_f \leq 40000 \text{ brt/dan}$
група 5	$5000 \text{ brt/dan} < T_f \leq 20000 \text{ brt/dan}$
локалне пруге	
група 6	$T_f \leq 5000 \text{ brt/dan}$



Слика 4.1 Веза категоризације пруга и фиктивног оптерећења

Табела 4.2 Веза класификације пруга и дозвољеног оптерећења

Маса по дужном метру p [kN/m]		Маса по осовини P [kN/осовини]				
		Класа А	Класа В	Класа С	Класа D	Класа Е
		160	180	200	225	250
1	50	A	B1			
2	64		B2	C2	D2	
3	72			C3	D3	
4	80			C4	D4	E4
5	88					E5

Табела 4.3 Категоризација пруга према TSI

КАТЕГОРИЈА ПРУГЕ		ВРСТА САОБРАЋАЈА		
		Путнички (P)	Теретни (F)	Мешовити (M)
ТИП ПРУГЕ	Нове пруге основне ТЕН мреже	IV-P	IV-F	IV-M
	Реконструисане пруге основне ТЕН мреже	V-P	V-F	V-M
	Нове остале пруге ТЕН мреже	VI-P	VI-F	VI-M
	Реконструисане остале пруге ТЕН мреже	VII-P	VII-F	VII-M

Табела 4.4 Технички услови према TSI категоризацији

		Слободни профил	Осовинско оптерећење [t]	Брзина [km/h]	Дозвољена дужина воза [m]
КАТЕГОРИЈА ПРУГЕ	IV-P	GC	22.5	200	400
	IV-F	GC	25	140	750
	IV-M	GC	25	200	750
	V-P	GB	22.5	160	300
	V-F	GB	22.5	100	600
	V-M	GB	22.5	160	600
	VI-P	GB	22.5	140	300
	VI-F	GC	25	100	500
	VI-M	GC	25	140	500
	VII-P	GA	20	120	250
	VII-F	GA	20	100	500
	VII-M	GA	20	120	500

4.2 ОСНОВНИ ТЕХНИЧКИ ПАРАМЕТРИ ЖЕЛЕЗНИЧКИХ ПРУГА

Природно-топографске карактеристике гравитационог подручја железничке пруге је параметар који дефинише теренске, геолошке, морфолошке, хидрографске, хидролошке, климатске, топографске, урбанистичке и еколошке карактеристике и услове на датом подручју. Из ових карактеристика и услова произилазе техничке особине и карактер дате пруге у експлоатацији саобраћаја, односно да ли је пруга: **равничарска, брежуљкаста, брдска или планинска.**

Попречни профил железничке пруге је параметар који дефинише потребне техничко-технолошке услове за одвијање саобраћаја и то без ограничења кретања појединих категорија возила или возних јединица. Утврђивање и обликовање попречног профила подразумева избор и димензионисање следећих елемената:

- слободан и товарни профил пруге,
- број колосека (једноколосечна или двоколосечна пруга),
- размак колосека на отвореној прузи и у станицама,
- конструкција горњег строја: тип шине (врста профила и квалитет материјала), систем причвршћења (еластични или крути), врста и димензије прагова (бетонски или дрвени), тип колосечне подлоге (застор од туцаника, бетонска или асфалтна плоча на цементној стабилизацији), типови скретница и укрштаја и дилатационе справе,
- конструкција доњег строја: ширина и конструкција слојева планума на отвореној прузи и у станицама, димензије и квалитет слоја за ојачање и заштиту планума, нагиб и уређење косина, геометријско обликовање контакта косине са тереном, положај и врсту објеката у трупку пруге, мост, тунел, елементи за заштиту животне средине,
- систем одводњавања (отворени и затворени системи),
- службене стазе,
- уређаји контактне мреже,
- тип и структура телекомуникационих и сигнално-сигурносних уређаја,
- објекти за заштиту животне средине.

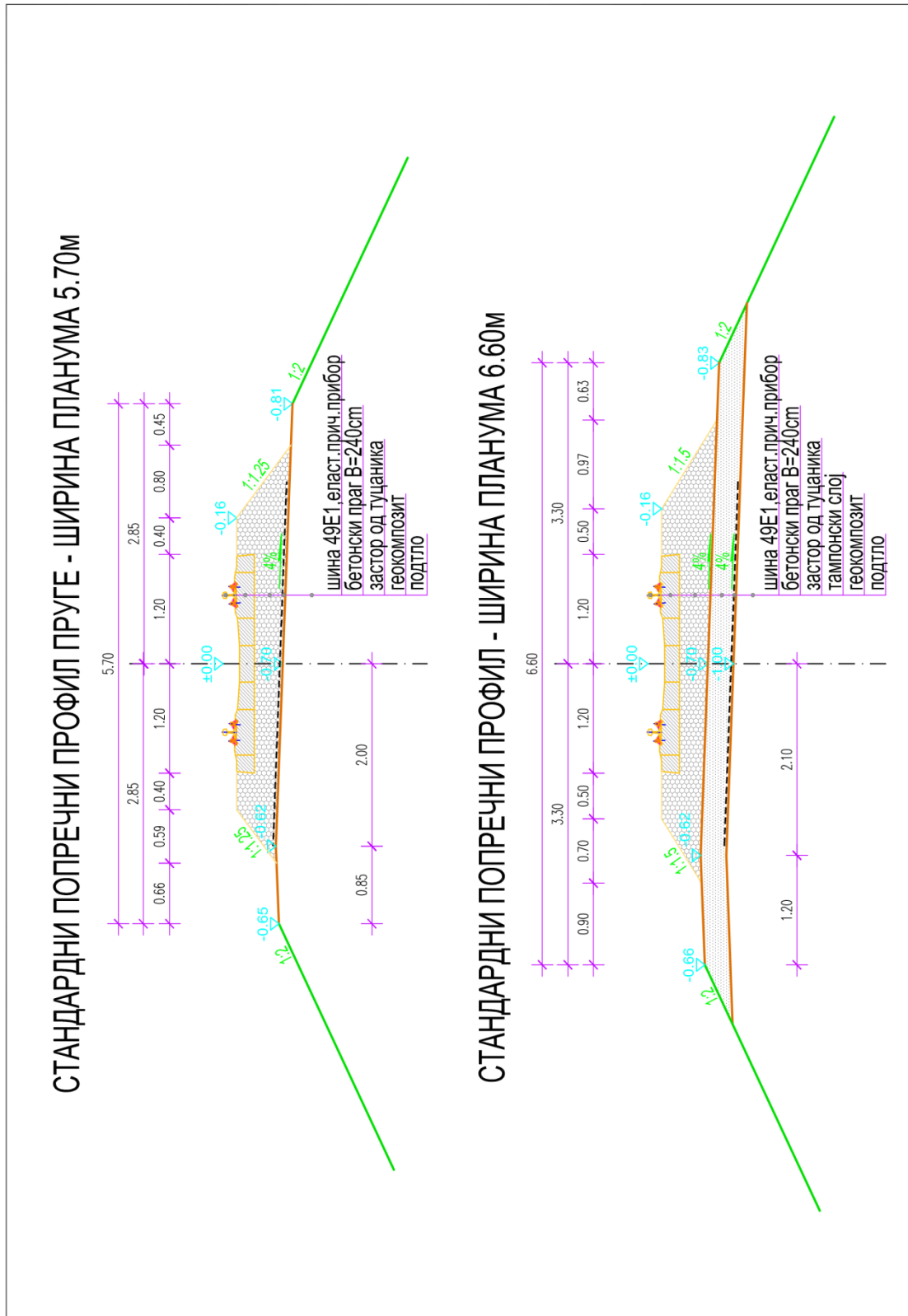
Елементи два стандардна попречна профила једноколосечне железничке пруге на насипу, са колосеком у застору од туцаника, за ширину планума 5,70 m и ширину планума 6,60 m приказани су на слици 4.2. На овај начин приказано је да избор типа, облика и димензија сваког елемента утиче на крајњи облик попречног профила. Избор елемената и обликовање стандардних профила железничке пруге врши се у складу са инжењерским принципима и одредбама прописа које одговарају категорији железничке пруге и специфичностима окружења (насип, усек, мост, тунел, урбано окружење, службено место и сл.).

Геометријске карактеристике ситуационог плана и уздужног профила железничке пруге је параметар који је релевантан за техничко-експлоатациону способност те пруге и обухвата дефинисање и избор следећих елемената:

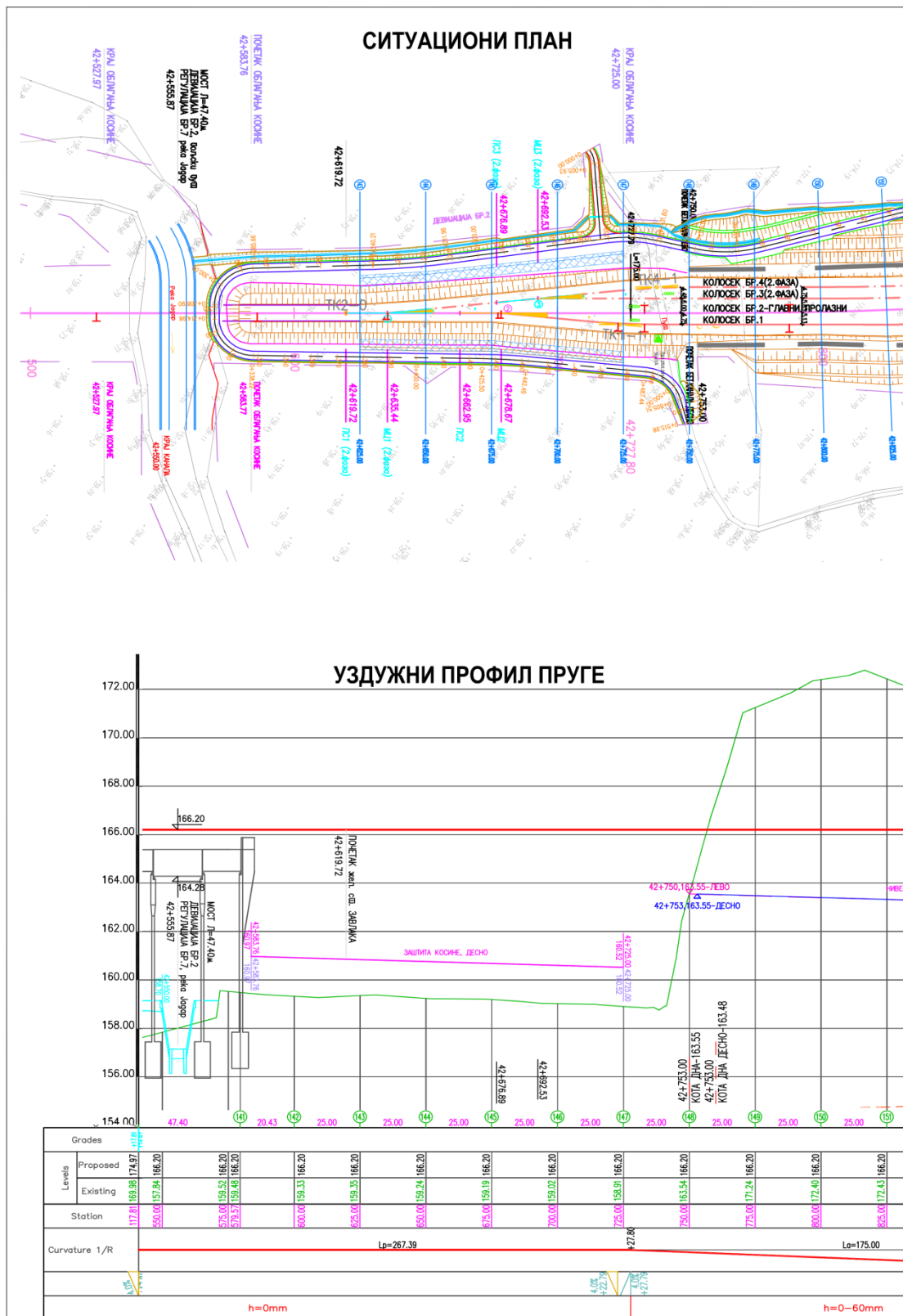
- минимални полупречник хоризонталне кривине R_{min} ,
- облик и дужина прелазних кривина и рампи за надвишење,
- дужине међуправаца и чистог кружног лука,
- минимални полупречник вертикалне кривине ρ_{min} ,
- максимални – меродавни нагиб нивелете i_{mer} .

Карактеристични елементи ситуационог плана и уздужног профила железничке пруге приказани су на слици 4.3.

Сви овде наведени технички параметри железничке пруге могу бити ограничавајући фактори капацитета и нивоа услуге железничког саобраћаја и зато се усклађују са важећом законском регулативом [27, 36, 37, 38, 87, 88, 89].



Слика 4.2 Елементи стандардног попречног профила железничке пруге на насипу



Слика 4.3 Елементи ситуационог плана и уздужног профила железничке пруге

4.3 ОСНОВНИ ЕКСПЛОАТАЦИОНИ ПАРАМЕТРИ ЖЕЛЕЗНИЧКИХ ПРУГА

Систем вуче (дизел или електрична) и **организација саобраћаја** (класичан систем путем отправника, систем возног диспечера или режим АПБ-а и телекоманде, односно напредни системи ETCS (*European Train Control System*) је параметар који зависи од нивоа техничке опремљености пруге (за ETCS систем потребна је и посебна опрема у возилима и поставницама), односно од примењених сигнално-сигурносних, телекомуникационих и других уређаја. Избор ових уређаја обухвата дефинисање следећих елемената:

- број службених места и њихов размештај, односно минимално и максимално међустанично растојање,
- минимална корисна дужина колосека у службеном месту,
- дужина и висина перона,
- дужина зауставног пута,
- минимална дужина просторног одсека,
- начин укрштања пруге и других саобраћајница.

Техничка моћ железничке пруге је параметар који се исказује компонентама пропусне моћи пруге преко броја возова на дан и превозне моћи пруге преко количине бруто тона на дан, а у функционалној зависности је од: броја колосека, обима и структуре путничког и теретног саобраћаја, разлике у брзинама возова, удаљености службених места за претицање и укрштавање, као и од примењених сигнално-сигурносних уређаја и организације саобраћаја. За утврђивање техничке моћи железничке пруге неопходно је дефинисати следеће елементе:

- максималне и минималне вредности времена трајања вожње возова по смеровима на просторним одсецима,
- најнеповољнији просторни одсек пруге (где је збирно време вожње возова у оба смера највеће),
- ограничавајући просторни одсек на прузи (где је период графикана највећи),
- минималну пропусну и превозну моћ.

5 ТРАСА ЖЕЛЕЗНИЧКЕ ПРУГЕ И ЊЕНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ

Потребе и услови за грађење железничке пруге нигде нису исти и значајно се разликују према месту и времену. Међутим, свака железничка пруга по својим конструктивним елементима, карактеристикама трасе, опреми и начину експлоатације, треба да буде што боље и ближе прилагођена, првенствено потребама саобраћаја, а затим и теренским и просторним условима подручја кроз које ће пролазити и центрима које ће међусобно повезивати. Тако ће она бити прилагођена економским приликама, условима подручја, потребама корисника и финансијским условима датог времена.

Начин повезивања одабраних економски или стратешки важних подручја и саобраћајних центара, упућује на положај и решење планиране железничке пруге. Траса железничке пруге треба да буде пројектована тако да оствари што краћу могућу саобраћајну везу између датих центара и подручја (поготово ако преовлађују транзитни захтеви). Међутим, многе природне препреке, које се морају савладати у току повезивања, као и однос према другим објектима инфраструктуре и уклапање у планове намене површина утичу да траса одступа и удаљава се од могућег најкраћег пута. Могућности за савлађивање ових препрека, као и само повезивање дефинисаних центара, су бројне и велике, тако да свако могуће решење постаје и формира једно ново варијантно решење трасе железничке пруге.

Поступак генерисања и обликовања варијантних решења трасе железничке пруге је сложени итеративни поступак који се састоји од избора и димензионисања пројектних елемената трасе, њиховог узајамног усклађивања (сходно прописаним саобраћајно-техничким условима) до формирања јединственог просторног објекта као целине. У току формирања и просторног обликовања трасе, морају се осим саобраћајно-техничких услова задовољити и следећи услови:

- да је траса економична у погледу инвестиција за грађење и трошкова експлоатације,
- да је по карактеру континуална,

- да са својим током прелази преко терена повољног морфолошког, геолошког и хидролошког састава,
- да минимално нарушава постојеће и планиране просторне односе,
- да остварује минималне еколошке последице на животну средину,
- да омогућује ефикасно и једноставно повезивање са осталим видовима саобраћаја у циљу успостављања интермодалности,
- да омогућује етапни развој (етапно повећање брзине, капацитета, система осигурања и сл.).

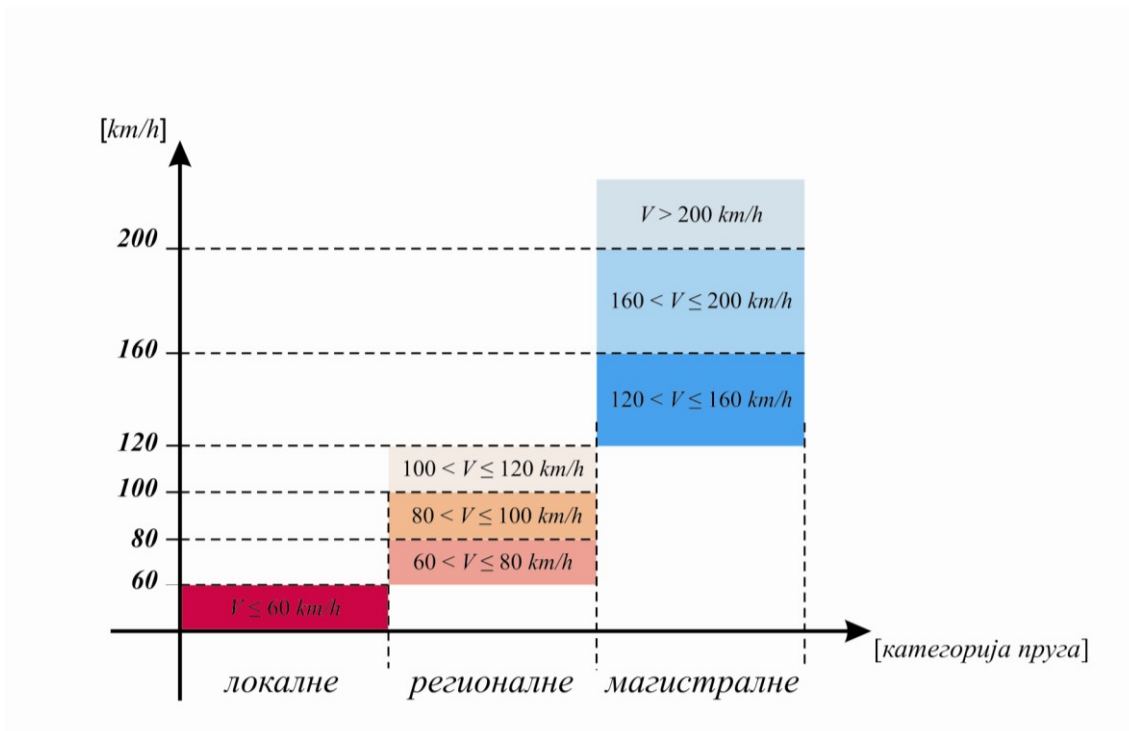
Обликовање варијанти трасе је процес складног компоновања, односно избора и комбинације пројектних елемената (правци, кружне кривине, прелазне кривине са рампама за надвишење, нагиби нивелете и вертикалне кривине) уз одређене геометријске и возно-динамичке законитости, са циљем да се оствари складна просторна слика трасе, али и стабилност колосека, безбедност и удобност вожње. За достизање овог циља није довољно да сваки пројектни елемент при димензионисању буде у границама (min, max) дозвољених вредности, које су у функцији пројектне брзине, односно возно-динамичког параметра, већ се показује неопходним да се успостави шира међузависност пројектних елемената, како унутар једне пројекције (пројектна линија ситуационог плана и пројектна линија уздужног профила) тако и континуалне целине у просторном смислу. Наиме, како просторну представу формирају удружене пројекције: ситуациони и уздужни план заједно са попречним профилем, тада се континуитет трасе добија тако да су усаглашени и међусобни односи свих пројекција, односно тако да се врши узајамна кординација свих пројектних елемената трасе.

При томе треба нагласити да опште важећи модел доброг варијантног решења не постоји и да свака железничка пруга за себе представља посебно и јединствено решење (због непоновљивих услова природне околине) без могућности умножавања.

5.1 ПРОЈЕКТНИ ЕЛЕМЕНТИ ТРАСЕ ЖЕЛЕЗНИЧКЕ ПРУГЕ

Како се једна те иста траса железничке пруге може обликовати различитим пројектним елементима, почев од оштрих кривина и успона, па све до комфорних елемената који пружају услове за сигурну и безбедну вожњу, неопходно је успоставити објективне критеријуме који би указивали на прихватљиве вредности њених пројектних елемената. Пошто су сви ови елементи у функционалној зависности од брзине вожње, тада се за меродавну величину, за одређивање минималних-граничних вредности пројектних елемената, усваја **рачунска брзина**. На тај начин рачунска брзина има значење највеће безбедне брзине у најоштријим условима трасе. Граничне вредности пројектних елемената указују на крајње могућности при којима се може одржати планирана категоризација железничке пруге, што је и приказано на слици 5.1. То значи да се мање вредности од дефинисаних граничних вредности не могу примењивати, али то не искључује примену комфорнијих пројектних елемената, ако су они прикладнији са техничке и економске стране. Вредности параметара су у распону од граничне дозвољене вредности (у складу са Законом о безбедности у железничком саобраћају и минималних услова удобности вожње), преко нормалних вредности (вредности које се препоручују за примену) до границе изводљивости (вредност условљена тачношћу извођења и могућностима одржавања).

На основу изложених ставова, а у складу са важећом законском и техничком регулативом [36, 37, 38, 87, 88, 89] могу се дефинисати области - поља избора основних пројектних елемената ситуационог плана и уздужног профила трасе железничке пруге. Ипак, према [27] дозвољена брзина за реконструисане пруге за мешовити саобраћај на Паневропској мрежи је од 120 km/h до 200 km/h. С обзиром да овој мрежи припада Коридор 10, технички услови за пројектовање магистралних пруга у Републици Србији такође дефинишу минималну пројектну брзину 120 km/h, док за горњу границу узимају 220 km/h као највећу пројектну брзину која омогућује реконструкцију постојећих пруга.



Слика 5.1 Веза категоризације пруга и брзине

Правцац је један од основних пројектних елемената ситуационог плана трасе железничке пруге и представља најкраћи пут између задатих тачака. Он је најповољнији возно-динамички елемент који се примењује за повезивање кривинских облика трасе било да су то кружне или прелазне кривине. Дужина правца од краја претходне до почетка наредне прелазне кривине дефинише се као ***m*- међуправа**. Динамички критеријум, односно услов удобности је одлучујући за одређивање ове дужине, а добија се на основу времена смиривања трансвензалних осцилација возила које настају због промене режима вожње. Ако је периода једног циклуса трансвензалних осцилација возила $1,5 s$, а пригушење се изврши за време једне периоде, тада је дужина пута $L = 1,5 V$, па ће минимална дужина међуправе бити (5.1):

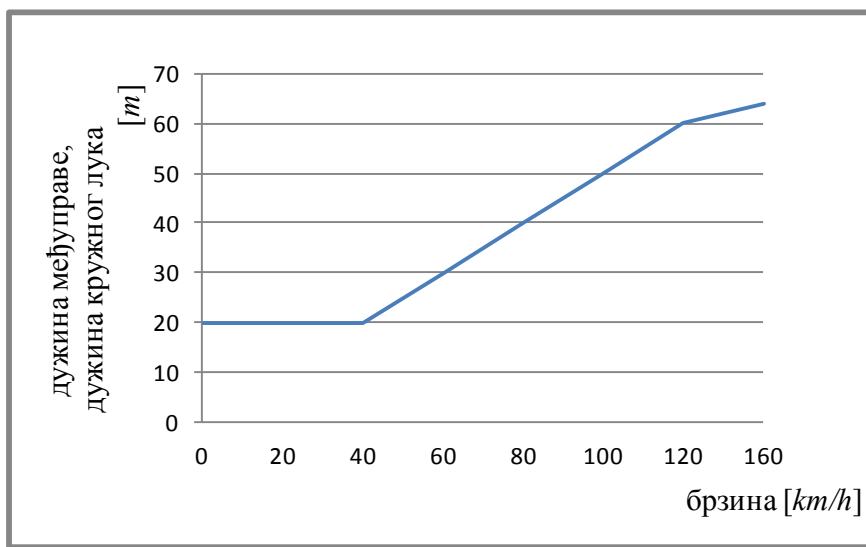
$$m_{min} = 1,5 \frac{V_r}{3,6} = 0,4V_r [m] \quad (5.1)$$

где је:

- $m_{min} [m]$ – минимална дужина међуправе,
- $V_r [km/h]$ – одговарајућа рачунска брзина.

Наши прописи [36, 38, 88] дефинишу зависност међуправе и брзине у облику (5.2), док се за пројектовање магистралних пруга [87] потребна дужина међуправе прорачунава према изразу (5.1). Ова зависност је приказана на слици 5.2.

$$m_{min} = 0,5V_r \geq 20 [m] \quad (5.2)$$



Слика 5.2 Дужина међуправе и кружног лука хоризонталне кривине у функцији брзине

Кружна кривина је други основни пројектни елемент ситуационог плана трасе железничке пруге, дефинисана преко основних параметара, полупречником R и преломним углом α , са задатком да сваку промену правца заобли и оствари повијање трасе ради савладавања теренских и других препрека. Кружна кривина, на основу возно-динамичког критеријума, треба да има што већу дужину кружног лука, односно из услова стабилности и удобности вожње, да буде са што мањом закривљеношћу, а то значи са што већим полупречником. Како мора постојати нека најмања дужина кружног лука d_{min} која ће омогућити смиривање осцилација возила, тада се из истог динамичког критеријума за добијање минималне дужине међуправе m_{min} , добија и минимална дужина кружног лука (5.3), а у случају пројектовања магистралних пруга (5.4):

$$d_{min} = 0,5V_r \geq 20 [m] \quad (5.3)$$

$$d_{min} = 0,4V_r [m] \quad (5.4)$$

где је:

d_{min} [m] – минимална дужина кружног лука,

V_r [km/h] – одговарајућа рачунска брзина.

Ова зависност је иста као и (5.2) тако да њен приказ одговара оном на слици 5.2. Тако се имплицитно успоставља веза (5.5) између примењеног полупречника R , преломног угла α и минималне дужине кружног лука кривине d_{min} (слика 5.3):

$$\alpha \geq \frac{180}{R\pi} (L + d_{min}) \geq \frac{57,3}{R} (L + 0,5V_r) [^\circ] \quad (5.5)$$

$$R \geq \frac{57,3}{\alpha} (L + 0,5V_r) [m]$$

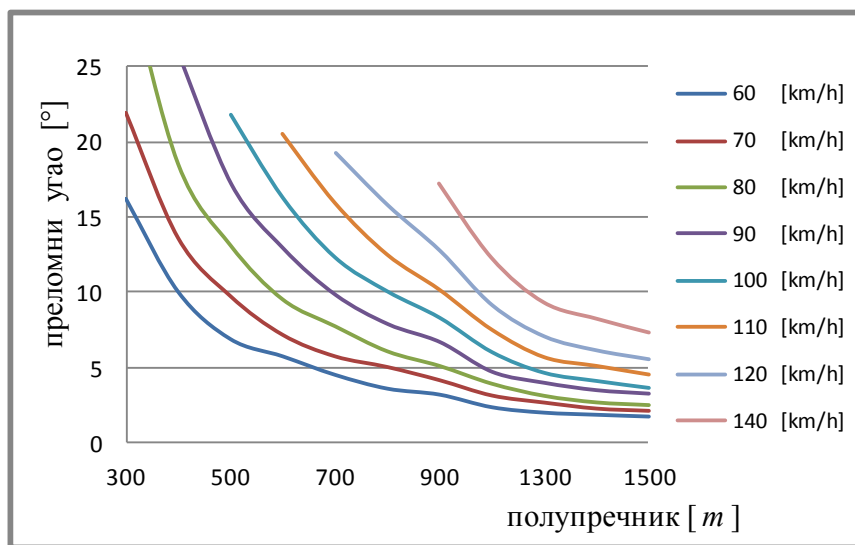
где је:

α [°] – преломни угао кривине,

R [m] – полупречник кривине,

V_r [km/h] – рачунска брзина,

L [m] – дужина прелазне кривине.



Слика 5.3 Веза између полупречника хоризонталне кривине R , преломног угла α и рачунске брзине V_r

Приликом обликовања пројектне линије ситуационог плана користе се кружне кривине са широком скалом вредности полупречника R , почев од R_{min} , који се добија из услова стабилности и удобности вожње до границе изводљивости

$R \leq 30.000 \text{ m}$. Услов стабилне вожње искључује могућност превртања или исклизнућа возила, што претпоставља максимално надвишење спољне шине $h_{max}=150-180 \text{ mm}$ које зависи од железничке управе. У кривинама са радијусима мањим од 300 m на пругама за мешовити железнички саобраћај важи додатно ограничење. За нове и реконструисане пруге надвишење мора, а код постојећих пруга треба, да буде мање од надвишења које износи (5.6):

$$h \leq \frac{2}{3}(R - 50) \text{ [mm]} \quad (5.6)$$

где је:

$h \text{ [mm]}$ – надвишење спољне шине,

$R \text{ [m]}$ – полупречник кривине.

Услов удобности претпоставља да је бочно хоризонтално убрзање p у прихватљивим границама удобне вожње (према нашим прописима $0,65 \leq p \leq 0,85 - 1,0 \text{ m/s}^2$). Тиме се добија минимална вредност полупречника R_{min} кружне кривине за усвојену рачунску брзину V_r преко израза (5.7):

$$R_{min} \geq a_i V_r^2, \quad (i = 1, 2, 3) \text{ [m]} \quad (5.7)$$

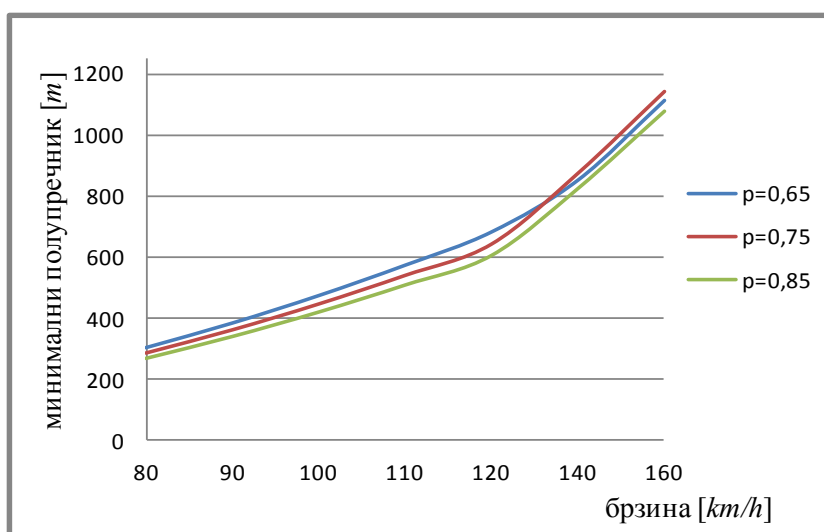
где је:

$R_{min} \text{ [m]}$ – минимална вредност полупречника кривине,

$V_r \text{ [km/h]}$ – рачунска брзина,

a_i – параметар у функцији бочног убрзања и има следеће вредности $a_1 = 0,0473$ ($V \leq 120 \text{ km/h}$) и $a_1 = 0,0434$ ($V > 120 \text{ km/h}$) за $p = 0,65 \text{ m/s}^2$, $a_2 = 0,0445$ за $p = 0,75 \text{ m/s}^2$ и $a_3 = 0,0422$ за $p = 0,85 \text{ m/s}^2$.

Ова зависност је приказана на слици 5.4.



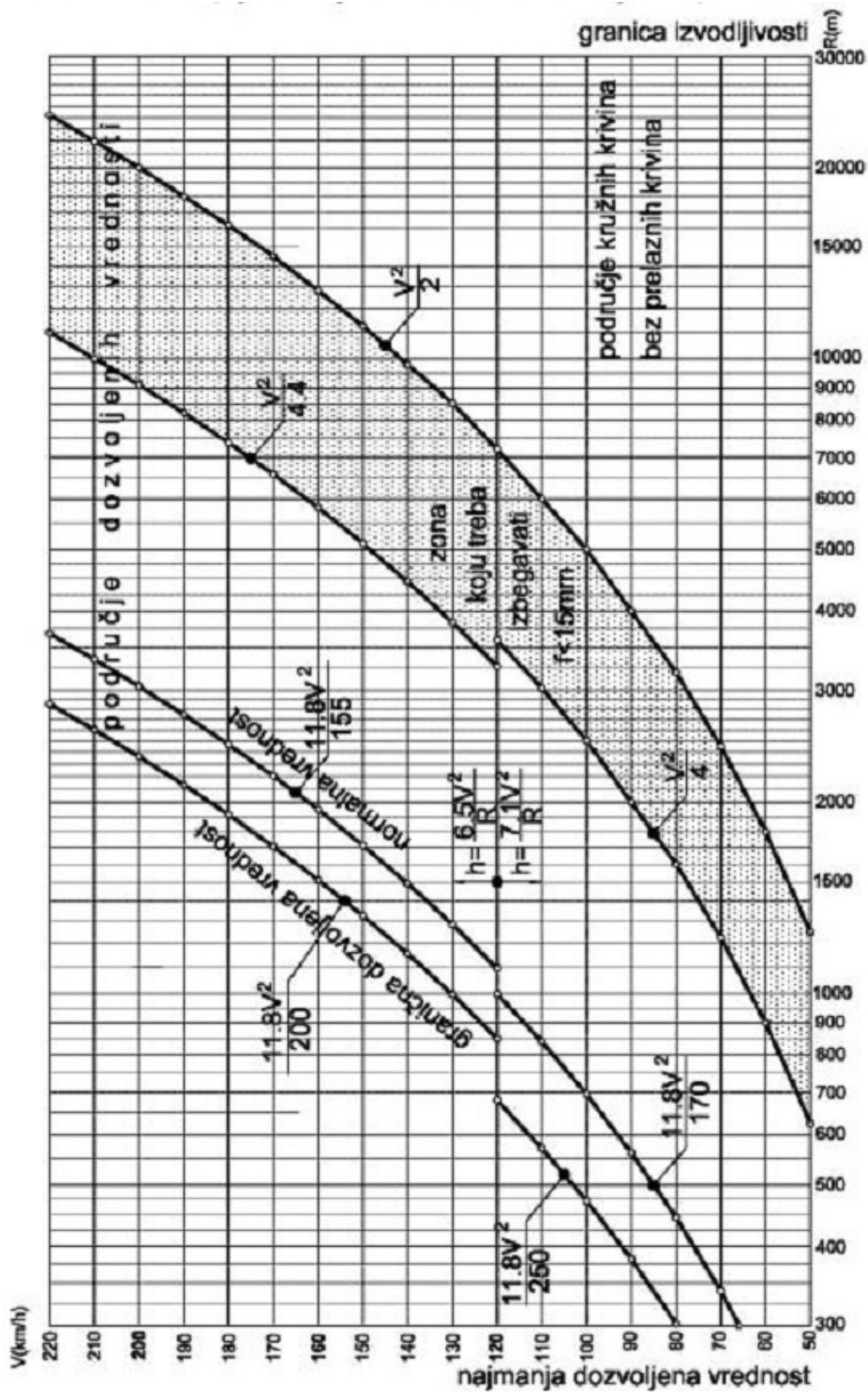
Слика 5.4 Минимална вредност полупречника R_{min} кружне кривине за усвојену рачунску брзину V_r и бочно убрзање p

Наши прописи [36, 38, 87, 88] усвајају вредност нормалног бочног убрзања од $p = 0,65 \text{ m/s}^2$, као и поделу брзине на $V \leq 120 \text{ km/h}$ и $V > 120 \text{ km/h}$, односно тада се добијају вредности за R_{min} , које су приказане у табели 5.1.

Табела 5.1 Веза између граничне дозвољене вредности полупречника R_{min} кружне кривине и усвојене рачунске брзине V_r у кривинама са прелазном кривином

V_r (km/h)	60	80	100	120	140	160
R_{min} (m)	300	300	500	700	1000	1200

У општем случају за обликовање трасе у ситуационом плану треба тежити за применом полупречника који су већи од R_{min} , што наравно зависи од конкретних теренских услова и других ограничења у датим околностима. На основу изложених зависности може се добити област за избор полупречника кружне кривине у функцији одговарајуће рачунске брзине. Ова зависност је приказана на слици 5.5.

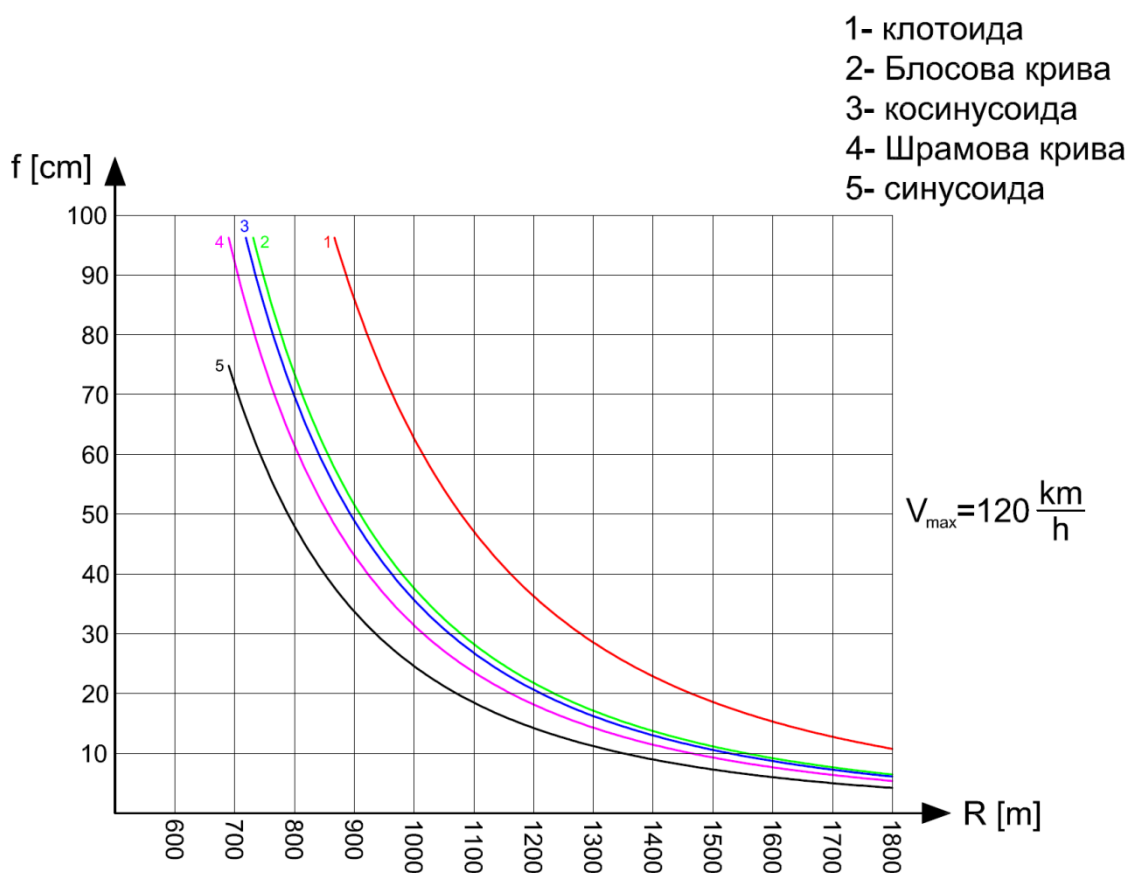


Слика 5.5 Област избора полупречника кривине R у функцији рачунске брзине ^{извор [87]}

Прелазна кривина и рампа за надвишење је пројектни елемент трасе железничке пруге који омогућава да воз са већом брзином прође кроз кривину одређеног полупречника. Савремени приступ геометријском обликовању трасе железничке пруге обједињује геометријски облик прелазне кривине у ситуационом плану и рампе за надвишење у уздужном профилу у јединствени просторни елемент трасе. Прелазна кривина са прелазном рампом чини сложен просторни геометријски облик са једновременом променом закривљености обе шине у колосеку и променом вредности надвишења спољне шине. Функција промене закривљености одговара функцији промене надвишења у области тако дефинисане просторне рампе, па праволинијској промени закривљености прелазне кривине одговара праволинијска рампа за надвишење. Да би крива произвољног геометријског облика могла да се назове прелазном кривином, она мора да задовољи одређене услове:

- у тачки која представља почетак прелазне кривине постоји заједничка тангента на прелазну кривину и елемент ситуационог плана који јој претходи (правац или кружна кривина),
- у тачки која представља крај прелазне кривине постоји заједничка тангента на прелазну и кружну кривину која следи,
- закривљеност прелазне кривине треба да буде једнака закривљености кружне кривине у тачки њиховог додира,
- закривљеност прелазне кривине на крају правца треба да буде једнака нули;
- промена закривљености дуж прелазне кривине треба да одговара промени надвишења спољне шине,
- на крају и/или почетку прелазне кривине постиже се пуно надвишење које одговара полупречнику кружне кривине за усвојену максималну вредност брзине,
- минимална дужина прелазне кривине изводи се на основу ограничене витоперности колосека на дужини рампе за надвишење (планска витоперност због издизања спољне шине увећана за вредност случајне витоперности услед пропадања геометрије колосека у области прелазне кривине током експлоатације) како би се спречило пењање венца унутрашњег точка предње осовине на главу унутрашње шине.

Према европским нормама препоручује се коришћење шест облика прелазних кривина: клотоида, кубна парабола (проста или поправљена), Блосова крива, косинусоида, Шрамова крива и Клајнова крива (синусоида). Једна од особина коју је важно уочити за инжењерску примену препоручених геометријских облика прелазних кривина је положај кружне кривине у односу на дефинисане правце тангената (f). Детаљно извођење видети у [56]. Најмања дужина растојања од темена до средине кружне кривине уочава се код Клајнове криве, а највећа код клотоиде и кубне параболе. Ова особина постаје израженија са порастом рачунске брзине (слика 5.6).



Слика 5.6 Дијаграм промене померања f у зависности од полупречника кружне кривине ^{извор [56]}

Са слике 5.6 се уочава да се Блосова, косинусоидна, Шрамова и Клајнова крива боље прилагођавају одабраним тангентним правцима у односу на клотоиду и кубну параболу, за исту вредност полупречника кружне кривине. Ова особина може бити предност у условима реконструкције или изразитих просторних ограничења при пројектовању нових пруга.

У сваком случају, одабрани облик прелазне кривине и њој одговарајуће рампе за надвишење морају бити усаглашени са условима одржавања просторне геометрије колосека током експлоатације железничке пруге.

Са аспекта једноставности извођења и одржавања колосека у застору од туцаника треба тежити примени клотоиде или кубне параболе, којима одговара прелазна рампа константног нагиба.

Остали облици прелазних кривина и њима одговарајући облици криволинијских рампи за надвишење обликовани су тако да се смање динамички утицаји на возило и вертикално убрзање које осећају путници. Међутим, непостојаност геометрије услед неуједначеног слегања колосека у застору од туцаника под саобраћајним оптерећењем доводи током експлоатације до проблема одржавања „заобљених“ рампи за надвишење и нежељеног ефекта повећања динамичких удара на почетку и крају прелазне кривине.

Трајно смањење динамичких утицаја применом Блосове, косинусоидне, Шрамове или Клајнове криве долази до изражаја у условима стабилне геометрије колосека на чврстој подлози.

Савремени приступ трасирању железничке пруге подразумева избор геометријског облика прелазне кривине и рампе за надвишење као јединственог просторног елемента трасе. Избор просторног облика рампе за надвишење треба да одговара типу конструкције горњег строја и условима одржавања геометрије колосека током експлоатације. Према правилнику [87] на магистралним пругама прелазна кривина се пројектује као поправљена кубна парабола или клотоида са праволинијским дијаграмом закривљености и праволинијском рампом за надвишење.

Из услова стабилне вожње, односно ако је надвишење спољне шине у границама $20 \text{ mm} \leq h \leq 150 \text{ mm}$ и бочног убрзања ограниченог на $p = 0,65 \text{ m/s}^2$ добија се нормална дужина прелазне кривине L као и рампе за надвишење у следећем облику (5.8):

$$L \geq 0,01 V_r h [m] \quad (5.8)$$

где је:

- $L [m]$ – дужина прелазне кривине,
- $V_r [km/h]$ – рачунска брзина,
- $h [mm]$ – надвишење спољне шине.

Ако се надвишење спољне шине одреди по формули (5.9) добија се израз за дужину прелазне кривине (5.10):

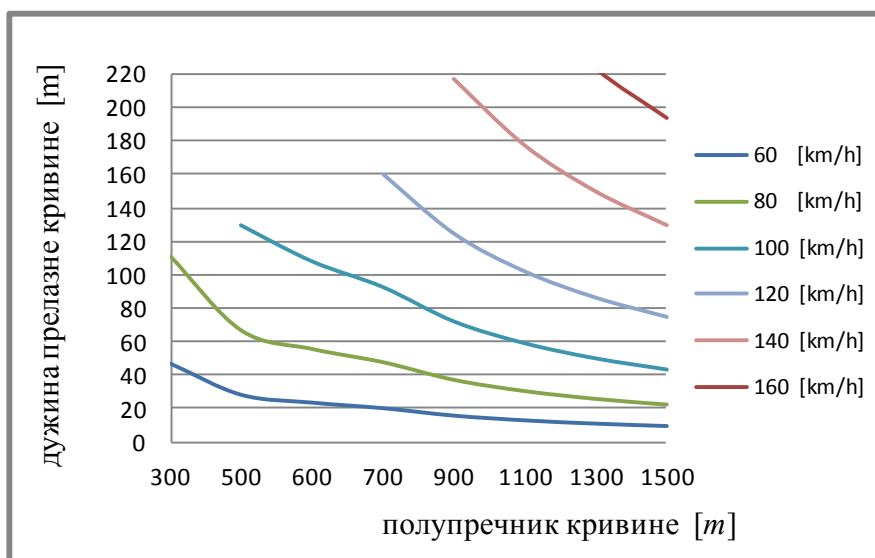
$$\begin{aligned} h &= 6,5 \frac{V_r^2}{R} [mm] \text{ за } V_r > 120 \frac{km}{h} \\ h &= 7,1 \frac{V_r^2}{R} [mm] \text{ за } V_r \leq 120 \frac{km}{h} \end{aligned} \quad (5.9)$$

$$\begin{aligned} L &= 0,065 \frac{V_r^3}{R} [m] \text{ за } V_r \leq 120 \frac{km}{h} \\ L &= 0,071 \frac{V_r^3}{R} [m] \text{ за } V_r > 120 \frac{km}{h} \end{aligned} \quad (5.10)$$

где је:

- $h [mm]$ – надвишење спољне шине,
- $V_r [km/h]$ – рачунска брзина,
- $R [m]$ – полупречник кривине.

Ова зависност је приказана и на слици 5.7.



Слика 5.7 Минимална дужина прелазне кривине у функцији полупречника хоризонталне кривине R и рачунске брзине V_r

Нагиб нивелете је основни пројектни елемент уздужног профила трасе железничке пруге. Зависи од категорије пруге. Према нашим прописима [36, 38, 88] највећи допуштени нагиб i_{max} на траси железничке пруге износи 25 %. За магистралне пруге овај параметар се прописује међународним споразумом. У складу са [87] максимални нагиб магистралних пруга за мешовити саобраћај у Србији износи 12,5 %. Минимални нагиби у тунелу и максимални нагиби станичних колосека прописани су, такође, у документу [87].

Нагиб на конкретној деоници одређује се у складу са конфигурацијом терена, односно теренским висинским разликама и међусобним растојањима одабраних тачака које повезује траса. У току повезивања одабраних тачака и савлађивања свих висинских разлика, код вођења трасе, долази до комбинације различитих нагиба i (успона, падова и хоризонтала) и тако се уједно и формира - нивелета железничке пруге. Приликом формирања нивелете постоји ограничење у броју промене нагиба, односно прелома, јер растојање између два суседна прелома, по нашим прописима [36, 38, 88] износи $l \geq 300 \text{ m}$. Функционална веза величине нагиба нивелете i , растојања одабраних тачака и њихове висинске разлике дата је изразом (5.11):

$$i = \frac{H}{L} [\%] \quad (5.11)$$

где је:

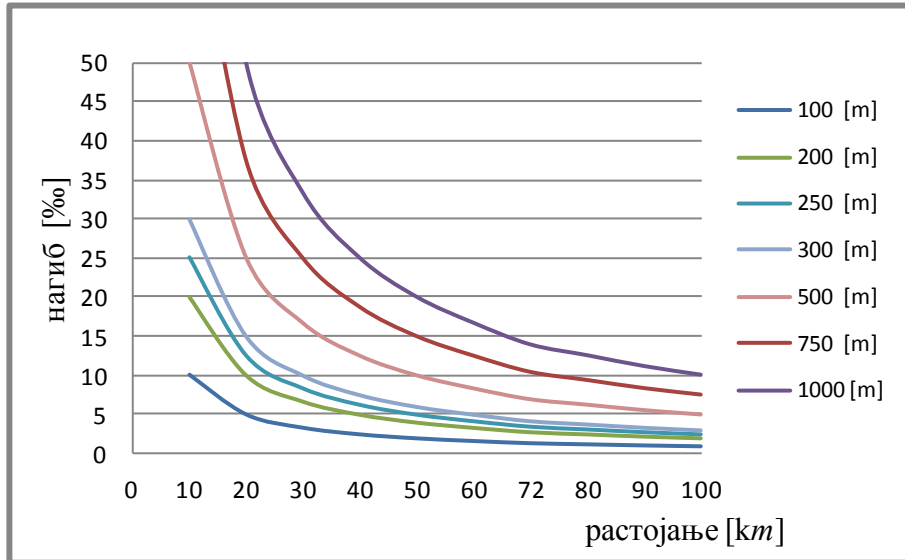
$i [\%]$ – нагиб нивелете,

$H [m]$ – висинска разлика одабраних тачака нивелете,

$L [m]$ – растојање одабраних тачака нивелете.

Ова зависност је приказана на слици 5.8 Осим тога, нагиб нивелете i мора бити у одређеним границама у складу са категоријом пруге, односно $i \leq i_{mer} \leq i_{max}$, при чему је меродавни нагиб i_{mer} у функцији масе воза Q и критичне брзине локомотиве V_{kr} . У случају када је висинска разлика H одабраних тачака које повезује траса, велика у односу на њихово међусобно растојање L , тада се траса мора вештачки развијати најмање до дужине која одговара меродавном нагибу, односно максималном нагибу. Јединствен пример овог случаја је део пруге узаног колосека (0,76 m) од Мокре горе до Шарган-Витаса, тзв. „Шарганска осмица“. На овом потезу трасе савладана је висинска разлика од 240 m на ваздушној

удаљености од 5 km . Траса пролази два пута кроз исту географску тачку правећи петљу у виду броја осам. Тако развијена траса има дужину $15,4 \text{ km}$, 20 тунела, са максималним нагибом нивелете од $i_{max}=18,5\%$.



Слика 5.8 Функционална веза величине нагиба нивелете i , растојања одабраних тачака L и њихове висинске разлике H

Вертикална кривина је пројектни елемент уздужног профила са задатком да одговарајуће промене нагиба, односно преломе заобли кружним луком полупречника ρ . Величина полупречника мора бити изабрана тако да задовољи услове удобности возње, односно да се вертикално убрзање ограничава на $p_v = 0,2-0,5 \text{ m/s}^2$ и тада се добија израз (5.12):

$$\rho_{min} = \frac{V_r^2}{13 p_v} [m] \quad (5.12)$$

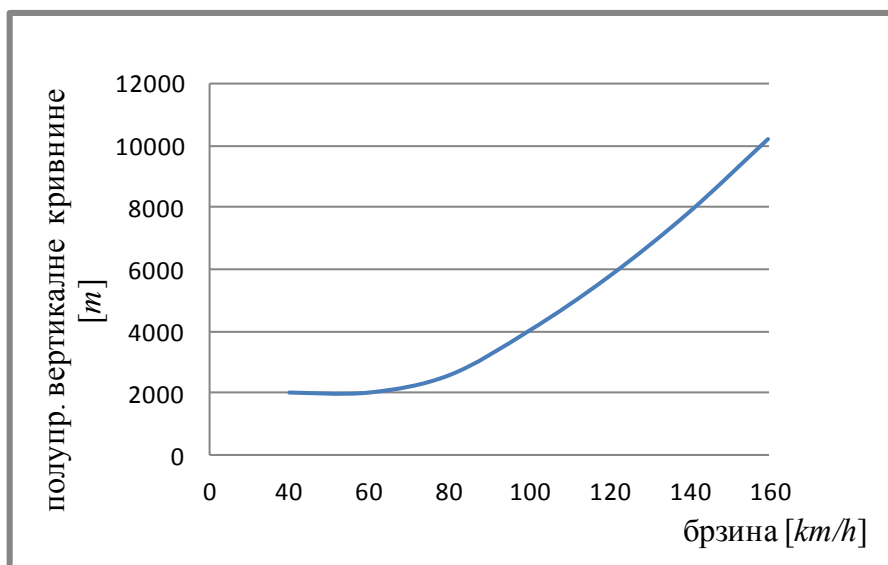
где је:

- $V_r [km/h]$ – рачунска брзина,
- $p_v [m/s^2]$ – вертикално бочно убрзање.

Наши прописи [36, 38, 88] дефинишу да се прелом нивелете заокругљује, ако је разлика нагиба $\geq 2 \text{ ‰}$, а на магистралним пругама $\geq 1 \text{ ‰}$ и то кружном кривином ρ [87] која се одређује по формули (5.13):

$$\rho = 0,4V_r^2 \geq 2000 [m] \quad (5.13)$$

Ова зависност је приказана на слици 5.9.



Слика 5.9 Веза између величине полупречника вертикалне кривине ρ и рачунске брзине V_r

5.2 УТИЦАЈ ИЗБОРА ВЕЛИЧИНЕ ПОЛУПРЕЧНИКА КРИВИНЕ

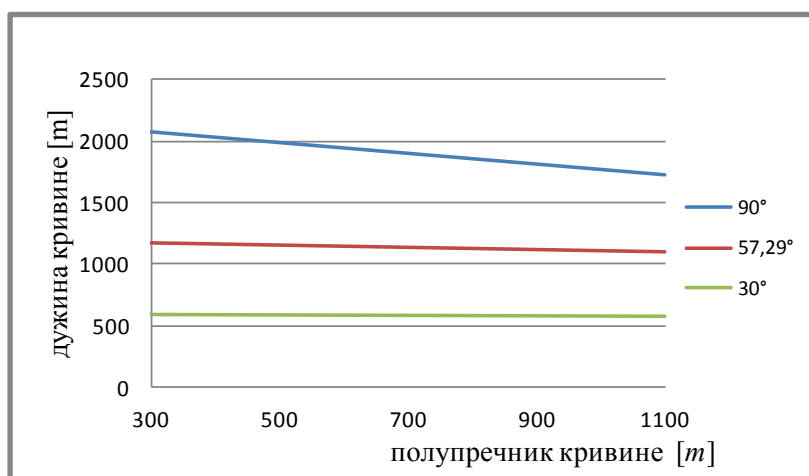
Као што је већ наглашено у претходном поглављу, брзина превоза је фактор од кључног значаја за савремене саобраћајне системе. Тако је за остваривање бржег железничког саобраћаја потребно да инфраструктура као и возна средства буду на одређеном техничком и технолошком нивоу. Међутим, ови услови могу бити недовољни, уколико железничка пруга са својим основним техничким елементима трасе не може да омогући бржи превоз. Проблеми примене већих нагиба трасе могу се ублажити употребом локомотива адекватне снаге, као и одговарајућим системом кочења. Међутим, примена хоризонталних кривина одређених полупречника, због њиховог директног возно-динамичког утицаја на брзину, често може да постане **лимитирајући** фактор и да доведе до ограничења брзине возова. Зато је правилан избор величине полупречника хоризонталних кривина од значаја за обликовање саме трасе железничке пруге у ситуационом плану, јер они директно утичу на величину инвестиција за градњу железничке пруге као и на услове саобраћаја, односно трошкове експлоатације и одржавања.

Примена хоризонталних кривина има за циљ што боље коришћење теренских могућности, а то значи прилагођавање трасе рељефу терена, обилажење

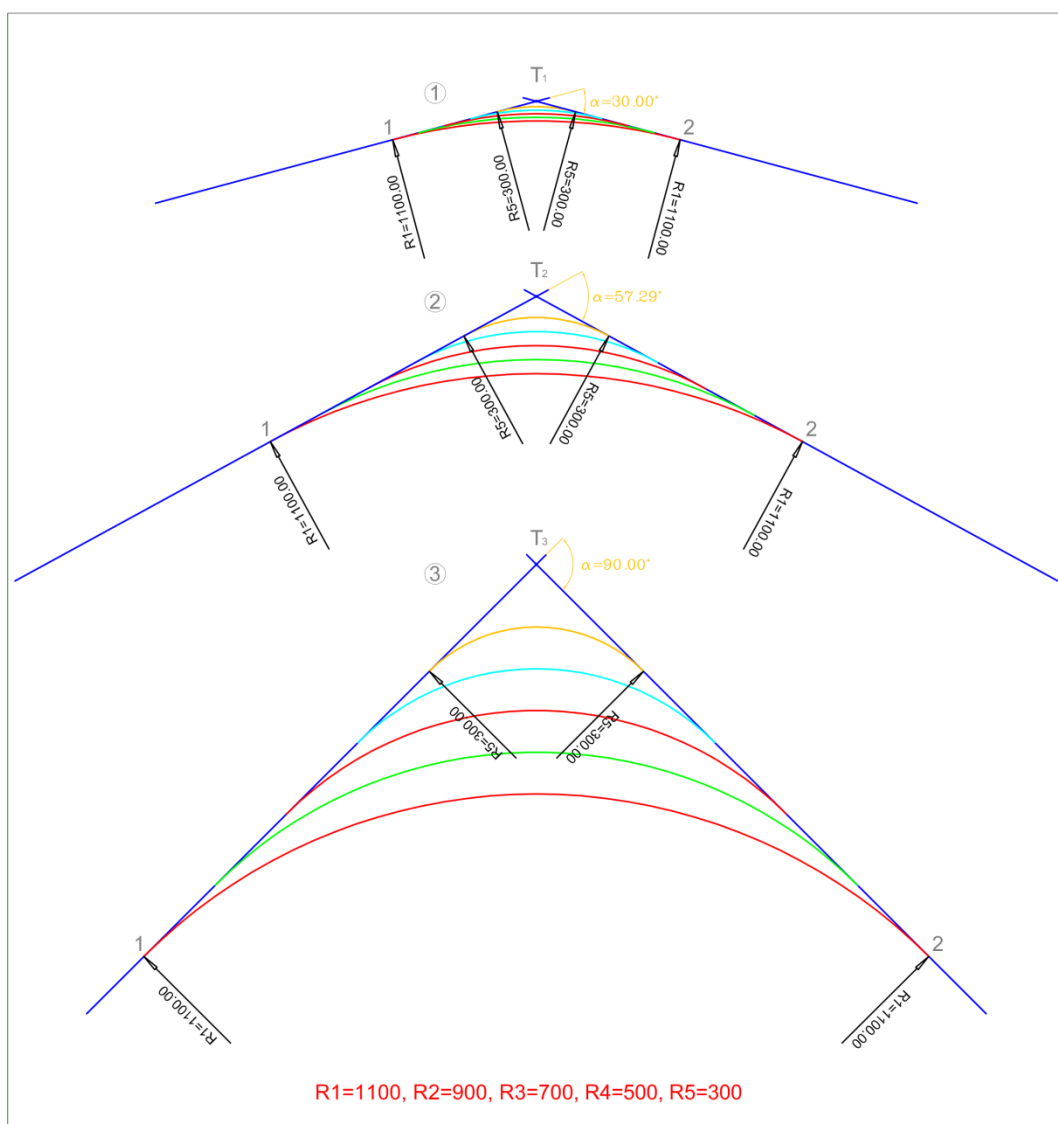
подручја са лошим геолошким и хидролошким карактеристикама, као и урбаних и заштићених подручја. На тај начин се смањује обим грађевинских радова, обезбеђује стабилан положај саме пруге и стварају повољни услови за вожњу.

Приликом избора величине полупречника хоризонталних кривина треба тежити за применом што већих полупречника, односно оних полупречника који су већи од R_{min} , али и у складу са реалним теренским околностима. Разлог томе је што се избором и применом већих полупречника реално смањује укупна дужина трасе железничке пруге, постижу бољи услови вожње и безбедност саобраћаја, смањује време вожње и трошкови експлоатације. Међутим, у тежим теренским условима примена већих полупречника има за последицу повећање инвестиција за грађење због појаве већих и многобројних вештачких објеката и већег обима земљаних радова **Ово указује на чињеницу да су инвестиције за грађење и трошкови експлоатације и одржавања директно повезани са избором елемената и дужином трасе, али да су они дијаметрално супротни чиниоци.**

На дужину трасе железничке пруге значајно утичу примењени полупречници хоризонталних кривина, као и величина преломних углова тих кривина. Ови односи су приказани на сликама 5.10 и 5.11 и то за преломни угао α од: 30° , 57.29° , и 90° и полупречник кривина R од: 300 m , 500 m , 700 m , 900 m и 1100 m .



Слика 5.10 Дужина хоризонталне кривине у функцији величине полупречника R и преломног угла α



Слика 5.11 Приказ хоризонталних кривина са различитим полупречницима и преломним угловима

При неизмењеном (истом) преломном углу кривине, примена мањег полупречника доводи до продужења трасе у односу на исту кривину са већим полупречником. Разлика у дужини трасе у кривини ΔL [15, 69] је већа уколико се ради и о већим преломним угловима и добија се преко релације (5.14):

$$\begin{aligned} \Delta L &= L_2 - L_1 \\ \Delta L &= 2(Tg_1 - Tg_2) + D_2 - D_1 \\ \Delta L &= (R_1 - R_2) \left(2tg \frac{\alpha}{2} - \frac{\pi\alpha}{180} \right) \\ \Delta L &= \Delta R \left(2tg \frac{\alpha}{2} - 0,0174\alpha \right) [m] \end{aligned} \quad (5.14)$$

где је:

- $R_1, R_2 [m]$ – полупречници хоризонталних кривина $R_2 < R_1$,
 $\Delta R = R_1 - R_2 [m]$ – разлика вредности полупречника хоризонталних кривина,
 $\alpha [^\circ]$ – преломни угао хоризонталне кривине,
 $Tg_1, Tg_2 [m]$ – тангенте хоризонталних кривина, које се добијају из (4.15):
$$Tg_i = R_i tg \frac{\alpha}{2} [m] \quad (4.15)$$

- $D_1, D_2 [m]$ – дужине хоризонталних кривина, које се добијају из (4.16):
$$D_i = R_i \frac{\pi \alpha}{180} [m] \quad (4.16)$$

Разлике у дужинама могу бити значајне, као што и показује слика 5.12 где су упоређене величине полупречника R од 300 до 1100 m, односно од $\Delta R = 200, 400, 600$ или 800 m као и величине преломног угла α од 30 до 120°.

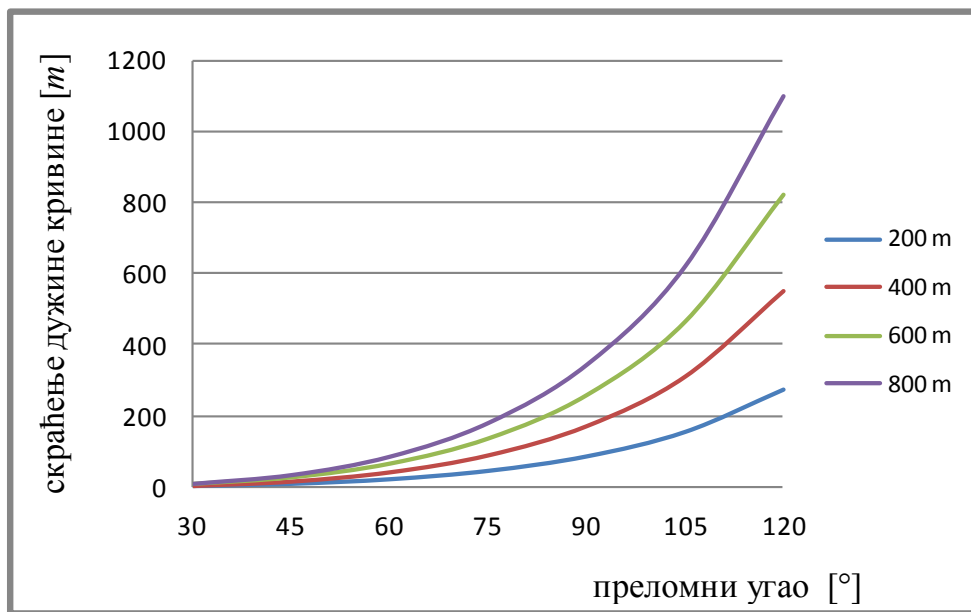
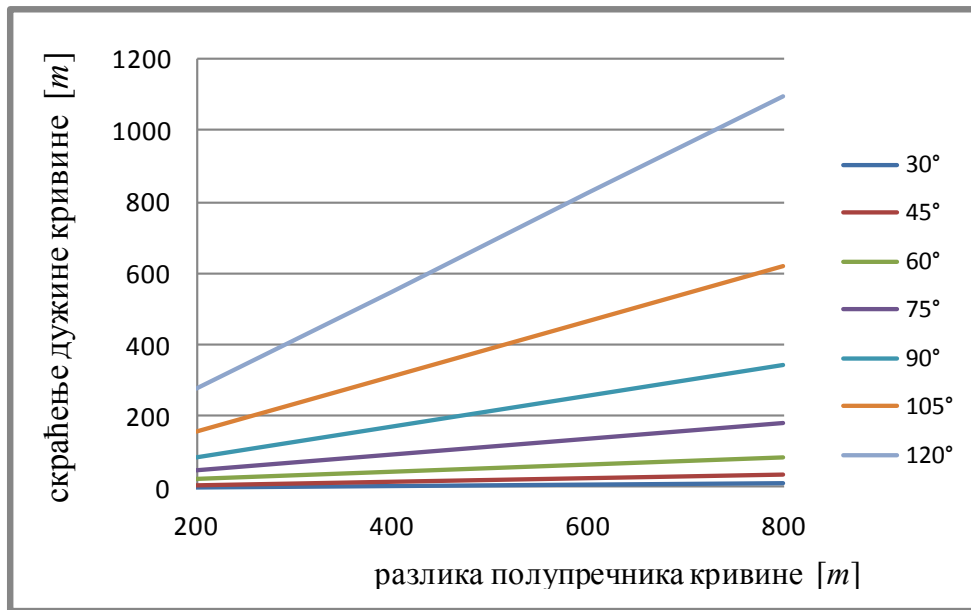
Избор већих полупречника, осим промене дужине - скраћење трасе у датој кривини, има за последицу и повећање бисектрисе ΔS , као и промену у обиму земљаних радова и величини објеката. Осим тога, у кривинама са већим полупречницима долази и до повећања брзине вожње за ΔV , ако то наравно возна средства дозвољавају, затим уштеде - смањења у времену вожње за Δt , као и до повећања пропусне моћи за Δn (пари возова или возова) шире деонице пруге.

Повећање бисектрисе ΔS се јавља као последица удаљавања средине кривина већих полупречника од темена и веће је ако су већи и преломни углови, као што и показује слика 5.13, а добија се преко релације (5.17):

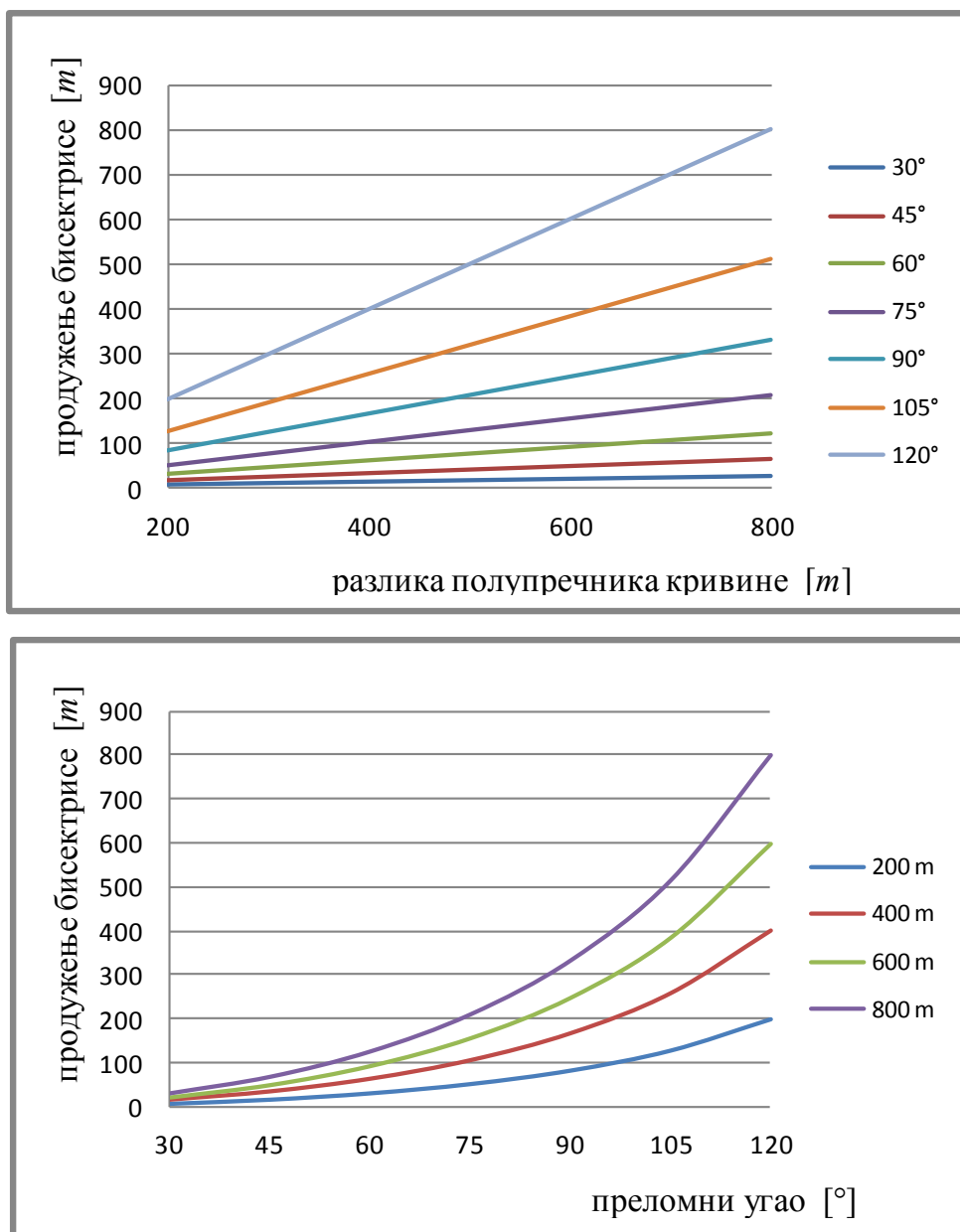
$$\begin{aligned} \Delta S &= S_1 - S_2 \\ \Delta S &= (R_1 - R_2) \left(\frac{1}{\cos \frac{\alpha}{2}} - 1 \right) \\ \Delta S &= \Delta R \left(\frac{1}{\cos \frac{\alpha}{2}} - 1 \right) [m] \end{aligned} \quad (5.17)$$

где је:

- $R_1, R_2 [m]$ – полупречници хоризонталних кривина $R_2 < R_1$,
 $\Delta R = R_1 - R_2 [m]$ – разлика вредности полупречника хоризонталних кривина,
 $\alpha [^\circ]$ – преломни угао хоризонталне кривине.

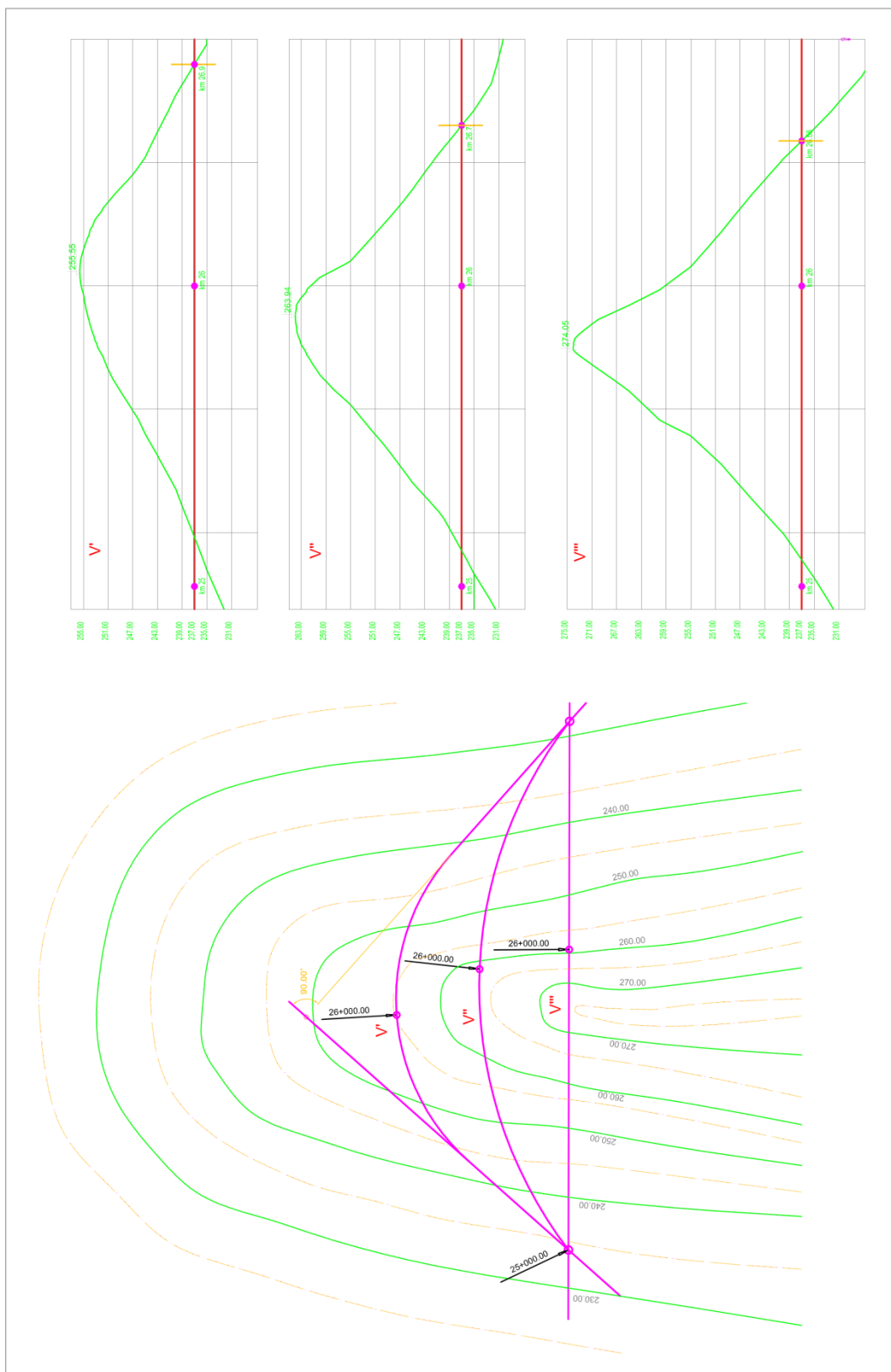


Слика 5.12 Скраћење дужине кривине ΔL при промени величине полупречника ΔR и преломног угла α

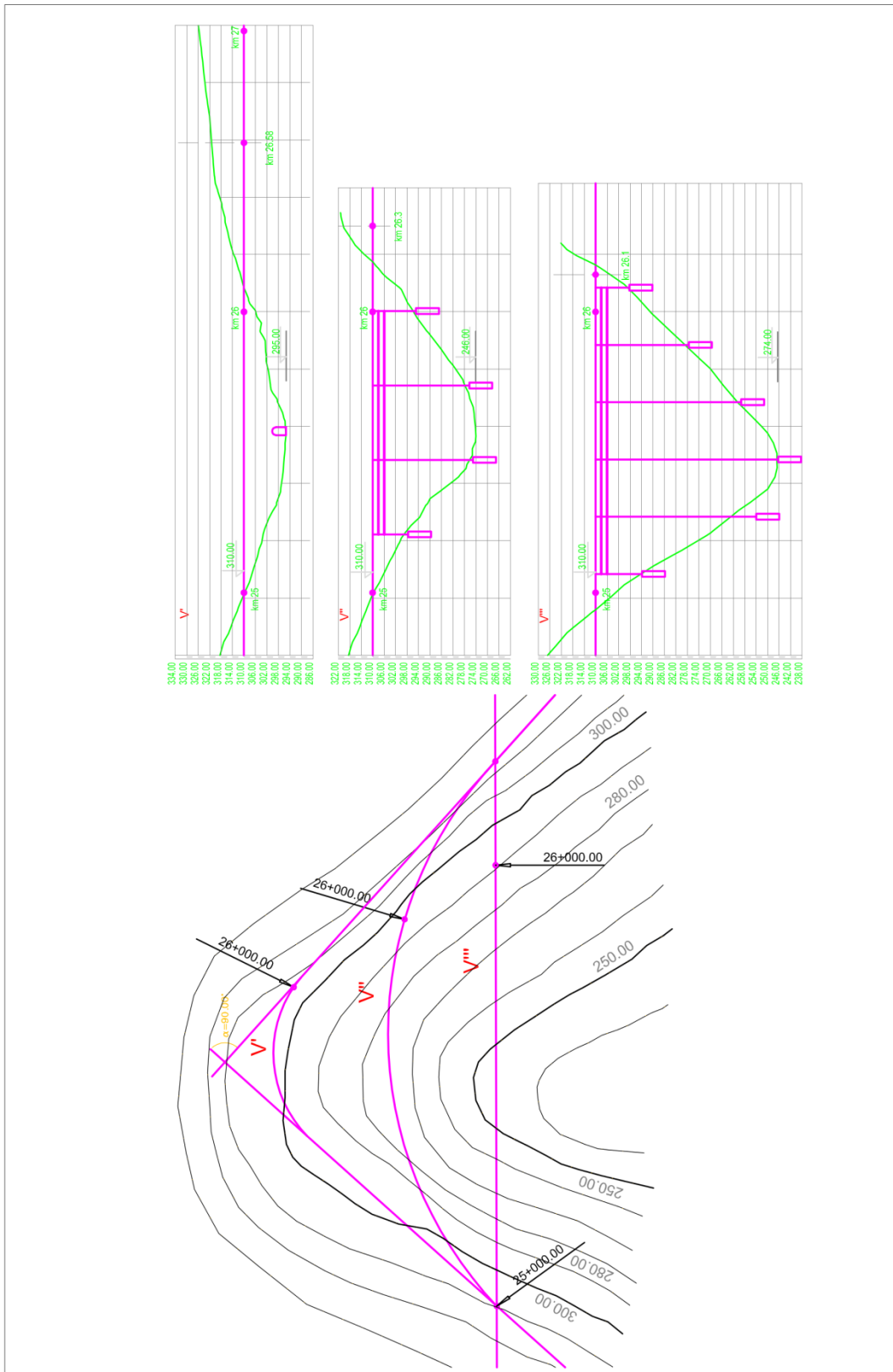


Слика 5.13 Повећање дужине бисектрисе ΔS при промени величине полупречника ΔR и преломног угла α

Промена дужине бисектрисе има за последицу и промену обима земљаних радова на траси, као што то и приказује слика 5.14. Конфигурација терена овде тражи избор мањих полупречника хоризонталне кривине јер се формирају мањи усеци. На слици 5.15 је приказана промена величине објеката при избору већих полупречника кривине, односно чак прелазак са насипа на мостовску конструкцију. У оба примера се види да примена већих полупречника скраћује дате деонице трасе пруге.



Слика 5.14 Последица промене дужине бисектрисе на обим земљаних радова на траси



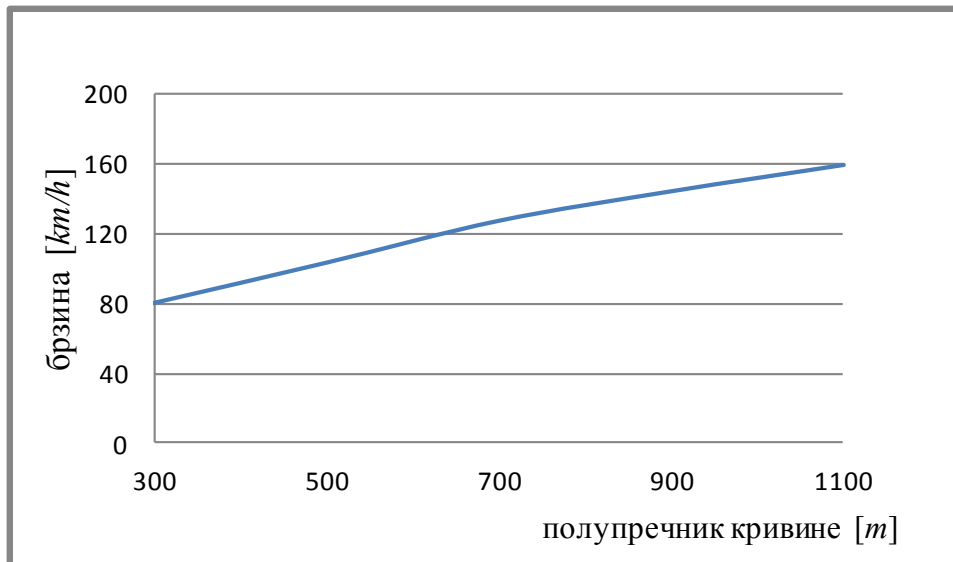
Слика 5.15 Последица промене дужине бисектрисе на величину објекта на траси

Повећање брзине за ΔV у кривинама са већим полупречницима следи на основу зависности која постоји између брзине и полупречника кривине, што је приказано на слици 5.16, а то преко релације (5.18):

$$\begin{aligned}\Delta V &= V_{max1} - V_{max2} \\ \Delta V &= k\sqrt{R_1} - k\sqrt{R_2} \\ \Delta V &= k(\sqrt{R_1} - \sqrt{R_2}) \text{ [km/h]}\end{aligned}\tag{5.18}$$

где су:

- V_{max1}, V_{max2} [km/h] – максималне брзине вожње у кривинама,
- R_1, R_2 [m] – полупречници хоризонталних кривина $R_2 < R_1$,
- k – параметар који у функцији дозвољеног бочног убрзања износи: $k = 4,6$ за $V \leq 120$ km/h и $k = 4,8$ за $V > 120$ km/h.



Слика 5.16 Повећање брзине ΔV при промени величине полупречника R

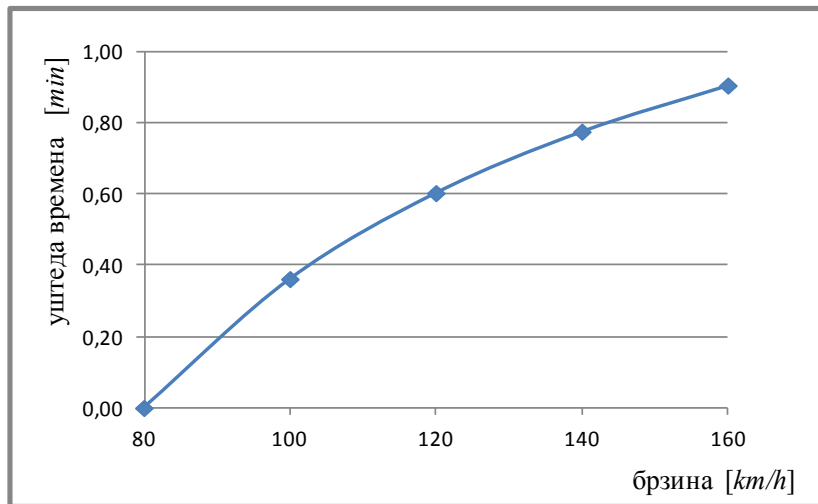
Уштеда, односно смањење времена вожње за Δt у кривинама са већим полупречницима, што је приказано на сликама: 5.17 и 5.18, јавља се као последица повећања брзине вожње и изражава се преко релације (5.19):

$$\begin{aligned}\Delta t &= t_2 - t_1 \\ \Delta t &= \frac{L_2}{V_{max2}} - \frac{L_1}{V_{max1}} \\ \Delta t &= \frac{L_2}{k\sqrt{R_2}} - \frac{L_1}{k\sqrt{R_1}}\end{aligned}\tag{5.19}$$

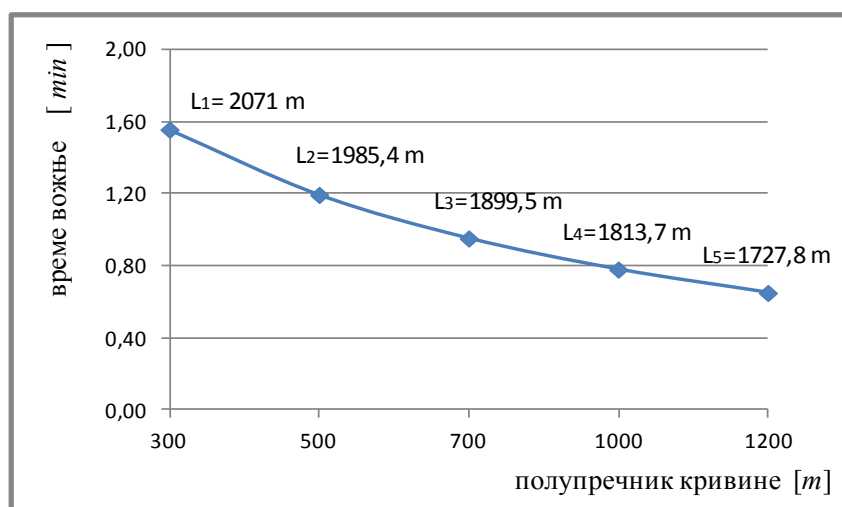
$$\Delta t = \frac{[D_2 + 2(Tg_1 - Tg_2)]}{k\sqrt{R_2}} - \frac{D_1}{k\sqrt{R_1}} \text{ [min]}$$

где је:

- L_1, L_2 [m] – дужине деоноца кроз кривине $L_1 < L_2$,
- V_{max1}, V_{max2} [km/h] – максималне брзине возње у кривинама,
- R_1, R_2 [m] – полупречници хоризонталних кривина $R_2 < R_1$,
- k – параметар у функцији од дозвољеног бочног убрзања,
- D_1, D_2 [m] – дужине хоризонталних кривина,
- Tg_1, Tg_2 [m] – тангенте хоризонталних кривина.



Слика 5.17 Уштеда времена возње Δt при промени брзине у кривинама



Слика 5.18 Смањење времена возње Δt при повећању полупречника R_{min}

Дијаграми смањења времена вожње на слици 5.17 и 5.18 су одређени на примеру хоризонталне кривине (слика 5.11) са следећим елементима: преломни угао $\alpha = 90^\circ$, распон полупречника $R = 300 - 1200 \text{ m}$, а могуће брзине вожње су $V = 80 - 160 \text{ km/h}$. Између тачке 1 и тачке 2, променом величине полупречника кривине формирају се могуће варијанте које имају следеће дужине $L_1 = 1727,8 \text{ m}$ за $R_1 = 1200 \text{ m}$ до $L_5 = 2071 \text{ m}$ за $R_5 = 300 \text{ m}$.

Избор ових полупречника кривине је везан за могуће максималне брзине које се могу остварити у овим кривинама, односно ово су минимални полупречници за дате вредности брзина: $V_{max} = 80 \text{ km/h} \rightarrow \min R = 300 \text{ m}$, $V_{max} = 100 \text{ km/h} \rightarrow \min R = 500 \text{ m}$, $V_{max} = 120 \text{ km/h} \rightarrow \min R = 700 \text{ m}$, $V_{max} = 140 \text{ km/h} \rightarrow \min R = 1000 \text{ m}$ и $V_{max} = 160 \text{ km/h} \rightarrow R_{min} = 1200 \text{ m}$. Ова зависност је дефинисана у поглављу 5.1 и приказана на слици 5.4.

При повећању брзине вожње, осим смањења времена вожње долази и до смањења периода графикана на ограничавајућем станичном размаку, односно до смањења интервала слеђења узастопних возова на двоколосечним пругама, те са на тај начин повећава и пропусна моћ те деонице. Разлика у пропусној моћи Δn добија се преко релације (5.20) за једноколосечну пругу или (5.21) за двоколосечну пругу.

$$\Delta n = 1440 \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \text{ [пари возова]} \quad (5.20)$$

$$\Delta n = 1440 \left(\frac{1}{I_1} - \frac{1}{I_2} \right) \text{ [пари возова]} \quad (5.21)$$

где је:

- $T_1 \text{ [min]}$ – период графикана за деоницу са већим полупречником кривине,
- $T_2 \text{ [min]}$ – период графикана за деоницу са мањим полупречником кривине,
- $I_1 \text{ [min]}$ – интервал слеђења на деоници са већим полупречником кривине,
- $I_2 \text{ [min]}$ – интервал слеђења на деоници са мањим полупречником кривине.

Како избор полупречника хоризонталних кривина утиче на: дужину трасе пруге, величину инвестиција за грађење, трошкове одржавања, време вожње, пропусну моћ и друге саобраћајне елементе, тада се након свега овде изложеног може закључити да је **најповољнији онај полупречник R који сигурно не ограничава усвојену брзину, а добија се итеративним поступком поређењем**

њихових различитих вредности при чему је $R \geq R_{min}$. Ове вредности полупречника, које су веће од R_{min} , треба примењивати увек где теренски и други услови то дозвољавају.

5.3 ТЕХНИЧКИ ПОКАЗАТЕЉИ ТРАСЕ ЖЕЛЕЗНИЧКЕ ПРУГЕ

Комбинацијом наведених основних пројектних елемената трасе, уз примену техничких услова и геометријских законитости, кроз итеративни поступак развија се већи број варијантних решења трасе железничке пруге. Оне се међусобно разликују по следећим елементима:

- укупној дужини,
- броју и врсти службених места,
- броју хоризонталних кривина са минималним и максималним полупречником,
- дужини трасе у правцу, односно у кривинама,
- броју прелома нивелете, нагибима нивелете и дужинама деоница са простим нагибом,
- просечној надморској висини нивелете,
- изгубљеним висинама,
- минималном и максималном полупречнику вертикалне кривине,
- објектима (врста, дужина и тип конструкције) и њиховом процентуалном учешћу у укупној дужини трасе.

Синтеза приказаних елемената одређују општи квалитет сваког варијантног решења трасе, а он се приказује преко техничких показатеља дефинисаних као:

Коефицијент развијања трасе ψ , однос укупне дужине трасе L према ваздушном-најкраћем растојању крајњих тачака трасе L_0 (5.22):

$$\psi = \frac{L}{L_0} \quad [-] \quad (5.22)$$

Закривљеност трасе K , збир свих преломних (централних) углова $\sum \alpha_k$ по километру трасе L (5.23):

$$K = \frac{\sum \alpha_k}{L} \quad [^\circ/km] \quad (5.23)$$

Средњи полупречник кривине на траси R_s , однос укупне дужине свих кривина $\sum D_k$ према збиру свих преломних углова $\sum \alpha_k$ (5.24):

$$R_s = \frac{180 \sum D_k}{\pi \sum \alpha_k} [m] \quad (5.24)$$

Средњи нагиб на траси i_s , однос савладане висинске разлике $\sum i_k l_k$ и укупне дужине трасе $\sum l_k$ (5.25):

$$i_s = \frac{\sum i_k l_k}{\sum l_k} [\%] \quad (5.25)$$

На основу ових техничких показатеља, који дефинишу општи квалитет сваког варијантног решења трасе, варијантна решења се не могу међусобно упоређивати ради избора најповољнијег решења. Међутим, како ови показатељи директно утичу на инвестиције за грађење и трошкове експлоатације и одржавања, као и сам капацитет трасе железничке пруге, тада су они непосредно укључени у процес вредновања и оптимизације варијантних решења трасе.

6 ПРЕГЛЕД ОСНОВНИХ ТЕОРИЈСКИХ ПРИНЦИПА ОПТИМИЗАЦИЈЕ

Оптимизација, у најширем смислу, представља стварање таквих односа између елемената једног система при чему се добија решење система које је најповољније и које највише одговара постављеним захтевима или датим условима у посматраном систему. Ово решење је оптимално решење система и оно је максимално добро решење само ако се зна како се мери и како се разликује шта је „боље“, а шта „лошије“.

У математичком смислу, оптимизација се дефинише као проналажење скупа најбољих вредности елемената система које у датим ограничавајућим условима задовољавају постављени циљ, који се изражава преко критеријумске функције. Тада циљна-критеријумска функција достиже глобални екстремум (максимум или минимум), с обзиром на ограничења која представљају могућност достизања циља [61]. Међутим, циљ намене и развоја једног система не може бити приказан само преко једне циљне функције, него се дефинише више критеријумских функција које обухватају све аспекте и елементе датог система. У овом случају то би били технички, технолошки, економски, социолошки, просторни, еколошки, законски и институционални.

На основу изложеног, оптимизациони поступак се може приказати преко пресликавања (6.1):

$$O : (S, Q, G) \rightarrow X^* \quad (6.1)$$

где је:

- S – опис и намена система,
- Q – критеријуми за оптимизацију,
- G – ограничења,
- X^* – најбоље (оптимално) решење.

Оптимизациони критеријуми Q омогућавају вредновање и упоређивање могућих решења из допустивог скупа решења X , док ограничења G представљају могућност достизања циља и обухватају:

- природна ограничења,
- физичка ограничења,
- нормативна ограничења,
- ограничења која проистичу из развојне политике,
- новчана или буџетска ограничења,
- стечене планске обавезе,
- ограничења због заштите животне средине.

Посматрани оптимизациони поступак обухвата више активности, одвија се у више фаза и на више нивоа, а основни кораци су:

1. *корак* : Дефинисање циљева система и идентификација начина постизања циљева,
2. *корак* : Формални (математички) опис система, израда математичког модела и дефинисање начина вредновања и критеријумских функција,
3. *корак* : Коришћење нормативних метода, оптимизација у ужем смислу,
4. *корак* : Усвајање коначног решења или доношење коначне одлуке.

Уколико коначно решење није усвојено, поступак се понавља од 2. *корака*.

Међутим, за опис железничког саобраћајног система, односно железничке пруге као техничког система, мора се користити други приступ, а то је случај **дискретних система**, када се уместо израде свеобухватног математичког модела пројектују варијантна решења - алтернативе тог система. Тада се оптимизациони поступак може формулисати као (6.2):

$$VKO (f_1(a), f_2(a), \dots, f_n(a)), \quad a \in A \quad (6.2)$$

где је:

- A – скуп допустивих варијантних решења - алтернатива,
- $a = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ – варијантно решење формирано за одређене вредности променљивих (x) система,
- f_i – i -та критеријумска функција,

VKO – оператор и има значење max , ако критеријумска функција представља добит, односно min ако критеријумска функција представља трошкове или „штету“,

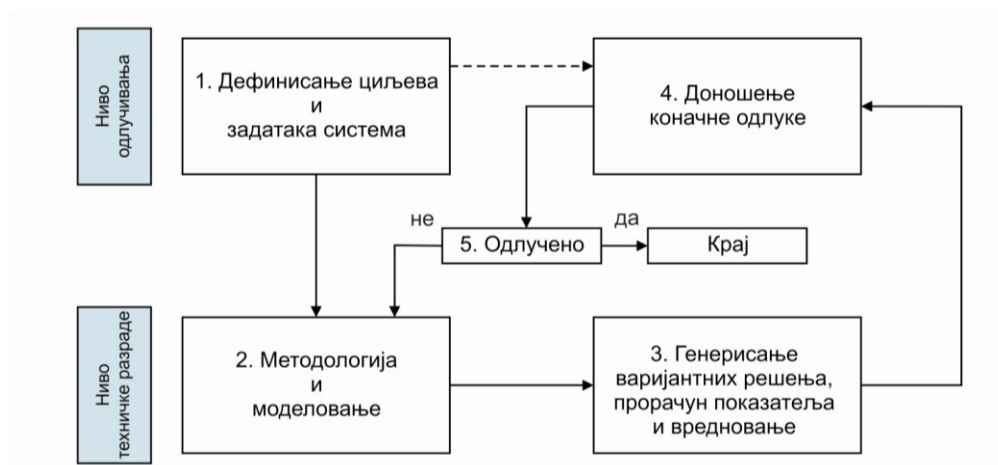
$g(x) \leq 0$ – сва ограничења у систему која су имплицитно садржана у допустивости варијантног решења.

У овом оптимизационом поступку задатак оптимизације је да изврши избор најповољнијег (најбољег) варијантног решења из низа могућих варијанти, у смислу усвојеног циља и критеријума.

Критеријум представља меру за поређење приликом одабирања најповољнијег-најбољег варијантног решења и тада критеријумска функција достиже глобални екстремум. Овај оптимизациони поступак [61] се реализује преко техничког нивоа и нивоа одлучивања, а у оквиру њих су дефинисани и следећи кораци:

1. корак : Проучавање система,
2. корак : Дефинисање циљева и критеријума за вредновање варијантних решења (алтернатива) система,
3. корак : Генерисање и разрада варијантних решења,
4. корак : Вредновање варијантних решења,
5. корак : Оптимизација-избор најповољније варијанте,
6. корак : Усвајање коначног варијантног решења.

Приказ овог поступка оптимизације дат је на слици 6.1.



Слика 6.1 Приказ поступка оптимизације извор [62]

6.1 ГЕНЕРИСАЊЕ ВАРИЈАНТНИХ РЕШЕЊА

Генерисање - стварање и разрада варијантних решења полази од главног циља и намене система који остају исти за сва решења, а мењају се само вредности одређених променљивих система x_1, x_2, \dots, x_m . Једна комбинација вредности вектора x представља једно варијантно решење V_j (6.3):

$$V_j = (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}) \quad (6.3)$$

где је:

V_j – j -то варијантно решење,

x_{mj} – вредност m -те променљиве (векторске) за j -то варијантно решење.

За генерисање варијантних решења сложених система не постоји аутоматизован поступак или модел, односно никаква техничка, математичка и рачунарска процедура и правила не могу заменити креативност у стварању варијанти. Како сваки систем има непоновљиве услове средине и окружења, тада формирана варијантна решења постају уникати без могућности умножавања.

Свако дефинисано решење мора бити тестирано како би се утврдило да ли је оно допустиво, односно да ли одговарајуће вредности променљивих задовољавају постављена ограничења. Поступак за добијање допустивих варијантних решења биће приказан у даљем тексту рада.

Скуп генерисаних варијантних решења мора бити потпун, а то значи да постоји једно или више решења за сваки значајнији аспект разматрања датог система, као и да ће и коначно решење бити из датог формираног скупа.

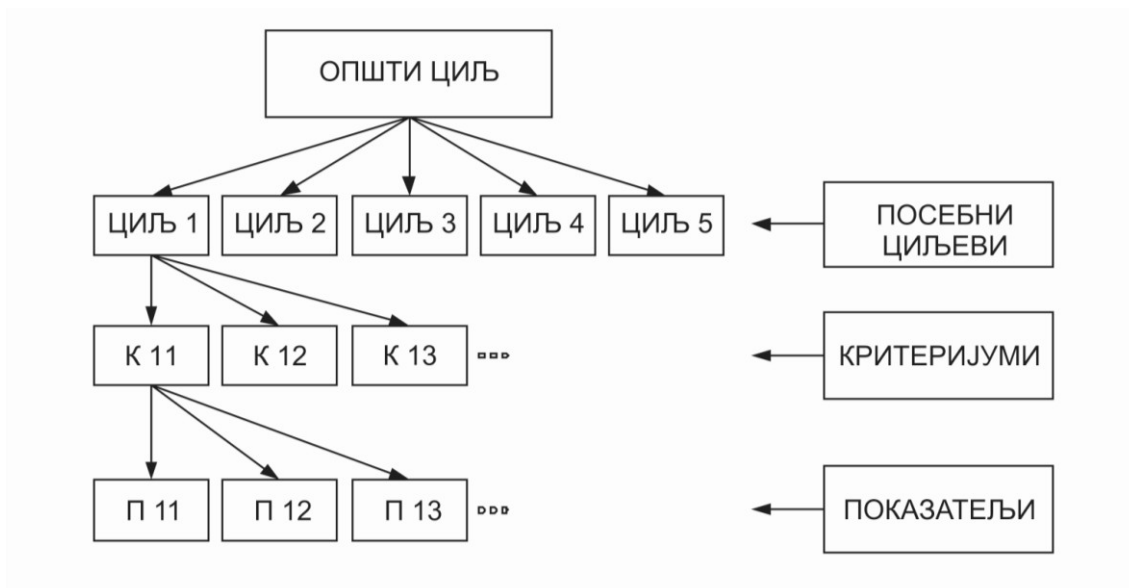
6.2 КРИТЕРИЈУМИ И КРИТЕРИЈУМСКЕ ФУНКЦИЈЕ

Ако циљ представља жељено стање једног система, тада се без његовог јасног сагледавања и дефинисања, не може решавати проблем оптимизације тог система. Међутим, како жељено стање обухвата различите аспекте (техничке, технолошке, економске, социјалне и еколошке) система, тада се општи циљ мора разложити на посебне циљеве, критеријуме и показатеље са разлогом добијања

нумеричких вредности, односно критеријумских функција. Сви ови елементи морају бити довољно специфични да њихове вредности покажу колико добро систем функционише, или колико су добри ефекти који настају радом тог система. Тако скуп циљева, критеријума и показатеља формира један хетерогени критеријумски простор за вредновање формираних варијантних решења система, као и један хијерархијски поредак за успостављање система важности у оквиру ове структуре, што је приказано на слици 6.2.

Жеља да се достигне добра вредност критеријумске функције представља критеријум за оптимизацију. У општем случају, могу се формулисати критеријумске функције за мерење и вредновање:

- економских показатеља система (трошкови),
- трошења ресурса (земљиште, материјали, енергија),
- ефеката и производа система (обезбеђивање добара, услуге),
- утицаја на околину (људи, биљни и животињски свет, вода, ваздух, земљиште, амбијент).



Слика 6.2 Хијерархијски поредак циљева, критеријума и показатеља

Код сложених система критеријумске функције могу бити изражене у различитим јединицама: монетарним, техничким, оценама или бодовима. Тада се уводи одређена трансформација ових функција и тако оне постају бездимензионалне са опсегом у интервалу $(0, 1)$. Начин трансформације зависи од изабране методе која ће се користити у поступку оптимизације.

6.3 ВРЕДНОВАЊЕ ВАРИЈАНТНИХ РЕШЕЊА

Вредновање, односно процена у којој мери је остварен задати циљ система, сваког допустивог варијантног решења врши се према свим дефинисаним критеријумима посебно. У поступку процене требало би размотрити сва допустива варијантна решења, одредити њихове све позитивне и негативне ефекте, као и да временски период и ниво детаљности буде исти за све. Вредности критеријумских функција могу бити изражене преко:

- квантитативних економских критеријума,
- квантитативних техничких критеријума,
- квалитативних критеријума (оцене или бодови).

Економски критеријуми су критеријуми одређени показатељима који се добијају економским анализама, а првенствено се односе на трошкове изградње и рада система и на добити корисника. Економска анализа би требало да потврди **економску оправданост** система, а то значи да ће дисконтована добит превазићи дисконтоване трошкове у животу система. Као критеријумске функције за вредновање користе се:

- инвестициона улагања за изградњу и опрему система, укључујући коштање материјала, радне снаге, механизације, заузетог земљишта и разна финансијска оптерећења,
- годишњи трошкови рада и одржавања система, укључујући радну снагу, сировине, замену дела опреме и материјала,
- бенефит као финансијска категорија, који не укључује добити које се не вреднују и не изражавају као финансијске категорије (социјални ефекти, заштита људи).

Квантитативни технички критеријуми су они критеријуми чији се показатељи добијају техничким или статистичким анализама и мерењима. Оваквим критеријумским функцијама вреднују се ефекти који се не могу лако изразити у монетарним јединицама, као што су:

- искоришћени ресурси или материјали: земљиште (*ha*), енергија (*kwh*), челик (тона), туцаник (m^3), бетон (m^3) и сл.,
- време трајања појединих процеса (у сатима, данима, месецима),

- промена квалитета ваздуха или воде у односу на садашње стање (%),
- поузданост, утврђена статистичким методама (%),
- промена запослености (број радних места).

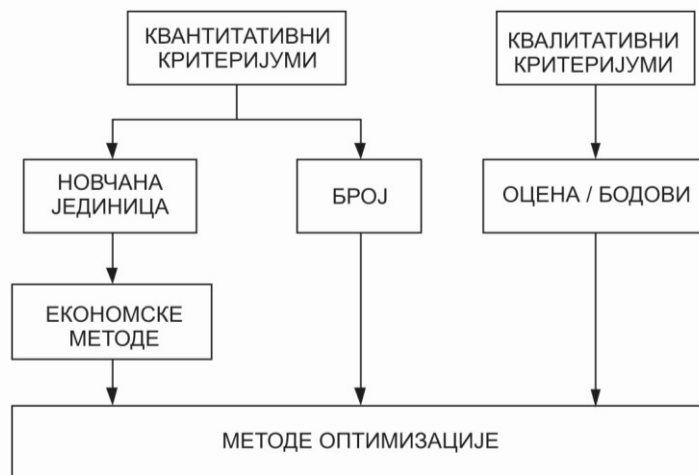
Квалитативни критеријуми су они критеријуми код којих се показатељи не могу добити ни економским ни техничким анализама, а обухватају следеће ефекте и утицаје:

- утицај на људско здравље,
- утицај на културно-историјско и природно наслеђе,
- утицај на биљни и животињски свет,
- утицај на амбијенталну вредност околине,
- комфор корисника система.

Вредновање оваквих ефеката и утицаја врши се од стране одговарајућих експерата и то давањем оцена O_i из ординарне скале за вредновање са следећим градацијама: не задовољава, слабо задовољава, добро, врло добро и одлично. Овим описним оценама се додељују и бројчане вредности од 0 до 10, односно $0 \leq O_i \leq 10$ или бодови од 0 до 100, односно $0 \leq O_i \leq 100$.

Један критеријум може бити одређен са више показатеља. Тада се вредност тог критеријума, односно критеријумске функције добија сумирањем нумеричких вредности тих показатеља. У случају да су то независни показатељи (различитих димензија), тада се они могу као подкритеријуми укључити у даљи процес вредновања. За поједине показатеље су прописане и граничне вредности (ограничење инвестиција и трошкова, здравствени и еколошки стандарди и прописи) које се морају поштовати у поступку вредновања.

На слици 6.3 је приказана вишедимензионална структура критеријума исказана монетарним и техничким јединицама, оценама или бодовима као и њихова веза са методама које ће се користити у поступку оптимизације.



Слика 6.3 Веза критеријума са методама оптимизације

6.4 РЕЛАТИВНЕ ТЕЖИНЕ КРИТЕРИЈУМА

Формирање хијерархијског низа циљева и критеријума не завршава се дефинисањем показатеља, као најнижег нивоа у хијерархији, него се мора одредити и **релативна тежина** w_i (значај) сваког посебног циља и критеријума из низа. Разлог овоме је што сви циљеви и критеријуми немају исту важност у формираној хијерархијској структури и немају увек економско значење. Ова важност проистиче из значаја самог система који се оптимизује, економског и просторног окружења, као и времена у коме се доносе одлуке. Основно је да релативне тежине отварају могућност да се директније и објективније изразе специфичности самог система, као и да се укључи друштвени став о могућим приоритетима (у недостатку инвестиционих средстава минимални трошкови могу доминирати као критеријум, или ако систем нарушава неко заштићено подручје, тада еколошки критеријум постаје доминантан).

Начин на који се исказује значај сваког посебног циља и критеријума зависи од изабране методе која ће се користити у поступку оптимизације. Најчешће се користе нормализоване вредности релативних тежина, при чему је (6.4):

$$w_i = \frac{t_i}{\sum t_i}, \quad \sum_i w_i = 1, w_i \geq 0, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (6.4)$$

где је:

t_i – вредност релативне тежине критеријума.

Међутим, за сагледавање релативних односа тежина могу се користити и ненормализоване вредности у виду целих бројева или износи у процентима. То је случај када се критеријум састоји од независних показатеља и који немају исте димензије, па се они директно уносе у процес вредновања у виду подкритеријума. Тада се релативна тежина критеријума преноси на ове показатеље према њиховом значају и важности.

Задавање вредности релативних тежина критеријума је посебан проблем у оптимизацији и његово решавање зависи од структуре доносилаца одлуке. Под доносиоцем одлуке подразумева се надлежно лице или група одговорна за доношење коначне одлуке, односно за усвајање најповољнијег варијантног решења. Случај када је доносилац одлуке једна особа или хомогена група, тада се релативне тежине критеријума могу одредити прецизно уз сарадњу доносилаца одлуке. Ако је доносилац одлуке хетерогена група одлучиоца и често са конфликтним интересима, тада поступци задавања релативних тежина критеријума могу бити:

- Анализа структуре преференције – *Delphi метода* или
- Симулација структуре преференције.

Анализа структуре преференције (*Delphi метода*) је једна од основних метода експертних оцена, а састоји се у систематском и организованом прикупљању мишљења групе експерата у циљу добијања тражених релативних тежина критеријума. Након дефинисања проблема и одређивања скупа критеријумских функција формира се и тим експерата, (10 до 15 чланова) специјалиста за дефинисану проблематику, а затим се спроводи анкета. У оквиру анкетног упитника сваки члан самостално расподељује поене (100 поена) на критеријумске функције, тако да већи број поена приписује критеријумској функцији којој даје већи значај у конкретном вишекритеријумском проблему. На основу статистичке обраде резултата анкете одређује се хистограм, односно параметри: средња вредност, стандардно одступање и коефицијент варијације за сваку тежину критеријума. Обрађени резултати се затим презентују члановима експертског тима и од њих се тражи да преиспитају остварену расподелу поена

или да их прихвате као коначне. Ако резултати нису коначни, онда се реализује нова анкета и поступак се понавља све док се не добију довољно поуздане вредности релативних тежина. Шири преглед ове методе дат је у [45, 62, 101].

Симулација структуре преференције се користи када је доносилац одлуке хетерогена група и када сви чланови не могу или не желе да учествују у формалној анализи преференције. Тада се симулација врши на техничком нивоу и то без учешћа доносиоца одлуке. Аналитичар сагледава расподелу структуре одлучиоца и претпоставља могућа сценарија доношења коначне одлуке и за сваки од њих задаје се једна комбинација вредности релативних тежина. На пример:

Сценарио I када се задају једнаке тежине свим критеријумским функцијама,

Сценарио II када се веће вредности дају тежинама уз економске критеријуме који презентују трошкове,

Сценарио III када се веће тежине задају критеријумима за заштиту природне средине,

Сценарио IV када се веће тежине задају критеријумима који дефинишу социјалне утицаје.

Шири преглед ове методе дат је у [62]. Сваки овај наведени сценарио приликом рангирања може дати за резултат исто варијантно решење или различита решења.

6.5 МЕТОДЕ ЗА ОПТИМИЗАЦИЈУ

Са аспекта начина и поступка решавања задатака и проблема, као и формулисања математичког модела, методе за оптимизацију могу бити груписане у две основне групе:

- Прву групу чине методе математичког програмирања (оптимизације), односно методе за решавање задатака са континуалним математичким моделом,
- Другу групу чине методе комбинаторне оптимизације, односно методе за решавање задатака анализе и избора најбољег решења из формираног скупа (допустивих) варијантних решења код дискретних система.

Друга група метода се често проширује и на методе за решавање задатака **рангирања** варијантних решења, односно одређивање њиховог редоследа – ранг листе. На основу утврђеног поступка рангирања, након вредновања свих варијантних решења (V_1, V_2, \dots, V_m) са становишта усвојених критеријума и критеријумских функција (f_1, f_2, \dots, f_n), утврђује се редослед варијантних решења (варијанта V_j је боља од варијанте V_k према i -том критеријуму само ако је $f_{ij} > f_{ik}$, односно $V_j > V_k$). Решење задатка рангирања, у зависности од изабране и примењене методе, може бити:

- ранг варијантних решења (редослед од најбољег до најлошијег),
- најбоље варијантно решење,
- скуп варијантних решења која испуњавају унапред задате услове.

На почетку овог поглавља већ је наглашено, да се за оптимизацију једног сложеног техничког система као што су железничке пруге, мора користити приступ за случај **дискретних система**. То значи, да се уместо израде свеобухватног математичког модела пројектују варијантна решења овог система, а задатак оптимизације је да се **изврши избор најбољег решења** из низа могућих и то на основу усвојеног циља и више критеријума.

Постојање више варијантних решења, већег броја критеријума за вредновање који су често конфликтни и са различитим мерним јединицама, значи да се за решавање овог вишекритеријумског задатка не могу користити класичне оптимизационе методе (методе из прве групе), него се морају користити методе из друге групе - методе за вишекритеријуску оптимизацију (одлучивање) и рангирање (**MCDM** – *Multi-Criteria Decision Making*). С обзиром на природу информација вишекритеријумских проблема, ове методе се могу сврстати у следеће групе:

- Вишеатрибутивно одлучивање (**MADM** – *Multi-Attribute Decision Making*) или како се у последње време све више назива вишекритеријумска анализа (**MCA** – *Multi-Criteria Analysis*). Ова група метода решава вишекритеријумске проблеме избором најбоље алтернативе из скупа претходно дефинисаних.
- Вишециљно одлучивање (**MODM** – *Multi-Objective Decision Making*). Ова група метода решава вишекритеријумске проблеме пројектовањем најбоље алтернативе.

Из приказане поделе, за решавање проблема оптимизације трасе користиће се методе вишеатрибутивног одлучивања, односно вишекритеријумске анализе. Ове методе се могу поделити у следеће групе:

1. **Методе корисности** – код ових метода се варијантна решења вреднују и рангирају према корисности у односу на све критеријуме. Представници ове групе метода су: **Адитивни метод (SWA – Simple Additive Weighting)**, **Вишеатрибутна теорија корисности (MAUT – Multi-Attribute Utility Theory)** и **Аналитички хијерархијски процес (АНП – Analytic Hierarchy Process)**.
2. **Методе засноване на компромису** – код ових метода се бира варијантно решење које је најближе идеалном решењу и то на основу усвојене мере растојања. Главни представник ове групе метода је **Компромисно програмирање (CP - Compromise Programming)**. Из елемената компромисног програмирања развијене су: метода **TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)** и метода **VIKOR (VIšekriterijumsko KOmpromisno Rangiranje)**.
3. **Методе вишег ранга (Outranking metode)** – код ових метода се рангирање, односно редослед варијантних решења генерише по приоритету. Представник ове групе је скуп метода **ELECTRE I, II, III и IV (ELEmination Et Choice Translating Reality)**, **PROMETHEE I, II, III и IV (Preference Ranking Organization METHod of Enrichment Evaluations)**.

Све ове методе припадају класи метода за меку оптимизацију, а за поједине методе се могу користити и фази верзије [8] како би се решио проблем субјективности као и проблем коришћења описних оцена. Шири преглед и опис ових наведених метода налази се у [9, 61, 62, 97, 100, 101] док ће у поглављу 7.3 из овог скупа бити одабрана најпогоднија метода за решавање задатка оптимизације трасе железничке пруге, односно избора најповољније варијанте трасе.

6.6 МАТРИЦА ОДЛУЧИВАЊА ЗА ИЗБОР НАЈПОВОЉНИЈЕГ ВАРИЈАНТНОГ РЕШЕЊА

Крајњи циљ оптимизације трасе железничке пруге је избор најповољнијег решења, односно доношење одлуке о најбољем решењу из формираног скупа допустивих варијантних решења овог система. Овом избору и доношењу одлуке предходи, као што је и приказано на слици 6.4, реализација следећих активности:

1. **Формирање почетне матрице за оптимизацију и одлучивање** – варијантна решења се документовано оцењују и вреднују у складу са усвојеним циљем и изведеном листом критеријума, тако што се сваком варијантном решењу V_j ($j=1,2,\dots,m$) додели вредност критеријума K_i ($i=1,2,\dots,n$) преко критеријумске функције f_{ij} (вредност i -те критеријумске функције за j -то варијантно решење). Та вредност се добија у виду суме нумеричких вредности показатеља који одређују сваки критеријум. Тако се формира почетна матрица F_{ij} за оптимизацију и одлучивање, при чему сваки ред у матрици одговара једном варијантом решењу, а свака колона једном критеријуму.
2. **Нормализација почетне матрице** – бројне вредности критеријумских функција f_{ij} су у општем случају разнородне, пошто сви критеријуми нису изражени истим јединицама мере. Облик трансформације зависи од методе која ће бити примењена за оптимизацију. После трансформације почетна матрица добија вредност n_{ij} ($i=1,2,\dots,n$), ($j=1,2,\dots,m$) у којој су сви елементи бездимензионе величине.
3. **Задавање релативних тежина критеријума** – дефинисане релативне тежине критеријума w_i ($i=1,2,\dots,n$) се уносе у нормализовану матрицу, тако што се сваки члан матрице множи са одговарајућом релативном тежином. Вредности релативних тежина, као мере значаја сваког појединачног циља и критеријума у хијерархијском низу, одређују се након формирања овог низа и то по једној од предложених метода.
4. **Синтеза и рангирање** – за свако варијантно решење се одређује синтеза вредност критеријумске функције по свим критеријумима, а затим се оне међусобно упоређују. Синтеза критеријумских функција се врши на

основу унапред утврђене релације, што зависи од примењене методе за оптимизацију. Након упоређивања, варијанте се рангирају са циљем добијања редоследа – ранг-листе. Ако постоји више комбинација вредности релативних тежина, односно више сценарија, тада се приликом рангирања за сваки сценаријо добија одговарајућа ранг-листа. У овој активности матрица одлучивања добија вредности N_i ($i=1,2,\dots,m$).

5. **Анализа резултата** – добијена ранг-листа варијантних решења се презентира доносиоцу одлуке и он на основу ње доноси одлуку о најповољнијој варијанти. Поступак доношења коначне одлуке зависи од структуре доносиоца одлуке, скупа решења која се предлажу након рангирања и ширих друштвених норми. Доношењем одлуке, односно избором најповољније варијанте процес оптимизације се завршава.

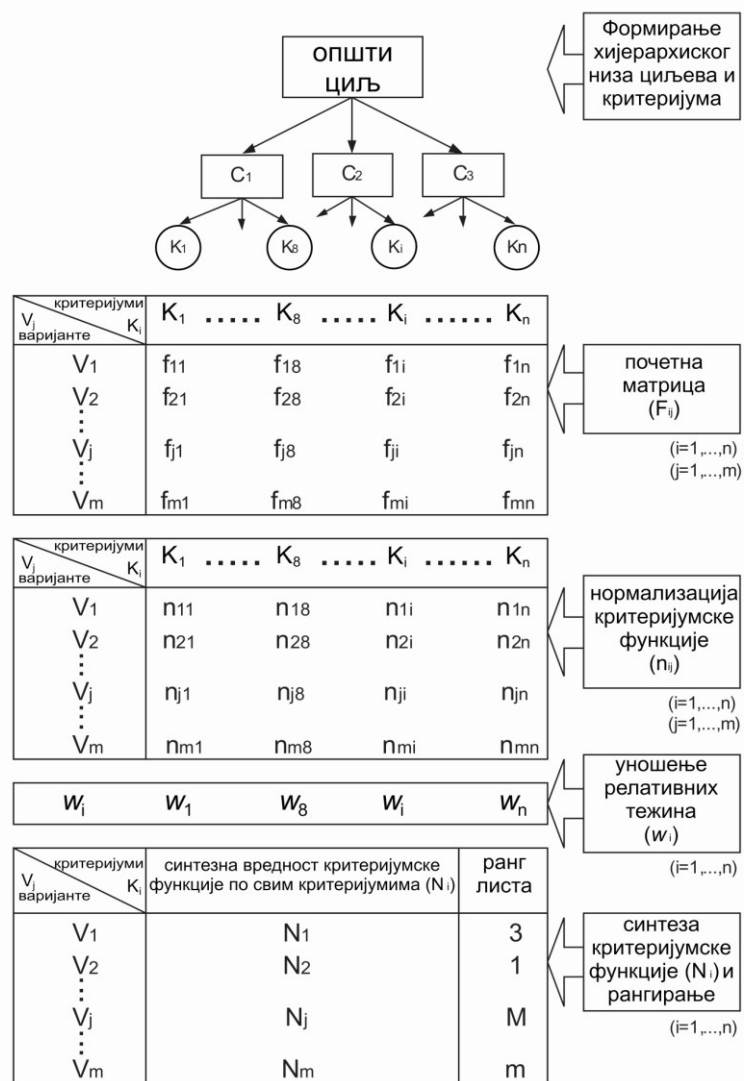
6.7 ДОНОШЕЊЕ ОДЛУКЕ О НАЈПОВОЉНИЈЕМ ВАРИЈАНТНОМ РЕШЕЊУ

Последња активност процеса оптимизације једног дискретног система је одлучивање о избору најповољнијег варијантног решења тог система. Само доношење одлуке, као крајњи резултат процеса одлучивања, је сложена али и одговорна активност због тога што свака одлука, уколико је неадекватна, оставља значајне последице на дати систем, па је зато и одговорност за сваку донету одлуку много већа. Одлучивање о најповољнијем варијантном решењу мора се реализовати уз учешће свих заинтересованих структура за дати систем, односно доносилаца одлуке, а то је надлежно лице или група (инвеститор, чланови пројекта за реализацију трасе железничке пруге као и представници корисника датог система) са или без конфликтних интереса, овлашћена и одговорна за избор и доношење коначних одлука.

Поступак доношења одлуке зависи како од структуре доносилаца одлуке тако и од скупа решења која се предлажу након рангирања. На крају процеса одлучивања доносиоцу одлуке се презентира резултат рангирања, односно редослед (ранг листа или ранг листе) варијантних решења. На основу добијених редоследа ранг листе или листа, доносилац одлуке се на крају опредељује за једно

од варијантних решења (коначно) које је прво по рангу или за неколико варијантних решења која су најбоља по рангу (сужавање скупа решења). Ако се доносилац одлуке определио за више варијантних решења, тада се она додатно анализирају и по истој методологији поново рангирају. Резултат поновљеног поступка је коначно - најповољније варијантно решење. У случају да није донета коначна одлука, овај вишекритеријумски оптимизациони поступак се понавља са одређеним модификацијама: спровођење додатних истраживања и анализа, генерисање нових варијантних решења и увођење нових критеријума.

Доношењем одлуке, односно избором најповољнијег варијантог решења процес оптимизације се завршава.



Слика 6.4 Активности у поступку оптимизације

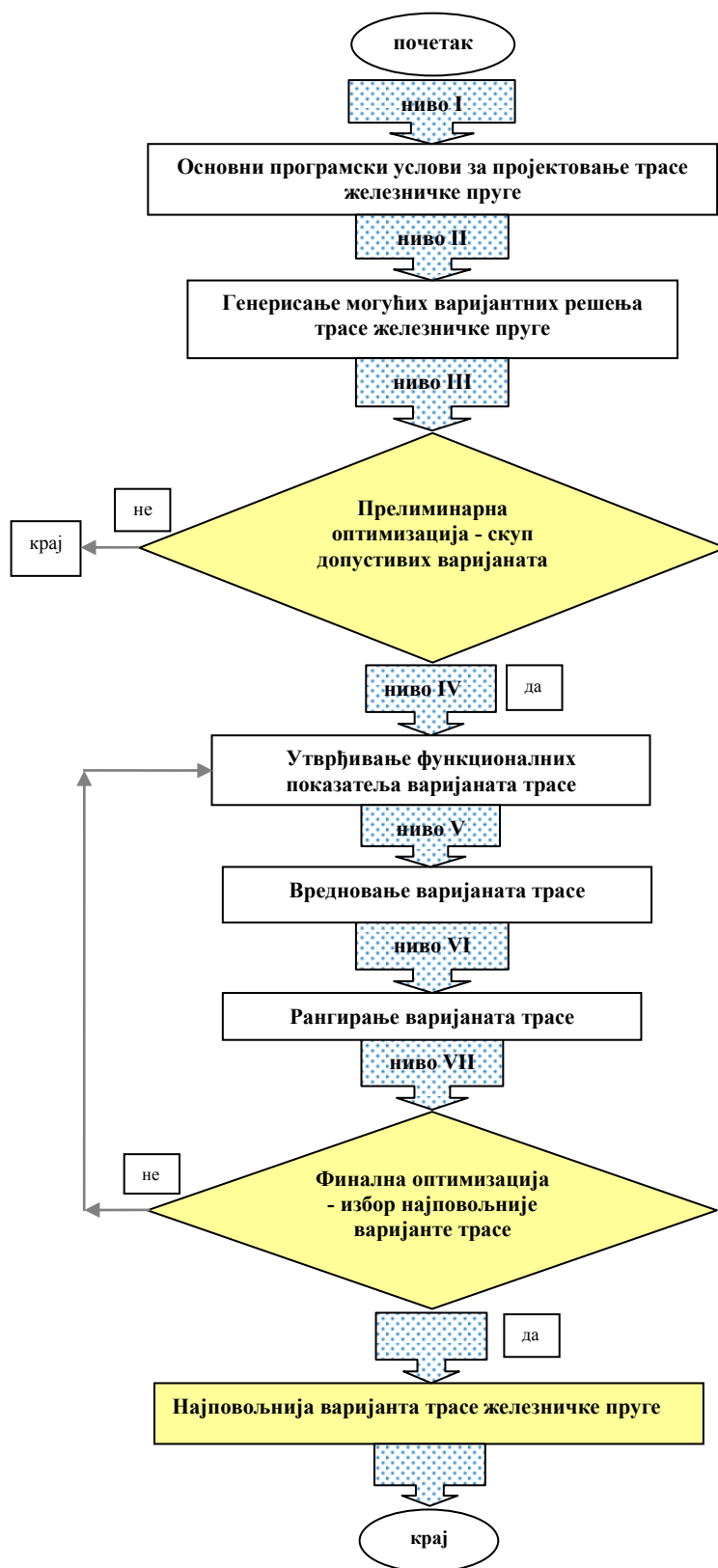
7 МОДЕЛ ЗА ОПТИМИЗАЦИЈУ ТРАСЕ ЖЕЛЕЗНИЧКЕ ПРУГЕ

Свака железничка пруга, као техничко средство железничке инфраструктуре и један од кључних чинилаца организације саобраћаја, представља сложени систем који треба да одговори на низ захтева. Ти захтеви се огледају у могућности обезбеђења довољног капацитета, меродавне брзине вожње, удобног и комфорног превоза, максималне сигурности и безбедности саобраћаја, минималних трошкова изградње и експлоатације, као и минималног утицаја на простор и животну средину. Као што се види, поједини захтеви имају за циљ остваривање што веће вредности (капацитет, безбедност, квалитет превоза) док други теже реализацији што мање вредности (трошкови изградње, трошкови експлоатације, трошкови одржавања, време путовања, утицаји и последице на простор и животну средину). Зато је за планирање и пројектовање овако сложеног система најпогоднија примена оптимизационог поступка као и формулисање и развој оптимизационог модела заснованог на вишекритеријумском одлучивању. Основни циљ стварања модела за оптимизацију, приказаног на сликама 7.1 и 7.2, је да омогући такву синтезу свих елемената датог система која ће дати услове за његову најповољнију реализацију као и оптимално функционисање. Модел се реализује преко следећих карактеристичних нивоа:

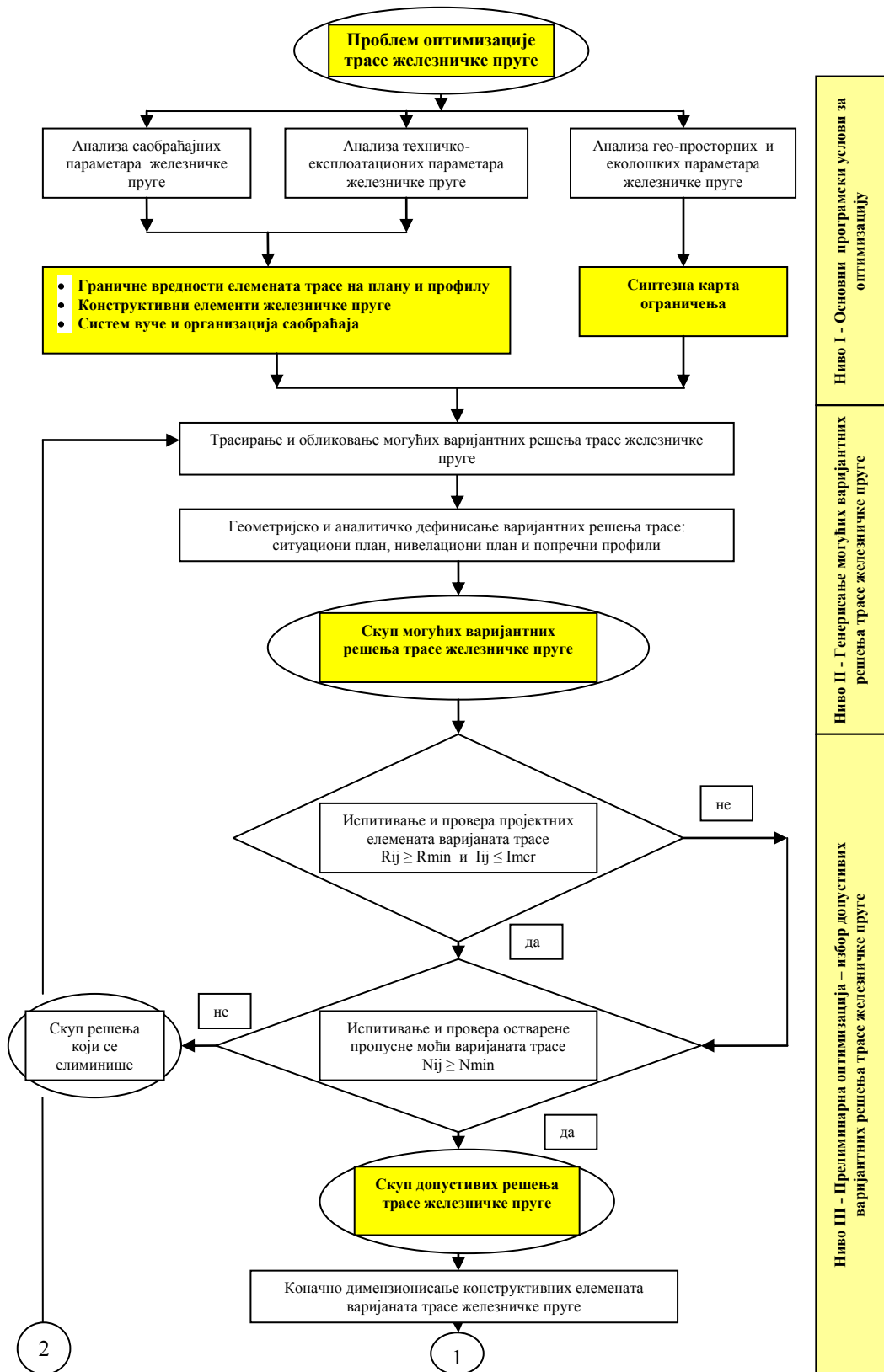
1. *ниво* Основни програмски услови за оптимизацију,
2. *ниво* Генерисање могућих варијантних решења трасе железничке пруге,
3. *ниво* Прелиминарна оптимизација – избор допустивих варијаната трасе,
4. *ниво* Утврђивање функционалних показатеља варијаната трасе,
5. *ниво* Вредновање варијаната трасе,
6. *ниво* Рангирање варијаната трасе,
7. *ниво* Финална оптимизација – избор најповољније трасе железничке пруге.

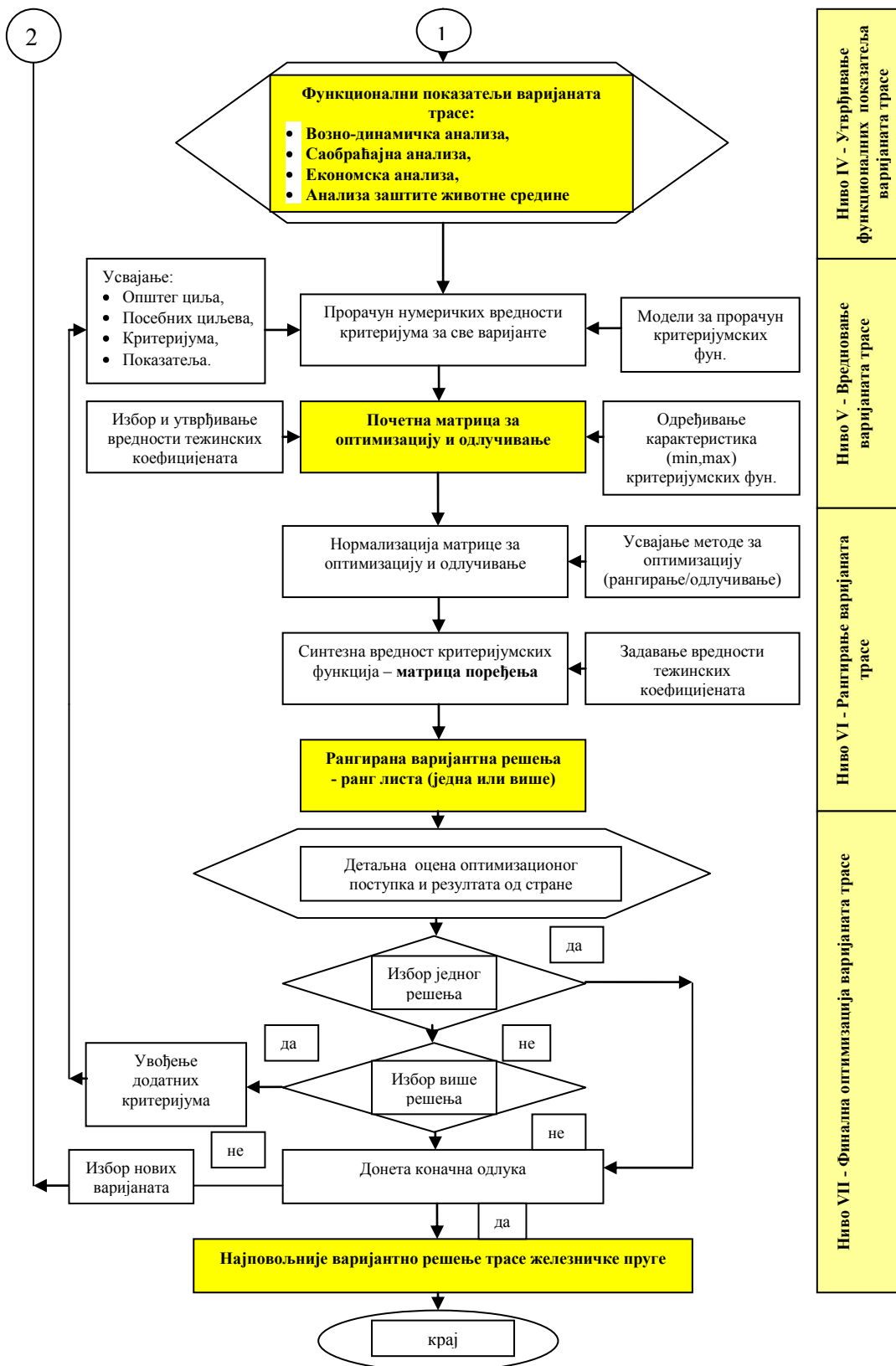
Приказана форма модела и сам ток оптимизационог поступка који се спроводи у оквиру модела, проистекли су из чињенице да железничке пруге припадају скупу дискретних система и да се за њихов опис не може формулисати свеобухватни математички модел, него се за потребе оптимизације морају генерисати алтернативе, односно варијантна решења, трасе железничке пруге. То захтева да се за даљи ток оптимизације трасе железничке пруге примени прво прелиминарна (избор допустивих варијантних решења трасе), а затим и финална оптимизација (избор најповољнијег решења из скупа допустивих варијантних решења) на основу усвојеног општег циља и низа критеријума.

Ово у математичком смислу значи да је за општи усвојени циљ, односно критеријуме и критеријумске функције потребно одредити њихове екстремне вредности, што је сложен поступак и захтева велики број итерација, различитих фаза и нивоа. Сваки наведени карактеристичан ниво у оквиру модела за оптимизацију садржи и низ активности које ће бити разрађене у наредном поглављу.



Слика 7.1 Структура модела за оптимизацију трасе железничке пруге





Слика 7.2 Нивои процеса оптимизације у оквиру модела за оптимизацију трасе железничке пруге

7.1 АЛГОРИТАМ ОПТИМИЗАЦИЈЕ ТРАСЕ ЖЕЛЕЗНИЧКЕ ПРУГЕ

За један објективан поступак оптимизације трасе железничке пруге неопходно је дефинисати и одговарајућу логичку структуру – **алгоритам** процеса оптимизације у оквиру модела за оптимизацију, јер се сваки од наведених нивоа модела реализује кроз низ додатних активности, што показује слика 7.2.

7.1.1 Ниво I – Основни програмски услови за оптимизацију

Основни програмски услови за оптимизацију представљају основу за генерисање могућих варијантних решења трасе, а остварује се преко активности које дефинишу:

- граничне вредности елемената трасе железничке пруге у ситуационом плану и уздужном профилу,
- конструктивне елементе железничке пруге,
- систем вуче и организацију саобраћаја,
- синтезну карту ограничења.

Граничне вредности елемената трасе у плану и профилу, обухватају усвајање: *min* полупречника хоризонталне кривине, облика и дужине прелазне кривине, облика рампе за надвишење, *min* дужине међуправаца и кружне кривине, *max* и *min* нагиба нивелете и *min* полупречника вертикалне кривине. Ове граничне вредности представљају само полазне вредности елемената у поступку формирања и обликовања варијантних решења трасе. Оне се примењују само на местима где синтезна просторна ограничења не дозвољавају примену већих вредности, док су реално примењиве вредности елемената, по правилу, повољније од ових граничних вредности.

Конструктивни елементи железничке пруге, обухватају усвајање: потребног броја колосека и њихов размак, слободног и товарног профила, основних елемената конструкције горњег и доњег строја, сигнално-сигурносних и телекомуникационих уређаја и електровучних постројења (стабилна и електроенергетска).

Систем вуче и организација саобраћаја, обухватају избор и дефинисање: броја службених места и њихов размештај, односно минимално и максимално растојање, минималне корисне дужине станичних колосека, дужине и висине перона, дужине зауставног пута, минималне дужине просторног одсека, начина укрштања пруге са другим саобраћајницама и минималне пропусне моћи.

Синтезна карта ограничења настаје на основу синтезе свих просторних ограничења у подручју где ће се формирати будућа варијантна решења трасе. Ова синтеза има задатак да дефинише повољне, условно повољне и неповољне области за генерисање варијантних решења. Синтезна карта, приказана на слици 7.3 се добија на основу:

- природних услова: топографских, геолошких, морфолошких, хидролошких, хидрографских и климатских карактеристика подручја, као и биљних и животињских станишта,
- намене површина (за становање, за привредне активности, за одмор и рекреацију, за саобраћајну и другу инфраструктуру) и стечених планских обавеза (изграђено, у току градње, генерално или детаљно планирано),
- зона и услова заштите (пољопривредно земљиште по категоријама, грађевинско земљиште, споменици културе, историјско наслеђе, природна добра: национални паркови, резервати и паркови природе који су под заштитом).

Прво се спроводи гео-просторна и еколошка анализа подручја, где ће се трасирати будућа варијантна решења трасе, са циљем регистровања свих наведених услова, планских обавеза и зона заштите. Ова анализа се реализује **GIS технологијом** [47, 59, 104], а наведени елементи се затим уносе у **дигиталне** тематске пројектне подлоге и карте (са истим нивоом тачности) и тако формирају њихово одговарајуће припадајуће подручје. Преклапањем свих издвојених припадајућих подручја, као што то показује слика 7.3, издвајају се повољне, условно повољне и неповољне области за формирање варијантних решења. Након одређивања повољног подручја и реализације осталих активности Основних програмских услова за оптимизацију, прелази се на наредни ниво.

Истраживање просторних ограничења у усвојеном подручју



Слика 7.3 Синтезна карта ограничења

7.1.2 Ниво II – Генерисање могућих варијантних решења трасе железничке пруге

Генерисање могућих варијантних решења трасе железничке пруге је други ниво модела и реализује се преко следећих активности:

На основу општег циља и намене трасе железничке пруге, синтезне карте ограничења и усвојених граничних вредности елемената плана и профила трасе, генеришу-стварају се могућа варијантна решења. Генерисање варијантних решења постиже се варирањем основних **променљивих–параметара** (саобраћајни, технички и експлоатациони) трасе: x_1, x_2, \dots, x_m , где једна комбинација вредности вектора x представља једно варијантно решење V_j .

Променљиве – параметри за генерисање варијантних решења могу бити:

x_1 – категорија железничке пруге,

x_2 – пројектна брзина,

x_3 – геометријски елементи ситуационог плана и уздужног профила,

x_4 – елементи попречног профила,

x_5 – просторни положај трасе,

x_6 – ниво техничке опремљености пруге,

x_7 – систем управљања саобраћајем.

На основу наведених могућих променљивих може се уочити да је број комбинација елемената за генерисање варијантних решења велики, па је и број могућих варијанти веома велики. Међутим, овај скуп решења је ипак могуће сузити, с обзиром да постоји одређена усаглашеност између променљивих, као и потреба да се варијантна решења упоређују на истом нивоу у току процеса оптимизације. Како вредност једне променљиве по правилу условљава вредности других променљивих (категија железничке пруге условљава величину пројектне брзине, а она затим граничне елементе ситуационог плана и уздужног профила), тако да се генерисање неће остварити истовременим варирањем свих приказаних променљивих. Зато се за одређену групу променљивих усвајају исте вредности: иста категорија и брзина, исти ниво опремљености и систем управљања. Тада се генерисање остварује варирањем само техничких променљивих, односно варирањем просторног положаја трасе у односу на природне и створене структуре и варирањем основних пројектних елемената, а то су: број хоризонталних и вертикалних кривина, величине њихових полупречника, број прелома и вредности нагиба нивелете.

За генерисање варијанти сложених система, као што су железничке пруге, не постоји аутоматизован поступак или модел, односно никаква техничка, математичка и рачунарска процедура и правила не могу заменити креативност у стварању варијанти. **Како свака железничка пруга има непоновљиве услове природне средине и окружења, тако формиране варијанте постају уникати без могућности умножавања и понављања.**

Након геомертијског обликовања, односно избора и комбинације пројектних елемената (правци, кружне кривине, прелазне кривине заједно са рампама за надвишење, нагиби нивелете и вертикалне кривине) варијантна решења трасе се даље разрађују, тако што се аналитички дефинишу у све три пројекције: ситуациони план, уздужни профил и попречни профили. Међутим, разрада формираних варијанти у оквиру овог нивоа не завршава се до краја, из разлога што свака генерисана варијанта мора бити **технички допустива**. Оне се овде разрађују до нивоа који је потребан за испитивање њихове допустивости. Након провере и испитивања скупа формираних варијанти, из даљег поступка вредновања и оптимизације биће искључене варијанте са елиминишућим

факторима. Овај проблем се решава на следећем нивоу модела – нивоу прелиминарне оптимизације.

7.1.3 Ниво III – Прелиминарна оптимизација

Свако генерисано варијантно решење V_j се анализира са циљем да се утврди која решења испуњавају унапред постављене услове, а која се односе на пројектне елементе и капацитет трасе железничке пруге. Анализа се састоји у испитивању међусобне усаглашености тока трасе у ситуационом плану, попречним пресецима и уздужном профилу, као и пропусне моћи трасе. Варијантна решења која испуњавају постављене услове, постају допустива решења и она се задржавају за даље разматрање и оптимизацију, док се остала решења елиминишу. Услове које морају да испуне генерисана решења, као што то показује слика 7.2, односе се на:

- *пројектне елементе појединих деоница (7.1), где морају да буду у плану R_{ij} већи, а најмање једнаки са граничним-минималним вредностима R_{min} , а у профилу i_{ij} мањи, а највише једнаки са граничним – максималним вредностима i_{mer} .*

у ситуационом плану: $R_{ij} \geq R_{min}, i = 1, 2, \dots, n$ и $j = 1, 2, \dots, t$ (7.1)

у уздужном профилу: $i_{ij} \leq i_{mer}, i = 1, 2, \dots, n$ и $j = 1, 2, \dots, t$

где је:

R_{ij} – полупречник i -те хоризонталне кривине у оквиру j -тог варијантног решења,

R_{min} – минимална вредност полупречника хоризонталне кривине која је у функцији усвојене пројектне брзине,

i_{ij} – нагиб i -те деонице нивелете у оквиру j -тог варијантног решења,

i_{mer} – максимална вредност нагиба нивелете, која је у функцији масе воза и критичне брзине локомотиве.

- *пропусну моћ појединих деоница (7.2), која мора да буде већа, а најмање једнака задатој минималној вредности.*

$$N_{ij} \geq N_{min}, \quad i = 1, 2, \dots, n \text{ и } j = 1, 2, \dots, t \quad (7.2)$$

где је:

N_{ij} – пропусна моћ i -те ограничавајуће деонице у оквиру j -тог варијантног решења,

N_{min} – задата минимална вредност пропусне моћи трасе која је у функцији усвојене категорије пруге и пројектне брзине.

Овде постоје три могућности:

- оба услова су испуњена, односно генерисана варијанта је допустива, она се задржава и улази у даљи процес оптимизације,
- ако је први услов испуњен а други није, тада генерисана варијанта није допустива, елиминише се и за њу је процес оптимизације завршен,
- ако први услов није испуњен а други јесте, тада је генерисана варијанта допустива, она се задржава и улази у даљи процес оптимизације.

Када је утврђен скуп допустивих варијантних решења трасе, прелази се на даљу разраду ових решења у смислу коначног дефинисања и димензионисања свих конструктивних елемената трасе пруге (конструкција горњег и доњег строја, укључујући инжењерске објекте, опрему пруге и сва преостала постројења за реализацију саобраћаја). Након ових активности, која су у потпуности дефинисала и одредила сва допустива решења трасе, прелази се на следећи ниво модела.

7.1.4 Ниво IV – Утврђивање функционалних показатеља варијаната трасе

Утврђивање функционалних показатеља варијаната трасе је четврти ниво модела, а реализује се преко следећих анализа: возно-динамичких, саобраћајних, економских као и утицаја на животну средину.

Возно-динамичком анализом одређује се:

- потребан обим возног парка,
- време путовања свих категорија возова,
- потрошња енергије и мазива,
- број и структура запосленог особља.

Саобраћајном анализом одређује се:

- капацитет железничке пруге (пропусна моћ),
- типови, број, распоред и капацитет службених места,

- концепт повезивања са другим видовима саобраћаја у мултимодалним саобраћајним терминалима,
- концепција организације саобраћаја (параметри за израду реда возње, технолошки процес рада станица),
- степен безбедности у функцији примењених сигурносних елемената и елемената аутоматизације.

Економском анализом одређује се:

- структура и обим радова за изградњу деоница отворене пруге,
- структура и обим радова за изградњу нових или реконструкцију постојећих службених места,
- структура и обим радова одржавања деоница отворене пруге,
- структура и обим радова одржавања службених места,
- структура и обим потребног возног парка,
- структура и обим постројења вуче,
- структура и обим сигнално-сигурносних и телекомуникационих постројења.

Анализом утицаја на животну средину одређују се:

- деонице трасе где се стварају значајне последице на природне и створене просторне структуре, као последица раздвајања просторних целина и центара активности, заузимања површина, културно - историјског наслеђа,
- деонице трасе где се стварају значајне последице на главне елементе животне средине: тло (загађење и деградација), вода (загађење и промене у режиму), ваздух (загађење), флора и фауна (угроженост и биодиверзитет), клима (промене макро и микро климатских услова) и пејзаж (нарушавање амбијенталних целина),
- деонице трасе где се остварују значајне последице на квалитет живота људи у окружењу (бука, вибрације, електро-магнетна зрачења, визуелна деградација),
- деонице трасе са неопходним техничким мерама за очување постојеће еколошке равнотеже.

Сви утврђени функционални показатељи користе се даље за оцењивање и вредновање варијаната, што је предмет наредног нивоа модела.

7.1.5 Ниво V – Вредновање варијаната трасе

Вредновање варијаната трасе, квантитативно и квалитативно оцењивање варијаната трасе, представља пети ниво модела, а реализује се преко следећих активности:

- **Дефинисање и усвајање општег циља који треба да оствари свака железничка пруга изградњом и експлоатацијом.** Како овај општи циљ обухвата различите аспекте и захтеве (техничке, технолошке, саобраћајне, економске, социјалне и еколошке) тада се он мора разложити на низ посебних циљева и критеријума – критеријумских функција па све до показатеља. Тако се успоставља одговарајући хијерархијски поредак, што показује слика 6.2 и табела 7.1 са листом циљева и критеријума (дефинисана у поглављу 7.2) у сврху добијања нумеричких вредности за оцењивање варијантних решења.
- **Дефинисање модела за прорачун критеријума и критеријумских функција за вредновање и оптимизацију варијаната трасе.** Сам поступак дефинисања ових модела такође је дат у поглављу 7.2.
- **Прорачун нумеричких вредности свих критеријумских функција, на основу утврђених модела.** Ова активност обухвата и одређивање карактеристика критеријумских функција (max или min), као и одређивање њихове релативне важности у дефинисаном хијерархијском поретку, односно избор тежинских коефицијената ω_i , што је приказано у оквиру поглавља 6.4.

Реализацијом свих активности овог нивоа добија се **почетна матрица за оптимизацију и одлучивање**, која је приказана на слици 7.4.

		Критеријуми					
		K_1	K_2	...	K_i	...	K_n
Варијанте	V_1	f_{11}	f_{12}	...	f_{1i}	...	f_{1n}
	V_2	f_{21}	f_{22}	...	f_{2i}	...	f_{2n}

	V_j	f_{j1}	f_{j2}	...	f_{ji}	...	f_{jn}

	V_m	f_{m1}	f_{m2}	...	f_{mi}	...	f_{mn}
		ω_1 <i>max</i>	ω_2 <i>min</i>	...	ω_i <i>max</i>	...	ω_n <i>min</i>

Слика 7.4 Почетна матрица за оптимизацију и одлучивање

где је:

- V_1, V_2, \dots, V_m – допустиве варијанте трасе и $j = 1, 2, \dots, m$,
- K_1, K_2, \dots, K_n – избрани критеријуми за оптимизацију и $i = 1, 2, \dots, n$,
- $f_{11}, f_{22}, \dots, f_{mn}$ – вредности критеријумских функција f_{ji} за сваку варијанту,
- $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ – тежински коефицијенти критеријума за оптимизацију,
- max* или *min* – карактеристике критеријумских функција.

7.1.6 Ниво VI – Рангирање варијаната трасе

Рангирање варијаната трасе је поступак добијања редоследа – ранг листи варијаната трасе, реализује се у оквиру шестог нивоа модела и то преко следећих активности:

- Нормализација почетне матрице за оптимизацију из разлога што су бројне вредности критеријумских функција у општем случају разнородне, односно сви критеријуми нису изражени истим јединицама мере. Облик трансформације зависи од методе (дефинисане у поглављу 6.5) примењене за оптимизацију.
- Уношење вредности тежинских коефицијената (један или више сценарија), као мере значаја сваког појединачног циља и критеријума у хијерархијском низу.

- Одређивање синтезне вредности критеријумске функције (за свако варијантно решење) по свим критеријумима. Синтеза критеријумских функција се врши на основу унапред утврђене релације, што зависи од методе примењене за оптимизацију.
- Формирање матрице поређења.

Након упоређивања, варијанте се рангирају са циљем добијања редоследа – ранг листе. Ако постоји више комбинација вредности релативних тежина, односно више сценарија, тада се приликом рангирања за сваки сценарио добија одговарајућа ранг-листа. Формиране ранг листе варијаната трасе се користе даље за одлучивање, односно за коначну оптимизацију.

7.1.7 Ниво VII – Финална оптимизација

Финална оптимизација је избор најповољније варијанте трасе железничке пруге. Ово је последњи – седми ниво структурног дијаграма модела за оптимизацију трасе железничке пруге и када се доноси одлука о најповољнијој варијанти.

Добијени резултат рангирања, односно редослед (ранг листа или листе) варијантних решења трасе, презентира се доносиоцу одлуке (инвеститор, чланови пројекта за реализацију трасе железничке пруге као и представници корисника датог система). Осим ове презентације, доносилац одлуке се упознаје са документовано образложеним оптимизационим поступком разматраних варијантних решења који садржи: начин на који су генерисана ова решења, хијерархијски поредак критеријума и критеријумских функција, поступак вредновања и рангирања, као и начин формирања саме ранг-листе. Све ове информације имају за циљ да пруже добру документовану основу за одлучивање и доношење одлуке о најповољнијем варијантном решењу. На тај начин се сужава простор за одлучивање и спречава могућност појаве субјективног, интуитивног па чак и политичког утицаја на доношење одлуке. Тада ће све одлуке, које се усвоје у процесу одлучивања, бити документоване, поуздане и непристрасне, а и сам процес одлучивања ће бити објективно изведен.

На основу добијених редоследа ранг-листе или листа, доносилац одлуке се опредељује за једно од варијантних решења (коначно) које је прво по рангу или за неколико варијантних решења која су најбоља по рангу (сужавање скупа решења).

Ако се доносилац одлуке определио за више варијантних решења, тада се она додатно анализирају и по истој методологији поново рангирају. Резултат поновљеног поступка је коначно-најповољније варијантно решење. У случају да није донета коначна одлука, овај вишекритеријумски оптимизациони поступак се понавља са одређеним модификацијама: спровођење додатних истраживања и анализа, генерисање нових варијантних решења или увођење нових критеријума.

Доношењем одлуке, односно избором најповољније варијанте процес оптимизације у оквиру модела се завршава.

7.2 ПОСЕБНИ ЦИЉЕВИ И КРИТЕРИЈУМИ ЗА ОПТИМИЗАЦИЈУ ТРАСЕ ЖЕЛЕЗНИЧКЕ ПРУГЕ

Активности: вредновање, међусобно упоређивање и рангирање допустивих варијаната трасе железничке пруге и избор најповољније варијанте, траже и формирање одговарајућих мерила, односно критеријума K_i ($i=1, \dots, n$) изражених преко критеријумских функција f_i ($i=1, \dots, n$) на основу којих ће се постићи циљ.

Критеријуми за избор најповољније варијанте утврђују се на основу општег циља оптимизације трасе железничке пруге. Општи циљ ове оптимизације може се дефинисати као: **планирање, изградња и експлоатација функционалне, безбедне, економичне и рентабилне трасе железничке пруге, која остварује унапред тражени квалитет превозних услуга у складу са захтевима корисника, која се уклапа у просторни развој подручја и прихватљива је у погледу очувања животне средине.**

У оквиру нивоа: „Вредновање варијаната трасе“ у моделу за оптимизацију се врши процена у којој су мери испуњени захтеви дефинисани кроз општи циљ оптимизације. Ова процена испуњења захтева може се математички дефинисати као тражење екстремума функције општег циља. Међутим, како општи циљ обухвата различите аспекте (техничке, технолошке, економске, социјалне и еколошке) и тражи балансирање различитих и супротних чинилаца, то у математичком смислу захтева да се он разложи на низ посебних циљева, критеријума и показатеља са разлогом добијања нумеричких вредности, односно

појединачних критеријумских функција. Ово разлагање приказано је у табели 7.1 где се лако уочавају издвојени посебни циљеви:

1. *посебни циљ* **инвестициона улагања,**
2. *посебни циљ* **трошкови одржавања и управљања,**
3. *посебни циљ* **квалитет саобраћајне услуге,**
4. *посебни циљ* **последнице на просторни развој,**
5. *посебни циљ* **утицај на животну средину.**

Ако се мало боље сагледају ови циљеви онда је јасно да циљ 1 има економско-технички карактер, циљ 2 економско-експлатациони, циљ 3 саобраћајно-технолошки, док циљеви 4 и 5 имају еколошки карактер. Ове циљеве дефинишу критеријуми K_i као и критеријумске функције f_i , који ће у даљем тексту овог поглавља бити дефинисани и приказани. Листа критеријума у оквиру табеле 7.1 није коначна, односно може се допунити новим критеријумима или смањити, ако то захтевају конкретни услови подручја кроз које траса железничке пруге пролази. Ово се, првенствено односи на критеријуме који дефинишу циљеве 4 и 5.

Табела 7.1 Листа циљева, критеријума и критеријумских функција за оптимизацију трасе железничке пруге

	Циљеви	Критеријуми	Критеријумске функције
Економско-технички- експлоатациони	ИНВЕСТИЦИОНА УЛАГАЊА	K_{11} Инвестициона улагања за изградњу деоница отворене пруге K_{12} Инвестициона улагања за изградњу службених места K_{13} Инвестициона улагања за постројења електричне вуче K_{14} Инвестициона улагања за СС и ТК уређаје и опрему	$f_1 = \sum K_{1i} \rightarrow \min \quad (i=1, \dots, 4)$ (n.j.)
	ТРОШКОВИ ОДРЖАВАЊА И УПРАВЉАЊА	K_{21} Трошкови одржавања отворене пруге и службених места K_{22} Трошкови одржавања постројења електричне вуче K_{23} Трошкови одржавања СС и ТК уређаја и опреме K_{24} Трошкови за организацију саобраћаја и управљање	$f_2 = \sum K_{2i} \rightarrow \min \quad (i=1, \dots, 4)$ (n.j./god.)
Саобраћајни	КВАЛИТЕТ САОБРАЋАЈНЕ УСЛУГЕ	<i>Времена путовања</i> K_{31} Укупно време возње између службених места K_{32} Укупно време бављења возова у службеним местима <i>Капацитет трасе железничке пруге</i> K^*_{31} Пропусна моћ трасе железничке пруге	$f_3 = \sum K_{3i} \rightarrow \min \quad (i=1, 2)$ (h/god.) $f^*_3 = \sum K^*_{3i} \rightarrow \max \quad (i=1)$ (пари возова)
	ПОСЛЕДИЦЕ НА ПРОСТОРНИ РАЗВОЈ	K_{41} Очување просторних целина K_{42} Заузимање површина K_{43} Очување културно-историјског и природног наслеђа K_{44} Последице раздвајања	$f_4 = \sum K_{4i} \rightarrow \min \quad (i=1, \dots, 4)$ (бодови)
Еколошки	УТИЦАЈ НА ЖИВОТНУ СРЕДИНУ	K_{51} Утицај буке и вибрација од саобраћаја K_{52} Утицај трасе железничке пруге на земљиште K_{53} Утицај трасе железничке пруге на воде K_{54} Утицај трасе железничке пруге на флору и фауну K_{55} Утицај трасе железничке пруге на климу и микроклиму K_{56} Утицај трасе железничке пруге на амбијенталне целине-пејзаж	$f_5 = \sum K_{5i} \rightarrow \min \quad (i=1, \dots, 6)$ (бодови)

7.2.1 Модел за одређивање критеријума *Инвестициона улагања*

Вредност инвестиционих улагања за изградњу нових или реконструкцију постојећих траса железничке пруге зависи од примењених техничких параметара и елемената траса (категорија пруге, врста саобраћаја, број и тип конструкције колосека, распоред и врста службених места), од саобраћајно-експлоатационих параметара (обим и структура саобраћаја, брзина кретања возова), као и техничке опремљености пруге (сигнално-сигурносна и телекомуникациона опрема и контактна мрежа). На основу пројектне документације (ситуационог плана, уздужног профила и карактеристичних попречних профила) железничке пруге, врши се процена (предмер) обима предвиђених радова који ће се јавити у току грађења (реконструкције) и одређује се предрачунска вредност тих радова по утврђеној методологији [42, 83, 91]. Тако се добијају укупна инвестициона улагања за изградњу и опрему нове или реконструкцију постојеће железничке пруге. Предмер и предрачуна вредност радова се спроводе у процесу одређивања функционалних елемената трасе и саставни су део пројектне документације. Инвестициона улагања у овом моделу се дефинишу преко критеријума K_{1i} ($i=1, \dots, 4$), а они обухватају инвестиције за:

- изградњу деоница отворене пруге (K_{11}),
- изградњу станица и осталих службених места (K_{12}),
- набавку и уградњу постројења електричне вуче (K_{13}),
- набавку и уградњу СС и ТК уређаја и опреме (K_{14}).

Критеријумска функција f_1 износи (7.3):

$$f_1 = \sum_i K_{1i} = \sum_k I_k = I_{op} + I_{st} + I_{ev} + I_{ss-tk}, \quad [n \cdot j.] \quad (7.3)$$

где је:

K_{1i} – критеријуми за дефинисање критеријумске функције f_1 ,

I_k – појединачне вредности инвестиционих улагања потребне за стабилна постројења железничке пруге,

I_{op} – инвестициона улагања за изградњу деоница отворене пруге,

I_{st} – инвестициона улагања за изградњу станица и осталих службених места,

- I_{ev} – инвестициона улагања за постројења електричне вуче,
 I_{ss-tk} – инвестициона улагања за СС и ТК уређаје и опрему.

Критеријумска функција f_I има економско-технички карактер и у табели 7.1 је означена са min , односно тежи се да инвестициона улагања буду минималана, док се вредности наведених инвестиционих улагања I_k ($k=1, \dots, 4$) исказују у новчаним јединицама и добијају се на следећи начин:

Инвестициона улагања за изградњу деоница отворене пруге K_{I1} се добијају сумирањем инвестиција за позиције грађевинских радова који ће се јавити у току изградње ових деоница (7.4):

$$I_{op} = I_{gs} + I_{ds} + I_{m-t} + I_e + I_r = \sum_i q_{opi} c_{opi}, \quad (i = 1, \dots, n) \quad [n.j.] \quad (7.4)$$

где је:

- I_{gs} – инвестициона улагања у горњи строј железничке пруге,
 I_{ds} – инвестициона улагања у доњи строј железничке пруге,
 I_{m-t} – инвестициона улагања у мостовске и тунелске конструкције,
 I_e – инвестициона улагања за експропријацију земљишта,
 I_r – инвестициона улагања за реконструкцију саобраћајне инфраструктуре и уређење речних токова,
 q_{opi} – обим i -те позиције грађевинских радова за изградњу деоница отворене пруге,
 c_{opi} – јединична цена i -те позиције грађевинских радова за изградњу деоница отворене пруге.

Инвестициона улагања за изградњу станица и осталих службених места K_{I2} се добијају сумирањем инвестиција за позиције грађевинских радова који ће се јавити у току изградње (реконструкције) станичних постројења (7.5):

$$I_{st} = I_{gs} + I_{ds} + I_{ost} + I_{pp} + I_e = \sum_i q_{sti} c_{sti}, \quad (i = 1, \dots, n) \quad [n.j.] \quad (7.5)$$

где је:

- I_{gs} – инвестициона улагања у горњи строј службених места,
 I_{ds} – инвестициона улагања у доњи строј службених места,
 I_{ost} – инвестициона улагања за изградњу (реконструкцију) објеката у станици (зграде, магацини, перони, рампе, платои и др.),

- I_{pp} – инвестициона улагања за колосечне везе са прикључним пругама,
- I_e – инвестициона улагања за експропријацију земљишта,
- q_{sti} – обим i -те позиције грађевинских радова за изградњу (реконструкцију) службених места,
- c_{sti} – јединична цена i -те позиције грађевинских радова за изградњу (реконструкцију) службених места.

Инвестициона улагања за постројења електричне вуче K_{13} се добијају сумирањем инвестиција за одређене позиције радова на формирању ових постројења и то у складу са њиховим техничким карактеристикама (7.6):

$$I_{ev} = I_{spev} + I_{peep} + I_{ospev} = \sum_i q_{evi} c_{evi}, \quad (i = 1, \dots, n) \quad [n.j.] \quad (7.6)$$

где је:

- I_{spev} – инвестициона улагања за стабилна постројења електричне вуче,
- I_{peep} – инвестициона улагања за електроенергетска постројења,
- I_{ospev} – инвестициона улагања за објекте за одржавање ових постројења,
- q_{evi} – обим i -те позиције радова на изградњи постројења за електричну вучу,
- c_{evi} – јединична цена i -те позиције радова на изградњи постројења за електричну вучу.

Инвестициона улагања за сигнално-сигурносне и телекомуникационе уређаје и опрему K_{14} се добија сумирањем инвестиција за одређене позиције радова на формирању ових уређаја и опреме и то у складу са њиховим техничким карактеристикама (7.7):

$$I_{ss-tk} = I_{ss} + I_{tk} = \sum_i q_{ss-tki} c_{ss-tki}, \quad (i = 1, \dots, n) \quad [n.j.] \quad (7.7)$$

где је:

- I_{ss} – инвестициона улагања за набавку и уградњу СС уређаја и опреме (унутрашњи и спољни релејни уређаји),

- I_{tk} – инвестициона улагања за набавку и уградњу ТК уређаја и опреме (кабловска постројења, системи радио веза, радио везе),
- q_{ss-tk} – обим i -те позиције радова на уградњи СС и ТК уређаја и опреме,
- c_{ss-tki} – јединична цена i -те позиције радова на уградњи СС и ТК уређаја и опреме.

7.2.2 Модел за одређивање критеријума *Трошкови одржавања и управљања*

Трошкови одржавања и управљања трасе железничке пруге деле се на: фиксне и променљиве трошкове. Фиксни трошкови не зависе од обима саобраћаја возова и обухватају трошкове одржавања железничке инфраструктуре и трошкове плата особља за регулисање и извршење планираног обима саобраћаја. Променљиви трошкови, зависе од обима саобраћаја и обухватају: трошкове текућег одржавања теретних и путничких возила, амортизацију и осигурање кола и локомотива, трошкове потрошње енергије и мазива. Параметри који утичу на ове трошкове су: дужина и технички елементи трасе, квалитет уграђеног материјала у горњи и доњи строј пруге, СС и ТК и опрему, организација саобраћаја, врста вуче и обим саобраћаја, као и сама опрема пруге [12, 98]. У овом моделу се трошкови одржавања и управљања дефинишу преко критеријума K_{2i} ($i=1, \dots, 4$), а они обухватају трошкове:

- за одржавање пруга, станица и осталих службених места (K_{21}),
- за одржавање постројења за електричну вучу (K_{22}),
- за одржавање сигнално-сигурносних и телекомуникационих уређаја и опреме (K_{23}),
- организације саобраћаја и управљања (K_{24}).

Критеријумска функција f_2 износи (7.8):

$$f_2 = \sum_i K_{2i} = \sum_k T_k = T_{ops} + T_{oev} + T_{oss-tk} + T_{osu} \quad [n.j./god.] \quad (7.8)$$

где је:

K_{2i} – критеријуми за одређивање критеријумске функције трошкова одржавања и управљања f_2 ,

- T_k – појединачне вредности трошкова за одржавање стабилних постројења и пратећих садржаја железничке пруге,
- T_{ops} – трошкови за одржавање пруге, станица и осталих службених места,
- T_{oev} – трошкови за одржавање постројења електричне вуче,
- T_{oss-tk} – трошкови за одржавање сигнално-сигурносних и телекомуникационих уређаја и опреме,
- T_{osu} – трошкови организације саобраћаја и управљања.

Критеријумска функција f_2 има економско-експлоатациони карактер и у табели 7.1 означена је са *min*, односно тежи се да ови трошкови буду минимални, док су њихове вредности T_k ($k=1, \dots, 4$) исказане у новчаним јединицама на годишњем нивоу, односно (*n.j./god.*) и добијају на следећи начин:

Трошкови одржавања пруге, станица и осталих службених места K_{21} се добијају сумирањем трошкова за позиције радова за редовно и инвестиционо одржавање горњег и доњег строја пруге и објеката у овим службеним местима (7.9):

$$T_{ops} = T_{riogs} + T_{riods} = \sum_i q_{opsi} c_{opsi}, \quad (i = 1, \dots, n) \quad [n.j.] \quad (7.9)$$

где је:

- T_{riogs} – трошкови за редовно и инвестиционо одржавање горњег строја,
- T_{riods} – трошкови за редовно и инвестиционо одржавање доњег строја (земљани труп, инжењерске конструкције, објекти у станицама),
- q_{opsi} – обим i -те позиције радова на одржавању пруге, станица и осталих службених места,
- c_{opsi} – јединична цена i -те позиције радова на одржавању пруге, станица и службених места.

Трошкови одржавања постројења електричне вуче K_{22} се добијају сумирањем трошкова за позиције радова на редовном и инвестиционом одржавању стабилних и погонских електроенергетских постројења (7.10):

$$T_{oev} = T_{riospev} + T_{riodpeep} = \sum_i q_{oevi} c_{oevi}, \quad (i = 1, \dots, n) \quad [n.j.] \quad (7.10)$$

где је:

$T_{riospev}$ – редовно и инвестиционо одржавање стабилних постројења електричне вуче,

$T_{riopeep}$ – редовно и инвестиционо одржавање погонских електроенергетских постројења,

q_{oevi} – обим i -те позиције радова на одржавању постројења електричне вуче,

c_{oevi} – јединична цена i -те позиције радова на одржавању постројења електричне вуче.

Трошкови одржавања сигнално-сигурносних и телекомуникационих уређаја и опреме K_{23} се добијају сумирањем трошкова за позиције радова на редовном и инвестиционом одржавању ових уређаја и опреме (7.11):

$$T_{oss-tk} = T_{rioss} + T_{riotk} = \sum_i q_{oss-tki} c_{oss-tki}, \quad (i = 1, \dots, n) \quad [n.j.] \quad (7.11)$$

где је:

T_{rioss} – редовно и инвестиционо одржавање сигнално-сигурносних уређаја и опреме,

T_{riotk} – редовно и инвестиционо одржавање телекомуникационих уређаја и опреме,

$q_{oss-tki}$ – обим i -те позиције радова на одржавању сигнално-сигурносних и телекомуникационих уређаја и опреме,

$c_{oss-tki}$ – јединична цена i -те позиције радова на одржавању сигнално- сигурносних и телекомуникационих уређаја и опреме.

Трошкови за организацију саобраћаја и управљање K_{24} се добијају сумирањем трошкова рада особља и управе, као и трошкова погонске енергије и мазива (7.12):

$$T_{osu} = T_{ro} + T_{ru} + T_{pem} =$$

$$= \sum_i n_{roi} c_{roi} + \sum_i n_{rui} c_{rui} + \sum_i n_{pemi} c_{pemi}, \quad (i = 1, \dots, n) \quad [n.j.] \quad (7.12)$$

где је:

- T_{ro} – трошкови рада особља (локомотивско, возопратно, контрола и одржавање),
- T_{ru} – трошкови управе (секције, радне јединице, заједничке службе предузећа),
- T_{pem} – трошкови потрошње погонске енергије и мазива,
- n_{roi} – ефективно време рада i -те, категорије особља у реализацији саобраћаја,
- c_{roi} – јединична цена рада i -те категорије особља у реализацији саобраћаја,
- n_{rui} – ефективно време рада i -те категорије особља управе,
- c_{rui} – јединична цена рада i -те категорије особља управе,
- n_{pemi} – количина утрошене погонске енергије ($i=1$), односно мазива ($i=2$),
- c_{pemi} – јединична цена погонске енергије ($i=1$), као и мазива ($i=2$).

7.2.3 Модел за одређивање критеријума *Квалитет саобраћајне услуге*

Квалитет саобраћајне услуге се у овом моделу дефинише преко критеријума K_{3i} ($i=1,2$) и K^*_{3i} ($i=1$), односно преко времена путовања и капацитета трасе железничке пруге. Како ови критеријуми имају различите димензије, тада се у процесу вредновања њихове вредности, као и вредности одговарајућих критеријумских функција не могу сумирати, већ се они у процес оптимизације укључују као независни критеријуми са одговарајућим функцијама.

Модел за одређивање критеријума *Време путовања*

Време путовања се дефинише преко критеријума K_{3i} ($i=1,2$), који обухватају:

- укупно време вожње возова између службених места (K_{31}),
- укупно време бављења возова у службеним местима (K_{32}).

Критеријумска функција f_3 износи (7.13):

$$f_3 = \sum_i K_{3i} = \sum_i T_i = t_{vv} + t_{vb} \quad [h/god.] \quad (7.13)$$

где је:

K_{3i} – критеријуми за одређивање критеријумске функције времена путовања f_3 ,

T_i – појединачне вредности времена које одређују време путовања возова ($i=1, 2$),

t_{vv} – укупно време возње између службених места за све категорије возова,

t_{vb} – укупно време бављења свих категорија возова у службеним местима.

Критеријумска функција f_3 има саобраћајно-технолошки карактер и у табели 7.1 је означена са *min*, односно тежи се да време путовања свих категорија возова буде минимално. Нумеричке вредности наведених временских показатеља исказују се на годишњем нивоу, односно (*час/год.*) и на основу технолошких карактеристика саме трасе железничке пруге, саобраћајне анализе и усвојеног броја и распореда локација службених места и дефинише се на следећи начин:

Укупно време возње између службених места K_{3i} се добија сумирањем чистих возних времена између службених места и додатних времена за полазак и заустављање за сваку категорију возова (7.14):

$$t_{vv} = \sum_i \sum_j \left(\frac{L_i}{V_{ij}} + t_{pij} + t_{zij} \right) \quad [h/god.] \quad (7.14)$$

где је:

n – број службених места ($i=1, 2, \dots, n$),

m – категорије возова ($j=1, 2, \dots, m$),

$n-1$ – број међустаничних растојања,

L_i – дужина i -те деонице трасе железничке пруге између службених места,

V_{ij} – одговарајућа брзина j -те категорије воза на i -тој деоници трасе железничке пруге између службених места,

t_{pij} – допунско време за полазак j -те категорије воза на i -тој деоници трасе железничке пруге између службених места,

t_{zij} – допунско време за заустављање j -те категорије воза на i -тој деоници трасе железничке пруге између службених места.

Укупно време бављења возова у службеним местима K_{32} се добија сумирањем времена бављења возова свих категорија из саобраћајних и комерцијалних потреба у успутним службеним местима (7.15):

$$t_{vb} = \sum_i \sum_j (t_{vbsij} + t_{vbkij}) \quad [h/god.] \quad (7.15)$$

где је:

n – број службених места ($i=1,2,\dots,n$),

m – категорије возова ($j=1,2,\dots,m$),

t_{vbsij} – време бављења j -те категорије воза у i -том успутном службеном месту из саобраћајних потреба,

t_{vbkij} – време бављења j -те категорије воза у i -том успутном службеном месту из комерцијалних потреба.

Модел за одређивање критеријума *Капацитет трасе железничке пруге*

Капацитет трасе железничке пруге одређује пропусна моћ трасе, а то је максималан број пари возова или број возова који се пропусти у јединици времена. Пропусна моћ трасе железничке пруге зависи од плана и профила трасе, начина организације саобраћаја, времена вожње возова, станичних интервала, интервала слеђења и од броја колосека у станицама. За прорачун пропусне моћи у овом моделу користи се методологија UIC-а, односно Метода UIC 406 [7, 13]. Капацитет трасе железничке пруге, односно пропусна моћ трасе се у овом поретку дефинише преко критеријума K^*_{3i} ($i=1$), као и преко критеријумске функције f^*_3 (7.16):

$$f^*_3 = K^*_{3i} = N \quad [\text{број пари возова или број возова у јед. времена}] \quad (7.16)$$

где је:

K^*_{3i} – критеријум за одређивање критеријумске функције пропусне моћи трасе железничке пруге f^*_3 ,

N – пропусна моћ трасе железничке пруге, односно број пари возова или број возова у јединици времена.

Критеријумска функција f^*_3 има саобраћајно–технолошки карактер и у табели 7.1 је означена са *max*, односно тежи се да пропусна моћ трасе железничке пруге буде максимална, док се њена нумеричка вредност исказује у квантитативно-техничким јединицама (*број пари возова или број возова у јединици времена*) и дефинише се према (7.17):

$$\begin{aligned} \text{за једноколосечне пруге:} \quad N &= \frac{T}{T_c} \text{ [број пари возова]} \\ \text{за двоколосечне пруге:} \quad N &= \frac{T}{I} \text{ [број возова]} \end{aligned} \quad (7.17)$$

где је:

T – период времена за који се прорачунава пропусна моћ,
 T_c – период графикана,
 I – интервал слеђења возова на ограничавајућем-меродавном просторном размаку.

Вредност критеријумске функције f^*_3 најпрецизније може да се добије, што је истакнуто у многим радовима [13, 14] на основу симулационог модела. За потребе овог рада коришћен је симулациони модел базиран на Методи UIC 406 [94].

7.2.4 Модел за одређивање критеријума *Последице на просторни развој*

Изградња сваке железничке пруге ствара значајне последице на природне и створене структуре подручја и окружења кроз који пролази, а узрок овоме су геоморфолошке карактеристике и елементи саме трасе. Ове настале последице ће имати утицаја на даљи просторни развој датог окружења и подручја, односно уопште на валоризацију датог простора [77, 78, 83]. Последице трасе железничке пруге на просторни развој се у овом моделу дефинишу преко критеријума K_{4i} ($i=1, \dots, 4$), а они процењују следеће последице:

- очување просторних целина (K_{41}),
- заузимање површина (K_{42}),
- културно - историјско наслеђе (K_{43}),
- раздвајање центара активности (K_{44}).

Критеријумска функција f_4 износи (7.18):

$$f_4 = \sum_i K_{4i} = \sum_k P_k = P_{opc} + P_{zp} + P_{kipn} + P_{pr} \text{ [бодови]} \quad (7.18)$$

где је:

K_{4i} – критеријуми за одређивање критеријумске функције последица на просторни развој f_4 ,

P_k – појединачне вредности последица трасе железничке пруге на просторни развој ($k=1, \dots, 4$),

P_{opc} – очување просторних целина (становање, привредне активности и одмор и рекреација),

P_{zp} – заузимање површина (пољопривредно и грађевинско земљиште),

P_{kipn} – очување културно-историјског и природног наслеђа (споменици, природна добра под заштитом),

P_{pr} – последице раздвајања центара активности.

Критеријумска функција f_4 има еколошки карактер и у табели 7.1 означена је са *min*, односно тежи се да последице трасе железничке пруге на просторни развој буду минималне. Нумеричке вредности наведених последица исказују се преко бодова, који се добијају из ординарне скале на следећи начин:

Очување просторних целина K_{41} дефинише однос трасе железничке пруге према:

- урбаним подручјима (за становање, за привредне активности, за одмор и рекреацију),
- саобраћајној и другој инфраструктури (постојеће железничке пруге, путеви, нафтоводи и гасоводи).

Добија се сумирањем дужина трасе која ће пресецати урбана подручја као и дужина инфраструктуре за реконструкцију. Ове дужине се преко ординарне скале претварају у бодове (*од 1 до 10*), што је приказано на слици 7.5, тако да се:

- *1 бод* додељује, ако траса не пресеца урбана подручја, односно ако нема инфраструктуре за реконструкцију,

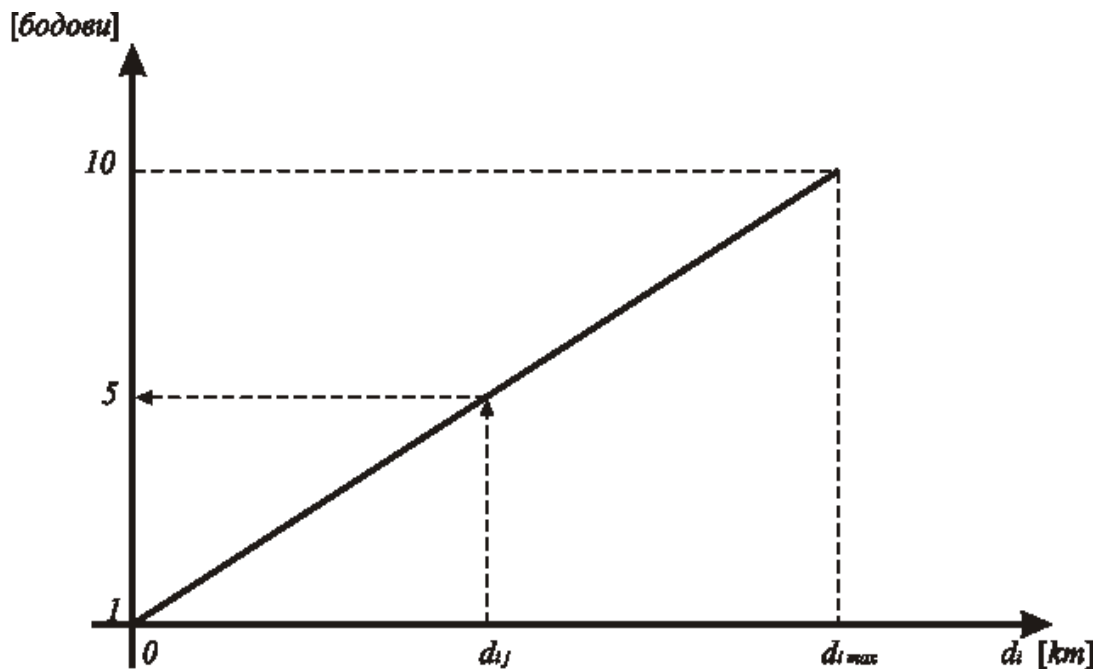
- 10 бодова додељује, ако траса има максималну дужину пресецања урбаних подручја, односно максималну дужину инфраструктуре за реконструкцију (најнеповољније варијантно решење трасе).

Тада се последице очувања просторних целина добија као сума (7.19):

$$P_{opc} = \sum_i d_i , \quad (i = 1, \dots, 7) \quad [\text{бодови}] \quad (7.19)$$

где је:

- d_1 – укупна дужина трасе пруге у (km) која пресеца подручја за становање исказана бодовима,
- d_2 – укупна дужина трасе пруге у (km) која пресеца подручја за привредне активности исказана бодовима,
- d_3 – укупна дужина трасе пруге у (km) која пресеца подручја за одмор и рекреацију исказана бодовима,
- $d_{4-5-6-7}$ – укупна дужина постојеће пруге или пута или нафтовода или гасовода за реконструкцију у (km) исказана бодовима.



Слика 7.5 Однос трасе железничке пруге према просторним целинама

Заузимање површина K_{42} дефинише однос трасе према :

- пољопривредном земљишту са једногод. културама (по бонитету I, II, III, IV),
- земљишту са вишегодишњим културама (шуме, воћњаци, виногради),
- грађевинском земљишту (изграђено, планирано),

а добија се сумирањем наведених површина земљишта које ће заузети пружни појас изградњом трасе железничке пруге. Ове површине се преко ординарне скале претварају у бодове (од 1 до 10), што је приказана на слици 7.6, тако што се:

- 1 бод додељује, ако пружни појас трасе не заузима наведена земљишта,
- 10 бодова додељује, ако пружни појас трасе заузима максималну површину наведених земљишта (најнеповољније варијантно решење трасе).

Тада се последица заузимања површина добија као сума (7.20):

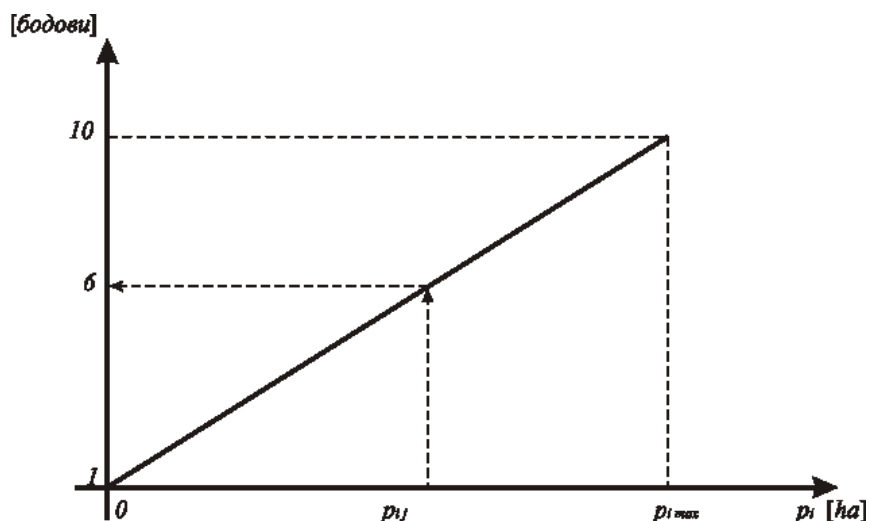
$$P_{zp} = \sum_i p_i, \quad (i = 1, \dots, 3) \quad [\text{бодови}] \quad (7.20)$$

где је:

p_1 – укупна површина пољопривредног земљишта у (ha) по бонитету које заузима пружни појас исказана бодовима,

p_2 – укупна површина земљишта са вишегодишњим културама у (ha) које заузима пружни појас исказана бодовима,

p_3 – укупна површина грађевинског земљишта у (ha) које заузима пружни појас исказана бодовима.



Слика 7.6 Однос трасе железничке пруге према површинама различите намене

Очување културно-историјског и природног наслеђа K_{43} дефинише однос трасе железничке пруге према:

- заштићеним историјским споменицима и споменицима културне баштине,
- природним добрима (национални парк, парк природе, резервати природе) који су под заштитом),

а добија се сумирањем удаљености трасе од заштићених комплекса, као и површине комплекса које заузима пружни појас. Ове удаљености и површине се преко ординарне скале претварају у бодове (од 1 до 10), што је приказано на слици 7.7, тако што се:

- 1 бод додељује, ако је траса удаљена најмање 1,5 km (гранична удаљеност где се не осећа штетан утицај буке и вибрација од саобраћаја) од споменика,
- 10 бодова додељује, ако траса пруге пролази поред самог споменика,

Односно:

- 1 бод додељује, ако траса не пресеца комплексе природног добра,
- 10 бодова додељује, ако траса заузима максималну површину комплекса природног добра (најнеповољније варијантно решење трасе).

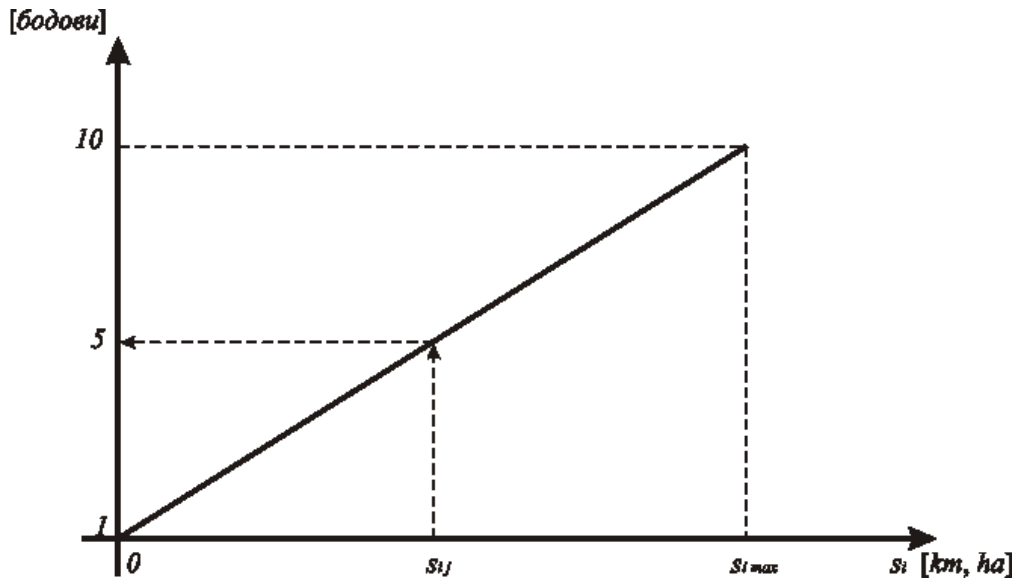
Тада се последице очувања културно-историјског и природног наслеђа добијају као сума (7.21):

$$P_{kipn} = \sum_i s_i, (i = 1, 2) \text{ [бодови]} \quad (7.21)$$

где је:

s_1 – укупна удаљеност заштићених културно-историјских споменика у (km) од трасе исказана бодовима,

s_2 – укупна површина природних добара у (ha) које заузима пружни појас исказана бодовима.



Слика 7.7 Однос трасе железничке пруге према културно-историјском и природном наслеђу

Последице раздвајања K_{44} дефинише степен раздвајања подручја и целина, који ће настати изградњом трасе железничке пруге, као што су:

- центри активности - гравитациона подручја (подручје становања од привредних активности, пољопривредна подручја као и подручја за одмор и рекреацију од насељених места),
- просторно – функционалне целине (јединствени комплекси обрадивих површина или под шумом).

На основу синтезне карте ограничења, утврђују се деонице трасе где долази до нарушавања већ формираних и устаљених веза између горе наведених подручја, што има за последицу смањења приступачности тим садржајима, као и деонице трасе где она пресеца јединствене комплексе површина. Тада се успоставља однос између укинутих и новоформираних веза између подручја, као и однос површина целина које се пресецају и даље преко ординарне скале претварају у бодове (од 1 до 10), што је приказано на сликама 7.8 и 7.9, тако што се:

- 1 бод додељује, ако је однос будућих и постојећих веза ≥ 1 што значи да се повећала, односно остала иста приступачност садржајима који су раздвојени,
- 10 бодова додељује, ако је однос будућих и постојећих веза = 0, што значи да не постоји прелаз преко трасе који би повезао раздвојене садржаје.

Односно:

- 1 бод додељује, ако траса не пресеца јединствени комплекс,
- 10 бодова додељује, ако је однос површине раздвојеног дела и целокупног комплекса максималан (најнеповољније варијантно решење трасе).

Тада се укупна последица раздвајања добија сумирањем на начин (7.22):

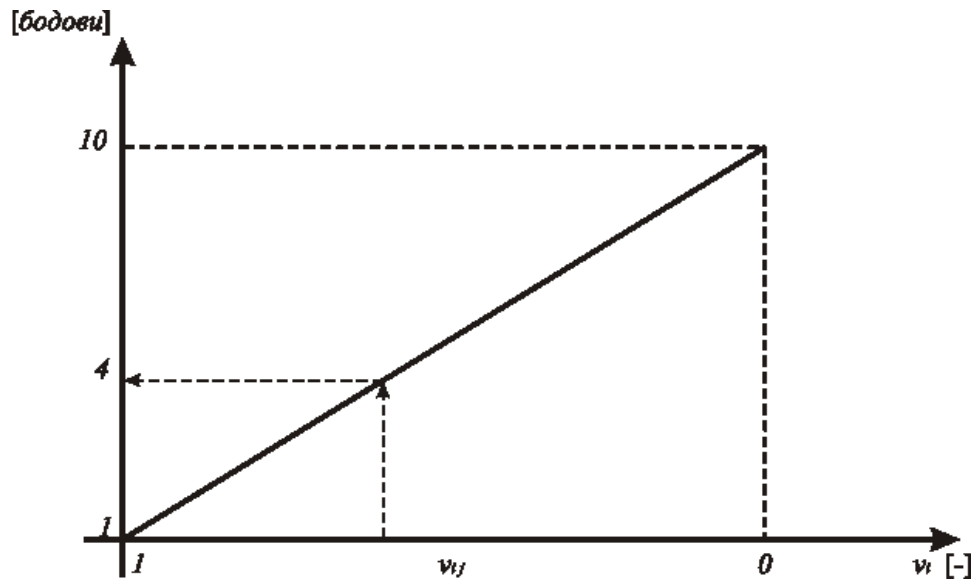
$$P_{pr} = \sum_i v_i + \sum_i p_i \quad [\text{бодови}] \quad (7.22)$$

где је:

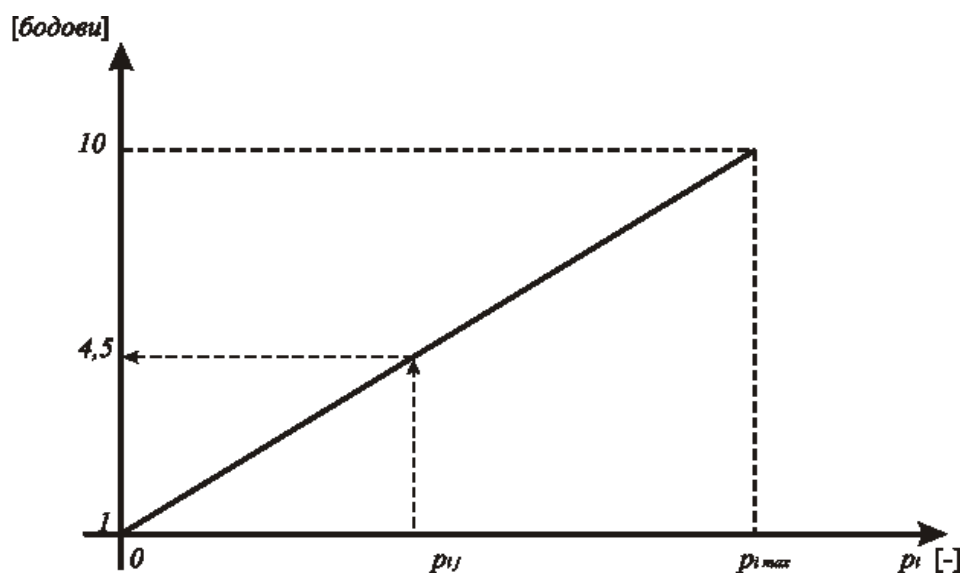
i – деоница трасе ($i = 1, \dots, n$),

v_i – однос будућих и постојећих веза између подручја и центара активности исказана бодовима,

p_i – однос површине раздвојеног дела и целокупног комплекса исказана бодовима.



Слика 7.8 Степен раздвајања центара активности од гравитационих подручја



Слика 7.9 Степен раздвајања просторно-функционалних целина

7.2.5 Модел за одређивање критеријума Утицај на животну средину

Ако животну средину дефинишемо као јединствену целину коју чине животне заједнице различитих организама, укључујући ту наравно и човека и њима насељени простор, тада свака промена било које карике ланца у овим односима, повлачи са собом низ веома драстичних утицаја и промена. Већина од тих утицаја на различите начине доводи до осиромашења животне средине и њеног загађивања. Из овог следи, да и свака изградња железничке пруге као грађевинског објекта и њена даља експлоатација, има за последицу појаву поремећаја у низу већ дефинисаних односа и законитости за главне елементе животне средине, а то су: тло, вода, ваздух, флора, фауна, клима и пејзаж.

Да би се степен промене и поремећаја животне средине могао одредити [79, 80, 82, 84, 85, 86], а наравно и благовремено реаговати, потребно је дефинисати утицај трасе железничке пруге у односу на сваки од наведених елемената и то се у овом моделу врши преко критеријума K_{5i} ($i=1, \dots, 6$), а они обухватају следеће утицаје:

- буке и вибрација од саобраћаја (K_{51}),
- на земљиште (загађење и деградација) (K_{52}),
- на воде (загађење и промене у режиму) (K_{53}),
- на флору и фауну (угроженост и биодиверзитет) (K_{54}),
- на климу и микроклиму (K_{55}),
- нарушавање амбијенталних целина-пејзажа (K_{56}).

Критеријумска функција f_5 износи (7.23):

$$f_5 = \sum_i K_{5i} = \sum_k U_k = U_{b-v} + U_z + U_v + U_{ff} + U_{kmk} + U_{ac} \quad [\text{бодови}] \quad (7.23)$$

где је:

K_{5i} – критеријуми за одређивање критеријумске функције утицаја трасе железничке пруге на животну средину f_5 ,

U_k – појединачне вредности утицаја трасе на животну средину ($k=1, \dots, 6$),

U_{b-v} – утицај буке и вибрација од саобраћаја,

U_z – утицај трасе железничке пруге на земљиште,

U_v – утицај трасе железничке пруге на воде,

U_{ff} – утицај трасе железничке пруге на флору и фауну,

U_{kmk} – утицај трасе железничке пруге на климу и микроклиму,

U_{ac} – утицај трасе железничке пруге на амбијенталне целине.

Критеријумска функција f_5 има еколошки карактер и у табели 7.1 је означена са *min*, односно тежи да утицај на животну средину од трасе железничке пруге буде минималан, док се нумеричке вредности наведених утицаја исказане преко бодова из ординарне скале дефинишу на следећи начин:

Утицај буке и вибрација од саобраћаја K_{51} дефинише се преко степена угрожености, исказаног површином или бројем особа који су под меродавним нивоом буке и вибрација (у току дана и у току ноћи) у насељеним подручјима. На деоницама трасе железничке пруге које пролазе кроз насељена подручја процењује се интезитет буке и вибрација преко средњег еквивалентног нивоа као и њен утицај у појасу од 25 m до 100 m од осовине пруге [57, 16]. Степен угрожености буком и вибрацијама исказује се укупним бројем, сумом површина или бројем особа које су изложене меродавном нивоу буке у току дана/ноћи у насељеним подручјима. Ове нумеричке вредности се преко ординарне скале претварају у бодове (од 1 до 10), што је приказано на слици 7.10, тако што се:

- 1 бод додељује, ако утицај буке и вибрација од саобраћаја не постоји, односно траса не пресеца насељена подручја и степен угрожености је 0,

- 10 бодова додељује, ако је степен угрожености максималан, односно ако је сума површина или број особа које су изложене меродавном нивоу буке у току дана/ноћи у насељеним подручјима у пружном појасу трасе максималан (најнеповољније варијантно решење трасе).

Тада се утицај буке и вибрација од саобраћаја добија као сума (7.24):

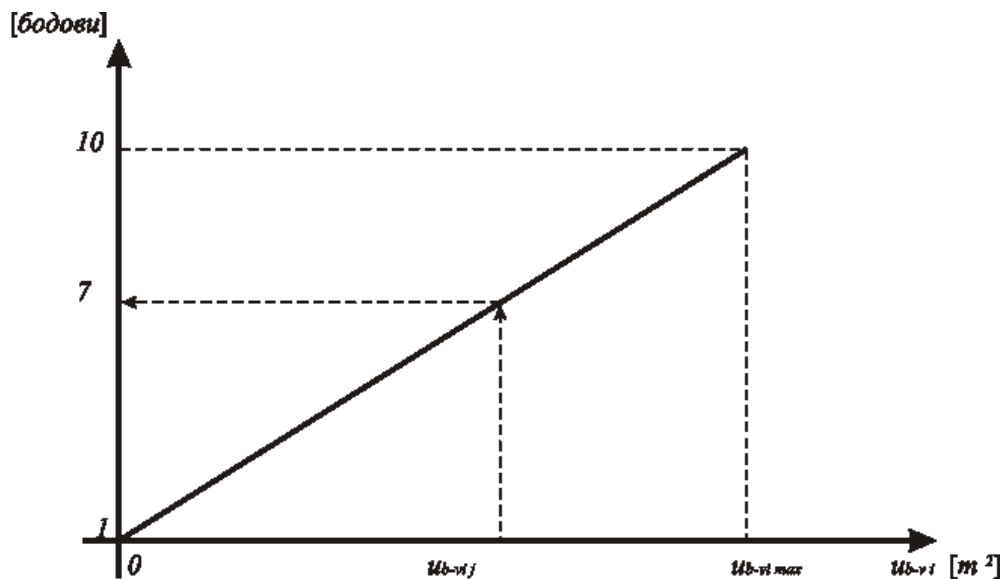
$$U_{b-v} = \sum_i U_{b-vdi} + \sum_i U_{b-vni} \quad [\text{бодови}] \quad (7.24)$$

где је:

i – број насељених подручја које пресеца траса железничке пруге ($i = 1, \dots, n$),

U_{b-vdi} – укупна површина у (m^2) или број особа у i -том насељеном подручју које су изложене меродавном нивоу буке и вибрација од саобраћаја у току дана исказана бодовима,

U_{b-vni} – укупна површина у (m^2) или број особа у i -том насељеном подручју које су изложене меродавном нивоу буке и вибрација од саобраћаја у току ноћи исказана бодовима.



Слика 7.10 Степен угрожености буком и вибрацијама у насељеним срединама од железничког саобраћаја

Утицај трасе железничке пруге на земљиште K_{52} (загађење и деградација тла) се дефинише преко:

- степена загађења тла као последица течних или чврстих загађивача од железничког саобраћајног система,
- степена деградације тла као последица ерозије или клизања услед изградње трасе железничке пруге,
- степена промене пермеабилитета тла.

На основу природних услова, односно геолошких карактеристика терена, дефинисаних на синтезној карти ограничења, одређују се деонице трасе где се могу јавити ови утицаји на тло, односно дефинишу се површине које су изложене загађивачима од железничког саобраћајног система, површине са деградираним тлом од ерозије или клизишта и површине тла са промењеним пермеабилитетом. Ове површине (исказане у m^2) се преко ординарне скале претварају у бодове (од 1 до 10), што је приказано на слици 7.11, тако што се:

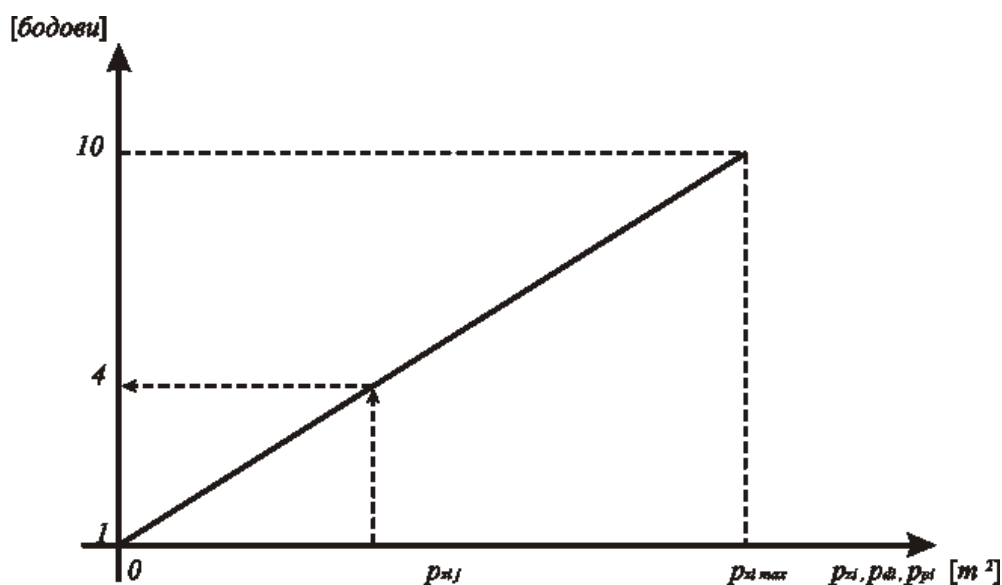
- 1 бод додељује, ако је степен загађења, односно степен деградације и степен промене пермеабилитета једнак 0,
- 10 бодова додељује, ако је степен загађења, односно степен деградације и степен промене пермеабилитета максималан, односно ако је сума површина које су изложене загађивачима од железничког саобраћајног система, површине са деградираним тлом од ерозије или клизишта и површине тла са промењеним пермеабилитетом максимална (најнеповољније варијантно решење трасе).

Тада се утицај трасе пруге на тло добија сумирањем следећих величина (7.25):

$$U_z = \sum_i p_{zi} + \sum_i p_{di} + \sum_i p_{pi} \quad [\text{бодови}] \quad (7.25)$$

где је:

- i – деоница трасе ($i = 1, \dots, n$),
- p_{zi} – површина тла у (m^2) која је изложена загађивачима на i -тој деоници трасе исказана бодовима,
- p_{di} – површина са деградираним тлом у (m^2) од ерозије или клизишта на i -тој деоници трасе исказана бодовима,
- p_{pi} – површина са промењеним пермеабилитетом у (m^2) на i -тој деоници трасе исказана бодовима.



Слика 7.11 Степен загађења и деградације тла као последица изградње трасе и железничког саобраћаја

Утицај трасе железничке пруге на воде K_{53} се дефинише преко:

- степена загађења зона за водоснабдевање,
- степена угрожености зона дуж обала површинских токова,
- степена промене у режиму површинских и подземних вода.

На основу заштићених зона, дефинисаних на синтезној карти ограничења, одређују се деонице трасе које пролазе: уз постојеће или будуће зоне за водоснабдевање (подземне воде и изворишта), уз површинске токове и уз зоне где долази до промене у режиму нивоа вода и дефинишу површине које би могле бити изложене утицају трасе железничке пруге. Ове површине (исказане у m^2) се даље преко ординарне скале претварају у бодове (од 1 до 10), што је приказано на слици 7.12, тако што се:

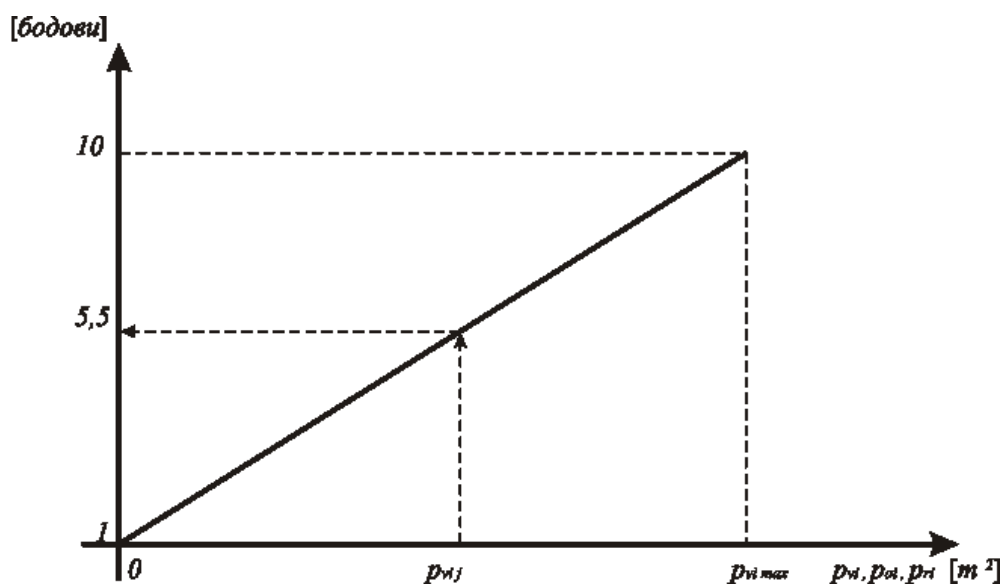
- 1 бод додељује, ако је степен загађења зона за водоснабдевање, степен угрожености зона дуж обала површинских токова и степен промене у режиму површинских и подземних вода једнак 0,
- 10 бодова додељује, ако је сума површина где је степен загађења зона за водоснабдевање, степен угрожености зона дуж обала површинских токова и степен промене у режиму површинских и подземних вода максималан (најнеповољније варијантно решење трасе).

Тада се утицај трасе железничке пруге на воде добија сумирањем следећих величина (7.26):

$$U_v = \sum_i p_{vi} + \sum_i p_{oi} + \sum_i p_{ri} \quad [\text{бодови}] \quad (7.26)$$

где је:

- i – деоница трасе ($i = 1, \dots, n$),
- p_{vi} – површина зоне за водоснабдевање у (m^2) на i -тој деоници трасе која је изложена утицају исказана бодовима,
- p_{oi} – површина угрожене обале у (m^2) на i -тој деоници трасе исказана бодовима,
- p_{ri} – површина у (m^2) на i -тој деоници трасе на којој је настала промена у режиму подземне и површинске воде исказана бодовима.



Слика 7.12 Степен загађења зона за водоснабдевање као последица изградње пруге

Утицај трасе железничке пруге на флору и фауну K_{54} се дефинише преко:

- степена угрожености заштићених биљних врста од утицаја трасе железничке пруге,
- степена угрожености заштићених животињских врста од утицаја трасе железничке пруге,
- биодиверзитета - смањивања броја биљних и животињских врста.

На основу заштићених зона, дефинисаних на синтезној карти ограничења, одређују се деонице трасе пруге које пролазе поред зона са заштићеним биљним и животињским врстама и дефинишу се површине које би могле бити изложене утицају трасе железничке пруге. Ове површине (исказане у m^2) се даље преко ординарне скале претварају у бодове (од 1 до 10), што је приказано на слици 7.13, тако што се:

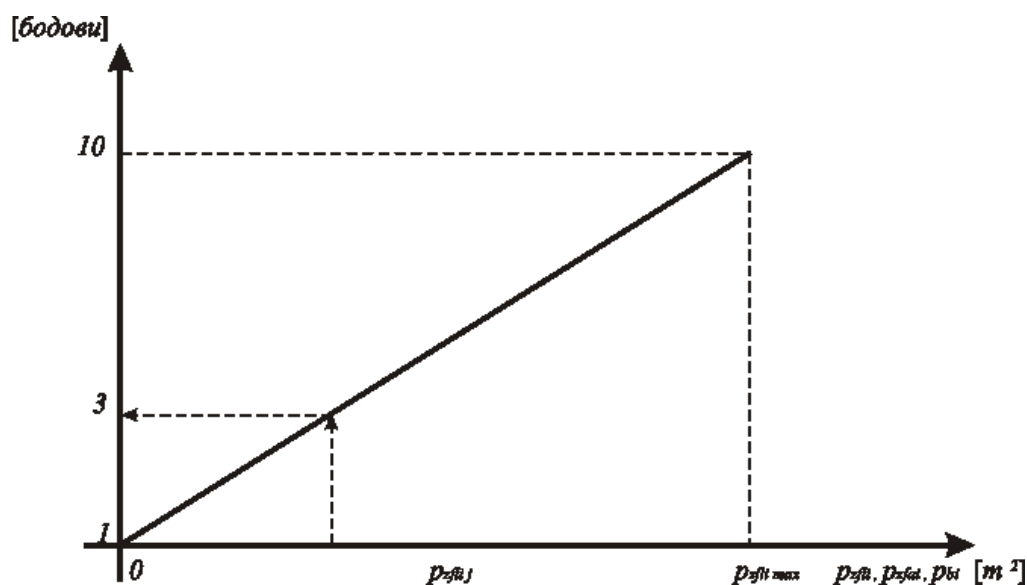
- 1 бод додељује, ако је степен угрожености заштићених биљних врста, степен угрожености заштићених животињских врста и смањивање броја биљних и животињских врста једнак 0,
- 10 бодова додељује, ако је ако је сума површина где је степен угрожености заштићених биљних врста, степен угрожености заштићених животињских врста и смањивање броја биљних и животињских врста максималан (најнеповољније варијантно решење трасе).

С обзиром на наведено укупан утицај трасе железничке пруге на флору и фауну добија се сумирањем следећих величина (7.27):

$$U_{ff} = \sum_i p_{zfli} + \sum_i p_{zfa_i} + \sum_i p_{bi} \quad [\text{бодови}] \quad (7.27)$$

где је:

- i – деоница трасе ($i = 1, \dots, n$),
- p_{zfli} – површина са заштићеном флором у (m^2) на i -тој деоници трасе која је изложена утицају исказана бодовима,
- p_{zfa_i} – површина са заштићеном фауном у (m^2) на i -тој деоници трасе која је изложена утицају исказана бодовима,
- p_{bi} – површина где се појављује биодивирзитет у (m^2), односно смањује број биљних и животињских врста на i -тој деоници трасе исказана бодовима.



Слика 7.13 Степен угрожености заштићених биљних и животињских врста од утицаја трасе железничке пруге

Утицај трасе железничке пруге на климу и микроклиму K_{55} се дефинише преко:

- степена промене климатских услова услед утицаја трасе железничке пруге,
- степена промене микроклиматских услова услед утицаја трасе железничке пруге.

На основу климатских карактеристика, дефинисаних у оквиру синтезне карте ограничења, одређују се деонице трасе пруге, односно површине које би могле бити изложене утицају трасе и изазвати промену климе, односно микроклиме. Ове површине (исказане у m^2) се даље преко ординарне скале претварају у бодове (од 1 до 10), што је приказано на слици 7.14, тако што се:

- 1 бод додељује, ако је степен промене климатских услова и степен промене микроклиматских услова једнак 0,
- 10 бодова додељује, ако је степен промене климатских услова и степен промене микроклиматских услова максималан (најнеповољније варијантно решење трасе).

Тада се утицај трасе железничке пруге на климу и микроклиму добија сумирањем следећих величина (7.28):

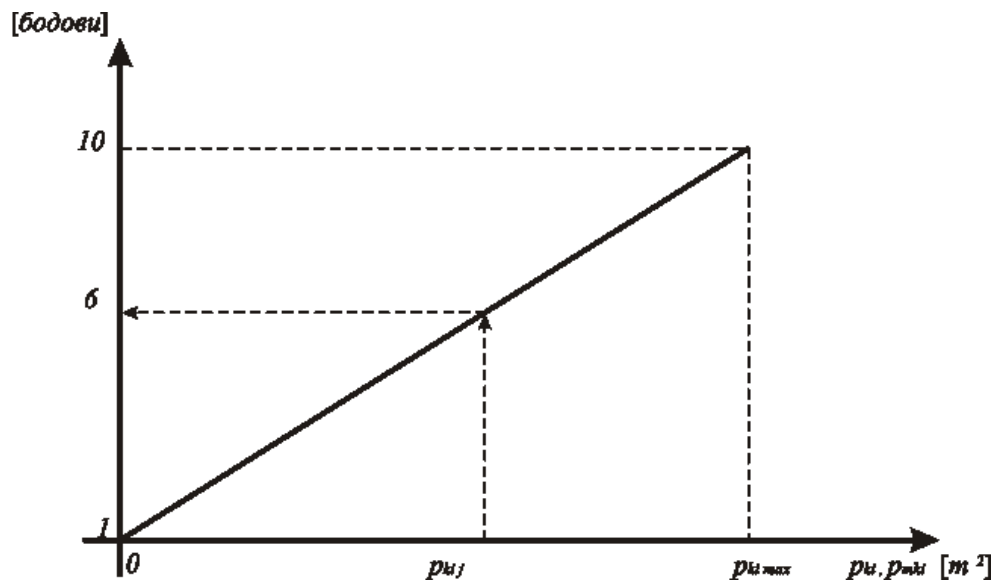
$$U_{kmk} = \sum_i p_{ki} + \sum_i p_{mki} \quad [\text{БОДОВИ}] \quad (7.28)$$

где је:

i – деоница трасе ($i = 1, \dots, n$),

p_{ki} – површина са промењеном климом у (m^2) на i -тој деоници трасе исказана бодовима,

p_{mki} – површина са промењеном микроклимом у (m^2) на i -ој деоници трасе исказана бодовима.



Слика 7.14 Степен промене климатских и микроклиматских услова услед утицаја трасе железничке пруге

Утицај трасе железничке пруге на амбијенталне целине - пејзаж K_{56} се дефинише преко:

- степена промене морфологије терена услед утицаја трасе железничке пруге,
- степена промене састава вегетације услед утицаја трасе железничке пруге.

На основу геолошких услова и целовитих садржаја вегетације са врстама и зонама, дефинисане у оквиру синтезне карте ограничења, одређују се деонице трасе пруге, односно површине које би могле бити изложене утицају трасе и изазвати промену морфологије терена, као и састав вегетације. Ове површине (исказане у m^2) се даље преко ординарне скале претварају у бодове (од 1 до 10), што је приказано на слици 7.15, тако што се:

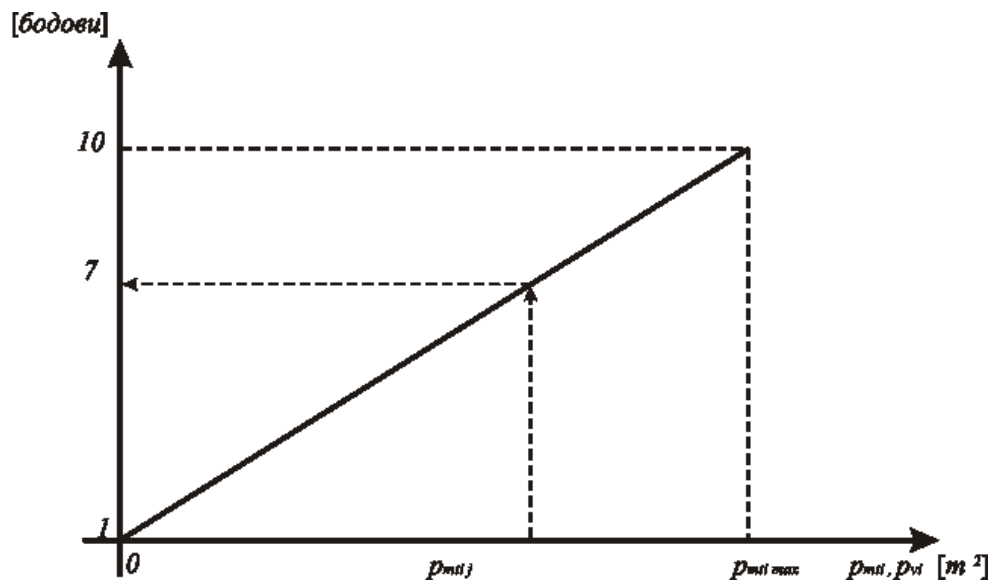
- 1 бод додељује, ако је степен промене морфологије терена и степен промене састава вегетације једнак 0,
- 10 бодова додељује, ако је степен промене морфологије терена и степен промене састава вегетације максималан (најнеповољније варијантно решење трасе).

Тада се утицај трасе железничке пруге на амбијенталне целине-пејзаж добија сумирањем следећих величина (7.29):

$$U_{ac} = \sum_i p_{mti} + \sum_i p_{vi} \quad [\text{бодови}] \quad (7.29)$$

где је:

- i – деоница трасе ($i = 1, \dots, n$),
- p_{mti} – површина са промењеном морфологијом терена у (m^2) на i -тој деоници трасе исказана бодовима,
- p_{vi} – површина са промењеним саставом вегетације у (m^2) на i -тој деоници трасе исказана бодовима.



Слика 7.15 Степен промене морфологије терена и састава вегетације услед утицаја трасе железничке пруге

7.3 ИЗБОР МЕТОДЕ ЗА РАНГИРАЊЕ И ОДЛУЧИВАЊЕ

У процесу оптимизације трасе железничке пруге потребно је спровести избор најповољнијег решења између више генерисаних решења, уз присуство већег броја критеријума са различитим мерама, од којих неке треба максимизирати, а неке минимизирати. Овако постављени односи значе да ће се одлуке доносити у конфликтним условима. Онда се за решавање оваквог проблема (ова проблематика је разматрана у поглављу 6.5) издваја група метода које су засноване на компромису, а то су методе: **TOPSIS** (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*), **Компромисно програмирање** (CP – *Compromise Programming*) и **VIKOR** (*VIšekriterijumsko KOmpromisno Rangiranje*). На основу карактеристика метода из предложене групе за решавање избора најповољније трасе железничке пруге у овом раду користиће се метода **VIKOR** [62, 63, 64, 65, 66].

Метода **VIKOR** је развијена за виšekriterijumsko рангирање алтернатива, а заснована је на компромисном програмирању. Ова метода се фокусира на рангирање и избор алтернатива у присуству конфликтних критеријума, а при том користи идеалну тачку као референтну тачку у простору критеријумских функција. Међутим, не постоји алтернатива која задовољава истовремено све критеријуме, па се тражи допустиво решење које је најближе идеалном у простору критеријумских функција. Решење које је најближе идеалном, назива се **компромисним** решењем на основу усвојене мере растојања. Као мере растојања од идеалне тачке користе се „граничне“ метрике L_p из Методе компромисног програмирања и то мере S_j (7.30) и R_j (7.31):

$$S_j = \frac{\sum w_i (f_i^* - f_{ij})}{(f_i^* - f_{ij})} \quad (7.30)$$

$$R_j = \max \frac{w_i (f_i^* - f_{ij})}{(f_i^* - f_{ij})} \quad (7.31)$$

где је:

f_{ij} – вредност i -те критеријумске функције за j -то варијантно решење $i=1, \dots, n$ и $j=1, \dots, m$,

$$f_i^* = \max f_{ij}$$

$f_i^- = \min f_{ij}$ – ако i -та критеријумска функција исказује добит,

$$f_i^* = \min f_{ij}$$

$f_i^- = \max f_{ij}$ – ако i -та критеријумска функција исказује трошак.

$w_i \geq 0$ – тежински коефицијенти изабраних критеријума

Рангирањем помоћу мера S_j и R_j одређују се места $s(V_j)$ и $r(V_j)$ на ранг листи за варијанте $V_j, j=1, \dots, m$. Овако добијене ранг листе се доста разликују, па је тражен даљи поступак за одређивање једне обједињене ранг листе. Ова обједињена ранг листа се добија на основу мере Q_j (7.32):

$$Q_j = vQS_j + (1 - v)QR_j, \quad (j = 1, \dots, m)$$

$$QS_j = \frac{S_j - S^*}{S^- - S^*} \quad \text{и} \quad QR_j = \frac{R_j - R^*}{R^- - R^*} \quad (7.32)$$

$$S^* = \min S_j \quad S^- = \max S_j$$

$$R^* = \min R_j \quad R^- = \max R_j$$

где је:

v – тежина стратегије одлучивања већином „критеријума“, а вредности се крећу у интервалу $(0; 0,5$ и $1)$.

Варијанта V_j је вишекритеријски боља од V_k рангирана помоћу Q , ако је $Q_j < Q_k$ и има вишу позицију на ранг листи. Позиција на листи Q добија се спајањем позиција на листама QR и QS . Рангирање се врши сортирањем варијанти према вредностима мера QS , QR и Q . Најбоља варијанта је она за коју је вредност мере најмања и она заузима прво место на ранг листи. Мера Q_j је линеарна функција тежине стратегије „задовољења већине критеријума“ v , па је позиција на листи Q „линеарна комбинација“ позиција на листама QS и QR . Стабилност позиције варијанте на ранг листи се анализира променом вредности тежинских коефицијената.

Метода VIKOR предлаже као вишекритеријумски најбољу варијанту ону (за усвојене вредности w_i), која је на првој позицији на компромисној ранг листи за $\nu = 0,5$ само уколико има и:

- „довољну предност“ над варијантом са следеће позиције (услов U1),
- „довољно стабилну“ позицију са променом тежине ν (услов U2).

За вредновање „предности“ користи се разлика између мера Q_j за $\nu = 0,5$. Варијанта V' има довољну предност над следећом V'' са ранг листе ако је задовољена неједнакост (7.33):

$$Q(V'') - Q(V') \geq DQ, \quad (7.33)$$

где је:

DQ – „праг предности“ који се одређује у односу на теоријске вредности Q , $Q_{max} - Q_{min} = 1 - 0$, и број варијанти m (7.34). Са 0,25 је ограничен праг за случајеве са малим бројем варијанти.

$$DQ = \min\left(0,25; \frac{1}{m-1}\right), \quad (7.34)$$

Услов „довољне предности“ омогућава да се доносиоцу одлуке прикажу све варијанте које су „блиске“ у вишекритеријумском смислу. Не би било оправдано да се доносиоцу одлуке прикаже само варијанта са прве позиције на ранг листи према мери Q и да се занемаре варијанте које имају њој „блиске“ вредности мере Q . Прва варијанта на ранг листи има „довољно стабилну“ позицију ако испуњава и бар један од следећих услова:

- има прву позицију на ранг листи према Q за $\nu = 0,25$ и $\nu = 0,75$,
- има прву позицију на ранг листи према QS ,
- има прву позицију на ранг листи према QR .

Уколико прва варијанта са компромисне ранг-листе не испуњава оба услова $U1$ и $U2$ сматра се да она није довољно боља од варијанте са друге позиције. У таквим случајевима методом VIKOR формира се скуп компромисних решења у који улазе прва и варијанта иза ње. Ако прва варијанта не испуњава само услов $U2$ онда у скуп компромисних решења улази само друга са компромисне листе. Међутим, ако не испуњава само услов $U1$ тада скуп компромисних решења садржи варијанте са компромисне ранг-листе V' и $V'', \dots, V^{(K)}$ за које је $Q(V^{(K)}) - Q(V') < DQ$.

8 ТЕСТИРАЊЕ МЕТОДОЛОШКОГ ПОСТУПКА И МОДЕЛА ЗА ОПТИМИЗАЦИЈУ

Изложен методолошки поступак и модел за оптимизацију трасе железничке пруге тестиран је на примеру предложених варијанти за реконструкцију деонице постојеће једноколосечне пруге Инђија - Нови Сад за веће брзине кретања возова са циљем функционалнијег и безбеднијег одвијања железничког саобраћаја.

Деоница Инђија - Нови Сад, (изграђена и пуштена у саобраћај 1882-83. год.) пруге (Београд) - Стара Пазова - Суботица - Државна граница, према Европском споразуму о најважнијим међународним железничким пругама, припада пругама **класе А** и део је европског правца **Е85** (*Budapest-Kelebi - Subotica - Beograd - Niš/Kraljevo -Skoplje-Gevgelija-Idomeni -Thessaloniki - Athina*). Према европском пројекту Паневропских саобраћајних коридора, представља део паневропског **коридора X**, који је дефинисан на правцу *Salzburg - Ljubljana - Zagreb - Beograd - Niš - Skopje - Veles -Thessaloniki*, и обухвата четири огранка **Xa** *Graz-Zagreb*, **Xb** *Stara Pazova-Budimpešta*, **Xc** *Niš - Sofia* и **Xd** *Skopje - Athine*.

Пруге на коридору X представљају најповољнију копнену везу земаља средње Европе са Бугарском и Турском и даље према Малој Азији и Северној Африци, омогућавају међусобно повезивање земаља југоистока Европе, а истовремено чине окосницу саобраћајног система Републике Србије, као правац који са одвојним пругама међусобно повезује већи део Србије.

Ово тестирање треба да пружи одговор на питање за које услове саобраћаја и до које се брзине кретања возова може предметна једноколосечна пруга реконструисати, а да висина инвестиционих улагања у свако од предложених варијантних решења има своју оправданост на добијене експлоатационе ефекте (трошкови одржавања и управљања, пропусна моћ и њена искоришћеност) као и настале последице на просторни развој и утицаје на животну средину које ово реконструисање доноси.

Висина инвестиционих улагања, експлоатациони ефекти, као и последице и утицаји су основа за доношење одлуке о избору најповољнијег варијантног решења, од предложених, за реализацију реконструкције.

8.1 АНАЛИЗА ПОСТОЈЕЋЕГ СТАЊА ПРУГЕ ИНЂИЈА – НОВИ САД

Постојеће стање пруге Инђија – Нови Сад се у овом тесту анализира од станице Инђија (*km 43+454,75*) до станице Нови Сад (*km 78+772,91*). Ова деоница пруге има дужину од *35,319 km* и карактеришу је следећи технички и технолошки елементи:

- једноколосечна је, електрифицирана монофазним системом *25 kV, 50 Hz* и опремљена уређајима АПБ-а, за брзине до *120 km/h*,
- пруга је магистрална (категорија D3) са дозвољеним оптерећењем по осовини од *225 kN* и са дозвољеним оптерећењем по дужном метру од *72 kN/t*, на прузи је заступљен слободан профил ЈЖ I, који одговара међународном товарном профилу UIC-B,
- пруга је намењена за мешовити саобраћај,
- на посматраној деоници пруге налази се *9* службених места (табела 8.1),
- на траси има *12* мостова, један тунел (Чортановци $L=654m$), *57* пропуста, као и *12* путних прелаза у нивоу (један регионални, четири локална, седам некатегорисаних),
- дужина трасе пруге у правцу износи *24,098 km* или *68,23 %* њене укупне дужине, а у кривинама, којих има *47*, налази се *11,221 km* или *31,76 %* њене укупне дужине,
- величина полупречника хоризонталних кривина се креће од $R_{min} = 298,5 m$ до $R_{max} = 20.000 m$, (табела 8.2),
- максимална величина нагиба на траси износи *13,7 ‰*,
- стање доњег и горњег строја на овој деоници је последица досадашњег неадекватног одржавања; евидентна је дотрајалост шина, прагова и колосечног прибора; стање засторног материјала креће се: од потпуне загађености па до местимичне појаве блата на кратким потезима пруге. Изузетак је деоница Чортановци - Петроварадин на којој је 2005. године извршен капитални ремонт.

Табела 8.1 Службена места на деоници пруге Инђија – Нови Сад

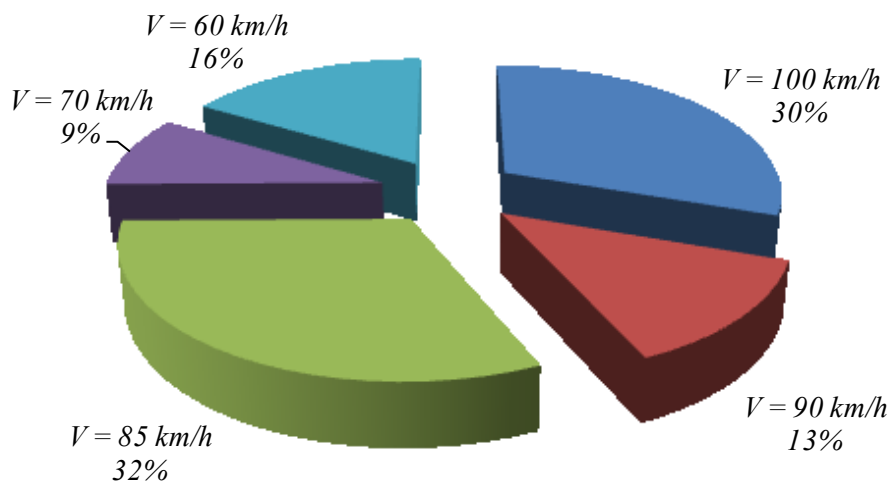
Службено место	Врста службеног места	Стационажа
Инђија	станица	42+861
Инђија Пустара	укрсница	48+040
Бешка	станица	52+952
Чортановци	станица	56+541
Чортановци Дунав	стајалиште	58+800
Карловачки Виногради	укрсница	62+208
Сремски Карловци	станица	66+571
Петроварадин	станица	71+894
Нови Сад	станица	78+038

Табела 8.2 Преглед полупречника хоризонталних кривина – постојеће стање

Деоница	Полупречници хоризонталних кривина													Укупно
	<300	300	350	400	450	500	600	700	800	900	1000	20000	
Инђија–Бешка				1							2		2	5
Бешка - Чортановци		3	2	1										6
Чортановци-С.Карловци	1	7	3	3	3	3	3						1	24
С. Карловци-Петроварадин			1			3	2	1	1				1	9
Петроварадин –Нови Сад				1		1					1			3
Укупно	1	10	6	6	3	7	5	1	1		3		4	47

На посматраној деоници предвиђене су различите брзине према постојећим елементима у плану. Тако је на делу: од Инђије до Бешке предвиђена брзина $V \leq 120 \text{ km/h}$. Од Бешке до Петроварадина је предвиђена брзина $V \leq 80 \text{ km/h}$. Поменути ремонт постојеће пруге Чортановци – Петроварадин извршен је 2005. године на постојећим елементима трасе у плану. На делу пруге од Петроварадина до Новог Сада (подручје чвора), према постојећим елементима у плану, предвиђена је брзина $V \leq 100 \text{ km/h}$. Међутим, стварне брзине кретања на овој деоници су у распону од $V = 60 - 100 \text{ km/h}$, што је приказано на слици 8.1, док се максимална брзина кретања од $V = 100 \text{ km/h}$ постиже само на почетном сектору станице Инђија:

- Инђија – Инђија Пустара (до уласка у Бешку) $V = 100 \text{ km/h}$,
- Бешка – Чортановци $V = 70 \text{ km/h}$,
- Чортановци – укрсница Карловачки Виногради $V = 60 \text{ km/h}$,
- укрсница Карловачки Виногради – Петроварадин $V = 85 \text{ km/h}$,
- Петроварадин – Нови Сад $V = 90 \text{ km/h}$.



Слика 8.1 Брзине по деоницама – постојеће стање

Међутим, највеће допуштене брзине возова су смањене на већем делу пруге, тако да су уведене лагане вожње због лошег стања пруге, а у циљу безбедности саобраћаја. Њихов преглед је дат у табели 8.3. Увођење лаганих вожњи изазива смањење пропусне моћи, поремећаје у извршењу реда вожње и кашњења возова, што у крајњој линији има за последицу и смањење тражње за превозним услугама. У претходном периоду то се посебно одразило на путнички и теретни унутрашњи саобраћај.

Табела 8.3 Преглед лаганих возњи на прузи по деоницама

Деоница (станица)	Почетак	Крај	Дужина (m)	Датум увођења	Смањена брзина (km/h)
Станица Инђија	42+200	43+300	1100	17/03/09	30
Станица Бешка	52+740	53+550	810	17/03/09	50
Деоница Чортановци - К. Виногради	55+940	58+000	2060	17/03/09	30
	61+380	61+880	500	14/12/08	50
	61+880	62+360	500	14/12/08	50
Станица Нови Сад	77+500	78+440	940	03/08/09	10

У Прилогу 1 дат је ситуациони приказ трасе постојећег стања пруге Инђија – Нови Сад.

8.2 ПРЕДЛОГ ВАРИЈАНТНИХ РЕШЕЊА РЕКОНСТРУКЦИЈЕ

Постојеће стање инфраструктуре на прузи Инђија – Нови Сад задовољава само тренутне потребе одвијања железничког саобраћаја. Међутим, како је реално очекивати повећавање динамике и обима саобраћаја у будућности, појављују се и нови захтеви у погледу увођења веће брзине. Међутим, стање доњег и горњег строја пруге као и већи број мањих полупречника хоризонталних кривина и неадекватне дужине прелазних кривина указује да су они **ограничавајући фактори** за могуће повећање брзине.

Зато се намеће потреба за реконструкцијом пруге на овој деоници, односно за променом техничких параметара елемената трасе уз све неопходне радове на доњем и горњем строју са циљем повећања брзине кретања, а што ће имати за последицу функционалније одвијање железничког саобраћаја у даљој будућности.

С обзиром на теренске карактеристике (конфигурација терена и карактеристике рељефа), просторни распоред, степен изграђености (постојећа насеља, Национални парк „Фрушка гора“ и река Дунав), геолошке параметре и жељено повећање брзине на овој деоници, **предлажу се четири варијантна решења реконструкције постојеће трасе железничке пруге Инђија – Нови Сад $V_j (j=1, \dots, 4)$:**

- **Варијантно решење V_1** је варијанта реконструкције за брзину 80 km/h ,
- **Варијантно решење V_2** је варијанта реконструкције за брзину 100 km/h ,
- **Варијантно решење V_3** је варијанта реконструкције за брзину 120 km/h ,
- **Варијантно решење V_4** је варијанта реконструкције за брзину $120\text{-}160 \text{ km/h}$.

Ова варијантна решења урађена су на основу расположиве техничке документације постојећег стања инфраструктуре и нове студијске, планске и техничке документације посматране железничке пруге са техничким параметрима приказаним у табели 8.4.

Табела 8.4 Технички параметри за геометријско обликовање варијантних решења реконструкције

Технички параметри	Варијантна решења			
	V_1	V_2	V_3	V_4
$V \text{ (km/h)}$	80	100	120	120-160
$R_{min} \text{ (m)}$	300	500	700	700-1100
$L_{min} \text{ (m)}$	125	140	175	175-240
$\rho_{min}=V^2/3,6^2 \cdot 0,2(0,3) \text{ (m)}$	2400	3800	5500	5500-9800
Слободни профил	UIC-C	UIC-C	UIC-C	UIC-C
Осовински притисак (kN)	225	225	225	225
Тип шине	49E1	49E1	60E1	60E1
Прагови	дрвени	дрвени	бетонски	бетонски

Основни усвојени принцип за реконструкцију постојеће трасе железничке пруге Инђија–Нови Сад, који је овде у овом тестирању примењен за предлагање наведених варијантних решења, је следећи: да се максимално искористити постојеће стање инфраструктуре, односно да се постојећи елементи трасе пруге задрже у што већој мери уз критеријум минимизирања укупних инвестиција за реконструкцију. Правци простирања трасе пруге остају исти у оној мери, у којој не утичу на реализацију **нове планиране брзине** кретања, а то значи следеће:

- Постојеће хоризонталне кривине, чија величина полупречника омогућава реализацију нове планиране брзине кретања, као и преломни углови тих кривина се задржавају у варијантама реконструкције. Врше се само корекције надвишења и дужина прелазних кривина у складу са рачунском брзином и важећим техничким условима.

- Ако величине полупречника постојећих кривина не омогућавају реализацију нове планиране брзине кретања усвајају се оне величине полупречника, као и параметри прелазних кривина који су у функцији нове планиране брзине. Величине преломних углова се задржавају ако то дозвољавају дужине међуправаца постојећих суседних кривина.
- Код постојећих кривина које су у низу и са кратким међуправцима, а величине њихових полупречника не могу да реализују нову планирану брзину кретања, полигон постојеће трасе се помера и формирају се темена нових кривина са параметрима који су у складу са рачунском брзином и важећим техничким условима. Овакве корекције имају за последицу да се поједине постојеће кривине укидају, па се укупан број кривина у варијантном решењу за реконструкцију смањује у односу на постојеће стање.
- Положај службених места, као и кључних објеката (мостови и тунел) у свим варијантама реконструкције је задржан и непромењен у односу на положај у постојећем стању.
- Скретнице у станицама се замењају скретницама са параметрима које одговарају новој планираној брзини кретања.
- Комплетно се мења конструкција горњег строја са карактеристикама које одговарају новој планираној брзини кретања.
- Ако ново планирана брзина кретања захтева укрштање са друмским саобраћајницама ван нивоа мора се извршити денивелација изградњом надвожњака или подвожњака, док се у случају задржавања путних прелаза у нивоу они планирају са савременим осигурањем.

Разматрана варијантна решења реконструкције имају следеће карактеристике:

Варијантно решење V_1 – Промена елемената трасе у ситуационом плану постојећег стања, са циљем остваривања брзине од 80 km/h на дужини читаве трасе, извршена је на укупно 24 кривине. Дужина нове трасе пруге по овој варијанти износи $35,007 \text{ km}$, од тога је у кривинама, којих има 43, укупно $11,035 \text{ km}$ или $31,52 \%$. У правцу се налази $23,972 \text{ km}$ или $68,48 \%$ трасе. У оквиру ове варијанте потребно је реконструисати **$4,550 \text{ km}$ постојеће** пруге, што чини $12,88 \%$ њене дужине. Реконструкција се састоји у виду проширења постојећег трупа или изради потпуно новог трупа пруге. Нивелета трасе у варијантном решењу V_1

задржана је у потпуности као нивелета у постојећем стању. Највећа одступања осовине трасе ове варијанте од постојеће су 81 m у $\text{km } 56+850$ -десно и 52 m у $\text{km } 61+200$ -лево.

У **Прилогу 2** дат је ситуациони приказ трасе овог варијантног решења. Број, структура и преглед употребљених полупречника кривина по деоницама приказан је у табелама 8.5 и 8.6.

Варијантно решење V_2 – Промена елемената трасе у ситуационом плану постојећег стања, са циљем остваривања брзине од 100 km/h на дужини читаве трасе, извршена је на укупно 29 кривина. Дужина нове трасе пруге по овом варијантном решењу износи $35,001\text{ km}$, од тога је у кривинама, којих има 36, укупно $11,444\text{ km}$ или $32,70\%$. У правцу се налази $23,557\text{ km}$ или $67,30\%$ трасе предложеног варијантног решења. У оквиру ове варијанте потребно је реконструисати **$8,700\text{ km}$ постојеће** пруге, што чини $24,63\%$ њене дужине. Реконструкција се састоји у виду проширења постојећег трупа или изради потпуно новог трупа пруге. Нивелета трасе варијантног решења V_2 је незнатно промењена у односу на постојеће стање. Највећа одступања осовине трасе ове варијанте од постојеће су 240 m у $\text{km } 59+200$ -десно и 106 m у $\text{km } 62+200$ -десно.

У **Прилогу 3** дат је ситуациони приказ трасе овог варијантног решења. Број, структура и преглед употребљених полупречника кривина по деоницама приказан је у табелама 8.5 и 8.6.

Варијантно решење V_3 – Промена елемената трасе у ситуационом плану постојећег стања, са циљем остваривања брзине од 120 km/h на дужини читаве трасе, извршена је на укупно 31 кривини. Дужина нове трасе пруге по овом варијантном решењу износи $34,879\text{ km}$, од тога је у кривинама, којих има 35, укупно $14,215\text{ km}$ или $40,75\%$. У правцу се налази $20,663\text{ km}$ или $59,25\%$ трасе. У оквиру ове варијанте потребно је реконструисати **$12,560\text{ km}$ постојеће** пруге, што чини $35,56\%$ њене дужине. Реконструкција се састоји у виду проширења постојећег трупа или израде потпуно новог трупа пруге. Нивелета трасе варијантног решења V_3 је незнатно промењена у односу на нивелету варијантног решења V_2 . Највећа одступања осовине трасе ове варијанте од постојеће су 360 m у $\text{km } 59+200$ -десно и 157 m у $\text{km } 60+200$ -десно.

У Прилогу 4 дат је ситуациони приказ трасе овог варијантног решења. Број, структура и преглед употребљених полупречника кривина по деоницама приказан је у табелама 8.5 и 8.6.

Варијантно решење V_4 – Промена елемената трасе у ситуационом плану постојећег стања, са циљем остваривања минималне брзине од 120 km/h и максималне од 160 km/h на траси, извршена је на укупно 36 кривина. Дужина нове трасе пруге по овом варијантном решењу износи $34,836 \text{ km}$, од тога је у кривинама, којих има 26, укупно $13,800 \text{ km}$ или $39,62 \%$. У правцу се налази $21,036 \text{ km}$ или $60,38 \%$ трасе. У оквиру ове варијанте потребно је реконструисати **$15,475 \text{ km}$ постојеће** пруге, што чини $43,82 \%$ њене дужине. Реконструкција се састоји у виду проширења постојећег трупа или израде потпуно новог трупа пруге. Нивелета трасе варијантног решења V_4 је непромењена у односу на нивелету варијантног решења V_3 . Највећа одступања осовине трасе ове варијанте од постојеће су 347 m у $\text{km } 59+200$ -десно и 200 m у $\text{km } 65+950$ -десно.

У Прилогу 5 дат је ситуациони приказ трасе овог варијантног решења. Број, структура и преглед употребљених полупречника кривина по деоницама приказан је у табелама 8.5 и 8.6.

Табела 8.5 Број кривина по деоницама

Деоница	Пос. стање	Варијантна решења			
		V_1	V_2	V_3	V_4
Ипђија - Бешка	5	5	5	5	5
Бешка - Чортановци	6	5	5	4	4
Чортановци - С. Карловци	24	21	14	14	7
С. Карловци - Петроварадин	9	9	9	9	7
Петроварадин - Нови Сад	3	3	3	3	3
Укупно	47	43	36	35	26

Табела 8.6 Приказ карактеристика траса по варијантама

Карактеристике трасе	Пос. стање	Варијантна решења			
		V_1	V_2	V_3	V_4
Дужина трасе (km)	35,319	35,007	35,001	34,878	34,836
Траса у правцу (km, %)	24,098 (68,23%)	23,972 (68,48%)	23,557 (67,30%)	20,663 (59,25%)	21,036 (60,38%)
Траса у кривини (km, %)	11,221 (31,76%)	11,035 (31,52%)	11,444 (32,70%)	14.,215 (40,75%)	13,800 (39,62%)
Број кривина	47	43	36	35	26
Дужина за реконструкцију (km, %)	-	4,550 (12,88%)	8,700 (24,63%)	12,560 (35,56%)	15,475 (43,82%)

8.3 ВРЕДНОВАЊЕ ВАРИЈАНТНИХ РЕШЕЊА РЕКОНСТРУКЦИЈЕ

Процена и вредновање предложених варијанти реконструкције V_j ($j=1, \dots, 4$) биће извршене у складу са посебним циљевима, критеријумима и критеријумским функцијама усвојеним у поглављу 7.2 овог рада, а приказани у табели 8.7.

Табела 8.7 Посебни циљеви, критеријуми и критеријумске функције за вредновање варијантних решења реконструкције

	Посебни циљеви	Критеријуми и критеријумске функције
1.	Инвестициона улагања	$f_1 = \sum K_{1i} \rightarrow \min$ ($i = 1, \dots, 4$) (n.j.)
2.	Трошкови одржавања и управљања	$f_2 = \sum K_{2i} \rightarrow \min$ ($i = 1, \dots, 4$) (n.j./god.)
3.	Квалитет саобраћајне услуге	$f_3 = \sum K_{3i} \rightarrow \min$ ($i = 1, 2$) (h/god) $f_3^* = \sum K_{3i}^* \rightarrow \max$ ($i = 1$) (број возова)
4.	Последице на просторни развој	$f_4 = \sum K_{4i} \rightarrow \min$ ($i = 1, \dots, 4$) (бодови)
5.	Утицај на животну средину	$f_5 = \sum K_{5i} \rightarrow \min$ ($i = 1, \dots, 6$), (бодови)

У овом приказаном поретку, карактеристике критеријумских функција су одредиле карактер посебних циљева (минимум или максимум).

Поступак вредновања се реализује тако што се свако варијантно решење реконструкције трасе појединачно вреднује према сваком критеријуму, односно сваком варијантном решењу V_j ($j=1, \dots, 4$) додели се вредност критеријумске функције f_i ($i=1, \dots, 5$).

8.3.1 Минимум инвестиционог улагања

Вредности критеријума и одговарајућа критеријумска функција f_i се добијају на основу модела који је дефинисан у поглављу 7.2.1 и приказане су у табелама 8.8 и 8.9.

Табела 8.8 Приказ коштања грађевинских радова на варијантним решењима реконструкције

Варијантна решења	ГОРЊИ СТРОЈ			ДОЊИ И ГОРЊИ СТРОЈ			Укупна цена грађ. радова реконструкције (€)
	Радови на горњем строју (km)	Цена радова на горњем строју (€/km)	Коштање радова горњег строја (€)	Радови на доњем и горњем строју (km)	Цена радова на доњем и горњем строју (€/km)	Коштање радова доњег и горњег строја (€)	
V1	30,457	295.000	8.984.815	4,550	835.000	3.799.250	12.784.065
V2	26,301	295.000	7.758.795	8,700	985.000	8.569.500	16.328.295
V3	22,318	350.000	7.811.300	12,560	1.090.000	13.690.400	21.501.700
V4	19,361	350.000	6.776.350	15,475	1.140.000	17.641.500	24.417.850

Напомена: Цена радова на доњем строју обухвата израду новог трупа пруге (деонице нове трасе) са свим пратећим објектима доњег строја уз пругу као и све потребне вештачке објекте на прузи (пропусти, мостови, потпорни зидови и зидови за заштиту од буке), а такође и санацију слабих места у трупу постојеће пруге. Цена је увећана за радове на реконструкцији саобраћајне инфраструктуре станичних и пратећих објеката, уређење речних токова као и за неопходну експроприацију.

Цена радова на горњем строју обухвата израду нове колосечне решетке на целој деоници отворене пруге и пролазним колосецима у станицама.

Табела 8.9 Приказ укупних инвестиционих улагања за варијантна решења
реконструкције

Критеријуми	Варијантна решења			
	V1	V2	V3	V4
Грађевински радови (€)	12.784.065	16.328.295	21.501.700	24.417.850
Електротехничка инфраструктура (КМ, СС, ТК) (€)	773.500	1.522.500	2.198.000	4.178.250
Укупно €	13.567.565	17.850.795	23.699.700	28.596.100
Непредвиђени радови (5%) (€)	678.378	892.539	1.184.985	1.429.805
Укупно €	14.245.943	18.743.334	24.884.685	30.025.905
Техн. документација, стручни надзор, сагласности (5%) (€)	712.797	937.167	1.244.234	1.501.295
Свега €	14.958.740	19.680.501	26.128.919	31.527.200

8.3.2 Минимални трошкови одржавања и управљања

Вредности критеријума и одговарајућа критеријумска функција f_2 се добијају на основу модела који је дефинисан у поглављу 7.2.2 и приказане су у табели 8.10.

Табела 8.10 Приказ укупних трошкова одржавања и управљања за варијантна
решења реконструкције

Критеријуми	Варијантна решења			
	V1	V2	V3	V4
Трошкови одржавања пруге и електротехничке инфраструкт.) (€/god.)	747.937,00	984.025,00	1.306.446,00	1.576.360,00
Трошкови текућег одржавања станичних зграда (€/god.)	21.370,00	21.370,00	21.370,00	21.370,00
Трошкови плата особља у станицама (€/god.)	291.000,00	291.000,00	291.000,00	291.000,00
Трошкови текућег одржавања теретних и путничких возова (€/god.)	4.795.160,84	4.794.338,98	4.777.627,76	4.771.737,74
Аморт. кола и локомотива (€/god.)	463.954,71	445.832,61	438.862,57	415.861,44
Осигурање кола и локомотива (€/god.)	39.382,62	38.529,47	38.201,34	37.118,49
Трошкови плата особља за извршење саобраћаја возова (€/god.)	25.163,68	23.961,30	23.498,85	21.972,74
Трошкови потрошње енергије (€/god.)	2.479.045,42	2.479.045,42	2.470.419,85	2.467.372,92
Трошкови потрошње мазива (€/god.)	203.287,29	203.287,29	202.579,48	202.329,67
Укупно (€/god.)	8.884.401,56	9.281.390,06	9.570.005,83	9.805.122,99

8.3.3 Максималан квалитет саобраћајне услуге

Вредности критеријума и одговарајуће критеријумке функције f_3 и f_3^* добијају се на основу модела који су дефинисани у поглављу 7.2.3. Вредности времена вожње возова између станица су изражене на дневном нивоу (*min/dan*) и приказане су у табели 8.11.

Конкретне вредности пропусне моћи по варијантама реконструкције трасе (под истим унапред дефинисаним условима, као што су: укупан број и структура возова, организација саобраћаја и брзине кретања возова) добијене су на основу развијеног симулационог модела. Добијене вредности приказане су у табели 8.12, тако што је за границу искоришћености капацитета усвојена вредност од 50 % јер је у питању једноколосечна пруга.

Табела 8.11 Приказ времена путовања за варијантна решења реконструкције

Критеријуми	Варијантна решења			
	V1	V2	V3	V4
Време вожње теретних возова (<i>min/dan</i>)	1876,80	1876,80	1876,80	1876,80
Време вожње експресних путничких возова (<i>min/dan</i>)	379,60	345,80	332,80	289,90
Време вожње локалних путничких возова (<i>min/dan</i>)	687,60	640,80	622,80	563,40
Укупно (<i>min/dan</i>)	2944,00	2863,40	2832,40	2730,10

Табела 8.12 Приказ капацитета трасе пруге-пропусне моћи за варијантна решења реконструкције

Критеријум	Варијантна решења			
	V1	V2	V3	V4
Пропусна моћ (<i>број возова на дан</i>)	106	126	128	168

8.3.4 Минимум последица на просторни развој

Вредности критеријума и одговарајућа критеријумка функција f_4 се добија на основу модела који је дефинисан у поглављу 7.2.4 и приказане су у табелама 8.13 и 8.14.

Табела 8.13 Приказ нумеричких вредности последица на просторни развој за варијантна решења реконструкције

Критеријуми	Нумеричке вредности	Варијантна решења			
		V1	V2	V3	V4
Очување просторних целина	Дужина трасе која пресеца подручја за становање (km)	1,466	1,300	1,100	0,800
	Дужина трасе која пресеца подручја за привредне активности (km)	0,602	1,112	1,320	0,991
	Дужина трасе која пресеца подручја за одмор и рекреацију (km)	1,200	0,750	0,800	1,000
	Дужина саобраћајне и техничке инфраструктуре за реконструкцију (km)	2,012	2,212	2,500	3,350
Заузимање површина	Површина обрадивог земљишта са јед. културама (ha)	4,8	8,6	12,4	16,2
	Површина земљишта са вишегод. културама (воћњаци, виногради, шуме) (ha)	2,60	3,05	4,75	9,80
	Површина грађевинског земљишта (изграђеног и планираног) (ha)	0,7	1,3	2,7	2,9
Очување културно историјског наслеђа	Удаљеност споменика културе/ природног добра од трасе (km)	2,4	2,4	3,7	3,7
	Површина комплекса са природним добром које заузима пружни појас (ha)	2,7	2,7	4,9	5,8
Последице раздвајања формираних целина	Однос будућих и постојећих веза између центара активности и гравитационог подручја (оцена)	1	1,8	1,9	2,1
	Однос површине раздвојеног дела и целокупног комплекса (оцена)	1,6	1,7	2,9	3,7

Табела 8.14 Приказ последица на просторни развој за варијантна решења реконструкције исказане бодовима

Критеријуми	Варијантна решења			
	V1	V2	V3	V4
Очување просторних целина (бодови)	30,0	30,0	32,8	31,5
Заузимање површина (бодови)	8,5	12,5	19,5	30,0
Очување културно историјског наслеђа (бодови)	5,0	5,0	9,0	11,0
Последице раздвајања формираних целина (бодови)	4,8	5,0	9,0	11,0
Укупно (бодова)	48,3	52,5	70,3	83,5

8.3.5 Минимум утицаја на животну средину

Вредности критеријума и одговарајућа критеријумка функција f_3 се добија на основу модела који је дефинисан у поглављу 7.2.5 и приказане су у табелама 8.15 и 8.16.

Табела 8.15 Приказ нумеричких вредности утицаја на животну средину за варијантна решења реконструкције

Критеријуми	Нумеричке вредности	Варијантна решења			
		V1	V2	V3	V4
Утицај буке и вибрација	Површина која је изложена меродавном нивоу буке у току дана/ноћи и вибрацијама у насељеним подручјима (ha)	24,34	28,03	28,45	29,70
Утицај на земљиште	Површине земљишта изложене загађивачима и деградацијом (ha)	2,50	8,70	12,56	15,47
Утицај на воде	Површина зоне водоснабдевања и обале површинских токова изложене загађивачима и површина на којој је настала промена режима површинских и подземних вода (ha)	15,60	12,60	17,00	18,00
Утицај на флору и фауну	Површина са заштићеним биљним и животињским врстама изложене загађивачима (ha)	3,45	5,62	11,52	13,56
Утицај на климу и микроклиму	Површина са промењеним макро и микро климатским карактеристикама (ha)	0,5	1,2	1,4	1,8
Утицај на пејзаж	Површина са промењеном морфологијом и вегетацијом (ha)	1,7	1,7	2,4	2,8

Табела 8.16 Приказ утицаја на животну средину за варијантна решења
реконструкције исказане бодовима

Критеријуми	Варијантна решења			
	V1	V2	V3	V4
Утицај буке и вибрација (бодови)	8,0	9,0	9,5	10,0
Утицај на земљиште (бодови)	2,5	6,0	8,0	10,0
Утицај на воде (бодови)	8,5	6,0	9,2	10,0
Утицај на флору и фауну (бодови)	3,5	4,5	8,5	10,0
Утицај на климу и микроклиму (бодови)	3,5	7,0	8,0	10,0
Утицај на пејзаж (бодови)	6,5	6,5	9,0	10,0
Укупно (бодова)	34,5	39,0	52,2	60,0

8.3.6 Рангирање варијантних решења реконструкције

Након процене и вредновања, које је реализовано у претходном поглављу, тако што је сваком предложеном варијантном решењу реконструкције трасе V_j ($j=1, \dots, 4$) додељена вредност критеријумске функције f_i ($i=1, \dots, 5$) за усвојене критеријуме, прелази се на следећи ниво модела за оптимизацију, а то је рангирање, односно поступак добијања редоследа – ранг листи варијаната реконструкције трасе. Прва активност у овом поступку је формирање почетне матрице F_{ij} за одлучивање. Израчунате вредности критеријумских функција f_{ij} (вредност i -те критеријумске функције за j -то варијантно решење), чине елементе почетне матрице за одлучивање. Ова матрица је приказана у табели 8.17, при чему сваки ред у матрици одговара једном варијантном решењу, а свака колона једној критеријумској функцији.

Табела 8.17 Почетна матрица за одлучивање

	f_1	f_2	f_3	f_3^*	f_4	f_5
	(mil €)	(mil €/god)	(min/dan)	(broj vozova)	(bodovi)	(bodovi)
	min	min	max	min	min	min
V_1	14,968	8,8044	2944,00	106,00	48,30	34,50
V_2	19,680	9,2814	2863,40	126,00	52,50	39,00
V_3	26,128	9,5700	2832,40	128,00	70,30	52,20
V_4	31,527	9,8051	2730,10	168,00	83,50	60,00

Подаци у табели 8.17 показују да нема варијанте реконструкције трасе код које су све вредности критеријумских функција најбоље. Из тих разлога и због различитих јединица мере критеријумских функција, почетна матрица F_{ij} за одлучивање се нормализује, на основу релације (8.1), а резултати су приказани у табели 8.18. Трансформација се постиже дељењем са дужином опсега (дужином интервала вредности) критеријумске функције. Дужина опсега i -те критеријумске функције је $D_i = f_i^* - f_i^-$, где за сваки i -ти критеријум f_i^* одговара најбољој варијанти система, а f_i^- најлошијој.

$$d_{ij} = T(f_i^* - f_{ij}) = \frac{f_i^* - f_{ij}}{D_i}, \quad i = 1, \dots, n \quad j = 1, \dots, m \quad (8.1)$$

Табела 8.18 Нормализација почетне матрице за одлучивање

	f_1	f_2	f_3	f_3^*	f_4	f_5
	(mil €)	(mil €/god)	(min/dan)	(broj vozova)	(bodovi)	(bodovi)
	min	min	max	min	min	min
V_1	0,000	0,000	1,000	1,000	0,000	0,000
V_2	0,285	0,477	0,623	0,677	0,119	0,176
V_3	0,674	0,765	0,478	0,645	0,625	0,694
V_4	1,000	1,000	0,000	0,000	1,000	1,000
f_i^*	14,968	8,804	2730,10	168,00	48,30	34,50
f_i^-	31,527	9,805	2944,00	106,00	83,50	60,00
D_i	-16,559	-1,001	-213,90	62,00	-35,20	-25,50

За даљу реализацију поступка рангирања потребно је свим посебним циљевима и одговарајућим критеријумским функцијама доделити релативне тежине, односно тежинске коефицијенте који детерминишу њихов значај. У овој анализи ће се за дефинисање тежинских коефицијената користити **метода симулације структуре преференције** тако да тежине-тежински коефицијенти

критеријума имају неколико комбинација вредности. У овом примеру предложена су **пет** сценарија и то на следећи начин:

Сценарио I **сви посебни циљеви** имају исту важност тако да критеријумске функције имају исте тежинске коефицијенте,

Сценарио II економски и саобраћајни аспект су изједначени тако да је највећа вредност тежинских коефицијената додељена **посебним циљевима C_1 , C_2 и C_3** , односно критеријумским функцијама f_1, f_2, f_3 и f_3^* , а најмања **посебним циљевима C_4 и C_5** , односно критеријумским функцијама f_4 и f_5 ,

Сценарио III предност се даје економском аспект тако да је највећа вредност тежинских коефицијената додељена **посебним циљевима C_1 и C_2** , односно критеријумским функцијама f_1 и f_2 , а најмања **посебним циљевима C_4 и C_5** , односно критеријумским функцијама f_4 и f_5 ,

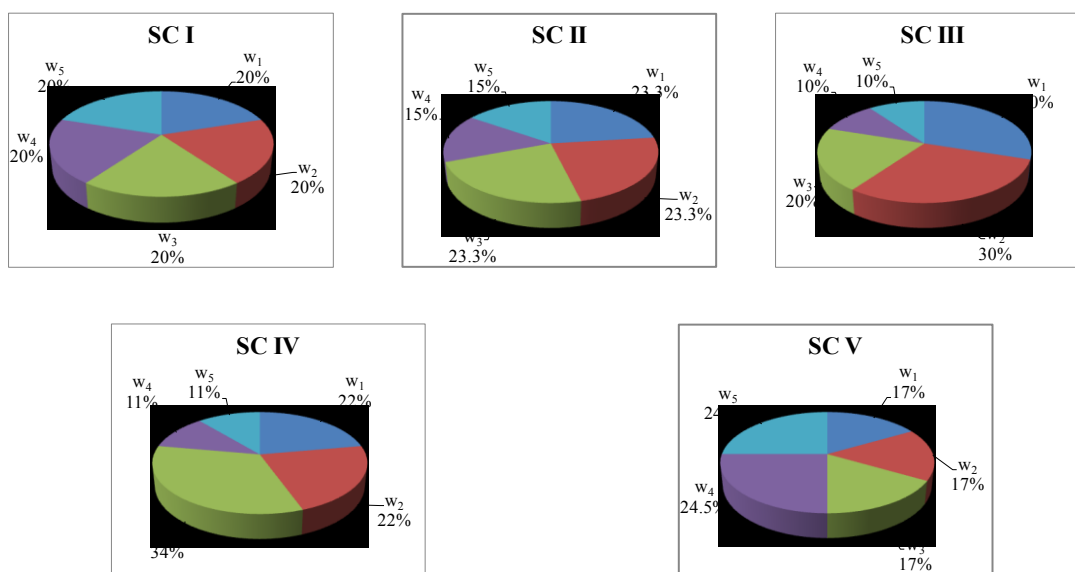
Сценарио IV предност се даје саобраћајном аспект тако да је највећа вредност тежинског коефицијента додељена **посебном циљу C_3** , односно критеријумским функцијама f_3 и f_3^* , а најмања **посебним циљевима C_4 и C_5** , односно критеријумским функцијама f_4 и f_5 ,

Сценарио V предност се даје еколошком аспект тако да је највећа вредност тежинских коефицијената додељена **посебним циљевима C_4 и C_5** , односно критеријумским функцијама f_4 и f_5 , а најмања **посебним циљевима C_1, C_2 , и C_3** , односно критеријумским функцијама f_1, f_2, f_3 и f_3^* .

Ненормализоване вредности тежинских коефицијената, за предложена могућа сценарија, приказане су у табели 8.19 и на слици 8.2.

Табела 8.19 Ненормализоване вредности тежинских коефицијената за предложена сценарија

Тежински коефицијенти	Сценарио				
	SC I	SC II	SC III	SC IV	SC V
w_1	1	3	3	2	2
w_2	1	3	3	2	2
w_3	1	3	2	3	2
w_4	1	2	1	1	3
w_5	1	2	1	1	3



Слика 8.2 Графички приказ ненормализованих вредности тежинских коефицијената за предложена сценарија

8.3.7 Финална матрица за одлучивање и ранг листе

На основу вредновања по критеријумима и дефинисаним сценаријима тежинских коефицијената, на основу релација (7.30), (7.31) и (7.32) методе VIKOR и усвојене тежине стратегије одлучивања „већином критеријума“ $v = 0,5$, добијене су: матрице за одлучивање на основу мера Q_j , QS_j и QR_j (приказане у табели 8.20), финална матрица за одлучивање (приказана у табели 8.21) и ранг-листе (приказане у табели 8.22).

Табела 8.20 Матрице за одлучивање на основу мера Q_j , QS_j и QR_j

		$V1$	$V2$	$V3$	$V4$
SC I	Q_j	0,022	0,118	0,662	1,000
	QS_j	0,000	0,236	0,773	1,000
	QR_j	0,044	0,000	0,551	1,000
SC II	Q_j	0,022	0,131	0,678	1,000
	QS_j	0,000	0,261	0,806	1,000
	QR_j	0,044	0,000	0,551	1,000
SC III	Q_j	0,000	0,265	0,720	1,000
	QS_j	0,000	0,314	0,793	1,000
	QR_j	0,000	0,216	0,648	1,000
SC IV	Q_j	0,246	0,128	0,742	1,000
	QS_j	0,000	0,257	0,961	1,000
	QR_j	0,492	0,000	0,523	1,000
SC V	Q_j	0,011	0,107	0,648	1,000
	QS_j	0,000	0,214	0,745	1,000
	QR_j	0,022	0,000	0,551	1,000

Табела 8.21 Финална матрица за одлучивање на основу мере Q_j

Вар. реш.	Сценарио				
	SC I	SC II	SC III	SC IV	SC V
V_1	0,022	0,022	0,000	0,246	0,011
V_2	0,118	0,131	0,265	0,128	0,107
V_3	0,662	0,678	0,720	0,742	0,648
V_4	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Табела 8.22 Ранг листе варијанти трасе за предложена сценарија и $\nu = 0.5$

Ранг	Сценарио				
	SC I	SC II	SC III	SC IV	SC V
1	$V_1(0,022)$	$V_1(0,022)$	$V_1(0,000)$	$V_2(0,128)$	$V_1(0,011)$
2	$V_2(0,118)$	$V_2(0,131)$	$V_2(0,265)$	$V_1(0,246)$	$V_2(0,107)$
3	$V_3(0,662)$	$V_3(0,678)$	$V_3(0,720)$	$V_3(0,742)$	$V_3(0,648)$
4	$V_4(1,000)$	$V_4(1,000)$	$V_4(1,000)$	$V_4(1,000)$	$V_4(1,000)$

8.3.8 Анализа резултата

Као вишекритеријумски најбоље, варијантно решење поред прве позиције на компромисној ранг листи треба да задовољи и услове „довољне предности“ и „довољне стабилности“ (услов $U1$ и услов $U2$). За усвојене вредности тежинских коефицијената, варијантно решење V_1 је у четири од укупно пет предложених сценарија заузело прву позицију на компромисној ранг листи док је за Сценарио

IV варијантно решење V_2 најбољег ранга (табела 8.22). За сва разматрана сценарија, прворангирано варијантно решење је задовољило услов „довољне стабилности“, док је услов „довољне предности“ задовољен само у *Сценарију III*. То значи, да се само у овом разматраном сценарију, када се предност даје саобраћајним критеријумима, варијантно решење V_1 може сматрати довољно бољим у односу на остала и прогласити за најбоље. Код осталих сценарија „близина“ другопласираних варијантних решења указује да се иста морају узети у разматрање, јер скуп компромисних решења за сценарија *SC I*, *SC II*, *SC III* и *SC V* сачињавају прворангирано и другорангирано варијантно решење, V_1 и V_2 . Овако добијени резултати у виду скупа компромисних решења се нуде доносиоцима одлуке у поступку одлучивања за решење најповољнијег варијантног решења реконструкције деонице железничке пруге. Које од ових решења ће изабрати доносиоци одлуке зависи од додатних анализа и прорачуна варијантних решења из скупа компромисних решења. У поновљеном рангирању ових решења утврдиће се предности и недостаци сваке од њих, па ће се тако одабрати најповољније компромисно решење.

9 ЗАКЉУЧАК

Оптимизација трасе и избор њеног најповољнијег варијантног решења железничке пруге је комплексан проблем у области железничке инфраструктуре из чега проистиче неопходност и важност истраживања и решавања овог проблема, како са практичног, тако и са научног аспекта.

Најповољније варијантно решење трасе, као резултат овог оптимизационог избора, је она траса која на најбољи начин испуњава техничке, саобраћајне, економске и еколошке захтеве који се постављају савременој железничкој инфраструктури. Овако изабрано решење трасе најуспешније усклађује сва улагања и трошкове, обезбеђује брз, безбедан, ефикасан, комфоран, поуздан, економичан, рентабилан, конкурентан и еколошки прихватљив железнички саобраћај.

Захтеви који се постављају железничкој инфраструктури су последица усаглашавања са стратегијом развоја и управљања железничким саобраћајним системом заснованом на циљевима Европске саобраћајне политике. Ово намеће неопходност прилагођавања железничких пруга, као техничког средства њене инфраструктуре, концептима интероперабилности и одрживог саобраћаја.

Ово има за последицу да се постојећи, до сада примењивани, модели развоја железничких пруга не могу више ефикасно примењивати, јер се заснивају углавном на методама које у први план стављају само техничке и економске параметре и показатеље. Варијантна решења трасе железничке пруге у овим моделима су формирана и упоређивана искључиво на основу инвестиционих улагања и трошкова експлоатације, без потпуног сагледавања и вредновања и других (економских, саобраћајних, социолошких, просторних, ергономских и еколошких) ефеката. Одлучивање, односно доношење одлуке о избору најповољнијег решења, најчешће је било интуитивно и недовољно документовано.

Како би се вредновање, упоређивање и избор најповољнијег решења трасе вршило у складу са поменутиим смерницама развоја железничког саобраћајног система у раду је предложен нов, итеративни и вишекритеријумски приступ у решавању проблема оптимизације трасе железничке пруге. Тако је формулисан оригинални модел за оптимизацију трасе железничке пруге, што је и циљ ове

дисертације. Предложени модел омогућава да се у сваком конкретном саобраћајном, економском, социолошком, просторном и еколошком окружењу, из скупа допустивих решења, уз примену метода вишекритеријумске оптимизације може добити најповољније варијантно решење трасе железничке пруге и зато овај модел представља подршку доносиоцима коначне одлуке у процесу одлучивања.

С обзиром да железничке пруге припадају скупу дискретних система, тада је комплексан итеративни и вишедимензионални процес у оквиру овог оптимизационог модела дефинисан преко седам карактеристичних нивоа:

1. *ниво* Основни програмски услови за оптимизацију,
2. *ниво* Генерисање могућих варијантних решења трасе железничке пруге,
3. *ниво* Прелиминарна оптимизација – избор допустивих варијаната трасе,
4. *ниво* Утврђивање функционалних показатеља варијаната трасе,
5. *ниво* Вредновање варијаната трасе,
6. *ниво* Рангирање варијаната трасе,
7. *ниво* Финална оптимизација – избор најповољније трасе железничке пруге.

На првом нивоу модела утврђују се Основни програмски услови за оптимизацију (граничне вредности елемената трасе железничке пруге на плану и профилу, конструктивни елементи железничке пруге, систем вуче и организација саобраћаја, као и синтетна карта ограничења за трасирање).

Други ниво је ниво Генерисања могућих варијантних решења трасе железничке пруге. За генерисање варијанти сложених система као што су железничке пруге, не постоји аутоматизован поступак или модел, односно ни једна техничка, математичка и рачунарска процедура, па се варијанте трасе генеришу варирањем њених основних конструктивних и експлоатационих параметара. Како свака железничка пруга има непоновљиве услове средине и окружења формиране варијанте постају уникати.

На трећем нивоу модела се спроводи Прелиминарна оптимизација, односно анализа генерисаних варијантних решења са циљем утврђивања решења која испуњавају унапред постављене услове везане за пројектне елементе и капацитет трасе железничке пруге. Тако се добија скуп допустивих варијантних решења.

У оквиру четвртог нивоа предложеног модела утврђују се вредности функционалних показатеља варијаната трасе спровођењем возно-динамичких, саобраћајних и економских анализа као и анализе утицаја на животну средину.

Вредновање варијаната трасе представља пети ниво модела и спроводи се кроз њихово квантитативно и квалитативно оцењивање, преко више усвојених посебних циљева (инвестициона улагања, трошкови одржавања и управљања, квалитет саобраћајне услуге, последице на просторни развој и утицај на животну средину) и листе изведених критеријума и критеријумских функција. За усвојене критеријуме и критеријумске функције дефинисани су модели за њихову квантификацију.

На шестом нивоу модела варијантна решења трасе се рангирају са циљем добијања ранг-листе варијаната уз примену неке од метода вишекритеријумске анализе, у овом случају методе ВИКОР. Ако постоји више комбинација вредности тежинских коефицијената (мере релативне важности сваког критеријума у формираном поретку критеријума), односно више сценарија, тада се за сваки сценарио добија одговарајућа ранг-листа. Формиране ранг листе варијаната трасе користе се за финално одлучивање.

Завршни ниво модела за оптимизацију трасе железничке пруге је Финална оптимизација у оквиру које се доноси одлука о најповољнијој траси, односно врши се избор једног (коначног) варијантног решења или неколико (сужен скуп) варијантних решења.

Овакав приступ у приказаном оптимизационом моделу омогућава да одлучивање и доношење коначне одлуке о најповољнијој варијанти трасе железничке пруге буде објективно и документовано, без субјективних процена, уз аргументовано образложење свих резултата.

Оптимизациони модел је подршка одлучивању у свим фазама планирања и пројектовања нових или реконструкције постојећих траса железничких пруга. Модел је заснован на вишекритеријумском одлучивању, а у њега су укључени нови критеријуми, те је на тај начин остварено унапређење овог процеса и досадашњи вишекритеријумски начин одлучивања замењен је новим. Доношење коначне одлуке постаје објективније, неполитичко, поузданије и документовано.

Примена и тестирање модела извршено је на примеру избора једне од четири варијанте реконструкције трасе постојеће железничке пруге Коридора X који пролази кроз Републику Србију, на деоници између станица Инђија и Нови Сад. Добијени резултати у приказаном примеру су показали практичну примену и употребљивост овог модела. Тако је испуњен основни циљ истраживања, који је постављен у овом раду, али се отвара простор и за даља истраживања у овој области.

Даља истраживања треба усмерити ка унапређењу појединих активности у оквиру итеративног оптимизационог процеса који се спроводи у моделу. То може да подразумева: идентификовање нових критеријума и критеријумских функција у складу са променама које се могу јавити у стратегији развоја и управљања железничког саобраћајног система, примену других метода вишекритеријумске оптимизације за рангирање варијантних решења трасе, као и примену других модела за дефинисање тежинских коефицијената критеријума за вредновање.

Други правац истраживања могао би бити усмерен ка развоју аутоматског оптимизационог модела за генерисање и вредновање трасе железничке пруге. Интегрисање савремених метода рачунарске интелигенције и географских информационих система омогућавају обраду гео-просторних података, њихову синтезу у просторна ограничења и стварање великог броја допустивих варијантних решења које би затим ушле у оптимизациони поступак избора најповољније трасе железничке пруге.

10 ЛИТЕРАТУРА

- [1] Авакумовић, Ј., Авакумовић, Ј.: *Модел управљања животном средином*, Ecologica, Вол. 17, Бр. 57, 2010, стр. 35-38.
- [2] Ballester, E., Antón, J. M., Bielza, C.: *Compromise-Based Approach to Road Project Selection in Madrid Metropolitan Area*, Journal of the Operations Research Society of Japan, Vol. 46, No. 1, 2003, pp. 99-122.
- [3] Banai, R.: *Public Transportation Decision-Making: A Case Analysis of the Memphis Light Rail Corridor and Route Selection with Analytic Hierarchy Process*, Journal of Public Transportation, Vol. 9, No. 2, 2006, pp. 1-24.
- [4] Banai, R.: *Evaluation of land use-transportation systems with the Analytic Network Process*, The Journal of Transport and Land Use, Vol. 3, No. 1, 2010, pp. 85-112.
- [5] Barić, D., Radačić, Ž., Čurepić, D.: *Implementation of multi-criteria decision-making method in selecting the railway line for reconstruction*, Proceedings of Transportation Logistics in Science and Practice ICTS 2006, Portorož 2006, pp. 1-5.
- [6] Белошевић, И., Косијер, М., Ивић, М., Поповић, З., Пузавац, Л., Лазаревић, Л.: *Техничко-технолошке предности железничког транспорта са аспекта одрживог развоја*, Ecologica, Вол. 18, Бр. 63, 2011, стр. 421-426.
- [7] Вешиновић, Н., Весковић, С., Ивић, М., Милинковић, С.: *Simulacioni model za utvrđivanje propusne moći pruge Novi Beograd-Batajnica primenom metode UIC 406*, Zbornik radova YU INFO 2011, Koraonik 2011.
- [8] Бојовић, Н., Мачвански, Д.: *Управљање маркетиншким стратегијама на железници коришћењем fuzzy вишекритеријумског одлучивања*, Зборник радова SYM-OP-IS 2008, Соко Бања 2008., стр. 551-554.
- [9] Боровић, С., Николић, И.: *Вишекритеријумска оптимизација: методе, примена у логистици, софтвер*, ЦВШ ВЈ, Београд, 1998.
- [10] Бошковић, Б., Павловић, Н., Ивић, М.: *Вишекритеријумско одлучивање у дефинисању стратегије побољшања параметара квалитета превоза робе железницом*, Зборник радова SYM-OP-IS 2000, Београд 2000., стр. 451-454.
- [11] Brauers, W. K., Peldschus, P., Zavadskas, E. K., Turskis, Z.: *Multi-Objective Optimization of Road Design Alternatives with an Application of the MOORA Method*, Proceedings of the 25th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Vilnius 2008., pp. 41-548.
- [12] Baumgartner, J.P.: *Prices and cost in the Railway sector*, EPFL, Lausanne, 2001.
- [13] Весковић, С.: *Моделирање процеса и оптимизација коришћења инфраструктуре*, докторска дисертација, Саобраћајни факултет, Универзитет у Београду, Београд, 2001.
- [14] Весковић, С., Младеновић, С., Милинковић, С., Брановић, И., Димановски, К.: *Симулациони модел саобраћаја возова на једноколосечној прузи у функцији квалитета услуге*, Зборник радова Нови хоризонти саобраћаја и комуникација 2011, Добој 2011., стр. 43-47.

- [15] Гавриленков, А.В., Переселенков, Г.С.: *Изыскания и проектирование железных дорог*, Транспорт, Москва, 1984.
- [16] Граовац, С., Златковић, А., Русов, С., Павловић, Н., Милинковић, С., Марковић, М.: *Извори буке железничких возила и мере које се предузимају за њихову редукацију*, Ecologica, Вол. 16, Бр. 54, 2009, стр. 261-266.
- [17] Деполо, В.: *Вредновање утицаја развоја саобраћајних система на окружење*, Техника, Вол. 45, Бр. 5-6, 1996, стр. С9-С20.
- [18] European Commission: *White Paper - The future development of the common transport policy - A global approach to the construction of a Community framework for sustainable mobility*, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 1992.
- [19] European Commission: *White Paper - European Transportation Policy for 2010: time to decide*, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 2001.
- [20] European Commission: *EUR 20807. COST Action 335. Passengers' accessibility to heavy rail systems*, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 2004.
- [21] European Commission: *Trans-European transport network European Commission, TEN-T priority axes and projects 2005*, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 2005.
- [22] European Commission: *Technical Specification for Interoperability - People with Reduced Mobility*, Official Journal of the European Union, 2006.
- [23] European Commission: *Technical specification for interoperability relating to the subsystem 'rolling stock - noise' of the trans-European conventional rail system*, Official Journal of the European Union, 2006.
- [24] European Commission: *Technical specification of interoperability relating to 'persons with reduced mobility' in the trans-European conventional and high-speed rail system*, Official Journal of the European Union, 2007.
- [25] European Commission: *Technical specification of interoperability relating to 'safety in railway tunnels' in the trans-European conventional and high-speed rail system*, Official Journal of the European Union, 2007.
- [26] European Commission: *Modern rail – Modern Europe, Towards an integrated European railway area*, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 2008.
- [27] European Commission: *Technical Specification for Interoperability - Subsystem Infrastructure*, Official Journal of the European Communities, 2011.
- [28] European Commission: *White Paper – Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system*, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 2011.
- [29] European parliament: *Directive 96/48/EC on interoperability of the trans-European high-speed rail system*, Official Journal of the European Communities, 1996.
- [30] European parliament: *Directive 1692/96/EC on Community guidelines for the development of the trans-European transport network*, Official Journal of the European Communities, 1996.

- [31] European parliament: *Directive 2001/16/EC on interoperability of the Trans European Conventional Rail System*, Official Journal of the European Communities, 2001.
- [32] European parliament: *Directive 2004/49/EC on safety on the Community's railways and amending Council Directive 95/18/EC on the licensing of railway undertakings and Directive 2001/14/EC on the allocation of railway infrastructure capacity and the levying of charges for the use of railway infrastructure and safety certification (Railway Safety Directive)*, Official Journal of the European Communities, 2004.
- [33] European parliament: *Directive 2004/50/EC amending Council Directive 96/48/EC on the interoperability of the trans-European high-speed rail system and Directive 2001/16/EC of the European Parliament and of the Council on the interoperability of the trans-European conventional rail system*, Official Journal of the European Communities, 2004.
- [34] European parliament: *Directive 2008/57/EC on the interoperability of the rail system within the Community*, Official Journal of the European Communities, 2008.
- [35] European Railway Agency: *Technical Specification for Interoperability: Accessibility for persons with reduced mobility*, 2012.
- [36] Заједница југословенских железница: *Правилник (314) о одржавању горњег строја пруга*, ЖЕЛНИД, Београд, 1989.
- [37] Заједница југословенских железница: *Правилник (315) о одржавању доњег строја пруга*, ЖЕЛНИД, Београд, 1989.
- [38] Заједница југословенских железница: *Правилник о изменама и допунама Правилника о одржавању горњег строја пруга*, ЖЕЛНИД, Београд, 1991.
- [39] Zschweigert, M.: *Voruntersuchung zur Fuehrung einer Hochleistungsstrecke Dresden-Prag*, Eisenbahningenieur, Vol. 51, No. 10, 2000, pp. 17-21.
- [40] Ивић, М.: *Оптимизација увођења прикључних пруга, структуре и капацитета колосечних паркова техничких теретних станица*, докторска дисертација, Саобраћајни факултет, Универзитет у Београду, Београд, 1992.
- [41] Ивић, М.: *Железничке пруге*, Саобраћајни факултет, Универзитет у Београду, Београд, 2005.
- [42] Ivković, B., Popović, Ž.: *Upravljanje projektima u građevinarstvu*, Građevinska knjiga, Београд, 2005.
- [43] Jha, M. K., Schonfeld, P.: *Transit Rail Line Optimization with Genetic Algorithms and GIS*, Proceedings of the 82th Annual TRB Meeting, Transportation Research Board, Washington DC 2003.
- [44] Јовановић, Б. П.: *Изградња пруге Београд-Бар*, Железнице, Вол. 12, 1971, стр. 5-17.
- [45] Јовановић, П.: *Инвестиционо одлучивање*, Факултет организационих наука, Универзитет у Београду, Београд, 2000.
- [46] Kalamaras, G. S., Brino, L., Carrieri, G., Pline, C., Grasso, P.: *Application of Multicriteria Analysis to Select the Best Highway Alignment, Tunelling and Underground Space Technology*, Vol. 15, No. 4, 2000, pp. 415-420.
- [47] Којић, Н., Којић, Р., Рељин, И., Рељин, Б.: *Планирање и избор трасе аутопута применом неуралне мреже*, Зборник радова TELFOR 2007, Београд 2007, стр. 369-372.

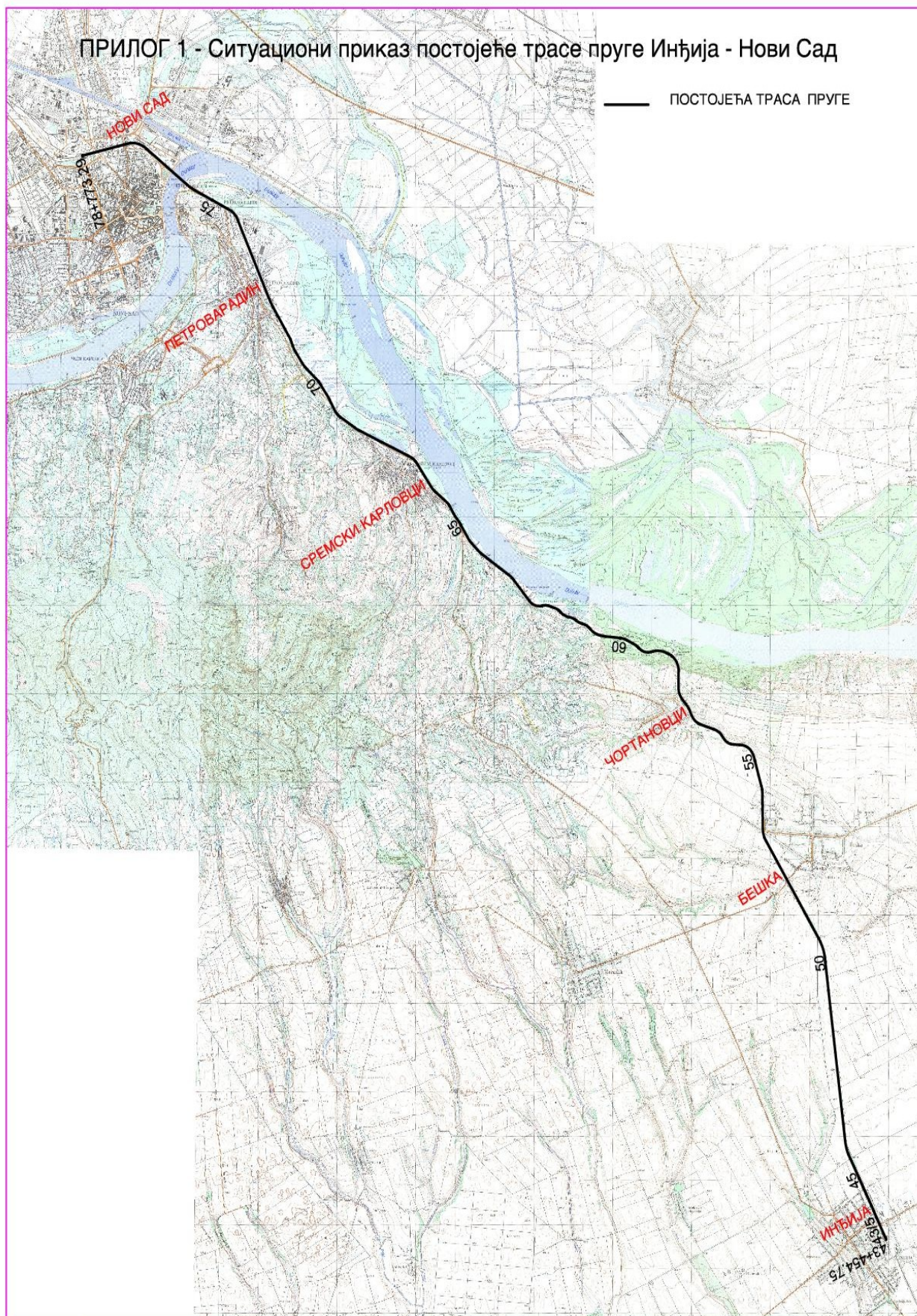
- [48] Коломејцева-Јовановић, Л.: *Принципи одрживог развоја у решавању глобалних еколошких проблема*, Ecologica, Београд, 2011.
- [49] Косијер, М.: *Прилог методологији вредновања варијаната пруга за велике брзине на нивоу генералног пројекта*, магистарски рад, Грађевински факултет, Универзитет у Београду, Београд, 1995.
- [50] Косијер, М., Ивић, М.: *Модел за избор оптималног коридора железничких пруга*, Зборник радова ЈУŽЕЛ 1997, Врњачка бања 1997., стр. 316-319.
- [51] Косијер, М., Ивић, М., Марковић, М., Аћимовић, С., Ћирић, Н., Белошевић, И.: *Аспект заштите и унапређења животне средине у процесу планирања и пројектовања железничких пруга*, Ecologica, Вол. 16, Бр. 54, 2009, стр. 256-260.
- [52] Косијер, М., Ивић, М., Марковић, М., Павловић, Н., Белошевић, И., Аћимовић, С.: *Анализа и вредновање последица изградње железничке пруге на просторне структуре у функцији одрживог развоја*, Ecologica, Вол. 18, Бр. 63, 2011, стр. 427-432.
- [53] Kosijer, M., Ivić, M., Marković, M., Belošević, I.: *Multicriteria decision-making in railway route planning and design*, Građevinar, Vol. 64, No. 3, 2012, pp 195-205.
- [54] Kosijer, M., Ivić, M., Belošević, I.: *Selection of Railway Route Applying Multiple Criteria Decision Making*, Proceedings of 4th International Scientific Conference MOTSP 2012 – Management of Technology Step to Sustainable Production, Zadar 2012., pp 17-24.
- [55] Кузовић, Љ.: *Вредновање у управљању развојем и експлоатацијом путне мреже*, Саобраћајни факултет, Универзитет у Београду, Београд, 1994.
- [56] Лазаревић, Л.: *Рампа за надвишење као просторни елемент трасе железничке пруге*, мастер рад, Грађевински факултет, Универзитет у Београду, Београд, 2010.
- [57] Максић, Г.: *Модел за избор оптималних техничко-експлоатационих параметара манипулативног места за рад са опасним материјама*, магистарски рад, Саобраћајни факултет, Универзитет у Београду, Београд, 2009.
- [58] Малетин, М., Анђус, В.: *Истаживање варијантних решења трасе спољне магистралне тангенте (СМТ) од Роспи ћуприје до прикључка на постојећу аутопут*, Грађевински факултет-ИСГ, Универзитет у Београду, Београд, 1989.
- [59] Margeta, J., Prskalo, G.: *Izbor lokacije za sanitarno odlagalište*, Građevinar, Vol. 58 No. 12, 2006, str. 997-1008.
- [60] Mladineo, N.: *Izbor trase jadranske autoceste primjenom metode višekriterijumske analize*, Zbornik radova SYM-OP-IS 1990, Kupari 1990., str. 651-654.
- [61] Оприцовић, С.: *Оптимизација система*, Грађевинска књига - Наука, Београд, 1992.
- [62] Оприцовић, С.: *Вишекритеријумска оптимизација система у грађевинарству*, Грађевински факултет, Универзитет у Београду, Београд, 1998.
- [63] Opricovic, S., Tzeng, G-H.: *Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS*, European Journal of Operational Research, Vol. 156, No. 2, 2004, pp. 445-455.

- [64] Opricovic, S., Tzeng, G-H.: *Extended VIKOR method in comparison with outranking methods*, European Journal of Operational Research, Vol. 178, No 2, 2007, pp. 514-529.
- [65] Opricovic, S., Tzeng, G-H.: *A comparative analysis of the DEA-CCR model and the VIKOR method*, Yugoslav Journal of Operational Research, Vol. 18, No. 2008, pp. 187-203.
- [66] Opricovic, S.: *A Compromise Solution in Water Resources Planning*, Water Resour Manage, Vol. 23, No. 8, 2009, pp.1549-1561.
- [67] Пађен, Ј.: *Методе просторног-прометног планирања*, Економски Институт, Загреб, 1978.
- [68] Пејчић-Тарле, С., Бојковић Н.: *Глобализација, европске интеграције и операционализација концепта одрживог саобраћаја*, Ecologica, Вол. 16, Бр. 54, 2009., стр. 273-279.
- [69] Поповић, З.: *Основе пројектовања железничких пруга*, Грађевински факултет, Универзитет у Београду, Београд, 2004.
- [70] Popović Z.: *Interoperability and Standardization of Railway Infrastructure of Serbian Railways*, Railway Technical Review, Vol. 47, No. 4, 2007, pp. 6-9.
- [71] Popović, Z., Stevanović, K., Puzavac, L.: *Railway Terminals – Accessibility for Persons with Reduced Mobility*, SPATIUM International Review, No. 20, 2009, pp. 60-67.
- [72] Popović, Z., Puzavac, L., Lazarević, L.: *Improving the Accessibility of Passenger railways in the Republic of Serbia*, Railway Technical Review, Vol. 52, No. 2, 2012, pp. 25-29.
- [73] Поповић, М.: *Примена метода вишекритеријумске анализе у планирању и пројектовању путне мреже*, Зборник радова SYM-OP-IS 1996, Златибор 1996., стр. 893-896.
- [74] Roy, B., Hugonnard, J. C.: *Ranking of Suburban Line Extension Projects on the Paris Metro System by a Multicriteria Method*, Transportation Research-A, Vol. 16A, No. 4, 1982, pp. 301-312.
- [75] Радић, С.: *Оцена ефективности и избор инвестиција*, ЖЕЛНИД, Београд, 1976.
- [76] Савић, К.: *Грађење железница – Технички услови за израду пројекта, Књига 1*, Графички уметнички завод „Планета“, Београд, 1934.
- [77] Службени гласник: *Закон о културним добрима*, Службени гласник Републике Србије, бр. 71/94, Београд, 1994.
- [78] Службени гласник: *Закон о планирању и уређењу простора и насеља*, Службени гласник Републике Србије, бр. 44/95, Београд, 1995.
- [79] Службени гласник: *Закон о стратешкој процени утицаја на животну средину*, Службени гласник Републике Србије, бр. 135/2004, Београд, 2004.
- [80] Службени гласник: *Правилник о садржини студије о процени утицаја на животну средину*, Службени гласник Републике Србије, бр. 69/2005, Београд, 2005.
- [81] Службени гласник: *Уредба о категоризацији пруга*, Службени гласник Републике Србије, бр. 75/2006, Београд, 2006.
- [82] Службени гласник: *Закон о заштити животне средине*, Службени гласник Републике Србије, бр. 36/2009, Београд, 2009.
- [83] Службени гласник: *Закон о планирању и изградњи*, Службени гласник Републике Србије, бр. 72/2009, Београд, 2009.

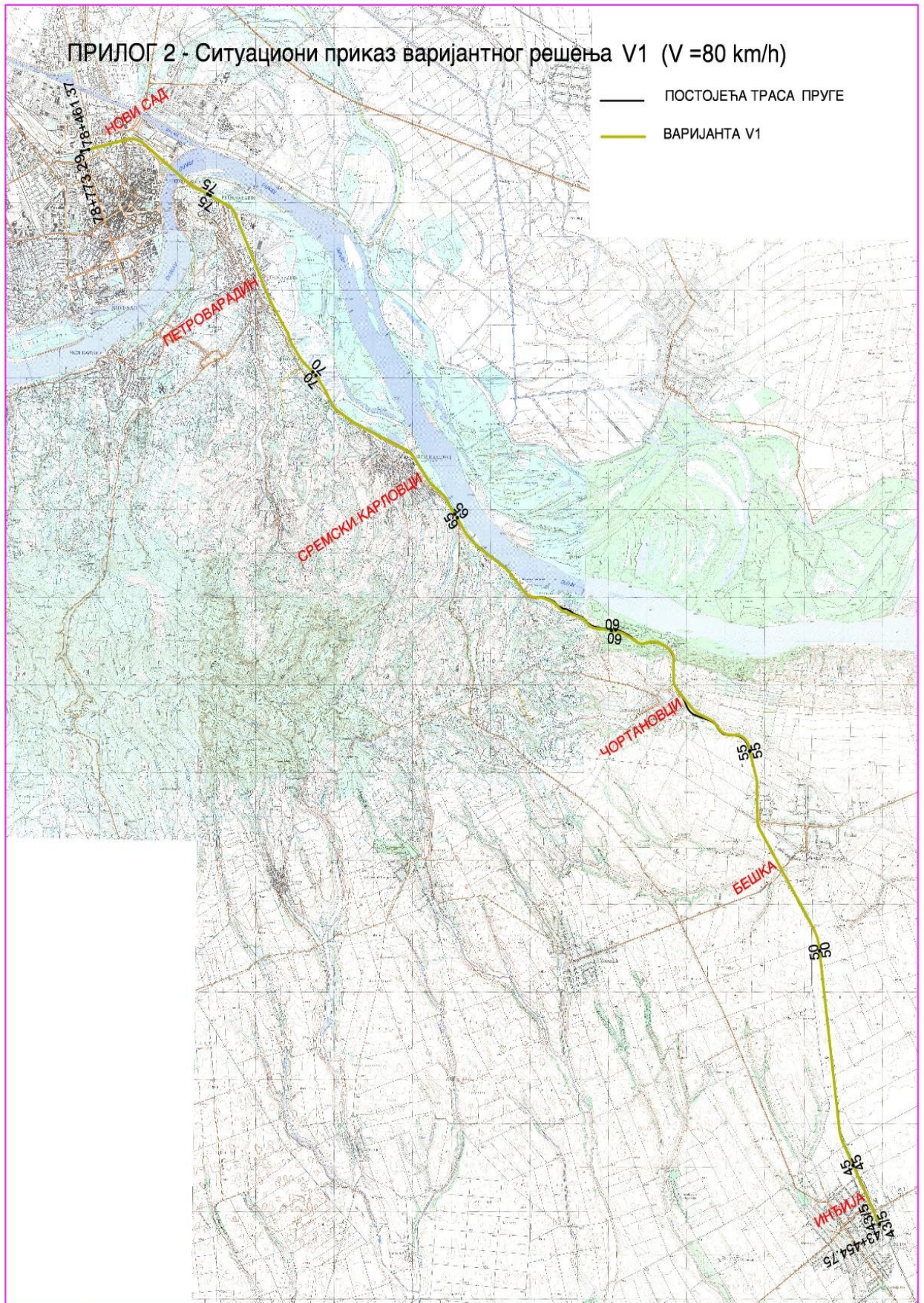
- [84] Службени гласник: *Закон о процени утицаја на животну средину*, Службени гласник Републике Србије, бр. 36/2009, Београд, 2009.
- [85] Службени гласник: *Закон о заштити природе*, Службени гласник Републике Србије, бр. 36/2009, Београд, 2009.
- [86] Службени гласник: *Закон о заштити од буке у животној средини*, Службени гласник Републике Србије, бр. 36/2009, Београд, 2009.
- [87] Службени гласник: *Правилник о техничким и другим условима за пројектовање и грађење железничких пруга и постројења, уређаја и објеката на магистралним пругама*, Службени гласник Републике Србије, бр. 56/2011, Београд, 2011.
- [88] Службени гласник: *Закон о железници*, Службени гласник Републике Србије, бр. 45/2013, Београд, 2013.
- [89] Службени лист: *Закон о безбедности у железничком саобраћају*, Службени лист Савезне Републике Југославије, бр. 36/99, Београд, 1999.
- [90] Стојановић, Б.: *Животна средина и одрживи развој*, НИП „Дечја кућа“, Горњи Милановац, 2007.
- [91] Trbojević, V., Prašcević, Ž.: *Organizacija građevinskih radova*, Građevinska knjiga, Beograd, 1992.
- [92] United Nations: *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*, Kyoto, 1998.
- [93] Union Internationale des Chemis de Fer: *Handbuch uber die Auswahl der Investitionen*, Paris, 1972.
- [94] Union Internationale des Chemis de Fer: *UIC Leaflet 406-Capacity*, Paris, 2004.
- [95] Union Internationale des Chemis de Fer: *UIC Leaflet 700 OR*, Paris, 2004.
- [96] Union Internationale des Chemis de Fer: *UIC Leaflet 714 R*, Paris, 2009.
- [97] Чичак, М.: *Моделирање у железничком саобраћају*, Саобраћајни факултет, Универзитет у Београду, Београд, 2003.
- [98] Чичак, М., Весковић, С.: *Организација железничког саобраћаја II*, Саобраћајни факултет, Универзитет у Београду, Београд, 2005.
- [99] Чичак, М., Ивић, М.: *Избор трасе пруге*, Саобраћајни факултет и Саобраћајни институт ЦИП Београд, Београд, 1992.
- [100] Чупић, М., Рао Tummala, В.Т.: *Савремено одлучивање*, Факултет организационих наука, Универзитет у Београду, Београд, 1997.
- [101] Чупић, М., Сукновић, М.: *Одлучивање*, Факултет организационих наука, Универзитет у Београду, Београд, 2008.
- [102] Џевер, Р.: *Примена модела вишекритеријумског одлучивања у избору варијанте трасе брзе пруге од станице Инђија до станице Нови Сад*, Зборник радова SYM-OP-IS 1992, Београд 1992., стр. 267-269.
- [103] Wang, D., Ma, W.: *Synthetische optimale Entscheidung in der Eisenbahnplanung*, Schienen der Welt, Vol. 12, 1988, pp.23-28.
- [104] <http://www.gis.ba/valorizacija-zemljista-u-gis-u-u-svrhu-odabira-optimalne-trase/>
- [105] http://www.ppiaf.org/sites/ppiaf.org/files/documents/toolkits/highwaystoolkit/6/financial_models/index.html

ПРИЛОЗИ

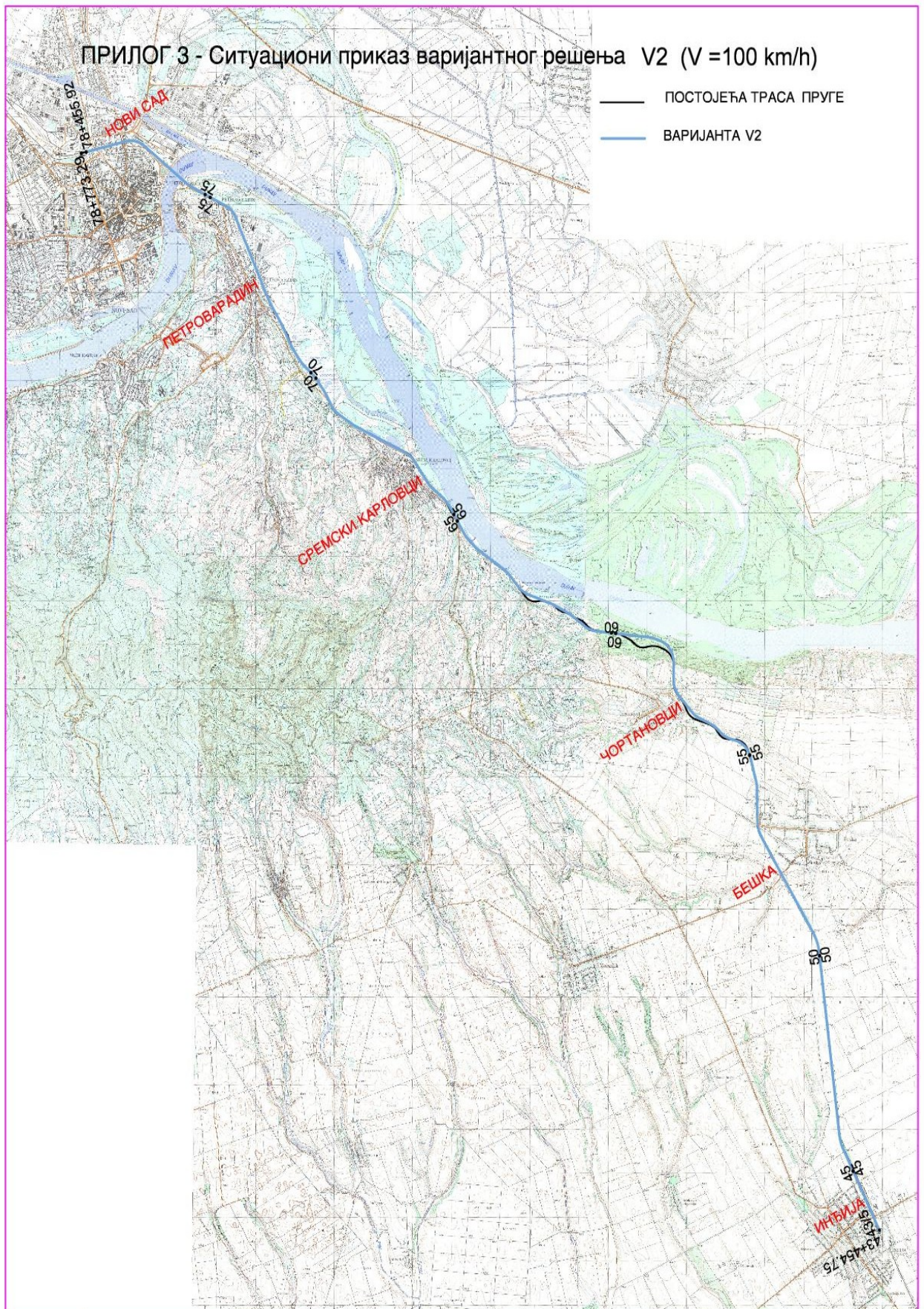
ПРИЛОГ 1 - Ситуациони приказ постојеће трасе пруге Инђија - Нови Сад



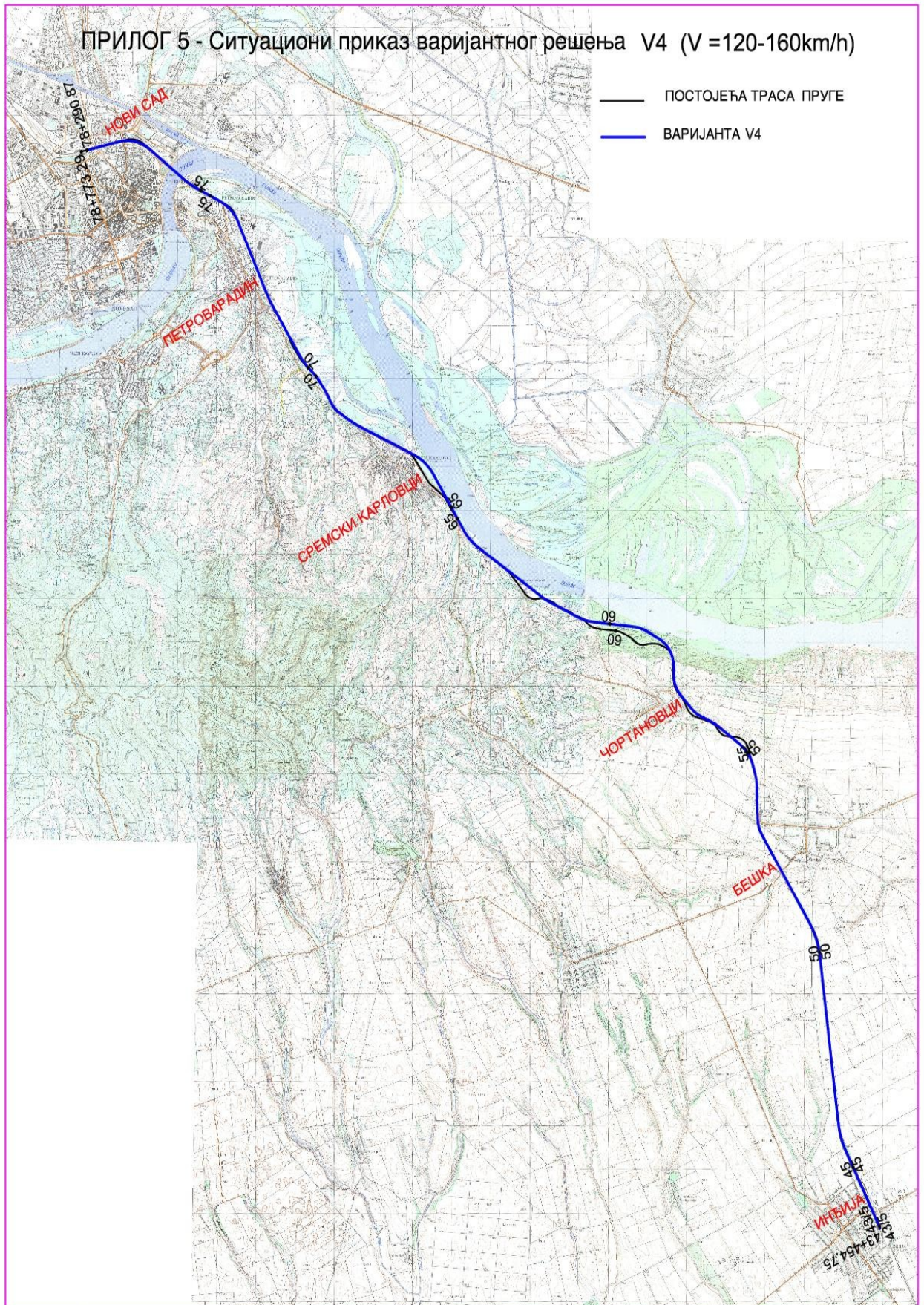
ПРИЛОГ 2 - Ситуациони приказ варијантног решења V1 (V = 80 km/h)



ПРИЛОГ 3 - Ситуациони приказ варијантног решења V2 (V = 100 km/h)



ПРИЛОГ 5 - Ситуациони приказ варијантног решења V4 (V =120-160km/h)



Биографски подаци о кандидаткињи

Милана В. Косијер рођена је 1959. године у Зрењанину, где је завршила основну школу и гимназију. На Грађевински факултет у Београду - Одсек за путеве и железнице, уписала се 1978. године. Студије је завршила септембра 1983. године са просечном оценом 8,11 и оценом 10 на дипломском раду. За постигнут успех у току школовања добила је дипломе „Вук Караџић“, а за дипломски рад: „Основно идејно решење заједничке железничке и аутобуске станице у Зрењанину“, добила је Октобарску награду града Београда 1983. године за најбоље стручне и научне радове студената.

Последипломске студије на Универзитету у Београду - Грађевинском факултету уписала је 1986. године и завршила их 1991. године са просечном оценом 9,66. Магистарски рад под називом: „Прилог методологији вредновања варијаната пруга за велике брзине на нивоу генералног пројекта“ одбранила је маја 1995. године на Грађевинском факултету и стекла академску титулу магистра техничких наука.

Запослена је на Универзитету у Београду - Саобраћајном факултету као асистент и у настави је ангажована на извођењу вежби на предметима: „Железничке пруге“, „Организација одржавања железничких пруга“ и „Планирање и саобраћајно пројектовање железничких пруга“, на основним академским студијама, и „Планирање, саобраћајно пројектовање и одржавање железничке инфраструктуре“, на мастер академским студијама. Уже области њеног научног и истраживачког интересовања су планирање, саобраћајно пројектовање и одржавање железничке инфраструктуре.

Као аутор и коаутор објавила је три рада у међународним часописима са SCI листе (са IF), осам радова у домаћим часописима, као и 32 рада и саопштења на домаћим и међународним научним скуповима и конференцијама. Као члан ауторског тима учествовала је у изради 22 научно-истраживачке и стручне студије и пројекта.

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписана Милана Косијер

број уписа _____

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

„ОПТИМИЗАЦИЈА ТРАСЕ ЖЕЛЕЗНИЧКЕ ПРУГЕ“

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанта

У Београду, 28.11.2013. год.

Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Милана Косијер

Број уписа _____

Студијски програм _____

Наслов рада „Оптимизација трасе железничке пруге“

Ментор Проф. др Срђан Русов, дипл. инж.

изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанта

У Београду, 28.11.2013. год.

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

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

„Оптимизација трасе железничке пруге“

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство

2. Ауторство - некомерцијално

3. Ауторство – некомерцијално – без прераде

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима

5. Ауторство – без прераде

6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанта

У Београду, 28.11.2013. год.
