



**УНИВЕРЗИТЕТ „УНИОН-НИКОЛА ТЕСЛА“
У БЕОГРАДУ
Факултет за градитељски менаџмент**

**ПРИМЕНА ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКЕ
ОПТИМИЗАЦИЈЕ КОД ИЗБОРА
КОНСТРУКТИВНОГ РЕШЕЊА САНАЦИЈЕ
КЛИЗИШТА**

Докторска дисертација

**Кандидат,
МСц Никола Д. Гвоздовић**

**Ментор,
В. проф. др Љиљана Милић Марковић**

Београд, 2022.

ФАКУЛТЕТ ЗА ГРАДИТЕЉСКИ МЕНАЏМЕНТ
КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број

РБР

Идентификациони број

ИБР

Тип документације: Монографска документација

ТД

Тип записа: Текстуални штампани материјал

ТЗ

Врста рада: Докторска дисертација

ВР

Аутор: МСц Никола Д. Гвоздовић

АУ

Ментор: В. проф. др Љиљана Милић Марковић

МН

Наслов рада: **Примена вишекритеријумске оптимизације код избора конструктивног
решења санације клизишта**

НР

Језик публикације: Српски (ћирилица)

ЈП

Језик извода: С/Е

ЈИ

Земља публикавања: Србија

ЗП

Уже географско подручје: Србија

УГП

Година 2022.

ГО

Издавач: Ауторски репринт

ИЗ

Место и адреса: Факултет за градитељски менаџмент, Ц. Душана бр. 62-64, Београд

МА

Физички опис рада: Број поглавља 6, стр. 148, цитата 302, табела 29, слика 44 и
формула 145.

ФО

Научна област: Техничко-технолошке науке

НО

Научна дисциплина: Вишекритеријумска оптимизација

НД

Кључне речи: клизиште, трошкови санације, вишекритеријумска оптимизација,
PROMETHEE, VIKOR, TOPSIS

КР

Чува се: Библиотека Факултет за градитељски менаџмент, Београд

ЧС

Важна напомена

ВН

Извод

ИЗ

АПСТРАКТ

Најчешћи и најсложенији вид нарушавања тла односи се на стабилност терена, било природних падина или вештачких косина. Свако нарушавање постојеће равнотеже на падинама или косинама изазива померања под утицајем гравитације: клизање, одроњавање или течење површинског дела тла, али и дубљих делова стенске масе. За овако успостављено клизање, у геолошкој и геотехничкој терминологији и номенклатури, устаљен је термин клизиште.

Клизишта се активирају тако да се иницијално откине и покрене потенцијално нестабилна стенска маса. Узрок слома је комбинација нестабилне структуре и догађаја или иницијатора. Неки од узрока могу бити природни - вода, пораст подземних притисака воде, ерозија (деловања неке реке или ерозија на обалама, глацијална ерозија), или вештачки - она која су дело људских руку (подкопавање површинским копањем или рударским радовима, ископи на градилиштима, проширење путева итд). После почетног откидања, може доћи до накнадних откидања стенских маса, како узбрдно тако и низбрдно од зоне клизишта. Процеси клизања изазивају велике материјалне штете и озбиљно ограничавају простор за пројектовање и изградњу грађевинских објеката.

На основу утврђене геометрије, инжењерско-геолошког профила терена и физичко-механичких параметара тла приступа се изради пројекта конструкције санације клизишта. У прелиминарној фази израде пројекта санације клизишта разматра се више могућих конструктивних решења санације кроз предложена варијантна решења. Узимају се у обзир инжењерски (технологија санације клизишта), економски (цена санације, време потребно да се санација изведе, проблеми набавке опреме и материјала) и еколошки (не нарушавање природне равнотеже – вода, камен, уклопљеност конструкције у амбијент) аспекти санације. Конструктивно решење представља део ширег система мера стабилности у пројекту санације клизишта, али у докторској дисертацији она је узета као тежишни део система, јер секундарне санационе мере могу се независно бирати и могу бити исте код свих варијантних решења. Финална варијанта пројектног конструктивног решења санације клизишта подразумева селекцију оптималне конструкције са одговарајућим фактором сигурности.

При избору оптималног конструктивног решења санације клизишта користе се методе вишекритеријумске оптимизације. Вишекритеријумска оптимизација представља прилаз решавању проблема кроз скупину разноврсних техника и метода,

које као финални резултат имају редослед варијаната, почевши од најподобније па до најнеподобније. Оне варијанте које су узете у разматрање у наведеном проблему се разликују у нивоу испуњења задатих циљева изабраних критеријума, у ком случају ће бити вероватно да нити једна варијанта неможе бити најповољнија гледано у односу на све циљеве и критеријуме. Исто тако се често дешава да циљеви и критеријуми буду конфликтни између себе.

Под појмом вишекритеријумска оптимизација често се подразумева вишеатрибутивна оптимизација, тј. процес избора и рангирања варијантних решења садржаних у доступном и коначном скупу варијаната у дискретном простору одлучивања. По досадашњим истраживањима и примена, развијена је методологија решавања вишекритеријумских задатака која садржи шест фаза, где се пре почетка дефинишу циљеви, приоритети и алати вишекритеријумског вредновања.

Приоритети намећу интересе и ставове разних интересних чиниоца и путем дефинисања тежинских коефицијената критеријума на директан начин утичу на финалан избор решења.

На крају поступка вишекритеријумског вредновања добијамо експлицитне излазне податке базираних на изабрано варијантно решење и они се подвргавају анализи осетљивости.

У литератури постоји више приступа за решавање проблема вишекритеријумске оптимизације. Сваки приступ карактеришу специфичне математичке карактеристике, која дају различите резултате.

У дисертацији ће се применити неколико метода вишекритеријумских техника анализе - VIKOR, PROMETHEE и "TOPSIS" које су се показале као веома погодне технике за стратешка планирања.

Датум пријаве рада

ДП

Датум одбране

ДО

Чланови комисије (научни степен, име и презиме, звање и факултет)

ЧК

Чланови комисије

В. проф.др Љиљана Милић Марковић, ментор

Проф.др Горан Ћировић, ко-ментор

Проф.др Сузана Копривица, председник комисије

Проф.др Љубо Марковић, члан комисије

Доц.др Миљан Ковачевић, члан комисије

FACULTY OF CONSTRUCTION MANAGEMENT
KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number

ANO

Identification number

INO

Documentation type: Monograph type

DT

Type of record: Printed text

TR

Contents code: Doctoral dissertation

CC

Author: Nikola D. Gvozdović

AU

Mentor: PhD Ljiljana Milić Marković

MN

The paper title: **APPLICATION OF THE MULTI-CRITERIA OPTIMIZATION METHOD
TO REPAIR LANDSLIDE IN ADDITIONAL SOIL COLLAPSE**

TB

Language of text: Serbian (Cirilic alphabet)

LT

Language of abstract: S/E

LA

Country of publication: Serbia

CP

Locality of publication: Serbia

LP

Publication year: 2022.

PY

Publisher: author's reprint

PU

Publication Place: Beograd, Faculty of construction management, C. Dusana 62-64,
Belgrade

PP

Physical description: chapters 6, page 148, number of citations 302, tables 29, pictures
44 and formules 145.

PD

Scientific discipline: Revision

SD

Keywords: accounting, control, revision i financial reporting,
performace

UC

Holding data: In the library of the Faculty of construction management, Belgrade

HD

Note: None

ABSTARACT

The most common and most complex type of soil disturbance refers to the stability of the terrain, either natural slopes or artificial slopes. Any disturbance of the existing balance on the slopes or slopes causes movements under the influence of gravity: sliding, landslide or flow of the surface part of the soil, but also of deeper parts of the rock mass. For such established sliding, in geological and geotechnical terminology and nomenclature, the term landslide is established.

Landslides are triggered by initially tearing off and moving a potentially unstable rock mass. The cause of failure is a combination of an unstable structure and an event or initiator. Some of the causes can be natural - water, an increase in underground water pressure, erosion (actions of a river or erosion on the banks, or glacial erosion), or artificial - those that are the work of human hands (undermining by surface mining or mining works, excavations on construction sites, widening of roads, etc.). After the initial detachment, there may be subsequent detachment of rock masses, both uphill and downhill from the landslide zone. Sliding processes cause great material damage and seriously limit the space for designing and building constructions.

On the basis of the determined geometry, engineering-geological profile of the terrain and physical-mechanical parameters of the soil, the development of the construction project for landslide rehabilitation is started. In the preliminary phase of the development of the landslide remediation project, several possible constructive remediation solutions are considered through the proposed variant solutions. Engineering (landslide rehabilitation technology), economic (rehabilitation cost, time needed to carry out rehabilitation, equipment and material acquisition problems) and ecological (not disturbing the natural balance - water, stone, integration of the structure into the environment) aspects of rehabilitation are taken into account. The constructive solution is part of a wider system of stability measures in the landslide rehabilitation project, but in the doctoral dissertation it was taken as the most importante part of the system, because the secondary rehabilitation measures can be chosen independently and can be the same for all variant solutions. The final version of the design and construction solution for the rehabilitation of landslides implies the selection of an optimal construction with an appropriate safety factor.

Multi-criteria optimization methods are used when choosing the optimal

constructive solution for landslide rehabilitation. Multi-criteria optimization represents an approach to problem solving through a group of different techniques and methods, which as the end result have an order, or ranking of variants, starting from the most eligible to the least eligible. Those variants that were taken into consideration in the mentioned problem may differ in the level of fulfillment of the set objectives of the selected criteria, in which case it is likely that no variant will be the most favorable in terms of all objectives and criteria. It is also often the case that goals and criteria conflict with each other.

The term multi-criteria optimization often means multi-attribute optimization, i.e. the process of selecting and ranking variant solutions contained in an available and finite set of variants in a discrete decision space. Based on previous research and application, a methodology for solving multi-criteria tasks has been developed, which contains six phases, where the goals, priorities and tools of multi-criteria evaluation are defined before the start.

Priorities impose the interests and attitudes of various interested parties, and by defining the weighting coefficients of the criteria, they directly influence the final choice of solution. At the end of the multi-criteria evaluation procedure, we receive explicit output data related to the selected variant solution and they can be subjected to some kind of sensitivity analysis. There are several approaches in the literature for solving multicriteria optimization problems. Each approach is characterized by specific mathematical features, which give different results. Several methods of multi-criteria analysis techniques - VIKOR, PROMETHEE and "TOPSIS" will be applied in the dissertation, which have proven to be very suitable techniques for strategic planning..

Accepted by the Scientific Board on

ASB

Defented on

DE

M. Sci. Thesis Defense Board:

DB (Scientific title/name and last name/rank/faculty)

PhD Ljiljana Milić Marković (mentor); PhD Goran Ćirović (co-mentor); PhD Suzana Koprivica (chairman of the board); PhD Ljubo Marković (board member); Associate professor, PhD Miljan Kovačević (board member)

САДРЖАЈ

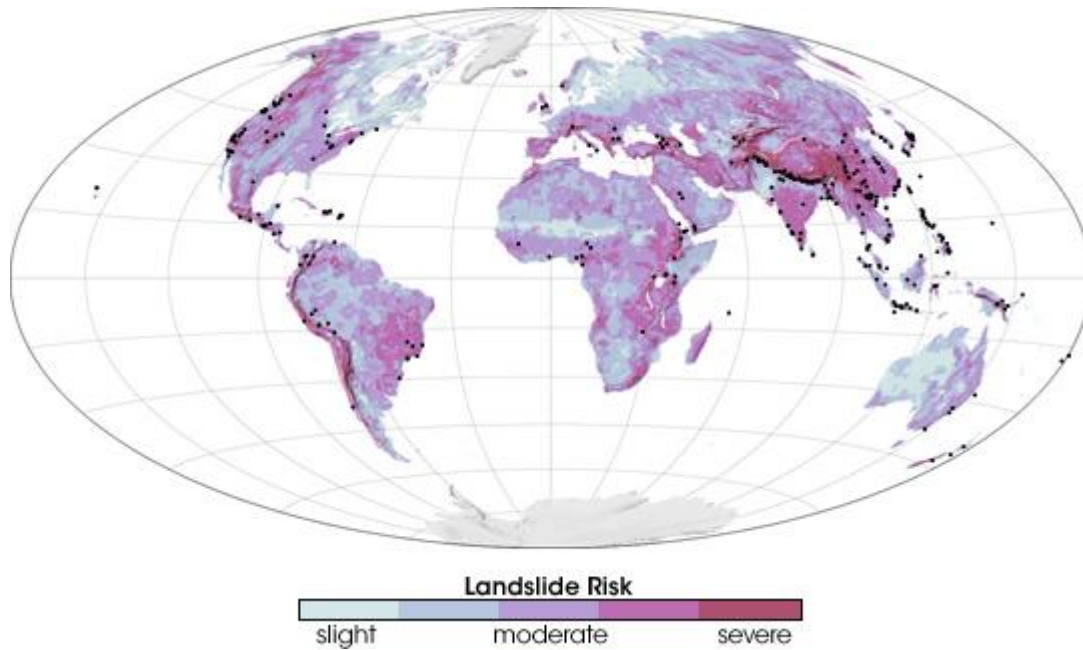
САДРЖАЈ	3
1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА.....	5
1.1. ЕКСПОЗИЦИЈА ПРОБЛЕМА.....	5
1.2. ЗНАЧАЈ И АКТУЕЛНОСТИ ИСТРАЖИВАЊА.....	8
1.3. ЦИЉЕВИ ИСТРАЖИВАЊА	10
1.4. ПОЛАЗНЕ ХИПОТЕЗЕ	11
1.5. ТЕОРИЈСКО – МЕТОДОЛОШКИ ОКВИР ИСТРАЖИВАЊА	12
1.6. ОЧЕКИВАНИ РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА	12
1.7. СТРУКТУРА ДОКТОРСKE ТЕЗЕ	13
2. ПРИМЕНА ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКЕ ОПТИМИЗАЦИЈЕ КОД САНАЦИЈЕ КЛИЗИШТА	16
2.1. ОСНОВЕ О КОСИНАМА И ФОРМИРАЊУ КЛИЗИШТА.....	16
2.2. ГЕОТЕХНИЧКА ИСПИТИВАЊА КОСИНА/КЛИЗИШТА.....	19
2.2.1. Геотехничка испитивања.....	19
2.2.2. Анализа физичко-механичких параметара тла клизишта.....	20
2.2.3. Методологија анализа прорачуна клизишта.....	21
2.2.4. Методологија санација клизишта.....	55
3. МЕТОДЕ ЗА ВРЕДНОВАЊЕ И РАНГИРАЊЕ ВАРИЈАНТНИХ РЕШЕЊА.....	57
3.1. ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКО ВРЕДНОВАЊЕ.....	58
3.1.1 Сакупљање повратних информација	60
3.1.2 Дефинисање сетова критеријума	61
3.1.3 Методологија вишекритеријумског вредновања.....	62
3.1.4 Циљеви, критеријуми и показатељи вредности.....	66
3.2. МЕТОДЕ ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКОГ ВРЕДНОВАЊА	67
3.2.1 Метода VIKOR.....	68
3.2.1.1 Алгоритам по ком ради метода VIKOR	69
3.2.2 Метода PROMETHEE- GAIA	71
3.2.3 Метода TOPSIS	74
3.2.4 Метода SAW	76
3.2.5 Метода АНР	77
3.2.6 Метода ELECTRE	79
3.2.7 Груби скупови.....	79
3.2.7.1 Математичка основа	80
3.2.7.2 Груба припадност	82
3.2.7.3 Зависност атрибута	83
3.2.7.4 Редуција атрибута	84
3.2.7.5 Матрица и функција разликовања	84

3.2.7.6	Правила одлучивања.....	85
3.3.	МЕСТО И УЛОГА ВРЕДНОВАЊА У ПРОЦЕСУ ПРОЈЕКТОВАЊА	86
4.	СТУДИЈА СЛУЧАЈА - ПРИКАЗ И ОБРАДА ПРИКУПЉЕНИХ ПОДАТАКА.....	89
4.1.	УВОДНЕ НАПОМЕНЕ.....	89
4.2.	ПРЕДЛОГ ПОТПОРНИХ КОНСТРУКЦИЈА ЗА САНАЦИЈУ КЛИЗИШТА.....	92
4.2.1	<i>I Варијанта – Гравитациони Армирано-бетонски зид</i>	<i>93</i>
4.2.2	<i>II Варијанта – Армирано тло са габионима.....</i>	<i>96</i>
4.2.3	<i>III Варијанта – Армирано тло са лицем од префабрикованих бетонских елемената.....</i>	<i>99</i>
4.2.4	<i>IV Варијанта – Шипови са наглавном гредом.....</i>	<i>101</i>
4.3.	ПРЕДВИЂЕНА ИНВЕСТИЦИОНА ВРЕДНОСТ РАДОВА.....	102
4.3.1	<i>Гравитациони армирано-бетонски зид.....</i>	<i>102</i>
4.3.2	<i>Армирано тло са габионима.....</i>	<i>103</i>
4.3.3	<i>Армирано тло са лицем од префабрикованих бетонских елемената ..</i>	<i>103</i>
4.3.4	<i>Шипови са наглавном гредом.....</i>	<i>104</i>
4.3.5	<i>Укупна инвестициона вредност радова по предложеним варијантним решењима</i>	<i>104</i>
4.4.	ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКО ВРЕДНОВЊЕ ПРЕДЛОЖЕНИХ КОНСТРУКТИВНА РЕШЕЊА ПОТПОРНИХ ЗИДОВА	104
4.4.1	<i>Дефинисање циљева, критеријума и показатеља вредновања</i>	<i>104</i>
4.4.2	<i>Одређивање релативних тежина</i>	<i>110</i>
5.	АНАЛИЗА И КОМЕНТАР ДОБИЈЕНИХ РЕЗУЛТАТА.....	112
5.1.	ИЗБОР ОПТИМАЛНЕ ВАРИЈАНТЕ ТРАСЕ ДОБИЈЕНИХ МЕТОДОМ ВИКОР	112
5.2.	ИЗБОР ОПТИМАЛНЕ ВАРИЈАНТЕ ТРАСЕ ДОБИЈЕНИХ МЕТОДОМ PROMETHEE-GAIA	123
5.3.	ИЗБОР ОПТИМАЛНЕ ВАРИЈАНТЕ ТРАСЕ ДОБИЈЕНИХ МЕТОДОМ TOPSIS	127
5.4.	ЗАКЉУЧАК ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКОГ ВРЕДНОВАЊА	128
6.	ЗАКЉУЧЦИ И ПРЕДЛОЗИ ЗА БУДУЋА ИСТРАЖИВАЊА.....	130
6.1.	ЗАВРШНА РАЗМАТРАЊА И ЗАКЉУЧЦИ ИСТРАЖИВАЊА	130
6.2.	ЗАКЉУЧЦИ	131
6.3.	ПРЕДЛОЗИ ДАЉИХ ИСТРАЖИВАЊА.....	132
	ЛИТЕРАТУРА:	135

1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА

1.1. Експозиција проблема

Спољашњи слој литосфере, рељеф земље, настао је под утицајем ендогених и егзогених процеса (фактора). Основни ендогени фактори су земљотреси, магматизам и вулканизам, док су основни егзогени фактори вода, ветар, ледници и таласи. С обзиром на комплексност геометрије рељефа земљине површине, косине представљају једне од проблематичнијих геолошких форми у геотехници. Косине карактерише нагла промена геометрије терена (денivelација) са предиспозицијом промене ове геометрије услед дејства различитих фактора. Најчешћи и најсложенији вид нарушавања тла и геометрије косине, односи се на стабилност терена, било природних падина или вештачких косина. Свако нарушавање постојеће равнотеже на падинама или косинама изазива померања под утицајем гравитације: клизање (одроњавање или течење) површинског дела тла, али и дубљих делова стенске масе. За овако успостављено клизање, у геолошкој и геотехничкој терминологији и номенклатури, устаљен је термин клизиште. Услови за настанак и развој клизишта су: геолошки, геоморфолошки, хидрогеолошки, метеоролошки, вегетациони, антропогени, дејство земљотреса, дејство акумулација, вибрације услед саобраћаја и др. Сваки од претходно набројаних услова може се исказати применом карти хазарда, односно проценом ризика. На слици 1.1 је приказана карта ризика појаве клизишта у свету, одређена у функцији развоја најповољних хидрометеоролошких услова. Зоне обојене тамнијом бојом приказују већи потенцијал ризика за развој клизишта.

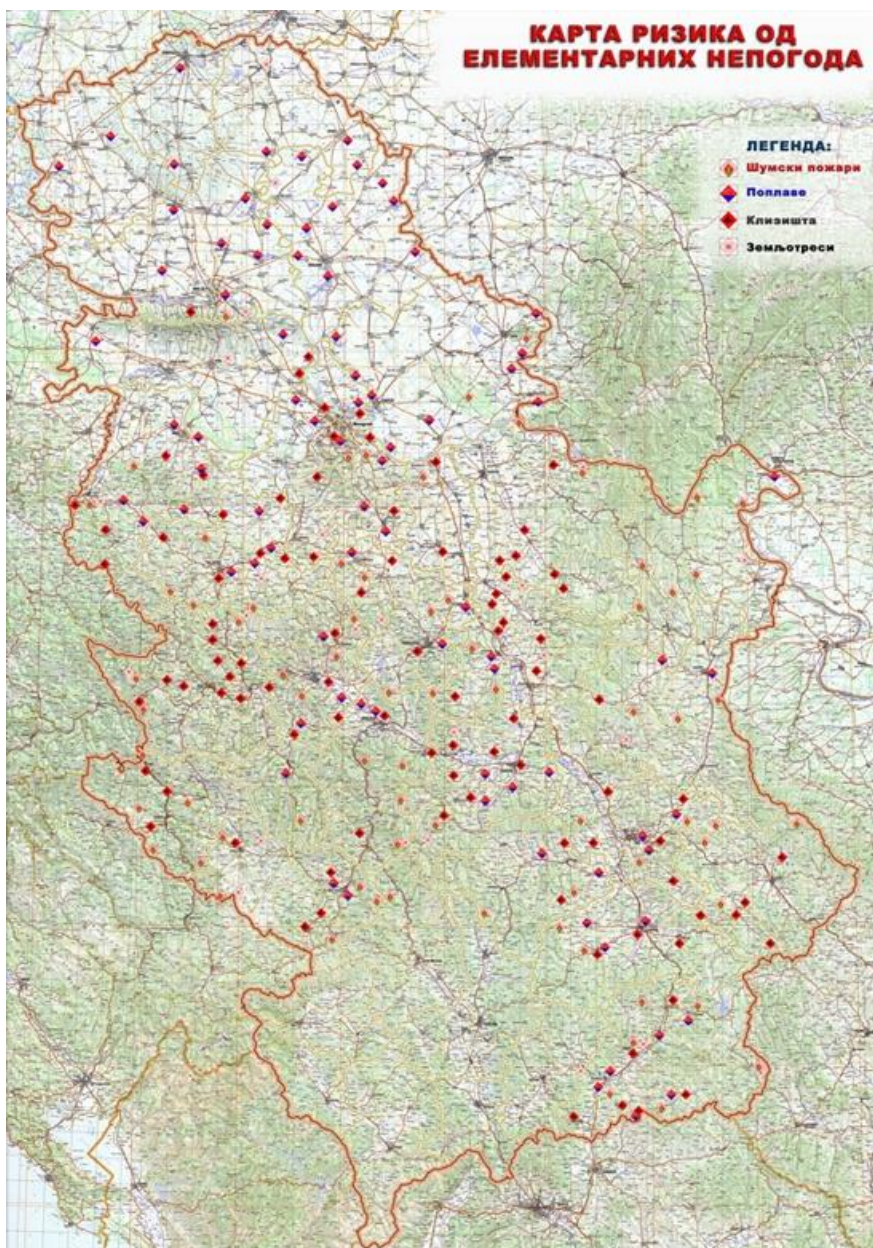


Слика 1.1. Карта ризика појаве клизишта у свету, одређена у функцији развоја најповољних хидрометеоролошких услова

У последњих сто година забележен је значајан број катастрофалних клизишта који су настали као последица дејства земљотреса, ерупције вулкана, нагомилавања снега, вишедневних киша значајног интензитета и урагана. Услед формирања ових клизишта погинуло је неколико стотина хиљада људи који су, у највећем броју случајева, имали саграђене сопствене домове на или у непосредној близини клизишта. Према у нај катастрофалнија клизишта, забележена у последњих сто година, убрајају се: *Haiyuan landslides* у Кини 1920, *Vargas Tragedy* у Венецуели 1999, *Nevado del Ruiz debris flows* у Колумбији 1985, *Nevados Huascaran debris avalanche* у Перуу 1970, *North India Flood mudslides* у Индији 2013, *Khait rock slide* у УССР-у 1949 и слично.

У катастарском листу евиденције клизишта у Србији забележено је више од 2200 активних, тренутно умирених и реактивних клизишта. На слици 1.2 је дат приказ најзначајнијих клизишта са највишим степеном ризика у Србији. Знатно је мањи број тренутно умирених, у односу на активна и реактивна клизишта. Врло често се у пракси сусрећемо са проблемима стабилности косина, када је након изведених теренских истраживања, лабораторијских геомеханичких испитивања, дефинисања узрока и услова настанка клизишта, потребно дефинисати мере

санације. У највећем броју случајева узрок појаве клизишта је природа тј. велика количина воде. Зависно од дубине клизне површи и тла разматра се конструктивно решење којим се отклања проблем.



Слика 1.2. Карта ризика од елементарних непогода са посебним освртом на клизишта у Србији

1.2. Значај и актуелности истраживања

Инфраструктурни пројекти представљају пројекте који по свом обиму, садржини и инвестицијама представљају пројекте велике вредности. У оквиру инфраструктурних пројеката израђују се различита пројектна решења за све врсте конструкција која се налазе на траси инфраструктурног пројекта, тако да израда овакве врсте пројекта захтева мултидисциплинаран приступ већег броја стручњака и струка у циљу изналажења већег броја техничких решења како би се извршио избор оптималног. Техничка решења – варијанте (алтернативе) представљају јединствене подухвате групе стручњака који уз примену научних метода и рачунарских програма решавају дати проблем, нарочито по питању потпорних конструкција којима се дисертација бави.

Задатак пројектанта на изради пројекта потпорних конструкција је да да такво пројектно решење који ће садржати задовољавајуће одговоре на следећа питања:

- која је најбоља диспозиција објекта;
- које су могуће варијанте техничких решења са становишта функционалности и рационалности;
- на које ће се начине вршити обезбеђење инфраструктуре;
- да се на основу урађене процене дефинишу утицаји на животну средину;
- које су потребе за евентуалном заштитом природних и културно-историјских вредности.

Процес планирања и пројектовања потпорних конструкција је изузетно сложен. Зато се он тешко може квалитетно и потпуно описати само једним математичким моделом. Због тога се за сваки поједини део процеса формира засебан математички модел. Тако се цео процес може поделити на три основна дела:

- генерисање алтернатива,
- вредновање и рангирање алтернатива и
- доношење одлуке о најповољнијем решењу.

Велики број постојећих модела иако се базира на анализама више од једног критеријума, у суштини су ипак једнокритеријумски јер се вредновање

алтернатива врше по сваком критеријуму појединачно. С друге стране, одређени број модела и ако су у суштини вишекритеријумски, донекле неоправдано форсирају одређену групу критеријума (у последње време најчешће еколошке).

Са перспективе примене модела одлучивања у процесу избора оптималног просторног решења потпорних конструкција, битна ставка је ко је релевантан доносилац одлуке - државна институција, пројектант или донета одлука треба бити продукт општег процеса одлучивања у којем би сваки заинтересовани актер на карактеристичан начин изразио своје прохтеве у односу на алтернативна решења. Долазимо до дилеме, у којој фази и како доносиоце одлуке обухватити процедуром одлучивања, с обзиром да сви заинтересовани актери немогу имати исту тежину са гледишта утицаја, заинтересованости и битности за успех пројекта. Уколико томе додамо и формално-правну одговорност код доношења одлука, јасно је да је исправна, научно заснована анализа заинтересованих актера као доносилаца одлуке свакако неопходна.

Анализа расположивих модела указује да се често критеријуми вредновања прихватају без одговарајућег појашњења због чега су баш они релевантни критеријуми код избора оптималног решења. Произвољан избор појединих критеријума, макар они заиста и били релевантни појединачно, производи погрешан одабир одређеног алтернативног решења као оптималног из више могућих разлога:

- небитни су критеријуми вредновања;
- битни су критеријуми вредновања али без основе издвојени из скупа осталих битних критеријума, па зато добијају већу тежину него што им заправо припада;
- чак и уколико су сви проматрани критеријуми битни, под утицајем лоше хијерархије између њих одређени критеријуми добијају већу, а остали мању тежину од оне која им заправо припада.

Често се дешава, да без прилично сагледавања проблематике која се решава, изабере се неодговарајућа метода вишекритеријумског одлучивања, углавном из разлога јер је најједноставнија или је најлакше применити је на дати проблем или је пак „у тренду“.

Такви проблеми су врло често проблеми лоших одлука донесених на

основу малог броја или оскудно скупљених информација, научно слабо утемељених анализа, лоших или са слабом одговорношћу спроведених процеса доношења овако битних одлука.

1.3. Циљеви истраживања

С обзиром на недостатке постојећих модела наведених у претходној тачки (једнодимензионалност, произвољан одабир критеријума и метода вредновања, често или константно одсуство анализе осетљивости одабира оптималног решења на замену тежине неких (или свих) критеријума вредновања, непостојање или погрешно успостављање хијерархије међу елементима структуре модела као и често непостојање ваљане идентификације заинтересованих актера (учесника) чије је учешће и те како значајно у процесу одлучивања, нарочито код јавних објеката какви су и инфраструктурни), намеће се потреба развијања функционалнијег модела за вредновање и рангирање алтернативних решења потпорних конструкција.

С тога је главни циљ овог истраживања дефинисан на следећи начин:

Циљ 1 - извршити истраживање, детаљно сагледати и анализирати постојеће моделе вредновања и рангирања варијанти конструктивног решења потпорних конструкција. Модел треба да карактерише вишекритеријумски приступ. Критеријуми вредновања, требају бити сортирани у исправну хијерархију (груписани, кластерисани). Модел захтева и спровођење анализе осетљивости изабраног решења код промене тежина неких (или свих) критеријума вредновања. Модел треба да буде способан да у процес одлучивања интегрише све заинтересоване актере (учеснике), као и њихово правовремено укључивање у процес одлучивања на одговарајућем нивоу доношења одлука у складу са степеном њихове релевантности и значаја за успех пројекта;

Овако дефинисан општи циљ истраживања намеће и низ специфичних циљева. Ти циљеви су:

Циљ 2 - предвидети начин идентификације и груписања релевантних критеријума вредновања алтернативних решења потпорних конструкција;

Циљ 3 - у моделу користити адекватне методе вредновања и рангирања (методе вишекритеријумског вредновања) варијантних решења;

Циљ 4 - валидност дефинисаног сложеног модела верификовати студијом случаја.

1.4. Полазне хипотезе

Модел не обухвата комплетну комплексност стварног система већ само оне особениости и делове који су од изричитог интереса за конкретно проучавање. Због комплексности физичке ситуације у реалном систему издвајају се само значајне особине физичких објеката. Приликом моделирања, оптимизације и коришћења добијених резултата потребно је имати на уму следеће:

- модел се сматра само једном од могућих апроксимација реалног система. На степен детаљности модела утиче постављени задатак и оптимизационе методе која се користе;
- задатак модела је да пружи помоћ истраживачу, а не да га замени нити да га ослободи одговорности за доношење одлука;
- модел не може да произведе сасвим нове информације о датом систему, али даје могућност да се на основу постојећих података јасније схвати сам систем и његово понашање.

Имајући у виду наведене чињенице, у истраживање се кренуло од следећих претпоставки:

Хипотеза 1 - могуће је дефинисати начин који обезбеђује идентификацију, класификацију и валоризацију релевантних заинтересованих актера (учесника) у процесу, те њихово правилно и правовремено укључивање у процес одлучивања на одговарајућем нивоу доношења одлука, а затим утврдити степен њихове релевантности и значај за успех пројекта;

Хипотеза 2 - могуће је дефинисати начин идентификације, груписања и верификације релевантности критеријума вредновања алтернативних решења, те исте користити као полазну основу за развијање модела одлучивања;

Хипотеза 3 - могуће је извршити одабир адекватне методе вредновања и рангирања (методе вишекритеријумског вредновања) варијанти решења;

Хипотеза 4 - могуће је уз помоћ одабране методе извршити вредновање и рангирање алтернативних решења у складу са њиховим релативним тежинама;

Хипотеза 5 - могуће је развити сложени, целовити модел одлучивања који ће у себи интегрисати одабир релевантних учесника, релевантних критеријума и адекватне методе вишекритеријумске анализе, те помоћу њега извршити одабир оптималног решења потпорних конструкција;

Хипотеза 6 - развијени модел ће бити употребљив, односно, могуће га је применити на реалне проблеме што је могуће проверити на студији случаја.

1.5. Теоријско – методолошки оквир истраживања

Током истраживања коришћен је већи број савремених научних метода. У зависности од проблематике и тока истраживања коришћене су методе којима се најједноставније и што прецизније долази до жељених резултата. Некада је било довољно за поједини проблем применити само једну методу, некада је било потребно исти проблем истражити уз помоћ две или више метода, али се најчешће истраживање базирало на комбинованој примени више различитих метода.

Коришћене методе су следеће: класификација, анализа, анкетаирање, вишекритеријумска оптимизација, метода VIKOR, PROMETHEE-GAIA и TOPSIS, анализа случаја праћена теоријом одлучивања.

1.6. Очекивани резултати истраживања

Као резултат истраживања у оквиру овог рада развиће се и тестираће се модел одлучивања у процесу одабира оптималног просторног решења потпорних конструкција. Модел је развијен на основу проучавања урађених претходних анализа и студија за израду пројекта “Реконструкција и модернизација постојећег железничког колосека и изградња другог колосека пруге Београд - Ниш, деоница Сталаћ-Ђуниш”. Модел је заснован на методологији вишеактерске вишекритеријумске анализе МАМСА (The Multi Actor Multi Criteria Analysis methodology) и на примени метода „меке“ оптимизације: VIKOR, PROMETHEE-GAIA И TOPSIS .

Током дефинисања модела акценат је стављен на отклањање недостатака уочених анализом постојећих модела. Предложена методологија омогућава целовито и систематско решавање проблема у процесу одлучивања код одабира оптималног решења потпорних конструкција у складу са усвојеним критеријумима и обезбеђивањем правовременог и ефикасног учешћа заинтересованих актера, некада и као доносиоца одлуке у појединим фазама.

Предложени модел оптимизације је у великој мери свеобухватан. Састоји се од шест корака који су у суштини комплексни као и сам модел. На овакав начин остварени су сви циљеви истраживања и потврђене све почетне хипотезе.

Научни допринос истраживања представља примену VIKOR, PROMETHEE-GAIA И TOPSIS методе која су примењене као подршка избору оптималног решења потпорних конструкција на инфраструктурним објектима као и приказаној интеграцији с осталим методама (анкета, дескриптивна статистика). Код вредновања варијантних решења потпорних конструкција употребљава се критеријум чија је релевантност верификована DELFI методом, као и методом вишекритеријумске анализе вредновања и рангирања алтернативних решења. За крај се постојаност одабраног решења проверава анализом осетљивости при промени утицаја критеријума.

Способност примена дефинисаног обрасца проверава се анализом конкретног случаја, па се са правом може рећи да ће имати битну улогу у делу израде Генералних пројекта инфраструктурних објеката као полазна основа за даљу надоградњу са добрим квалитетима.

1.7. Структура докторске тезе

У Поглављу 1 (УВОДНА РАЗМАТРАЊА) приказан је објекат као и проблем истраживања. Истраживање је извођено у делу примене вишекритеријумске анализе код извођења радова на потпорним конструкцијама на санацији клизишта и стабилизацији косина. Указано је да се избор оптималног решења из ове области најчешће обавља по основу ограниченог броја критеријума. Истакнуто је да ни модели вишекритеријумског приступа потпуно не обрађују проблем, нарочито уколико је избор релевантних критеријума вредновања доведен у питање. Врло често се уопште не покушава дати дефиниција одлучиоца, већ се модел развија на тај начин што за оног који доноси

одлуке кажемо „он“. Важност, и велика материјална вредност коју имају инфраструктурни пројекти са нужношћу за стабилизацију косина и клизишта захтева комплетнији приступ задатој проблематици, па се истиче потреба за усавршавањем датог модела. Напомене такође приказују циљеве истраживања, полазне хипотезе, употребљене научне методе и добијени резултати па је потом дат научни допринос овог рада и сажетак садржаја рада.

У Поглављу 2 (ПРИМЕНА ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКЕ ОПТИМИЗАЦИЈЕ КОД САНАЦИЈЕ КЛИЗИШТА) дате су теоријска разматрања о клизиштима на територији републике Србије, наведени основни појмови и дефиниције, дат је преглед развоја потпорних конструкција кроз историју, те наглашена је битност и статус потпорних конструкција. Наведени су најчешће коришћени математички модели који обрађују геотехничка испитивања и добијене резултате испитивања.

У Поглављу 3 (МЕТОДЕ ЗА ВРЕДНОВАЊЕ И РАНГИРАЊЕ ВАРИЈАНТНИХ РЕШЕЊА) дате су теоријске основе вишекритеријумске оптимизације и вредновања. Дате су дефиниције елементарних појмова тог процеса, објашњено је шта критеријуми вредновања могу бити и на који начин се одређују њихове тежине, а потом је дат приказ метода вишекритеријумског одлучивања VIKOR, PROMETHEE-GAIA, TOPSIS, SAW, ANP, ELECTRE i GRUBI SKUPOVI методу које су и коришћена за развијање дефинисаног модела

У Поглављу 4 (СТУДИЈА СЛУЧАЈА - ПРИКАЗ И ОБРАДА ПРИКУПЉЕНИХ ПОДАТАКА) приказана је студија случаја –анализа и обрада реалних прикупљених података о клизишту из Генералног пројекта “Реконструкција и модернизација постојећег железничког колосека и изградња другог колосека пруге Београд - Ниш, деоница Сталаћ-Ђуниш” на деоници од км 182+220.00 до км 182+327.40. Затим су предложена IV варијантна решења потпорних конструкција и дефинисани критеријуми и показатељи вредновања приликом избора оптималног решења санације клизишта које се јавило на датој деоници.

У Поглављу 5 (АНАЛИЗА И КОМЕНТАР ДОБИЈЕНИХ РЕЗУЛТАТА) развијен је интегрисани модел који је послужио за одабир оптималног решења потпорне конструкције за санацију клизишта методама VIKOR, PROMETHEE-GAIA И TOPSIS, као и примена датог модела на конкретном примеру одабира оптималног решења потпорних конструкција на деоници од км 182+220.00 до км 182+327.40 у оквиру Генералног пројекта “Реконструкција и модернизација постојећег железничког колосека и изградња другог колосека пруге Београд - Ниш, деоница Сталаћ-Ђуниш” Поступак избора (вредновање и рангирање) оптималног решења концепиран је у неколико корака:

- избор релевантних актера;
- дефинисање критеријума и показатеља вредновања за наведена варијантна решења;
- утврђивање функционалних индикатора избора;
- избор начина одлучивања;
- вредновање и рангирање свих решења варијанти;
- одлучивање на основу резултата вредновања.

У Поглављу 6 (ЗАКЉУЧЦИ И ПРЕДЛОЗИ ЗА БУДУЋА ИСТРАЖИВАЊА) приказани су изведени закључци као и завршна разматрања и дати су предлози даљих истраживања.

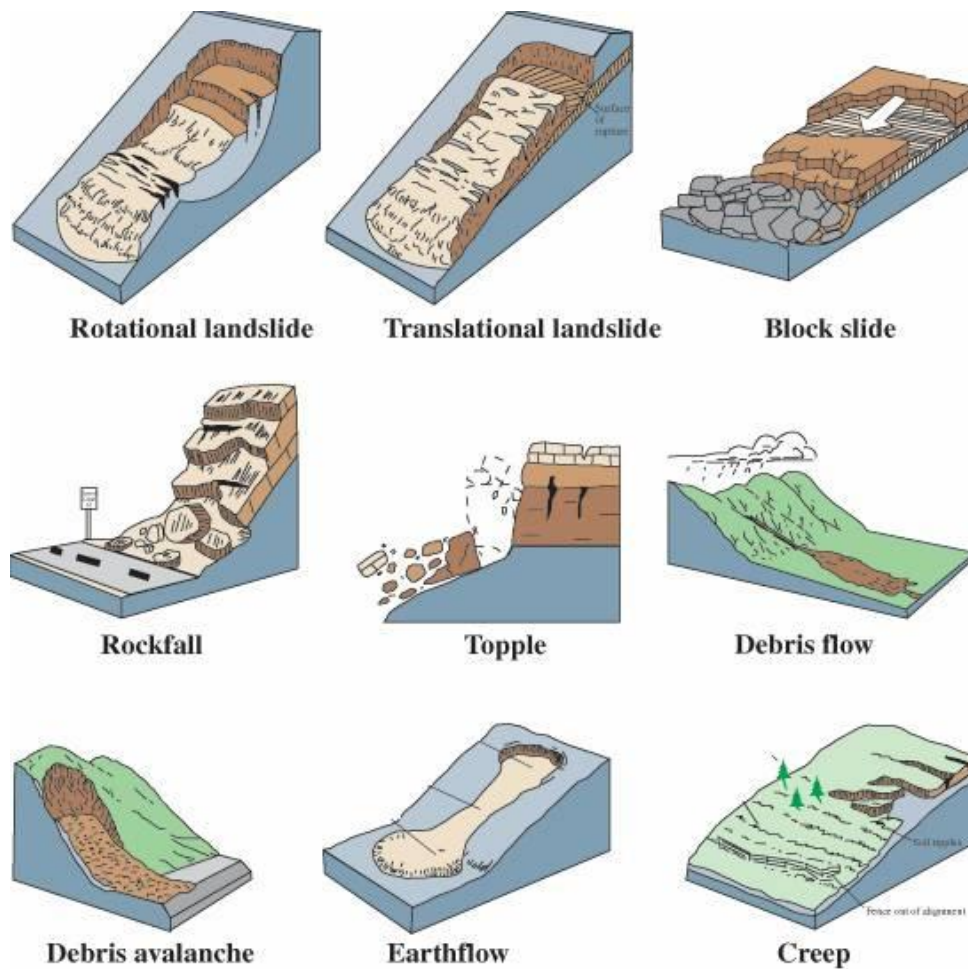
У Поглављу ЛИТЕРАТУРА, дата је литература која је употребљавана у изради ове дисертације и дати су одговарајући прилози, библиографска грађа и веб извори

На крају рада, дати су ПРИЛОЗИ који су коришћени у поступку прикупљања информација од заинтересованих актера (учесника).

2. ПРИМЕНА ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКЕ ОПТИМИЗАЦИЈЕ КОД САНАЦИЈЕ КЛИЗИШТА

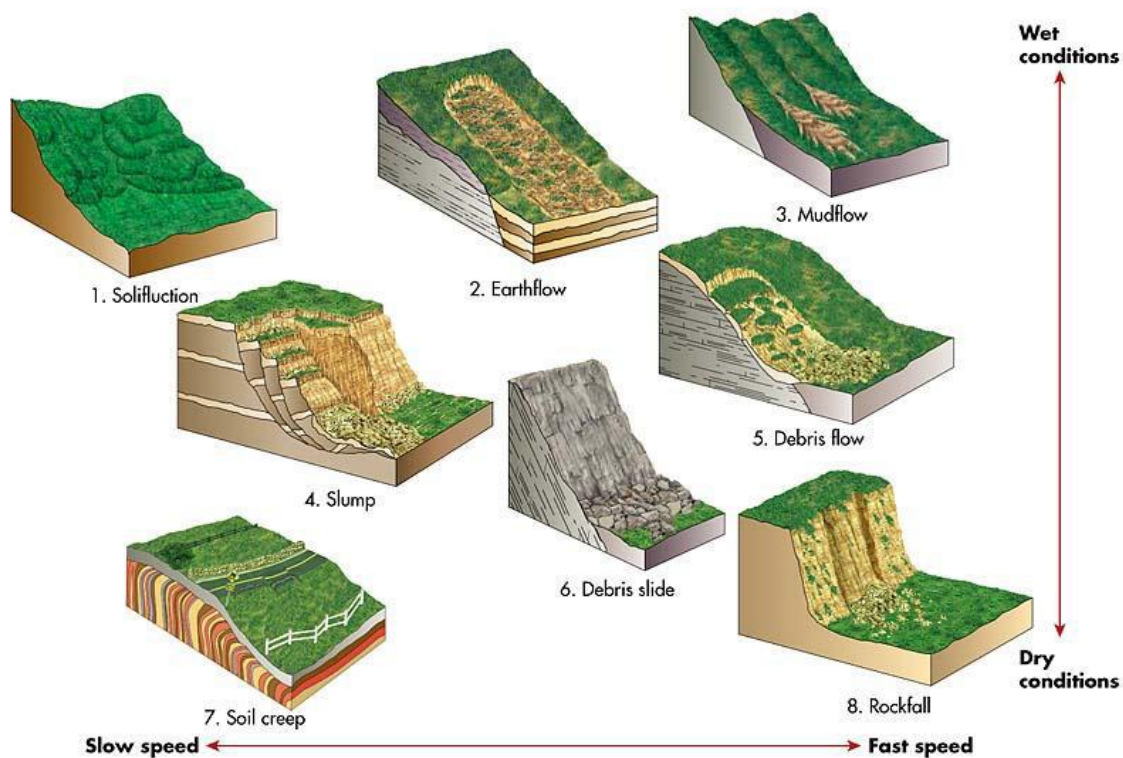
2.1. Основе о косинама и формирању клизишта

Уопштено разматрајући косине се могу налазити у стабилном-равнотежно, нестабилном-неравнотежном и индиферентном-полуравнотежном стању. Стабилно равнотежно стање карактерише успостављен однос дестабилизујућих и умирујућих сила, тако да са растом утицаја умирујућих сила, расте и фактор сигурности. Нестабилно неравнотежно стање карактерише нарушен однос дестабилизујућих и умирујућих сила, тако да је утицај дестабилизујућих сила доминантан. Индиферентно (неодређено) полуравнотежно стање представља прелазну категорију између стабилног равнотежног и нестабилног неравнотежног стања. Однос дестабилизујућих и умирујућих сила индиферентног полуравнотежног стања је значајније нарушен, у односу на стабилно равнотежно стање и довољно је да мали прираштај дестабилизујућих сила трансформише ово стање у нестабилно неравнотежно. С обзиром на комплексност индиферентног стања и могућност парцијалне промене геометрије косине, односно полуформирања клизишта, индиферентно стање карактерише скуп више различитих полуравнотежних стања. Ово је посебно карактеристично у ситуацијама када наступи нарушавање стабилитетног равнотежног стања, при чему не мора доћи до потпуног кретања клизне масе тла, већ се може успоставити ново полуравнотежно стање. Детаљнија класификација стабилитетних и нестабилитетних стања косина, узимајући у обзир и прелазне категорије, приказана је у: стабилна косина, потенцијално нестабилна косина, рана фаза рушења, средња фаза рушења, делимично или тотално рушење и потпуно рушење. На слици 2.1 су приказани основни типови настанка и развоја клизишта: ротациони модел, транслациони модел, модел формиран из различитих геометријских форми блокова, модел са клизањем, котрљањем и падањем камена различитих димензија, модел са значајним одваљивањем клизног тла, клизиште формирано услед обимних киша, клизиште формирано као обимни бујични ток, клизиште формирано течењем тла и клизиште формирано пузањем тла уз појаву прелина и расцепа у тлу.



Слика 2.1. Основни типови настанка и развоја клизишта

Кључни параметар при класификацији клизишта је брзина кретања клизне масе, а такође и степен партиципације воде у тлу. На слици 2.2 је приказана класификација клизишта према ова два параметра. Генерално се може констатовати да клизишта, која имају већи нагиб спољашње контуре тла, имају и већу брзину кретања клизне масе. Ово је последица дејства гравитационих сила. Међутим, када се узме у обзир и утицај влажности, тада је и разматрање брзине кретања клизне масе комплексније.



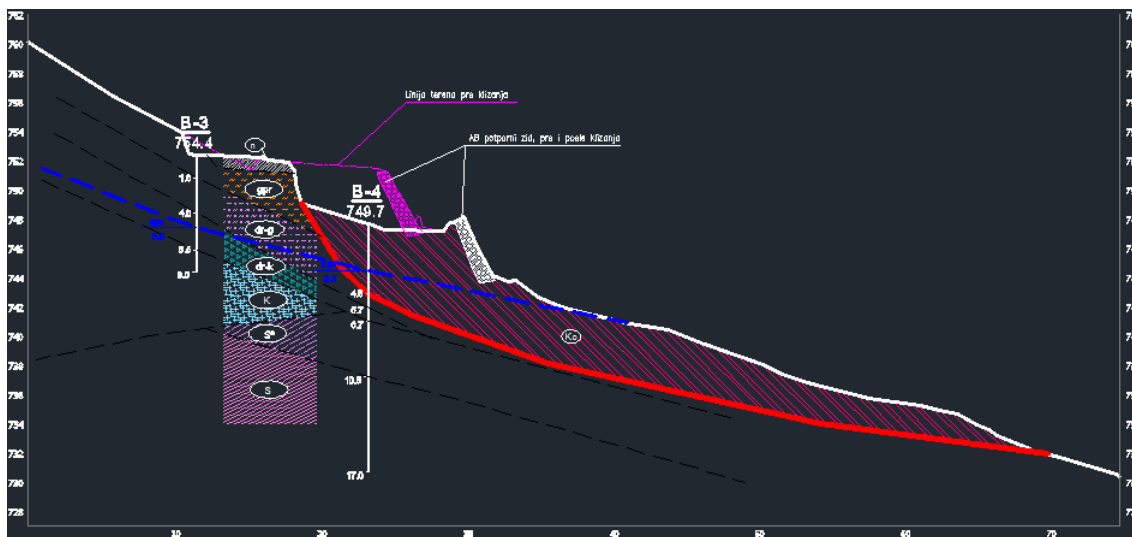
Слика 2.2. Класификација клизишта према брзини кретања клизне масе и степену партиципације воде у тлу

Методологија анализе потенцијалног клизишта састоји се из неколико сегмената: геодетско осматрање терена и прикупљање података, геотехничка *in-situ* испитивања, анализа физичко-механичких параметара тла у лабораторији и прорачун косине применом математичких метода у геотехници. Методологија анализе формираног клизишта заснива се на пројекту санације клизишта, а који се састоји из неколико сегмената: геодетско осматрање терена и прикупљање података, геотехничка *in-situ* испитивања, анализа физичко-механичких параметара тла у лабораторији, реконструктивна анализа претходног стања клизишта, анализа фактора који су довели до формирања клизишта, разматрање варијантних решења санације клизишта, прорачуни варијантних решења косина применом математичких метода у геотехници, економска анализа варијантних решења, вишекритеријумска оптимизација варијантних решења и анализа технологије санације клизишта за оптимално изабрано решење.

2.2. Геотехничка испитивања косина/клизишта

2.2.1. Геотехничка испитивања

Приликом анализе косина спроводе се претходна геотехничка *in-situ* испитивања помоћу којих се, првенствено, формира инжењерско-геолошки профил терена. Кључна геотехничка испитивања, која се спроводе за формирање инжењерско-геолошког профила терена, су истражне бушотине. Истражне бушотине се спроводе техником бушења језгровањем, приликом чега се узорци тла пажљиво класификују ради идентификације типа тла по дубини и физичко-механичких карактеристика тла. Извођење истражне бушотине је потребно спровести довољно дубоко како би се на инжењерско-геолошком профилу клизишта утврдила раван клизања. Број потребних истражних бушотина у корелацији је са: геометријом клизишта, димензијама клизишта, дубинама клизне равни, променљивости геологије и слично. На слици 2.3 је приказан карактеристичан инжењерско-геолошки профил терена клизишта са бушотинама и приказом типа слојева тла по дубини. Такође, приказан је и ниво подземне воде.



Слика 2.3. Карактеристичан инжењерско-геолошки профил терена клизишта са бушотинама и приказом типа слојева тла по дубини

2.2.2. Анализа физичко-механичких параметара тла клизишта

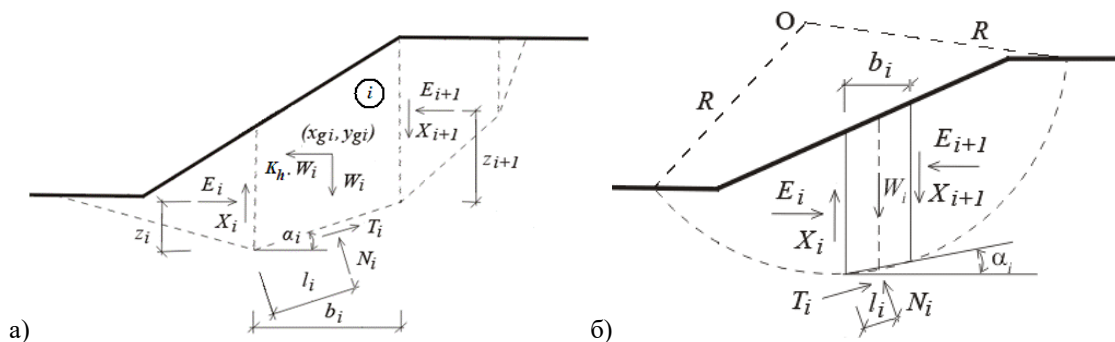
Приликом креирања прорачунских модела клизишта потребно је размотрити све релевантне параметре и одредити њихове вредности, с обзиром да је коначно решење у директној корелацији са селекцијом и варијацијом вредности параметара. Релевантни параметри прорачунских модела клизишта се могу класификовати у пет група: параметри геометрије прорачунског модела, параметри физичко-механичких карактеристика тла, параметри дејстава, посебни типови параметара и параметри прорачуна.

Ми ћемо се у овом раду фокусирати само на физичко-механичке параметре. Параметри физичко-механичких карактеристика тла добијају се из лабораторијских испитивања узорака, од којих се издвајају: опит једноаксијалне чврстоће, опит директног смицања, триаксијални опит и едометарски опит стишљивости. За анализе стабилности косина су од значаја параметри: запреминска тежина тла, кохезија, тежина тла у засићеном стању, *Young*-ов модул еластичности, угао унутрашњег трења, едометарски модул стишљивости, *Poisson*-ов коефицијент, модул деформације, референтан модул смицања, дилатанција, коефицијент порозности и др. У зависности од типа конститутивног модела понашања тла, дефинишу се и релевантни параметри, с тим што се код конститутивних модела којим се описује тродимензионално напонско стање знатно повећава број параметара. Најчешће се као конститутивни модел понашања тла, при анализи клизишта, примењује *Mohr-Coulomb*-ов модел тла, док се, у зависности од специфичности типа тла, могу користити омекшавајући (*soft soil model*) или ојачавајући (*hardening soil model*), *Cam-Clay* модел, *Drucker-Prager*-ов модел и др. Постоје и додатни параметри којима се унапређује конститутивни модел понашања тла, као што су нпр. параметри којима се додатно утиче на промену чврстоће и кохезије по дубини тла, увођење затежуће чврстоће тла и дефинисање параметара консолидације. Такође, од интереса је и познавање конзистенције тла (веома мека, мека, средња, крута, веома крута). Приликом дефинисања параметара према *Eurocode 7* прописима, потребно је познавати парцијалне факторе за: угао унутрашњег трења, ефективну кохезију и недренирану смичућу чврстоћу тла.

2.2.3. Методологија анализа прорачуна клизишта

Методе прорачуна клизишта се генерално могу поделити у четири групе: аналитичке, нумеричке, експерименталне и хибридне. У зависности од тога која ће метода бити примењена добијају се решења са мањим или већим степеном поузданости, с тим што предност треба дати нумеричким методама. Генерално разматрајући, прорачун косина је могуће спровести моделирајући их као 2D (раванске) или 3D (просторне) математичке моделе, с тим што се прорачун 3D модела комплексније геометрије спроводи нумеричким методама.

Кључни фактор у анализи косине је одређивање стабилности косине, тако да се идентификује да ли је косина у стању равнотеже, постоји ли опасност од губитка равнотеже или није у стању равнотеже. У општем случају, код аналитичких метода стабилности косине, тло се дели на вертикалне блокове, а за сваки блок се одређују одговарајуће силе. Слика 2.4 приказује шематски поделе тла на блокове за општу анализу стабилности косине са полигоналном и кружном клизном површи.



Слика 2.4. Подела тла на блокове за општу анализу стабилности косине: а) полигонална клизна површ, б) кружна клизна површ

Одговарајуће силе за све блокове гласе: n нормалних сила N_i које делују на сваки појединачан блок, n смичућих сила T_i које делују по ивици клизне површи сваког појединачног блока, $n-1$ нормалних сила E_i које делују између блокова, $n-1$ смичућих сила X_i које делују између блокова, $n-1$ геометријских места z_i на којима делују силе E_i и n геометријских места l_i на којима делују силе N_i . Укупно је $6n-2$ непознатих које треба одредити из $4n$ једначина (услова равнотеже). Евидентно је да се $2n-2$ непознатих мора или апроксимирати или унапред одредити.

Када се анализа стабилности спроводи за полигоналну клизну површ,

примењују се: *Sarma*, *Spencer*, *Janbu*, *Morgenstern-Price*, *Shahunyantsi* сличне методе. *Sarma* метода се заснива на подели тла на блокове који нису строго вертикални, већ имају одређени угао закошења, при чему су E_i и X_i нормалне и смичуће силе између блокова, N_i и T_i нормалне и смичуће силе које делују по ивици клизне површи сваког појединачног блока, W_i сопствена тежина блока, $K_h W_i$ хоризонтална сила којом се обезбеђује постизање граничног стање. K_h фактор представља однос хоризонталних и гравитационих убрзања. На слици 2.5 је приказана подела тла на блокове за анализу стабилности косине према *Sarma* методи. Алгоритам прорачуна стабилности косине према *Sarma* методи се заснива на једначинама равнотеже блокова:

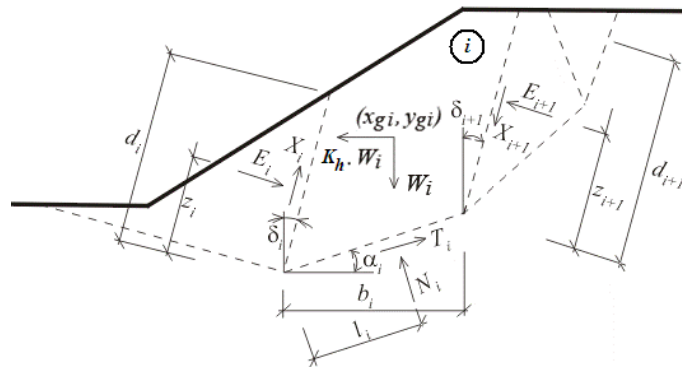
$$T_i \cos \alpha_i - N_i \sin \alpha_i = K_h W_i - F_{x,i} + X_{i+1} \sin \delta_i - X_i \sin \delta_i + E_{i+1} \cos \delta_i - E_i \cos \delta_i, \quad (2.1)$$

$$N_i \cos \alpha_i - T_i \sin \alpha_i = W_i - F_{y,i} + X_{i+1} \cos \delta_{i+1} - X_i \cos \delta_i - E_{i+1} \sin \delta_{i+1} + E_i \cos \delta_i, \quad (2.2)$$

$$N_i l_i - X_{i+1} b_i \sec \alpha_i \cos(\alpha_i + \delta_{i+1}) + E_{i+1} [z_{i+1} + b_i \sec \alpha_i \sin(\alpha_i + \delta_{i+1})] - E_i z_i - W_i (x_{g,i} - x_i) + K_h W_i (y_{g,i} - y_i) - F_{x,i} r_{x,i} + F_{y,i} r_{y,i} = 0, \quad (2.3)$$

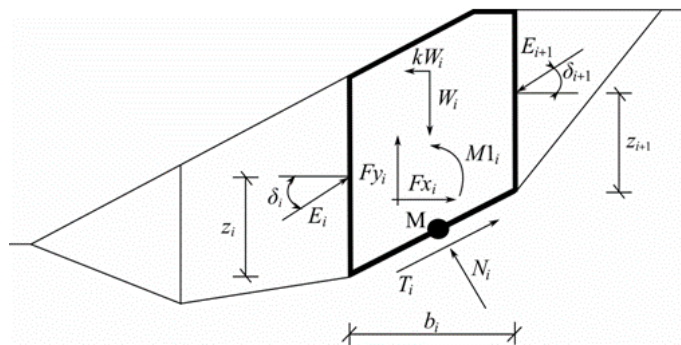
$$T_i = (N_i - U_i) \operatorname{tg} \varphi_i + c_i b_i \sec \alpha_i, \quad X_i = (E_i - P W_i) \operatorname{tg} \bar{\varphi}_i + \bar{c}_i d_i, \quad (2.4)$$

где су $F_{x,i}$ и $F_{y,i}$ компоненте хоризонталне и вертикалне пројекције сила, $r_{x,i}$ и $r_{y,i}$ краци $F_{x,i}$ и $F_{y,i}$ сила, респективно, $P W_i$ резултанта силе порног притиска на подељене блокове, $\bar{\varphi}_i$ просечна вредност угла унутрашњег трења по подељеним блоковима, \bar{c}_i просечна вредност кохезије по подељеним блоковима. Фактор сигурности косине F_s се одређује итеративно редукујући параметре c и $\operatorname{tg} \varphi$, тако да се достигне вредност фактора K_h (нула или већа од нуле).



Слика 2.5 Подела тла на блокове за анализу стабилности косине према *Sarma* мет.

Spencer-ова метода се заснова на граничној равнотежи косине, кроз успостављање равнотеже сила и момената који делују на поједине блокове. На слици 2.6. је приказана подела тла на блокове за анализу стабилности косине према Spencer-овој методи.



Слика 2.6. Подела тла на блокове за анализу стабилности косине према *Spencer*-овој методи

У циљу постизања решења проблема граничне равнотеже косине, која је подељена на блокове, уведене су одређене претпоставке:

- равни, којима су подељени блокови, остају вертикалне и током прорачуна,
- линија дејства сопствене тежине блока W_i пролази кроз центар i -тог сегмента клизне површи и представља се тачком M ,
- нормална сила N_i делује у центру i -тог сегмента клизне површи у тачки M ,
- угао дејства силе E_i , која делује између блокова, је константан за све блокове и једнак је δ .

Алгоритам прорачуна стабилности косине према *Spencer*-овој методи се заснива на изразима:

$$N_i = N'_i + U_i, \quad (2.5)$$

$$T_i = (N_i - U_i) \operatorname{tg} \varphi_i + \frac{b_i}{\cos \alpha_i} = N'_i \operatorname{tg} \varphi_i + c_i \frac{b_i}{\cos \alpha_i}, \quad (2.6)$$

$$N'_i + U_i - W_i \cos \alpha_i + K_h W_i \sin \alpha_i + F_{y,i} \cos \alpha_i - F_{x,i} \sin \alpha_i + E_{i+1} \sin(\alpha_i - \delta_{i+1}) - E_i \sin(\alpha_i - \delta_i) = 0, \quad (2.7)$$

$$N'_i \frac{\operatorname{tg}\varphi_i}{F_s} + \frac{c_i b_i}{F_s \cos\alpha_i} - W_i \sin\alpha_i - K_h W_i \cos\alpha_i + F_{y,i} \sin\alpha_i + F_{x,i} \cos\alpha_i - E_{i+1} \cos(\alpha_i - \delta_{i+1}) + E_i \cos(\alpha_i - \delta_i) = 0, \quad (2.8)$$

$$E_{i+1} \cos\delta_{i+1} \left(z_{i+1} - \frac{b_i}{2} \operatorname{tg}\alpha_i \right) - E_{i+1} \sin\delta_{i+1} \frac{b_i}{2} - E_i \cos\delta_i \left(z_i - \frac{b_i}{2} \operatorname{tg}\alpha_i \right) - E_i \sin\delta_i \frac{b_i}{2} + M1_i - K_h W_i (y_M - y_{g,i}) = 0, \quad (2.9)$$

где је U_i резултанта порног притиска на i -ти сегмент клизне површи, $M1_i$ моменат сила F_x и F_y око тачке M . Израз (2.5) представља релацију између ефективне и тотале вредности нормалних сила које делују дуж клизне површи. Израз (2.6) представља релацију између нормалних и смичућих сила сегмента клизне површи (*Mohr-Coulomb*-ови услови). Преформулацијом израза (2.7) и (2.8) добија се:

$$E_{i+1} = \frac{\left[(W_i - F_{y,i}) \cos\alpha_i - (K_h W_i - F_{x,i}) \sin\alpha_i - U_i + E_i \sin(\alpha_i - \delta_i) \right] \frac{\operatorname{tg}\varphi_i}{F_s} + \frac{c_i b_i}{F_s \cos\alpha_i} - (W_i - F_{y,i}) \sin\alpha_i - (K_h W_i - F_{x,i}) \cos\alpha_i + E_i \cos(\alpha_i - \delta_i)}{\sin(\alpha_i - \delta_{i+1}) \frac{\operatorname{tg}\varphi_i}{F_s} + \cos(\alpha_i - \delta_{i+1})}. \quad (2.10)$$

Применом израза (2.10) могу се одредити све силе E_i које делују између блокова за дате вредности δ_i и F_s . Преформулацијом израза (2.9) добија се:

$$z_{i+1} = \frac{\frac{b_i}{2} [E_{i+1} (\sin\delta_{i+1} - \cos\delta_{i+1} \operatorname{tg}\alpha_i) + E_i (\sin\delta_i - \cos\delta_i \operatorname{tg}\alpha_i)] + E_i z_i \cos\delta_i - M1_i + K_h W_i (y_M - y_{g,i})}{E_{i+1} (\cos\delta_{i+1})}. \quad (2.11)$$

Применом израза (2.11) могу се одредити сви краци силе z за дате вредности угла δ_i . Фактор сигурности F_s се одређује применом итеративног алгоритма:

- иницијална вредност за угао δ је $\delta=0$,
- фактор сигурности F_s , за дату вредност угла δ , одређује се према изразу (2.10), узимајући у обзир да је $E_{n+1}=0$ на крају клизне површи,
- угао δ се одређује из израза (2.11) користећи вредности за силу E , која је

одређена из претходног корака анализе, при чему је вредност $z_{n+1}=0$,

- претходна два корака анализе се итеративно понављају све док вредност угла δ у две узастопне итерације не постане једнака.

Да би алгоритам итерација био довољно стабилан, потребно је интервенисати у циљу отклањања нестабилних решења. Ове нестабилности се јављају када се у изразима (2.10) и (2.11) појаве ситуације дељења са нулом. У изразу (2.11) оваква ситуација се може појавити за вредности угла $\delta=\pi/2$ или $\delta=-\pi/2$, па се решење мора тражити за интервал угла $\delta=[-\pi/2;\pi/2]$. Дељење са нулом у изразу (2.10) се појављује у случају:

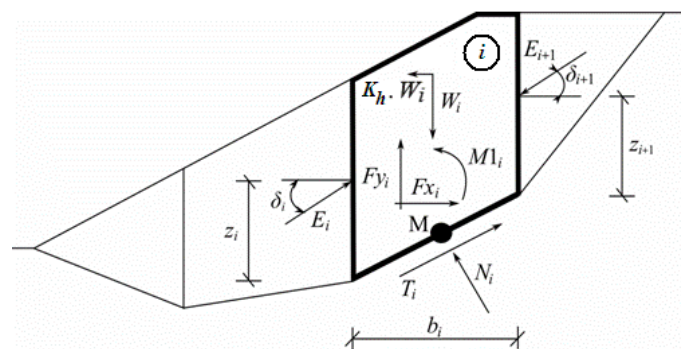
$$F_s = \operatorname{tg}\varphi_i \operatorname{tg}(\delta_{i+1} - \alpha_i). \quad (2.12)$$

У циљу спречавања нестабилности решења, потребно је спровести проверу параметра m_α према изразу:

$$m_\alpha = \cos\alpha_i + \frac{\sin\alpha_i \operatorname{tg}\varphi_i}{F_s} > 0.2. \quad (2.13)$$

Пре него што се започне са итеративном анализом потребно је пронаћи највећу критичну вредност $F_{s,min}$ која задовољава претходне услове. Вредности фактора сигурности F_s које су испод ове критичне вредности $F_{s,min}$ припадају области нестабилног решења. Прва итерација започиње са вредношћу фактора сигурности F_s која је тек нешто већа од $F_{s,min}$, тако да су и преостале вредности фактора сигурности F_s , које се одређују прорачуном, увек веће од $F_{s,min}$.

Janbu-ова метода је процедура верификације стабилности граничне равнотеже косина, а заснива се на успостављању равнотеже сила и момената који делују на поједине блокове. На слици 2.7 је приказана подела тла на блокове за анализу стабилности косине према *Janbu*-овој методи.



Слика 2.7. Подела тла на блокове за анализу стабилности косине према *Janbu*-овој методи

У циљу постизања решења проблема граничне равнотеже косине, која је подељена на блокове, уведене су одређене претпоставке:

- равни, којима су подељени блокови, остају вертикалне и током прорачуна,
- линија дејства сопствене тежине блока W_i пролази кроз центар i -тог сегмента клизне површи и представља се тачком M ,
- нормална сила N_i делује у центру i -тог сегмента клизне површи у тачки M ,
- вертикална координата z_i дејства силе E_i , која делује између блокова, је једнака нула за крајње тачке клизне површи.

Избор позиције вертикалне координате z_i дејства силе E_i има значајан утицај на добијање конвергентног решења. Уколико се лоше претпоставе позиције вертикалне координате z_i , може наступити дивергенција решења уз претходно знатно повећање времена прорачуна. Позиције вертикалних координата z_i дејства сила E_i се усвајају да су једнаки $1/3$ висине блокова, на које је подељена косина. Уколико наступи дивергенција решења, потребно је кориговати вредности z_i , тако што се благо повећавају код блокова пасивне зоне (код ножице косине) и благо смањују код блокова активне зоне (код врха косине). Алгоритам прорачуна стабилности косине према *Janbu*-овој методи се заснива на изразима:

$$N_i = N'_i + U_i, \quad (2.14)$$

$$T_i = (N_i - U_i) \operatorname{tg} \varphi_i + \frac{b_i}{\cos \alpha_i} = N'_i \operatorname{tg} \varphi_i + c_i \frac{b_i}{\cos \alpha_i}, \quad (2.15)$$

$$N'_i + U_i - W_i \cos \alpha_i + K_h W_i \sin \alpha_i + F_{y,i} \cos \alpha_i - F_{x,i} \sin \alpha_i + E_{i+1} \sin(\alpha_i - \delta_{i+1}) - E_i \sin(\alpha_i - \delta_i) = 0, \quad (2.16)$$

$$N'_i \frac{\operatorname{tg} \varphi_i}{F_s} + \frac{c_i b_i}{F_s \cos \alpha_i} - W_i \sin \alpha_i - K_h W_i \cos \alpha_i + F_{y,i} \sin \alpha_i + F_{x,i} \cos \alpha_i - E_{i+1} \cos(\alpha_i - \delta_{i+1}) + E_i \cos(\alpha_i - \delta_i) = 0, \quad (2.17)$$

$$E_{i+1} \cos \delta_{i+1} \left(z_{i+1} - \frac{b_i}{2} \operatorname{tg} \alpha_i \right) - E_{i+1} \sin \delta_{i+1} \frac{b_i}{2} - E_i \cos \delta_i \left(z_i - \frac{b_i}{2} \operatorname{tg} \alpha_i \right) - E_i \sin \delta_i \frac{b_i}{2} + M 1_i - K_h W_i (y_M - y_{g,i}) = 0. \quad (2.18)$$

Преформулацијом израза (2.16) и (2.17) добија се:

$$E_{i+1} = \frac{\left[(W_i - F_{y,i}) \cos \alpha_i - (K_h W_i - F_{x,i}) \sin \alpha_i - U_i + E_i \sin(\alpha_i - \delta_i) \right] \frac{tg \varphi_i}{F_s} + \frac{c_i b_i}{F_s \cos \alpha_i} - (W_i - F_{y,i}) \sin \alpha_i - (K_h W_i - F_{x,i}) \cos \alpha_i + E_i \cos(\alpha_i - \delta_i)}{\sin(\alpha_i - \delta_{i+1}) \frac{tg \varphi_i}{F_s} + \cos(\alpha_i - \delta_{i+1})}. \quad (2.19)$$

Преформулацијом израза (2.18) добија се:

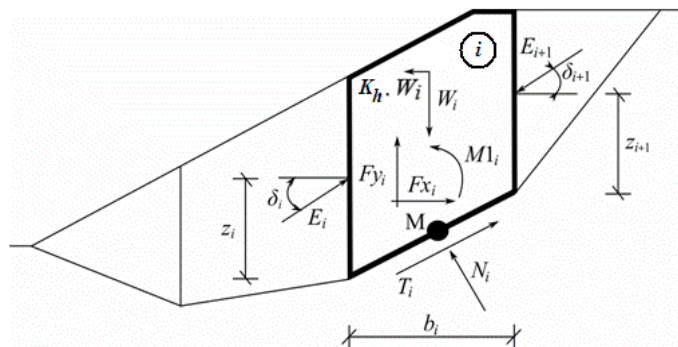
$$\delta_{i+1} = \arctg \left(\frac{2z_{i+1}}{b_i} + tg \alpha_i \right) - \arcsin \frac{E_i \left(\cos \delta_i \left(z_i - \frac{b_i tg \alpha_i}{2} \right) + \sin \delta_i \frac{b_i}{2} \right) - M1_i}{E_{i+1} \sqrt{\left(z_{i+1} + \frac{b_i tg \alpha_i}{2} \right)^2 + \left(\frac{b_i}{2} \right)^2}}. \quad (2.20)$$

Фактор сигурности F_s се одређује применом итеративног алгорита:

- иницијалне вредности свих углова су $\delta_i=0$ и позиције z_i су усвојене да су једнаке $1/3$ висине блокова,
- фактор сигурности F_s , за дату вредност угла δ , одређује се према изразу (2.19), узимајући у обзир да је $E_{n+1}=0$ на крају клизне површи,
- угао δ се одређује из израза (2.20) користећи вредности за силу E , која је одређена из претходног корака анализе,
- претходна два корака анализе се итеративно понављају све док вредност угла δ у две узастопне итерације не постане једнака.

Отклањање нестабилних решења се спроводи исто као код *Spencer*-ове методе.

Morgenstern-Price-ова метода верификације стабилности граничне равнотеже косина се заснива на сличном принципу као и методе *Spencer*-а и *Janbu*-а. На слици 2.8 је приказана подела тла на блокове за анализу стабилности косине према *Morgenstern-Price*-овој методи.

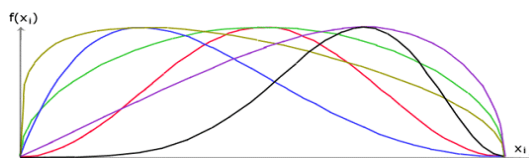


Слика 2.8. Подела тла на блокове за анализу стабилности косине према *Morgenstern-Price*-овој методи

У циљу постизања решења проблема граничне равнотеже косине, која је подељена на блокове, уведене су одређене претпоставке (сличано *Spencer*-овој методи):

- равни, којима су подељени блокови, остају вертикалне и током прорачуна,
- линија дејства сопствене тежине блока W_i пролази кроз центар i -тог сегмента клизне површи и представља се тачком M ,
- нормална сила N_i делује у центру i -тог сегмента клизне површи у тачки M ,
- угао дејства силе E_i (која делује између блокова) је различит за све блокове и једнак је $\delta=0$ за крајње тачке.

Предпоставка о вредности угла δ_i се успоставља применом полусинусне функције. На слици 2.9. је приказан спектар полусинусних функција. Избор облика функције има мањег утицаја на квалитет коначног решења, али оптималним избором облика функције доприноси се конвергенцији решења. Угао δ_i се одређује мултипликацијом вредности полусинусне функције $f(x_i)$ и параметра λ .



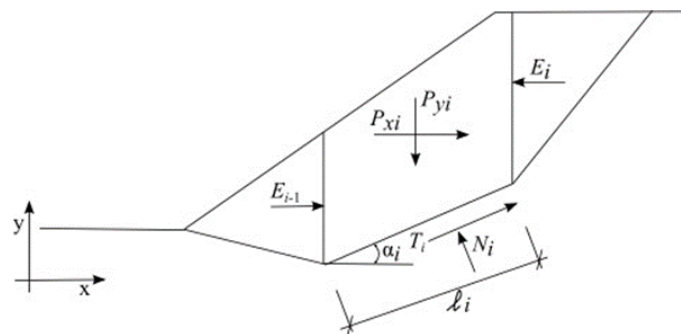
Слика 2.9. Полусинусна функција за претпоставке о вредности угла δ_i

Алгоритам прорачуна стабилности косине према *Morgenstern-Price*-овој методи се заснива на изразима који су идентични изразима (2.5÷2.11) код *Spencer*-ове методе. Фактор сигурности F_s се одређује применом итеративног алгоритма:

- иницијална вредност углова δ_i је $\delta_i = \lambda f(x_i)$,
- фактор сигурности F_s , за дату вредност угла δ , одређује се према изразу (2.10), узимајући у обзир да је $E_{n+1} = 0$ на крају клизне површи,
- угао δ се одређује из израза (2.11) користећи вредности за силу E , која је одређена из претходног корака анализе ($z_{n+1} = 0$), при чему се вредност полусинусне функције $f(x_i)$ задржава константна кроз итерације, а итерира се параметар λ ,
- претходна два корака анализе се итеративно понављају све док вредност угла δ у две узастопне итерације не постане једнака.

У циљу спречавања нумеричке нестабилности решења, спроводе се контроле према изразима (2.12) и (2.13).

Shahunyants-ова метода верификације стабилности граничне равнотеже косина се заснива на сличном принципу као и претходне методе. На слици 2.10. је приказана подела тла на блокове за анализу стабилности косине према *Shahunyants*-овој методи.



Слика 2.10 Подела тла на блокове за анализу стабилности косине према *Shahunyants*-овој методи

У циљу постизања решења проблема граничне равнотеже косине, која је подељена на блокове, уведене су одређене претпоставке:

- равни, којима су подељени блокови, остају вертикалне и током прорачуна,
- угао дејства силе E_i , која делује између блокова, једнак је нула (силе делују хоризонтално).

Алгоритам прорачуна стабилности косине према *Shahunyants*-овој методи започиње трансформацијом сила $P_{x,i}$ и $P_{y,i}$ у правцу нормале (N) и тангенте (Q) клизне површи:

$$P_{N,i} = P_{x,i} \sin \alpha_i + P_{y,i} \cos \alpha_i, \quad (2.21)$$

$$P_{Q,i} = P_{y,i} \sin \alpha_i - P_{x,i} \cos \alpha_i. \quad (2.22)$$

Силе које делују дуж сегмената клизне површи се прорачунавају према:

$$T_i = (N_i - U_i) \operatorname{tg} \varphi_i + c_i l_i. \quad (2.23)$$

Једначина равнотеже управно на раван сегмента клизне површи гласи:

$$N_i = P_{N,i} + E_{i-1} \sin \alpha_i - E_i \sin \alpha_i, \quad (2.24)$$

док једначина равнотеже у равни сегмента клизне површи гласи:

$$T_i = P_{Q,i} + E_i \cos \alpha_i - E_{i-1} \cos \alpha_i. \quad (2.25)$$

Увођењем израза (2.23) у (2.25) добија се:

$$(N_i - U_i) \operatorname{tg} \varphi_i + c_i l_i = P_{Q,i} + E_i \cos \alpha_i - E_{i-1} \cos \alpha_i, \quad (2.26)$$

док се увођењем израза (2.24) у (2.26) добија:

$$(P_{N,i} + E_{i-1} \sin \alpha_i - E_i \sin \alpha_i - U_i) \operatorname{tg} \varphi_i + c_i l_i = P_{Q,i} + E_i \cos \alpha_i - E_{i-1} \cos \alpha_i. \quad (2.27)$$

Након сређивања израза (2.27) добија се:

$$(P_{N,i} - U_i) \operatorname{tg} \varphi_i + (E_{i-1} - E_i) \sin \alpha_i \operatorname{tg} \varphi_i + c_i l_i = P_{Q,i} + (E_i - E_{i-1}) \cos \alpha_i, \quad (2.28)$$

односно:

$$(P_{N,i} - U_i) \operatorname{tg} \varphi_i + c_i l_i - P_{Q,i} = (E_i - E_{i-1}) (\cos \alpha_i + \sin \alpha_i \operatorname{tg} \varphi_i). \quad (2.29)$$

С обзиром да је:

$$\cos \alpha + \sin \alpha \operatorname{tg} \beta = \frac{\cos \alpha \cos \beta + \sin \alpha \sin \beta}{\cos \beta} = \frac{\cos(\alpha - \beta)}{\cos \beta}, \quad (2.30)$$

добија се да је израз (2.29):

$$(P_{N,i} - U_i) \operatorname{tg} \varphi_i + c_i l_i - P_{Q,i} = (E_i - E_{i-1}) \frac{\cos(\alpha_i - \varphi_i)}{\cos \varphi_i}, \quad (2.31)$$

а додатном модификацијом израза (2.31) добија се:

$$(P_{N,i} - U_i) \operatorname{tg} \varphi_i + c_i l_i - P_{Q,i} + E_{i-1} \frac{\cos(\alpha_i - \varphi_i)}{\cos \varphi_i} = E_i \frac{\cos(\alpha_i - \varphi_i)}{\cos \varphi_i}. \quad (2.32)$$

Применом израза (2.32) силе које делују између блокова E_i се одређују према:

$$E_i = \frac{[(P_{N,i} - U_i) \operatorname{tg} \varphi_i + c_i l_i - P_{Q,i}] \cos \varphi_i}{\cos(\alpha_i - \varphi_i)} + E_{i-1}. \quad (2.33)$$

Сада се у прорачун стабилности косине уводи фактор сигурности F_s , док се $P_{Q,i}$ силе разлажу на активне силе које доприносе клизању $P_{Q,i,sd}$ и силе које не

доприносе клизању (резистентне силе) $P_{Q,i,ud}$:

$$E_i = \frac{\left[(P_{N,i} - U_i) \operatorname{tg} \varphi_i + c_i l_i - F_s P_{Q,i,sd} - P_{Q,i,ud} \right] \cos \varphi_i}{\cos(\alpha_i - \varphi_i)} + E_{i-1}. \quad (2.34)$$

$P_{Q,i}$ је позитивно када доприноси клизању косине, а негативно када не доприносе клизању косине, тако да се израз (2.34) може писати у форми:

$$E_i = \frac{\left[(P_{N,i} - U_i) \operatorname{tg} \varphi_i + c_i l_i - F_s P_{Q,i,sd} + |P_{Q,i,ud}| \right] \cos \varphi_i}{\cos(\alpha_i - \varphi_i)} + E_{i-1}. \quad (2.35)$$

На клизној површи вредност силе E_0 је једнака нула, док за E_1 важи:

$$E_1 = \frac{\left[(P_{N,1} - U_1) \operatorname{tg} \varphi_1 + c_1 l_1 - F_s P_{Q,1,sd} + |P_{Q,1,ud}| \right] \cos \varphi_1}{\cos(\alpha_1 - \varphi_1)}, \quad (2.36)$$

а за E_2 :

$$E_2 = \frac{\left[(P_{N,2} - U_2) \operatorname{tg} \varphi_2 + c_2 l_2 - F_s P_{Q,2,sd} + |P_{Q,2,ud}| \right] \cos \varphi_2}{\cos(\alpha_2 - \varphi_2)} + \frac{\left[(P_{N,1} - U_1) \operatorname{tg} \varphi_1 + c_1 l_1 - F_s P_{Q,1,sd} + |P_{Q,1,ud}| \right] \cos \varphi_1}{\cos(\alpha_1 - \varphi_1)}. \quad (2.37)$$

Слично се могу приказати и изрази за све силе које делују између блокова, при чему је $E_n=0$:

$$E_n = \sum_{i=1}^n \left[(P_{N,i} - U_i) \operatorname{tg} \varphi_i + c_i l_i + |P_{Q,i,ud}| \right] \frac{\cos \varphi_i}{\cos(\alpha_i - \varphi_i)} + F_s \sum_{i=1}^n P_{Q,i,sd} \frac{\cos \varphi_i}{\cos(\alpha_i - \varphi_i)} = 0, \quad (2.38)$$

тако да се из овог израза може директно приказати фактор сигурности F_s у форми:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n \left[(P_{N,i} - U_i) \operatorname{tg} \varphi_i + c_i l_i + |P_{Q,i,ud}| \right] \frac{\cos \varphi_i}{\cos(\alpha_i - \varphi_i)}}{\sum_{i=1}^n P_{Q,i,sd} \frac{\cos \varphi_i}{\cos(\alpha_i - \varphi_i)}}. \quad (2.39)$$

У случају да се анализа стабилности спроводи за кружну клизну површ, примењују се: *Fellenius/Petterson*, *Bishop*, *Spencer*, *Janbu*, *Morgenstern-Price*, *Shahunyants* и сличне методе. Фактор сигурности F_s према *Fellenius/Petterson*-овој методи се одређује на основу израза:

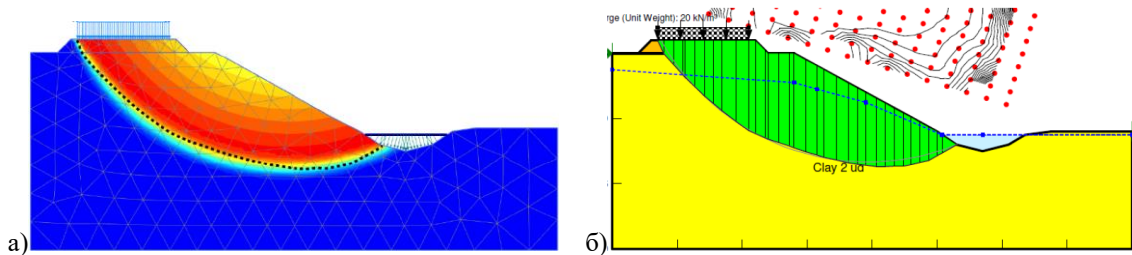
$$F_s = \frac{1}{\sum_i W_i \sin \alpha_i} \sum_i [c_i l_i + (N_i - u_i l_i) \operatorname{tg} \varphi_i], \quad (2.40)$$

док се према *Bishop*-овој методи одређује на основу израза:

$$F_s = \frac{1}{\sum_i W_i \sin \alpha_i} \sum_i \frac{c_i b_i + (W_i - u_i b_i) \operatorname{tg} \varphi_i}{\cos \alpha_i + \frac{\operatorname{tg} \varphi_i \sin \alpha_i}{F_s}} \quad (2.41)$$

Одређивање фактора сигурности према *Spencer, Janbu, Morgenstern-Price* или *Shahunyants* методи, за кружну клизну површ, спроводи се идентично као за полигоналну клизну површ.

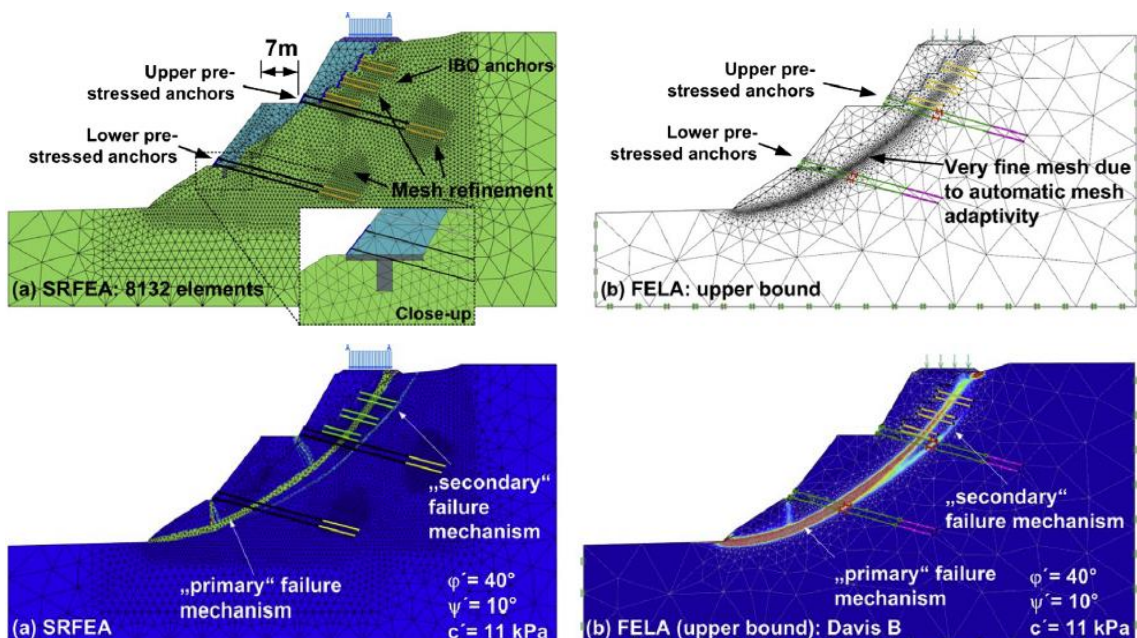
Прорачун стабилности косина нумеричким методама се заснива на методама дискретизације домена, као што су: метода коначних елемената (FEM - *Finite Element Method*), проширена метода коначних елемената (XFEM - *eXtended Finite Element Method*), метода граничних елемената (BEM - *Boundary Element Method*) и метода дискретних елемената (DEM - *Discrete Element Method*). Ове методе разматрају тло као линеарно-еластичан, еласто-пластичан и нелинеаран материјал. Метода коначних елемената (FEM) се најчешће употребљава за решавање проблема нумеричке анализе стабилности косина, тако да велики број софтвера има имплементирани алгоритми засновани на овој методи. На слици 2.11. је приказана мрежа коначних елемената дискретног нумеричког модела косине и сет тачака добијених оптимизацијом фактора сигурности косине према методи коначних елемената (FEM). Косина се моделира применом површинских коначних елемената са интегрисаном математичком формулацијом за анализу равног стања деформација (*plane strain*).



Слика 2.11. 2D нумерички модел косине: а) мрежа коначних елемената дискретног нумеричког модела косине према методи коначних елемената (FEM), б) сет тачака добијених оптимизацијом фактора сигурности косине према методи коначних елемената

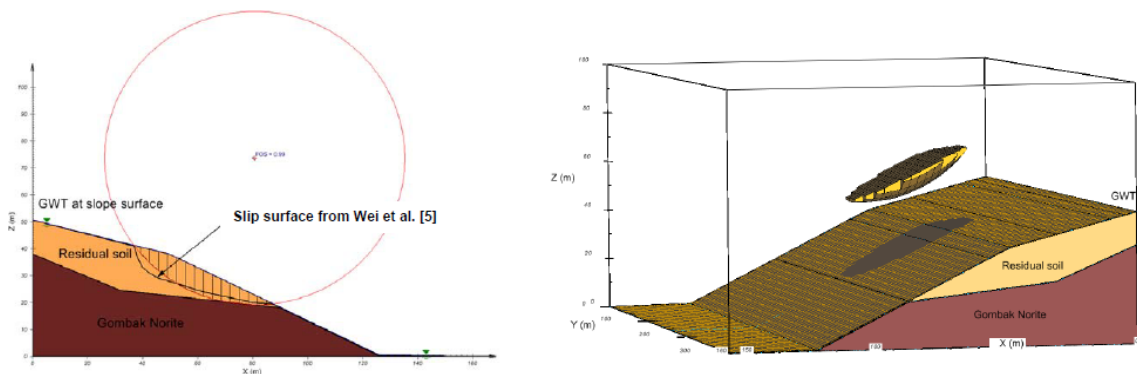
Приликом моделирања и анализе стабилности косина потребно је узети у обзир два битна аспекта: дискретизација и апроксимација. Дискретизација се

односи на проблем поделе домена тла на коначне елементе довољно малих димензија за које се морају поштовати критеријуми односа дијагонала и углава четвороугаоног коначног елемента или односи страница траоуганог коначног елемента. У области контакта тла са елементима за плитко или дубоко фундарање, који се користе приликом санације клизишта, потребно је извршити прогушћење мреже коначних елемената. Такође, прогушћење се спроводи и у зони клизне површи, на местима дисконтинуитета и отвора у тлу и слично. Успостављање везе основних коначних елемената, који формирају домен тла, са прогушћеном мрежом коначних елемената спроводи се применом прелазних елемената. Као прелазни елементи се најчешће примењују троугаони коначни елементи. Веома битан аспект је и успостављање компатибилности чворова коначних елемената кроз анализу конформности/неконформности, посебно код прелазних коначних елемената, при чему се не сме дозволити да одређени чворови, у комбинацији основних и прелазних коначних елемената, остану неповезани или парцијално повезани. На слици 2.12. су приказани 2D нумерички модели косина са генерисаним мрежама коначних елемената и прогушћењима по селектованим доменима.



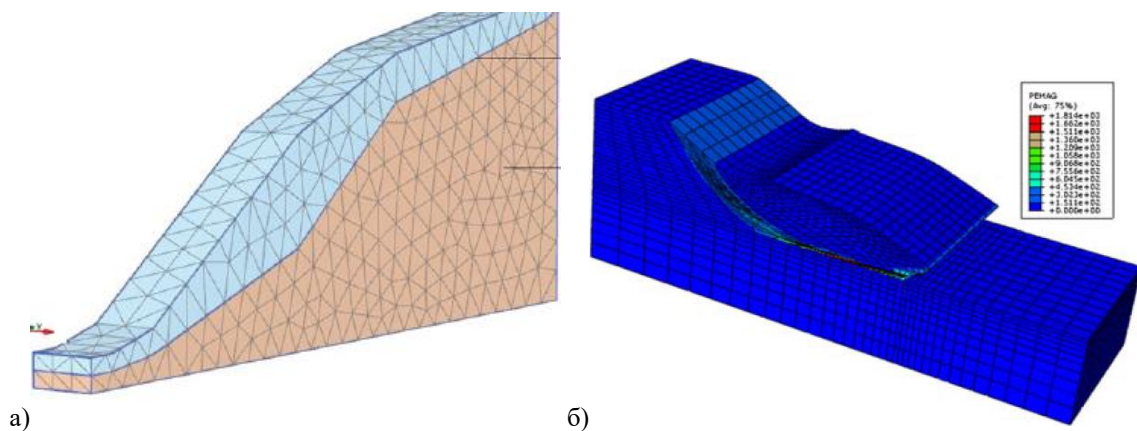
Слика 2.12. 2D нумерички модели косина са генерисаним мрежама коначних елемената и прогушћењима по селектованим доменима

У односу на 2D модел косине, који се и највише користи у практичне сврхе, применом 3D модела косине се могу моделирати комплекснији геометријски модели са просторно сложенијом и знатно променљивијом геологијом на мањем простору. На слици 2.13. је приказан 2D и 3D нумерички модели косине са издвојеним приказом клизне масе тла и просторним моделом клизне површи.



Слика 2.13. 2D и 3D нумерички модели косине са издвојеним приказом клизне масе тла и просторним моделом клизне површи

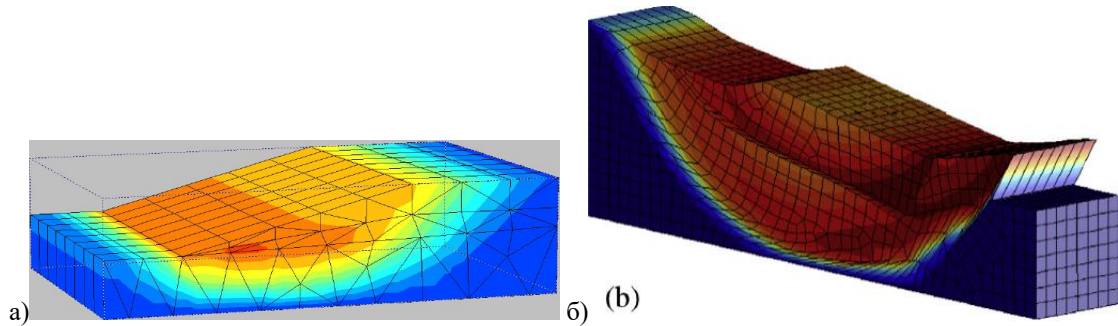
За моделирање 3D модела косина се користе призматични (*solid*) или тетраедарски коначни елементи, при чему моделирање домена тла просторним коначним елементима захтева знатније хардверске капацитете. Код призматичних коначних елемената примењује се минимално $2*2*2$ нумеричка интеграција путем *Gaussian*-ових квадратура. Слика 2.14. приказује 3D нумерички модел косина формиран од тетраедарских и призматичних коначних елемената.



Слика 2.14. 3D нумерички модели косина формиран од: а) тетраедарских

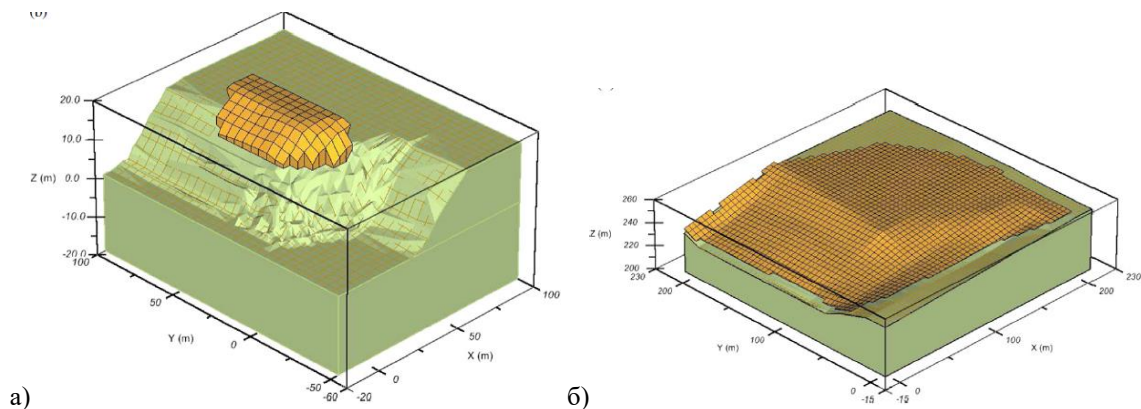
коначних елемената, призматичних коначних елемената

На слици 2.15. су приказани 3D нумерички модели косина формирани од призматичних коначних елемената који за основу имају троугао, квадрат и четвороугао с различитим унутрашњим угловима.



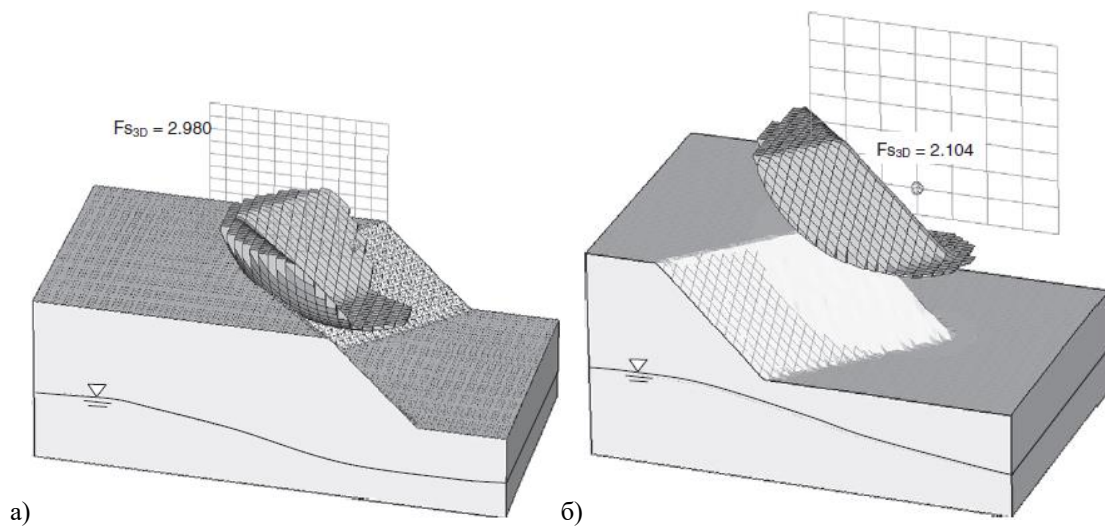
Слика 2.15. 3D нумерички модели косина формирани од призматичних коначних елемената који за основу имају: а) троугао, б) квадрат и четвороугао с различитим унутрашњим угловима

У одређеним случајевима, када је домен тла знатних димензија и комплексније геометрије, мрежа коначних елемената 3D модела косине може имати и неколико милиона коначних елемената, па се у тим случајевима најчешће примењује техника паралелног процесирања. Додатно се код оваквих проблема оптимизује мрежа коначних елемената. На слици 2.16. су приказани 3D нумерички модели косина сложеније геометрије са издвојеном клизном масом тла.



Слика 2.16. 3D нумерички модели косина сложеније геометрије са приказаном издвојеном клизном масом тла

Моделирање клизне површи, код анализе стабилности 3D модела косина, може се спровести, као што је већ приказано, применом 3D просторних коначних елемената или чак применом 2D површинских коначних елемената. На слици 2.17. су приказани 3D нумерички модели косина сложеније геометрије са приказаном издвојеном клизном масом тла и положајима прорачунатих тачака фактора сигурности добијених оптимизацијом за конкавну и конвексну клизну површ. Конкавна клизна површ је формирана из 3D просторних коначних елемената, док је конвексна клизна површ формирана комбинацијом 3D просторних и 2D површинских коначних елемената.

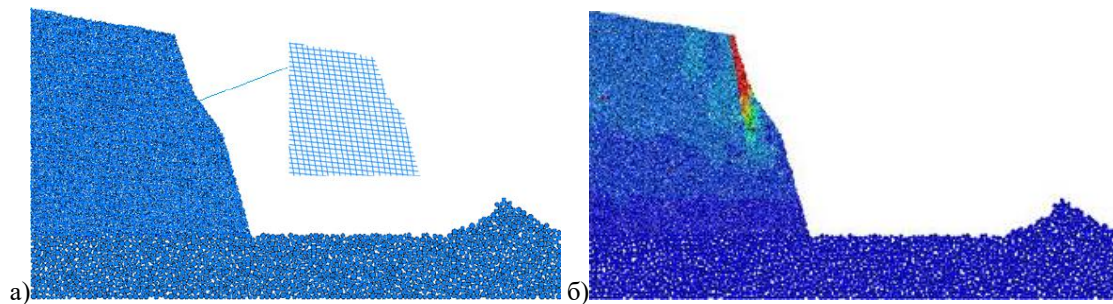


Слика 2.17. 3D нумерички модели косина сложеније геометрије са приказаном издвојеном клизном масом тла и положајима прорачунатих тачака фактора сигурности добијених оптимизацијом: а) конкавна клизна површ, б) конвексна клизна површ

Моделирање омекшања и дисконтинуитета у тлу се спроводи корекцијом параметара конститутивног модела понашања тла и елиминацијом везе одређених коначних елемената или чак редукијом одређеног броја коначних елемената, који се налазе у посебној зони прогушћења мреже коначних елемената. Апроксимација се односи на избор оптималног типа коначног елемента којим се ефикасно моделира поље померања тла у моделу косине. У овом случају постоји низ развијених типова коначних елемената код којих се непознате одређују у преко сила, померања или комбиновано (мешовито). За интерполационе функције

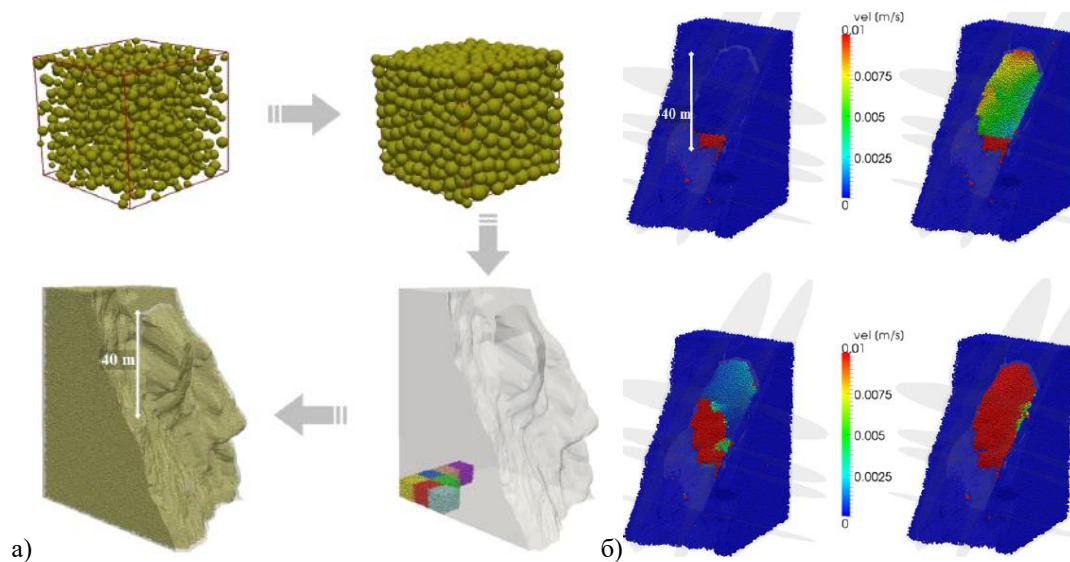
се користи изопараметарска формулација, при чему су чворови за прорачун нумеричких интеграција рапорешени у угловима, унутрашњости и/или по контури коначног елемента. Такође, аспект апроксимације се односи на нумеричко моделирање контурних и прелазних услова, моделирање понашања материјала и моделирање дејстава - оптерећења.

Проширена метода коначних елемената (XFEM), у односу на методу коначних елемената (FEM), има могућност примене напредније нелинеарне анализе и прорачуна постнелинеарног понашања система. Такође, код ове методе се, приликом формирања клизишта, може моделирати развој прслина, пукотина и раседа у тлу. Прслине у тлу се, у општем случају, моделирају као размазане, док се код високозахтевних проблема формирања клизишта примењују алгоритми моделирања дискретних прслина. Модел дискретних прслина у тлу захтева имплементацију алгоритама механике контакта, док се модел размазаних прслина у тлу решава нелинеарном анализом трајекторија екстремних вредности главних напона у тлу. Метода граничних елемената (BEM) има значајну примену у геотехници, с обзиром да се применом ове методе брже добијају решења, у односу на методу коначних елемената (FEM), при чему је ниво квалитета коначног решења задовољавајући. С обзиром да постоји неколико алгоритама у оквиру методе граничних елемената (BEM), они се, у највећем броју случајева, заснивају на дискретизацији граничне области (контура) граничним елементима. Унутрашњост области се, у највећем броју случајева, не дискретизује, па овакве методе припадају групи безмрежних метода. Метода дискретних елемената (DEM) се заснива на разматрању равнотежног стања појединачно за сваки коначни елемент. У односу на методу коначних елемената (FEM), где се равнотежно стање разматра на глобалном нивоу преко комплетног нумеричког модела, код методе дискретних елемената (DEM) се једначине кретања дефинишу посебно за сваки коначни елемент, тако да се могу пратити међусобно независна поља померања коначних елемената. На слици 2.18. је приказан 2D нумерички модел косине према методи дискретних елемената (DEM) са идентификованом зоном иницирања клизишта.



Слика 2.18. 2D нумерички модел косине: а) нумерички модел косине према методи дискретних елемената (DEM), б) идентификација зоне иницирања клизишта према методи дискретних елемената (DEM)

Применом ове методе може се пратити инкрементални развој клизишта, тако да се као коначна вредност прорачуна добија спектар фактора сигурности. Такође, ова метода се примењује и за 3D моделирање сложених форми косина, при чему је развијен низ алгоритама за топологију и компактност елемента којима се формира 3D модел косине. На слици 2.19. је приказан поступак креирања 3D нумеричког модела косине према методи дискретних елемената (DEM) и одговарајуће инкременталне прорачунске ситуације.



Слика 2.19. 3D нумерички модел косине: а) поступак креирања 3D нумеричког модела косине према методи дискретних елемената (DEM), б) инкременталне прорачунске ситуације

Да би се овакав алгоритам ефикасно применио у пракси, међусобне везе коначних елемената се моделирају контактним елементима са могућношћу имплементације различитих нелинеарних понашања. Код контактних елемената се дефинишу компоненте крутости при притиску, а напони затезања се, такође, могу дефинисати или чак елиминисати. Приликом моделирања контакта две тачке модела јављају се два стања: активно (контакт је успостављен уз учешће одређене крутости) и неактивно (контакт није успостављен уз учешће мале крутости или без увођења ефеката крутости). Слика 2.20. приказује дијаграм сила - померање контактеног елемента који је активан само на притисак, а што је специфично код великог броја типова тла, где се не могу развити значајни напони затезања. Треба употребити геометријски нелинеарну инкрементално-итеративну анализу да би се ефикасно моделирали ефекти интеракције контактних елемената,. Услед нелинеарног понашања контактеног елемента, где је могуће промену стања пратити велике промене крутости, јављају се озбиљне тешкоће у обезбеђењу конвергенције нелинеарног решења. Па у том смислу може бити повољније користити процедуру контроле инкременталног прираштаја померања, него процедуру контроле инкременталног прираштаја силама.



Слика 2.20. Дијаграм сила-померање контактеног елемента који је активан само на притисак

Увођење механике контакта у анализу кретања масе тла клизишта и развоја великих пластичних деформација спроводи и проширена метода коначних елемената (XFEM), слично је и код методе дискретних елемената (DEM). При формулацији проблема сматра се да при инкременталним ситуацијама долази до такве промене геометрије зоне контакта, да почетној генерисаној мрежи коначних елемената одговарајућа је конфигурација мреже коначних елемената за све инкременталне ситуације. Тиме се елиминише коришћење додатних алгоритама за претраживање најповољније конфигурације у спајању чворова мреже у i -тој инкременталној анализи или чак имплементација адаптивне методе за корекцију

мреже коначних елемената система. Једначина контакта се директно формулише код сваког пара чворова, и тако добијамо да су геометријски услови контактне везе за један пар i -тих чворова.

$$g_{Ni} = (u_i^2 - u_i^1)n_i^1 + g_i \geq 0, \quad (2.42)$$

где су u_i^α вектори померања i -тог пара чворова који су одговарајући доменима B^α коначних елемената, g_i иницијални размаци између i -тог пара чворова. С обзиром да је параметар дефинисања величина иницијалног отвора независан од поља померања, па се варијацијом (2.42) добија:

$$\delta g_{Ni} = (\eta_i^2 - \eta_i^1)n_i^1. \quad (2.43)$$

Разматрајући да у интеракцији два домена учествује n_c контактних елемената потребно је интегралом:

$$\int_{\Gamma_c} \lambda_N \delta g_N d\Gamma \rightarrow \sum_{i=1}^{n_c} \int_{\Gamma_i^h} \lambda_{Ni}^h \delta g_{Ni}^h d\Gamma \quad (2.44)$$

обухватити све активне контактне чворове, при чему је λ_N поље *Lagrange*-ових мултипликатора, g_N функција отвора. У поменутој анализи приемљива је пенална формулација (*penalty formulation*), тј. метода *Lagrange*-ових мултипликатора:

$$\int_{\Gamma_c} \lambda_N \delta g_N d\Gamma \rightarrow \sum_{i=1}^{n_c} \lambda_{Ni} \delta g_{Ni} A_i = \sum_{i=1}^{n_c} \lambda_{Ni} (\eta_i^2 - \eta_i^1) n_i^1 A_i, \quad (2.45)$$

односно:

$$\int_{\Gamma_c} \delta \lambda_N g_N d\Gamma \rightarrow \sum_{i=1}^{n_c} \delta \lambda_{Ni} g_{Ni} A_i = \sum_{i=1}^{n_c} \delta \lambda_{Ni} [(u_i^2 - u_i^1) n_i^1 + g_i] A_i = 0, \quad (2.46)$$

за $\lambda_N = \varepsilon g_N$, где је n_c број активних контактних чворова у Γ_c^h , η_i^α функција провере, n_i^l вектор нормале i -тог пара чворова. Производом *Lagrange*-овог мултипликатора λ_{Ni} и површине A_i која спада у i -ти чвор произилази сила контактног чвора, када је λ_{Ni} еквивалентно контактном притиску p_{Ni} за i -ти чвор. Разматрањем да је област контакта оба домена дискретизована, увођењем два вектора се изводи матрична формулација: први за варијацију $\{\eta_i^\alpha, \delta \lambda_i\}$, а други за инкременте варијације $\{\Delta u_i^\alpha, \Delta \lambda_i\}$ i -тог чвора:

$$\hat{\eta}_i = \begin{Bmatrix} \eta_i \\ \delta \lambda_i \end{Bmatrix}, \quad \Delta \hat{u}_i = \begin{Bmatrix} \Delta u_i \\ \Delta \lambda_i \end{Bmatrix}, \quad \eta_i = \begin{Bmatrix} \eta_i^2 \\ \eta_i^1 \end{Bmatrix}, \quad \Delta \hat{u}_i = \begin{Bmatrix} \Delta u_i^2 \\ \Delta u_i^1 \end{Bmatrix}. \quad (2.47)$$

Увођењем (2.47) у (2.45) добија се:

$$\int_{\Gamma_c} (\delta\lambda_N g_N + \lambda_N \delta g_N) d\Gamma \approx \sum_{i=1}^{n_c} \hat{\eta}_i^T G_i^{cL}, \quad (2.48)$$

при чему је:

$$G_i^{cL} = \begin{Bmatrix} \lambda_{Ni} C_i \\ u_i^T C_i \end{Bmatrix} A_i, \quad C_i = \begin{Bmatrix} n_i^1 \\ -n_i^1 \end{Bmatrix}, \quad u_i = \begin{Bmatrix} u_i^2 \\ u_i^1 \end{Bmatrix}. \quad (2.49)$$

Коначно се може извршити дискретизација (2.45) за $\lambda_N = \varepsilon g_N$ у (2.47), (2.48) и (2.49):

$$\int_{\Gamma_c} \varepsilon_N g_N \delta g_N d\Gamma \rightarrow \sum_{i=1}^{n_c} \varepsilon_N g_{Ni} \delta g_{Ni} A_i = \sum_{i=1}^{n_c} \eta_i^T \varepsilon_N g_{Ni} C_i A_i. \quad (2.50)$$

Уобичајено је да се површина A_i која се сврстава у i -ти контактни чвор избацује (или убацује преко пеналног параметра ε_N) у контактну чвор-чвор формулацији. То означава да контактни напон $p_{Ni} = \varepsilon_N g_{Ni}$ постаје контактна (чворна) сила $f_{Ni} = \varepsilon_N A_i g_{Ni} = \varepsilon^+ g_{Ni}$. Усаглашено са матричним формулацијом (2.50) за геометријску линеарност i -тог чвора дефинише се контактни резидуал $G_i^{cP} = \eta_i^T G_i^{cL}$ и тангентна матрица крутости K_i^{cP} . Експлицитна формулација се изводи применом (2.49):

$$G_i^{cP} = \varepsilon_N g_{Ni} A_i C_i, \quad K_i^{cP} = \varepsilon_N A_i C_i C_i^T. \quad (2.51)$$

У једно-димензионалним проблемима вектор нормале n_i^1 се дефинише преко скалара $n_x = 1$. Из тог разлога је матрица C_i поједностављена и гласи $C_i^T = \{1, -1\}$, па да се за резидуал и тангентну матрицу крутости добија:

$$G_i^{cP} = \varepsilon_N g_{Ni} A_i \begin{Bmatrix} 1 \\ -1 \end{Bmatrix}, \quad K_i^{cP} = \varepsilon_N A_i \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.52)$$

У 2Д проблемима вектор нормале n_i^1 има две компоненте $(n_i^1)^T = \{n_x, n_y\}_i$. Због тога матрице C_i и G_i^{cP} имају четири компоненте:

$$G_i^{cP} = \varepsilon_N g_{Ni} A_i \begin{Bmatrix} n_x \\ n_y \\ -n_x \\ -n_y \end{Bmatrix}, \quad K_i^{cP} = \varepsilon_N A_i \begin{bmatrix} n_x^2 & n_x n_y & -n_x^2 & -n_x n_y \\ n_x n_y & n_y^2 & -n_x n_y & -n_y^2 \\ -n_x^2 & -n_x n_y & n_x^2 & n_x n_y \\ -n_x n_y & -n_y^2 & n_x n_y & n_y^2 \end{bmatrix}. \quad (2.53)$$

С обзиром да се код анализе стабилности косина, у великом броју случајева, разматра као дводимензионални проблем, то се моделирање равног стања деформација спроводи коначним елементима којим имају имплементирану одговарајућу математичку формулацију. Ти коначни елементи су и математички

двостепенни јер се разматрања везују за координатни систем дефинисан са две осе. Те осе одређују средњу раван или средњу површ која дели на два једнака дела дебљину површинског коначног елемента. Поље померања дефинишемо применом две компоненте:

$$\delta(x, y) = \begin{bmatrix} u(x, y) \\ v(x, y) \end{bmatrix}, \quad (2.54)$$

где је $\delta(x, y)$ поље резултујућих, односно укупних померања у (x, y) координатном систему, $u(x, y)$ компонента поља померања у правцу x осе координатног система, $v(x, y)$ компонента поља померања у правцу y осе координатног система. Поље деформација се дефинише применом три компоненте:

$$\varepsilon(x, y) = \begin{bmatrix} \varepsilon_x(x, y) \\ \varepsilon_y(x, y) \\ \gamma_{xy}(x, y) \end{bmatrix}, \quad (2.55)$$

где је $\varepsilon(x, y)$ поље укупних деформација у (x, y) координатном систему, $\varepsilon_x(x, y)$ компонента поља деформација која представља дилатацију у правцу x осе координатног система, $\varepsilon_y(x, y)$ компонента поља деформација која представља дилатацију у правцу y осе координатног система, $\gamma_{xy}(x, y)$ компонента поља деформација која представља клизање између праваца x и y осе координатног система. Поље напона се дефинише применом три компоненте:

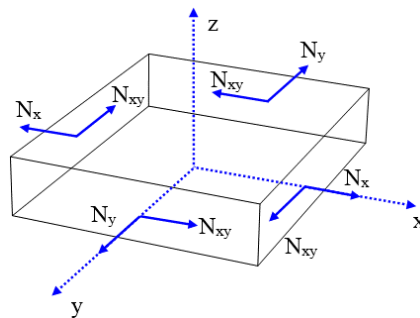
$$\sigma(x, y) = \begin{bmatrix} \sigma_x(x, y) \\ \sigma_y(x, y) \\ \tau_{xy}(x, y) \end{bmatrix}, \quad (2.56)$$

где је $\sigma(x, y)$ поље укупних напона у (x, y) координатном систему, $\sigma_x(x, y)$ компонента поља напона која представља нормални напон у равни са нормалом у правцу x осе координатног система, $\sigma_y(x, y)$ компонента поља напона која представља нормални напон у равни са нормалом у правцу y осе координатног система, $\tau_{xy}(x, y)$ компонента поља напона која представља смичући напон у правцу y осе у равни са нормалом у правцу x осе координатног система. Компоненте сила у пресецима за коначни елемент косине који се налази у равном стању деформација гласи (слика 2.21):

$$N(x, y) = \begin{bmatrix} N_x(x, y) \\ N_y(x, y) \\ N_{xy}(x, y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d \cdot \sigma_x(x, y) \\ d \cdot \sigma_y(x, y) \\ d \cdot \tau_{xy}(x, y) \end{bmatrix}, \quad (2.57)$$

где је d дебљина коначног елемента, $N(x, y)$ поље укупних сила у пресецима у (x, y) координатном систему, $N_x(x, y)$ нормална сила у пресеку чија је нормала у правцу x осе координатног система, $N_y(x, y)$ нормална сила у пресеку чија је нормала у правцу y осе координатног система, $N_{xy}(x, y)$ смичућа сила у правцу y осе, а у пресеку са нормалом у правцу x осе координатног система. У случају равнотостања деформација може се претпоставити да тачке попречног пресека, који је довољно удаљен од основа, остају после деформације у равни попречног пресека, односно тачке попречног пресека имаће само компоненте померања у равни x и y (раван разматраног модела косине), а ова померања биће независна од положаја тачке у погледу на z осу (управна на раван разматраног модела косине):

$$\omega = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\partial u}{\partial z} = 0. \quad (2.58)$$



Слика 2.21. Силе у пресецима коначног елемента косине

На основу учињених претпоставки добија се да је:

$$\varepsilon_z = 0, \gamma_{zx} = 0, \gamma_{zy} = 0, \quad (2.59)$$

а на основу *Hookе*-овог закона важи:

$$\begin{aligned} \sigma_z &= \nu(\sigma_x + \sigma_y) \\ E\varepsilon_x &= (1 - \nu^2)\sigma_x - \nu(1 + \nu)\sigma_y \\ E\varepsilon_y &= (1 - \nu^2)\sigma_y - \nu(1 + \nu)\sigma_x \\ E\gamma_{xy} &= 2(1 + \nu)\tau_{xy} \end{aligned} \quad (2.60)$$

Како су све компоненте деформације независне од z то је:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial \sigma_y}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial z} = 0. \quad (2.61)$$

За равно стање деформације тла могу се формулисати три групе конститутивних релација, а то су везе деформација и померања, везе напона и деформација, везе напона и спољашних сила. Везе деформација и померања, односно кинематичке конститутивне релације гласе:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = [L]\{u\}. \quad (2.62)$$

Везе напона и деформација, односно физичке конститутивне релације гласе:

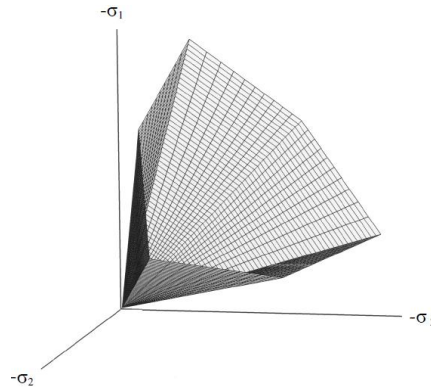
$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_z \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = [E]\{\varepsilon\}. \quad (2.63)$$

Везе напона и спољашњих сила, односно услови равнотеже гласе:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} b_x \\ b_y \end{Bmatrix} = [L]^T \{\sigma\} + \{b\} = 0. \quad (2.64)$$

Нумерички прорачуни еластопластичног модела тла косине доста зависе од вредности параметара који се уносе при дефинисању самог конститутивног модела понашања. Уколико се за моделирање тла користи песак са нултом вредности кохезије c , тада је потребно узети у обзир минималну вредност ове кохезије од $c > 0.2 \text{ kN/m}^2$, како би се избегле непотребне компликације приликом спровођења нумеричких анализа. Са друге стране, уколико је вредност угла унутрашњег трења тла φ велика ($\varphi > 35^\circ$), тада се може знатније повећати време прорачуна нумеричког модела, јер угао унутрашњег трења тла φ знатно утиче на вредност смичуће чврстоће. На слици 2.22. је приказан критеријум течења за некохезивна тла приказан у функцији трокомпоненталних напона. Угао дилатанције ψ за преконсолидоване слојеве, посебно за глине, еквивалентан је вредности $\psi = 0$, док у случају пескова угао дилатанције зависи од запреминске

тежине и угла унутрашњег трења гла. За кварцне пескове угао дилатанције се може одредити према $\psi \approx \varphi - 30^\circ$, док за већину осталих случајева угао дилатанције се може узети да је једнак $\psi = 0$ за $\varphi < 30^\circ$.



Слика 2.22. Критеријум течења гла приказан у функцији трокомпоненталних напона

Основни принцип еластопластичности је да се дилатације и прираштаји дилатација могу декомпоновати на еластичне и пластичне:

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon\}^e + \{\varepsilon\}^p, \quad \{\dot{\varepsilon}\} = \{\dot{\varepsilon}\}^e + \{\dot{\varepsilon}\}^p. \quad (2.65)$$

Узимајући у обзир *Hookе*-ов закон може се писати:

$$\{\dot{\sigma}\} = [D]^e \{\dot{\varepsilon}\}^e = [D]^e (\{\dot{\varepsilon}\} - \{\dot{\varepsilon}\}^p). \quad (2.66)$$

С обзиром на функцију потенцијала пластичности g , прираштај пластичних дилатација се може писати у облику:

$$\{\dot{\varepsilon}\}^p = \lambda \frac{\partial g}{\partial \{\sigma\}}, \quad (2.67)$$

где је λ пластични мултипликатор. За потпуно еластично понашање је $\lambda = 0$, док је за потпуно пластично понашање $\lambda > 1$:

$$\begin{aligned} \lambda = 0 & \quad f < 0 & \quad \frac{\partial f^T}{\partial \{\sigma\}} [D]^e \{\dot{\varepsilon}\} \leq 0 \\ \lambda > 0 & \quad f = 0 & \quad \frac{\partial f^T}{\partial \{\sigma\}} [D]^e \{\dot{\varepsilon}\} > 0 \end{aligned}, \quad (2.68)$$

где је f функција течења. Израз (2.68) се може искористити за успостављање релација између прираштаја напона и прираштаја дилатација еластопластичног понашања :

$$\{\dot{\sigma}\} = \left([D]^e - \frac{\alpha}{d} [D]^e \frac{\partial g}{\partial \{\sigma\}} \frac{\partial f^T}{\partial \{\sigma\}} [D]^e \right) \{\dot{\epsilon}\}, \quad (2.69)$$

при чему је:

$$d = \frac{\partial f^T}{\partial \{\sigma\}} [D]^e \frac{\partial g}{\partial \{\sigma\}}. \quad (2.70)$$

С обзиром да је овако приказана површ течења глатка, то је у случају *Mohr-Coulomb*-овог еластопластичног модела понашања тла спроведена додатна корекција уводећи неколико функција пластичног потенцијала :

$$\{\dot{\epsilon}\}^p = \lambda_1 \frac{\partial g_1}{\partial \{\sigma\}} + \lambda_2 \frac{\partial g_2}{\partial \{\sigma\}} + \dots \quad (2.71)$$

У овом случају се користи неколико квазине независних функција течења f_1, f_2, \dots, f_n за одређивање вредности мултипликатора $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$. Потпуни *Mohr-Coulomb*-ов критеријум се састоји из шест функција течења:

$$\begin{aligned} f_{1a} &= 0.5(\sigma_2 - \sigma_3) + 0.5(\sigma_2 + \sigma_3)\sin\varphi - c\cos\varphi \leq 0 \\ f_{1b} &= 0.5(\sigma_3 - \sigma_2) + 0.5(\sigma_3 + \sigma_2)\sin\varphi - c\cos\varphi \leq 0 \\ f_{2a} &= 0.5(\sigma_3 - \sigma_1) + 0.5(\sigma_3 + \sigma_1)\sin\varphi - c\cos\varphi \leq 0 \\ f_{2b} &= 0.5(\sigma_1 - \sigma_3) + 0.5(\sigma_1 + \sigma_3)\sin\varphi - c\cos\varphi \leq 0 \\ f_{3a} &= 0.5(\sigma_1 - \sigma_2) + 0.5(\sigma_1 + \sigma_2)\sin\varphi - c\cos\varphi \leq 0 \\ f_{3b} &= 0.5(\sigma_2 - \sigma_1) + 0.5(\sigma_2 + \sigma_1)\sin\varphi - c\cos\varphi \leq 0 \end{aligned} \quad (2.72)$$

Да би се постигло решење еластопластичног проблема дефинисано је додатних шест функција потенцијала пластичности:

$$\begin{aligned} g_{1a} &= 0.5(\sigma_2 - \sigma_3) + 0.5(\sigma_2 + \sigma_3)\sin\psi \\ g_{1b} &= 0.5(\sigma_3 - \sigma_2) + 0.5(\sigma_3 + \sigma_2)\sin\psi \\ g_{2a} &= 0.5(\sigma_3 - \sigma_1) + 0.5(\sigma_3 + \sigma_1)\sin\psi \\ g_{2b} &= 0.5(\sigma_1 - \sigma_3) + 0.5(\sigma_1 + \sigma_3)\sin\psi \\ g_{3a} &= 0.5(\sigma_1 - \sigma_2) + 0.5(\sigma_1 + \sigma_2)\sin\psi \\ g_{3b} &= 0.5(\sigma_2 - \sigma_1) + 0.5(\sigma_2 + \sigma_1)\sin\psi \end{aligned} \quad (2.73)$$

У општем случају домен тла се може третирати као континуум за који једначине равнотеже гласе:

$$[L]^T \{\sigma\} + \{p\} = \{0\}, \quad (2.74)$$

где је $\{\sigma\}$ вектор напона (шест компоненти), $\{p\}$ спољашње оптерећење, док је $[L]^T$ транспоновани диференцијални оператор:

$$[L]^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix}. \quad (2.75)$$

Као додаток једначинама равнотеже, кинематичка релација се може формулисати према:

$$\{\varepsilon\} = [L]\{u\}, \quad (2.76)$$

где је $\{\varepsilon\}$ вектор дилатација (шест компоненти), $\{u\}$ вектор померања. Веза између израза (2.74) и (2.75) представља форму конститутивних једначина, а које представљају материјално нелинеарно понашање дефинисано у функцији напона и деформација:

$$\{\dot{\sigma}\} = [M]\{\dot{\varepsilon}\}. \quad (2.77)$$

Комбинујући изразе (2.74), (2.76) и (2.77) добија се парцијална диференцијална једначина другог реда. Једначине равнотеже се могу преформулисати према *Galerkin*-овим варијационим принципима (*weak form*):

$$\int \delta\{u\}^T ([L]^T \{\sigma\} + \{p\}) dV = 0, \quad (2.78)$$

где је $\delta\{u\}$ варијација кинематички прихватљивих померања. Применом *Green*-ове теореме на парцијалну интеграцију израза (2.78) добија се:

$$\int \delta\{\varepsilon\}^T \{\sigma\} dV = \int \delta\{u\}^T \{p\} dV + \int \delta\{u\}^T \{t\} dS. \quad (2.79)$$

Једначина (2.79) је заправо једначина виртуелног рада и овако дефинисана, у математичком смислу, представља затворени интеграл. Развој напонског стања $\{\sigma\}$ се може третирати као инкрементални процес:

$$\{\sigma\}^i = \{\sigma\}^{i-1} + \Delta\{\sigma\}, \quad \Delta\{\sigma\} = \int \{\dot{\sigma}\} dt, \quad (2.80)$$

где је $\{\sigma\}^i$ тренутно стање напона које је непознато, $\{\sigma\}^{i-1}$ претходно стање напона које је познато, инкремент напона $\Delta\{\sigma\}$. Уколико се израз (2.79) разматра за i -то тренутно стање, тада се непознате вредности напона $\{\sigma\}^i$ могу елиминисати применом израза (2.79):

$$\int \delta\{\varepsilon\}^T \Delta\{\sigma\} dV = \int \delta\{u\}^T \{p\}^i dV + \int \delta\{u\}^T \{t\}^i dS - \int \delta\{\varepsilon\}^T \{\sigma\}^{i-1} dV. \quad (2.81)$$

С обзиром да се домен тела дискретизује на коначне елементе, а при том се сваки коначни елемент састоји из неколико чворова, то сваки чвор има неколико степени слободе, па ови степени слободе одговарају компонентама померања. У оквиру

сваког елемента поље померања $\{u\}$ се одређује из дискретних чворних вредности $\{v\}$ и применом интерполационих функција у форми матрице $[N]$:

$$\{u\} = [N]\{v\}. \quad (2.82)$$

Уврштавањем израза (2.82) у израз (2.76) добија се:

$$\{\varepsilon\} = [L][N]\{v\} = [B]\{v\}, \quad (2.83)$$

где је $[B]$ матрица интерполационих дилатација. Сада се израз (2.81) може преформулисати у дискретној форми:

$$\int ([B]\delta\{v\})^T \Delta\{\sigma\} dV = \int ([N]\delta\{v\})^T \{p\}^i dV + \int ([N]\delta\{v\})^T \{t\}^i dS - \int ([B]\delta\{v\})^T \{\sigma\}^{i-1} dV. \quad (2.84)$$

Дискретна померања се могу писати ван интеграла:

$$\delta\{v\}^T \int [B]^T \Delta\{\sigma\} dV = \delta\{v\}^T \int [N]^T \{p\}^i dV + \delta\{v\}^T \int [N]^T \{t\}^i dS - \delta\{v\}^T \int [B]^T \{\sigma\}^{i-1} dV. \quad (2.85)$$

Узимајући у обзир да израз (2.85) важи за варијацију било ког кинематички прихватљивог померања $\delta\{v\}^T$, то се може писати да је:

$$\int [B]^T \Delta\{\sigma\} dV = \int [N]^T \{p\}^i dV + \int [N]^T \{t\}^i dS - \int [B]^T \{\sigma\}^{i-1} dV. \quad (2.86)$$

За пластични модел понашања тла инкременти напона се могу писати као [34]:

$$\Delta\{\sigma\} = [D]^e (\Delta\{\varepsilon\} - \Delta\{\varepsilon\}^p), \quad (2.87)$$

где је $[D]^e$ еластична матрица материјала за текући инкремент напона. Инкременти дилатације $\Delta\{\varepsilon\}$ се одређују из инкремената померања $\Delta\{u\}$ применом матрице интерполационих дилатација $[B]$. За еластичан домен понашања материјала инкременти пластичних дилатација $\Delta\{\varepsilon\}^p$ су једнаки нула, док за пластичан домен понашања ови инкременти се могу писати као [51]:

$$\Delta\{\varepsilon\}^p = \Delta\lambda \left[(1-\omega) \left(\frac{\partial g}{\partial \{\sigma\}} \right)^{i-1} + \omega \left(\frac{\partial g}{\partial \{\sigma\}} \right)^i \right], \quad (2.88)$$

где је $\Delta\lambda$ инкремент пластичног мултипликатора, док је ω параметар који указује на тип временске интеграције. Уколико је $\omega=0$, тада се може говорити о експлицитној интеграцији, а уколико је $\omega=1$, тада се може говорити о имплицитној интеграцији. Имплицитна интеграција има већу предност, у односу на експлицитну интеграцију, с обзиром да се, између осталог, имплицитном интеграцијом добија симетрична и позитивно дефинитна матрица. Дакле, с обзиром да је сада $\omega=1$, израз (2.88) се редукује на израз:

$$\Delta\{\varepsilon\}^p = \Delta\lambda \left(\frac{\partial g}{\partial \{\sigma\}} \right)^i. \quad (2.89)$$

Уврштавањем израза (2.89) у израз (2.87), а затим у израз (2.80) добија се:

$$\{\sigma\}^i = \{\sigma\}^{ir} - \Delta\lambda [D]^e \left(\frac{\partial g}{\partial \{\sigma\}} \right)^i, \quad \{\sigma\}^{ir} = \{\sigma\}^{i-1} + [D]^e \Delta\{\varepsilon\}, \quad (2.90)$$

где је $\{\sigma\}^{ir}$ помоћни вектор напона. Инкремент пластичног мултипликатора $\Delta\lambda$ може се одредити из услова да ново напонско стање треба да задовољи услов течења:

$$f(\{\sigma\}^i) = 0. \quad (2.91)$$

За случај савршено пластичног понашања материјала и материјала који линеарно ојачава у домену нелинеарних деформација, инкремент пластичног мултипликатора $\Delta\lambda$ се може писати као:

$$\Delta\lambda = \frac{f(\{\sigma\}^{ir})}{d+h}, \quad (2.92)$$

где је:

$$d = \left(\frac{\partial f}{\partial \{\sigma\}} \right)^{\{\sigma\}^{ir}} [D]^e \left(\frac{\partial g}{\partial \{\sigma\}} \right)^i, \quad (2.93)$$

при чему је h параметар ојачања, а његова вредност је константна за материјал који линеарно ојачава и једнака је нула за савршено пластични модел материјала. Ново напонско стање се може формулисати као:

$$\{\sigma\}^i = \{\sigma\}^{ir} - \frac{\langle f(\{\sigma\}^{ir}) \rangle}{d+h} [D]^e \left(\frac{\partial g}{\partial \{\sigma\}} \right)^i, \quad (2.94)$$

при чему важи $\langle x \rangle = 0$ за $x \leq 0$ и $\langle x \rangle = x$ за $x > 0$. Глобална итеративна процедура се спроводи субституцијом релација између инкремената напона и инкремената дилатација $\Delta\{\sigma\} = [M] \Delta\{\varepsilon\}$ у израз (2.86):

$$[K]^i \Delta\{v\}^i = \{f\}_{ex}^i - \{f\}_{in}^{i-1}, \quad (2.95)$$

где је $[K]$ матрица крутости $\Delta\{v\}$ вектор инкременталих померања, $\{f\}_{ex}$ вектор спољашњих сила, $\{f\}_{in}$ вектор унутрашњих сила. С обзиром да је, у општем случају, релација између инкремената напона и дилатација нелинеарна, то није могуће унапред формулисати матрицу крутости. Зато се мора користити итеративна процедура да би се задовољили услови равнотеже и конститутивне релације. Глобална итеративна процедура се може формулисати као:

$$[K]^j \delta\{v\}^j = \{f\}_{ex}^j - \{f\}_{in}^{j-1}, \quad (2.96)$$

где је j број итерације, $\delta\{v\}$ вектор субинкременталних померања који учествује у инкрементима померања i -тог корака:

$$\Delta\{v\}^i = \sum_{j=1}^n \delta\{v\}^j, \quad (2.97)$$

где је n број итерација у оквиру i -тог корака. Матрица крутости за линеарно-еластичан модел понашања материјала може се представити као:

$$[K] = \int [B]^T [D] [B] dV. \quad (2.98)$$

Методом коначних елемената (FEM) нелинеаран проблем формулишемо системом нелинеарних алгебарских једначина:

$$[K]\{u\} + \{F\} = 0, \quad (2.99)$$

односно:

$$\{P\} + \{F\} = 0, \quad (2.100)$$

где је $\{u\}$ непознати параметар померања, $\{F\}$ генералисани спољна деловања (оптерећења) у чворовима система. Једнакост проблема (2.99) уместо за целокупно оптерећење, решавају се за низ засебних инкременталних оптерећења. У оквиру сваког инкремента предпостављамо да је систем једнакости линеаран. Па да се решење нелинеарног проблема добија као збир низа линеарних (инкременталних) решења. Нелинеаран проблем се приказује изразом:

$$[K_t]\{\Delta u\} + \lambda\{F\} = 0, \quad (2.101)$$

односно:

$$\{P\} + \lambda\{F\} = 0, \quad (2.102)$$

где је $\{P\}$ вектор унутрашњих генералисаних сила модела које су функција вектора генералисаних померања $\{u\}$, $\{\lambda\}$ параметар инкременталног оптерећења (однос инкременталног и пуног оптерећења). У складу са концептом инкременталног решења добија се:

$$\begin{aligned} \{\Delta u\}_i &= -[K_t]^{-1} \Delta\lambda_i \{F\} = -[K_t]^{-1} \{\Delta F\}_i \\ \{\Delta u\}_i &= \{u\}_{i+1} - \{u\}_i \\ \Delta\lambda_i &= \lambda_{i+1} - \lambda_i \\ \{\Delta F\}_i &= \{F\}_{i+1} - \{F\}_i = \Delta\lambda_i \{F\} \end{aligned} \quad (2.103)$$

Изразом (2.103) се дефинишу инкременти вектора померања за инкременте оптерећења и тангентну матрицу крутости модела, која се формулише за референтно стање на почетку инкремента. Почетном референтном стању првог

инкремента одговара линеарна матрица крутости (иницијална матрица крутости).

Општи i -ти корак инкременталног поступка обухвата:

- формирање тангентне матрице крутости $[K_i]_i$ нумеричког модела косине,
- одређивање инкремената вектора оптерећења $\{\Delta F\}_i$ нумеричког модела,
- одређивање инкремената вектора генералисаних померања $\{\Delta u\}_i$ решавањем система линеарних алгебарских једначина за тангентну матрицу крутости,
- одређивање инкремената утицаја у коначним елементима (деформације, напони),
- одређивање укупне вредности генералисаних померања инкременталним (кумулативним) сабирањем.

Померања после m -тог инкремента одређена су изразом:

$$\{u\}_m = \{u\}_0 + \sum_{i=1}^m \{\Delta u\}_i. \quad (2.104)$$

Разлог за појаву грешке инкременталног решења је спроведена линеаризација у оквиру инкремента. Величина грешке може да се одреди из услова равнотеже на крају инкремента. Као последица линеаризације, јављају се неуравнотежена (резидуална) оптерећења која су мера одступања инкременталног решења од тачног. Вектор резидуалног оптерећења приказан је као одступање од равнотеже:

$$\{\Delta R\}_i = \{\Delta F\}_i - [K_i]_{i+1} \{\Delta u\}_i. \quad (2.105)$$

Корекција грешке се постиже припајањем резидуалног оптерећења на спољно оптерећење у наредном инкременту:

$$\{\Delta F\}_{i+1}^R = \{\Delta F\}_{i+1} + \{\Delta R\}_i. \quad (2.106)$$

Најбољи резултати се постижу комбинацијом инкременталног и итеративног поступка. Услед неиспуњених услова равнотеже у првој итерацији појављују се резидуална оптерећења. Уколико се следеће итерације реализују само са резидуалним оптерећењима, уз корекцију тангентне матрице крутости, поступак може да конвергира уз минимизирање резидуалног оптерећења. При формулисању итеративне методе полази се од израза за развој у *Taylor*-ов ред вектора резидуалних сила у околини померања $\{u\}_j$:

$$\{R\}_{j+1} = \{R\}_j + \frac{d\{R\}_j}{d\{u\}_j} \{\Delta u\}_j. \quad (2.107)$$

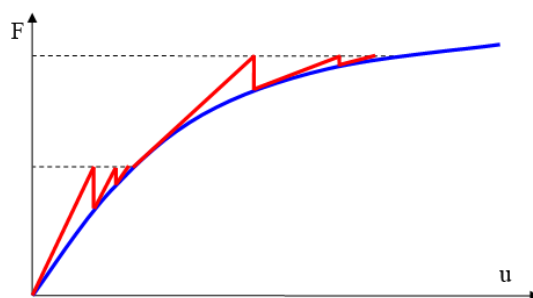
Из услова да резидуално оптерећење испуњава услове равнотеже $\{R\}_{j+1}=0$, важи:

$$\{\Delta u\}_j = -[K_t]^{-1}\{R\}_j. \quad (2.108)$$

Последња два израза представљају основу итеративне методе. Комбинацијом инкременталне и итеративне методе добија се *Newton-Raphson*-ова инкрементално-итеративна метода (слика 2.23).

Верификација прорачуна, добијеног аналитичким или нумеричким методама, спроводи се према прописима за пројектовање у геотехници, као што су *Eurocode 7* прописи. Према *Eurocode 7* прописима, у општем случају, разматрају се гранична стања:

- EQU: губитак глобалног равнотежног стања конструкције или тла,
- STR: унутрашњи лом или прекорачене деформације конструкције или конструктивних елемената,
- GEO: лом или прекорачене деформације тла,
- UPL: губитак равнотежног стања конструкције или тла услед дејства силе узгона воде.



Слика 2.23. *Newton-Raphson*-ова инкрементално-итеративна метода

Приликом анализе стабилности косине потребно је узети у обзир три прорачунске ситуације (*DA - Design Approach*) DA 1, DA 2, DA 3, комбинације оптерећења, парцијалне факторе за дејства A, материјал M, отпорност R:

- прорачунска ситуација 1:
 - комбинација 1: A1 “+” M1 “+” R1,
 - комбинација 2: A2 “+” M2 “+” R1,
 - комбинација 3: A2 “+” M1 “+” R4,
 - комбинација 4: A2 “+” M2 “+” R4,

- прорачунска ситуација 2:
 - комбинација 1: A1 “+” M1 “+” R2,
- прорачунска ситуација 3:
 - комбинација 1: A1 “+” M2 “+” R3,
 - комбинација 2: A2 “+” M2 “+” R3.

Свака прорачунска ситуација има различите парцијалне факторе за параметре тла γ_M и парцијалне факторе отпорности γ_R . У табели 2.1. су приказане прорачунске ситуације (DA) и одговарајући парцијални фактори за анализу стабилности косине. Упоредна анализа стабилности косине се спроводи према:

$$V_u = \frac{M_{ovr}\gamma_R}{M_{res}}(\%) < 100\%, \quad (2.109)$$

где је M_{ovr} прорачунски моменат ротације косине, M_{res} отпорни моменат ротације косине. Прорачунска вредност дејстава (оптерећења) се одређује према:

$$\gamma_G G + \gamma_Q Q, \quad (2.110)$$

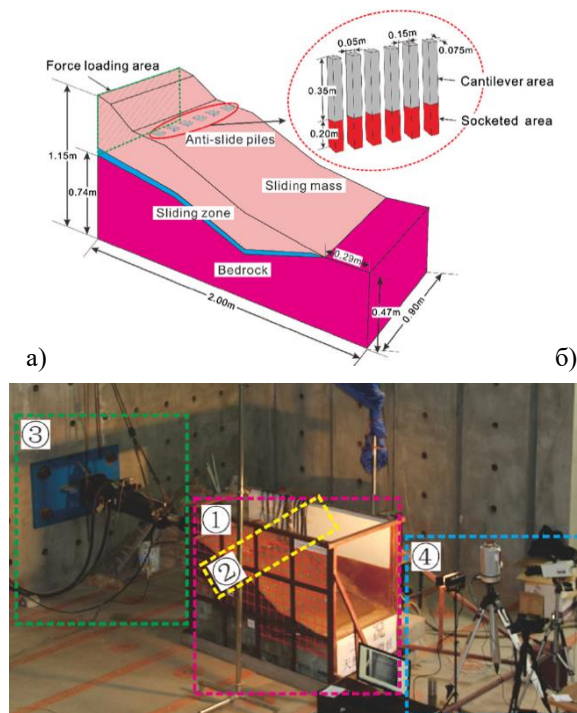
где је γ_G парцијални фактор сталног оптерећења, γ_Q парцијални фактор повремених оптерећења, G стално оптерећење, Q повремено оптерећење.

Табела 2.1. Прорачунске ситуације (DA) и одговарајући парцијални фактори

прорачунска ситуација DA 1				
A1 (дејство)		M1 (тло)		R1 (отпорност)
$\gamma_G G + \gamma_Q Q$	“+”	$\gamma_\phi=1, \gamma_c=1, \gamma_{cu}=1, \gamma_{qu}=1, \gamma_\gamma=1$	“+”	$\gamma_R=1$
НЕПОВОЉНО				
$\gamma_G=1.35 \quad \gamma_Q=1.5$				
ПОВОЉНО				
$\gamma_G=1 \quad \gamma_Q=0$				
A2	“+”	M2	“+”	R1
$\gamma_G G + \gamma_Q Q$				
НЕПОВОЉНО				
$\gamma_G=1 \quad \gamma_Q=1.3$				
ПОВОЉНО				
$\gamma_G=1 \quad \gamma_Q=0$				
A2	“+”	M1	“+”	R4
$\gamma_G G + \gamma_Q Q$				
НЕПОВОЉНО				
$\gamma_G=1 \quad \gamma_Q=1.3$				
ПОВОЉНО				
$\gamma_G=1 \quad \gamma_Q=0$				
A2	“+”	M2	“+”	R4
$\gamma_G G + \gamma_Q Q$				
НЕПОВОЉНО				
$\gamma_G=1 \quad \gamma_Q=1.3$				
ПОВОЉНО				
$\gamma_G=1 \quad \gamma_Q=0$				

прорачунска ситуација DA 2				
A1	“+”	M1	“+”	R2
$\gamma_G G + \gamma_Q Q$		$\gamma_\varphi=1, \gamma_c=1, \gamma_{cu}=1, \gamma_{qu}=1, \gamma_\gamma=1$		$\gamma_R=1.1$
НЕПОВОЉНО				
$\gamma_G=1.35$ | $\gamma_Q=1.5$				
ПОВОЉНО				
$\gamma_G=1$ | $\gamma_Q=0$				
прорачунска ситуација DA 3				
A1	“+”	M2	“+”	R3
$\gamma_G G + \gamma_Q Q$		$\gamma_\varphi=1.25, \gamma_c=1.25, \gamma_{cu}=1.4, \gamma_{qu}=1.4, \gamma_\gamma=1$		$\gamma_R=1$
НЕПОВОЉНО				
$\gamma_G=1.35$ | $\gamma_Q=1.5$				
ПОВОЉНО				
$\gamma_G=1$ | $\gamma_Q=0$				
A2	“+”	M2	“+”	R3
$\gamma_G G + \gamma_Q Q$		$\gamma_\varphi=1.25, \gamma_c=1.25, \gamma_{cu}=1.4, \gamma_{qu}=1.4, \gamma_\gamma=1$		$\gamma_R=1$
НЕПОВОЉНО				
$\gamma_G=1$ | $\gamma_Q=1.3$				
ПОВОЉНО				
$\gamma_G=1$ | $\gamma_Q=0$				

Експерименталне методе прорачуна клизишта се заснивају на испитивању модела клизишта у лабораторијским условима. Најчешће се раде испитивања симулацијом кретања клизне масе у вештачки створеним условима. Такође, испитивања се, у последње време, спроводе на сеизмичким платформама за 3D моделе клизишта, па и у интеракцији са 3D моделима конструкција које су направљене на клизиштима. Овако формирану 3D моделе клизишта, са или без 3D модела конструкција, излажу се дејству трокомпоненталних акцелерограма забележених природних или вештачки генерисаних земљотреса. Такође, примењује се метода сукцесивног скалирања акцелерограма, тако да се тачно може утврдити за који ниво сеизмичког хазарда наступа нарушавање стабилног равнотежног стања. На слици 2.24. а) је приказана геометрија клизишта и шипова за стабилизацију, док је на слици 2.24. б) приказан лабораторијски модел клизишта и опрема за испитивање.



Слика 2.24. Експериментална метода прорачуна клизишта: а) геометрија клизишта и шипова за стабилизацију, б) лабораторијски модел клизишта и опрема за испитивање

Хибридне методе прорачуна клизишта се заснивају на спрезању нумеричких метода клизишта са експерименталним лабораторијским моделима клизишта или са лабораторијским екпериментима за испитивање узорака тла, из реалних модела клизишта. На тај начин се сукцесивно кроз инкременталне фазе нумеричких анализа клизишта, корекцијом инкременталних вредности померања чворова за које се спроводи мониторинг на експерименталном моделу клизишта или инкременталних вредности параметара тла, коригује и сам нумерички модел. Хибридне методе се заснивају на коришћењу експертских софтвера отвореног кода (OSS - *Open-SourceSoftware*), ради лакшег програмирања конститутивних модела понашања материјала и имплементације инкрементално-итеративних алгоритама прорачуна.

2.2.4. Методологија санација клизишта

Методе стабилизације косина се могу поделити на методе којима се:

- променом геометрије пресека или додавањем/уклањањем тла побољшава

- опште стабилитетно стање,
- системом дренажа утиче на смањење порног притиска и контролише се кретање воде,
 - изградњом различитих типова потпорних конструкција успоставља равнотежа између дестабилизујућих и умирујућих сила,
 - применом дубоког фундарања (шпоровима) у комбинацији са другим геотехничким конструкцијама знатније редукују дестабилизујуће силе,
 - примена обложних конструкција додатно утиче на стабилизовање косине,
 - применом гео синтетике, гео мрежа и гео ћелија симулирају ефекти армирања тла,
 - применом пасивних мера утиче на прерасподелу односа сила,
 - инјектирањем масе тла инјекционим смешама додатно спроводи повезивање и интеграција честица тла,
 - применом комбиновани система додатно оптимизује однос неповољних и повољних сила,
 - применом електро-осмозе са ниским потенцијалом електричног поља побољшава опште стабилитетно стање.

3. МЕТОДЕ ЗА ВРЕДНОВАЊЕ И РАНГИРАЊЕ ВАРИЈАНТНИХ РЕШЕЊА

Од почетка постојања, човек се сусретао са проблемима који захтевају неколико опција, код којих се, у специфичним приликама и код наведених лимита, јавља потреба за трагањем за избором најповољније. Суочавамо се са проблематиком вредновања, рангирања и избора оптималне алтернативне варијанте. Одлуке које се могу донети претходе изналажењу најбољег начина извршавања неког задатка, при чему је потребно истовремено задовољити унапред фиксиране захтеве.

Потреба инвеститора да преиспита могућности реализације инвестиционог пројекта је потреба процене да ли се реализацијом тог пројекта и његовом експлоатацијом остварује одређени финансијски профит. Уколико је процена трошкова у оквиру преинвестиционих студија и планираног финансијског профита током експлоатације у одређеном временском периоду није на корист инвеститора, реализација инвестиционог пројекта се обуставља. У процесу одлучивања, уз субјективне ставове онога који доноси одлуке, користе се и научне дисциплине које обухватају и делове вештачке интелигенције и операционих истраживања.

За класификовање проблема одлучивања могу се употребити многе стандардне методе. Једна од значајнијих класификација базирана је на следећој структури проблема: структурирани, полуструктурирани и неструктурирани проблеми. Код структурираног проблема, процедуре за генерисање најбољег или оптималног решења познате су као стандардне математичке методе (детерминистичке, стохастичке, методе засноване на теорији расплнутих и грубих скупова, комбиноване методе). Значајна предност ових метода је њихова математичка строгост у формулацији и егзактност у налажењу решења, могућност да се добију квантитативне (бројчане) вредности функција критеријума и променљивих садржаних у математичком моделу. Недостатак им се састоји у ограничениости примене само на оне проблеме чији се услови ограничења и функција циља могу математички дефинисати (Прашчевић, 2007).

Код неструктурираних проблема не постоји стандардан метод за решавање.

За формулацију и решавање математички ових проблема користе се хеуристичке (Симплекс метода) и експертне методе (*Delfi metoda*). У решавању оваквих оваквих проблема људска интуиција често игра главну улогу.

Полуструктурирани проблеми налазе се између структурираних и неструктурираних проблема, поседујући и структуриране и неструктуриране елементе проблема. Њихово решавање захтева комбиновање како стандардних процедура за генерисање решења тако и људског расуђивања (Анђус и Малетин, 1993).

3.1. Вишекритеријумско вредновање

Вишекритеријумско вредновање (вишекритеријумског вредновања) подразумева доношење одлука у случајевима када постоје вишеструки и међусобно конфликтни критеријуми. Проблеми који се тичу вишекритеријумског вредновања обухватају нашу свакодневницу као што је куповина аутомобила – нико не купује аутомобил на основу само једног критеријума (нпр. цене). У обзир се узимају и комфор, квалитет, перформансе, престиж, итд. Проблеми могу да буду од стратешког значаја и да имају утицаја на ширу друштвену заједницу као што је, на пример случај са расподелом средстава која ће се употребити за очување националне безбедности. У оквиру вишекритеријумског вредновања разликују се вишециљно и вишеатрибутивно вредновање о којима ће бити речи касније. Ипак, без обзира на различитост, вишекритеријумски проблеми, по Јуну (Yoon) и Хвангу (Hwang), деле следеће заједничке карактеристике:

- вишеструки критеријуми: сваки проблем поседује вишеструке критеријуме, који могу бити функције циља или атрибути;
- међусобна конфликтност критеријума: вишеструки критеријуми често су међусобно конфликтни;
- неупоредиве јединице: критеријуми су изражени у различитим квалитативним и квантитативним мерним јединицама;
- пројектовање / селекција: решења вишекритеријумског проблема су или пројектовање најбоље алтернативе (може бити и више њих) или одабир најбоље од претходно дефинисаних коначних алтернатива;

- врло често је добро скупити критеријуме у одређене скупове критеријума који важе за посебне и различите делове циља који је потребно остварити. Скупљање критеријума посебно је значајно код одлучивања када постоји пуно критеријума (нпр., више од седам). Основни разлози груписања критеријума су следећи;
- лакше проверавање компатибилности скупова критеријума датом проблему, односно јесу ли одабрани критеријуми и скупови критеријума релевантни решавању проблема;
- упршћава се процедура рачунања тежинских фактора – у одређеним случајевима постоји могућност израчунавања тежинских фактора за скуп критеријума, а онда их међусобно упоређивати;
- постоји могућност јаснијег приказа улоге и места критеријума у процедури доношења одлуке;

Критеријуми представљају стандарде расуђивања или правила која се поштују приликом оцене прихватљивости. Литература која се бави вишекритеријумском наводи их као атрибуте и/или циљеве. У том смислу, сваки вишекритеријумски проблем односи се на вишециљно вредновање или вишеатрибутивно вредновање, али се више користи као термин за вишеатрибутивно вредновање.

Циљеви представљају одраз жељи и тежњи доносиоца одлука и указују на правац у коме они желе да раде и развијају свој модел за доношење одлуке. Вишециљно вредновање резултира пројектовањем алтернатива које оптимизују или најбоље задовољавају функције циља доносиоца одлука.

Конкретни циљеви су жељени нивои остваривања од стране доносиоца одлука изражени у смислу специфичног стања система у простору и времену. Дакле, док циљеви исказују жељени правац, конкретни циљеви представљају жељени (или одредишни) ниво остваривања.

Атрибути су карактеристике, квалитети или параметри перформанси алтернатива. Вишеатрибутивно вредновање подразумева одабир „најбоље“ алтернативе из спектра претходно селектованих алтернатива у светлу њихових атрибута.

Алтернатива увек подразумева поступак опредељивања између две или више могућности или одлука. Начин генерисања алтернатива је значајан део вишециљног вредновања. У скоро свим моделима вишециљног вредновања, алтернативе се могу аутоматски генерисати помоћу модела. Међутим, у већини случајева вишеатрибутивног вредновања, неопходно је алтернативе генерисати ручно. Питања о томе како и када треба престати са стварањем алтернатива може бити веома важно. Генерисање алтернатива веома зависи од доступности и цене информација и захтева експертски приступ. Алтернативе се могу генерисати и уз помоћ хеуристике и то од стране једног лица или групе. Генерисање алтернатива обично наступа пре дефинисања критеријума за процену алтернатива, али одабир алтернатива долази после тога.

Проблематика вишекритеријумске оптимизације код нединамичких система може се формулисати на следећи начин:

$$\max F(x)$$

где је: $F(x)$ - векторска критеријумска функција који има компоненте појединачне критеријумске функције $f_i(x)$,

$i=1, \dots, n$; x - векторска променљива (вектор одлучивања),

\max - решење треба да максимизира све критеријумске функције $f_i(x)$, $i=1, \dots, n$ (претпоставка је да све представљају добити);

n - број критеријума или критеријумских функција,

X је допустиви скуп,

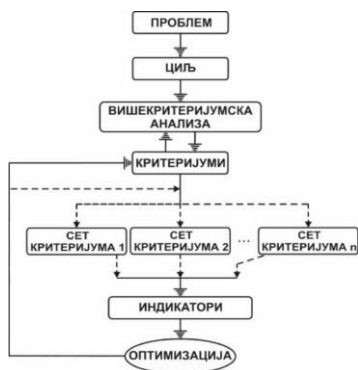
$$X = \{x : x \geq 0, g_l(x) \leq 0, l=1, \dots, L\}$$

3.1.1 Сакупљање повратних информација

Вредновање различитих решења захтева континуирану евалуацију одлука донесених у прошлости. Сакупљање повратних информација у вези са неким ранијим изведеним пројектима важно је због тога што се тако стиче искуство на основу лоших или погрешних одлука донесених у прошлости како би се то знање применило у будућности. Овај процес стицања знања не треба да буде само неформалан и вербални, већ треба да се на један систематски и објективан начин документује и има у виду код доношења одлука у будућности. У том процесу кључна је улога тзв. Архивског пројекта као документа који директно повезује процес пројектовања и изградње објекта са његовим одржавањем и експлоатацијом.

3.1.2 Дефинисање сетова критеријума

Груписање критеријума у скупове битно је када код доношења одлуке постоји већи број критеријума.



Слика 3.1 - Место критеријума у процесу вишекритеријумског вредновања

Показатељи представљају реалне вредности сваког критеријума (економске јединице, утрошак горива, проценат саобраћајних несрећа, степен услуга, разреди оцена, итд.), док се методом оптимизације (постављени минималних или максималних вредности индикатора) дефинишу директиве вредновања за солуције у процедури вишекритеријумске анализе.

Због побројаних разлога, сакупљање критеријума је битан садржалац вишекритеријумске анализе. Има више усвојених смерница утврђивања да ли су критеријуми груписани као функционални или нефункционални. Некада се истиче да приступ решавању овог задатка структурисања критеријума тражи умеће стечено практичним искуством у тој области. Код већине проблеме оправдано не постоји начин структурирања који је у потпуности исправан. Груписање критеријума је оно које приказује прецизно, одрживо, аргументовано и општеприхваћено становиште начина који омогућава неколико релевантних критеријума спајања у кохерентне сетове како би било која група представљала једну и јединствену компоненту водећег задатка (Multi-criteria analysis: a manual, 2009.). Готово исто како критеријуме представљају изабрани индикатори, групе критеријума се посматрају као посебни циљеви код којих се оптимизацијом долази до главног циља.

3.1.3 Методологија вишекритеријумског вредновања

Методологија вишекритеријумског вредновања подразумева следеће фазе (Multi-criteria analysis: manual, 2009.):

Етапа 1: Одређивање критеријума и скупова критеријума;

Етапа 2: Одређивање вредности критеријума као и правца оптимизовања (задати мин. или макс. вредности); одавде добијамо индикаторе, тј. специфичне вредности критеријума;

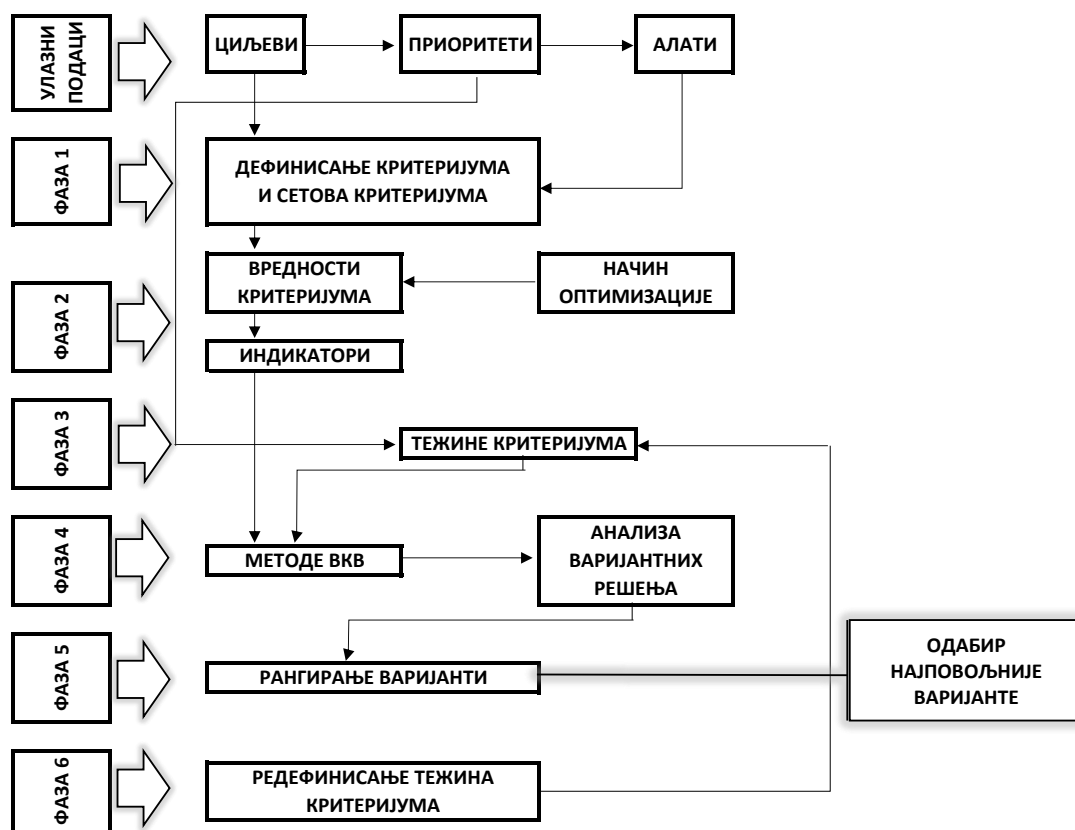
Етапа 3: Задавање тежинских фактора критеријума;

Етапа 4: Избор начина вишекритеријумског вредновања;

Етапа 5: Рангирање варијанти и избор најпогодније алтернативе;

Етапа 6: Поновно дефинисање тежина критеријума; некада се долази до промене у тежинама критеријума онда се целокупан процес враћа на фазу број 3 и проналази се нова варијантна решења.

Методологија употребе вишекритеријумског вредновања дата је на дијаграму на слици 3.2. Ово представља главне принципе по којима се решава један вишекритеријумски проблем и дате фазе се разликују у зависности од природе конкретног проблема тј. области коју обухвата.



Слика 3.2 - Методологија употребе вишекритеријумског вредновања

Вишекритеријумско вредновање је и начин приступања решавању проблематике и групацији разних техника и метода, који као завршни резултат имају редослед, тј. рангирање варијаната, од најприхватљивије до најнеприхватљивије алтернативе. Проучаване алтернативе у том проблему се разликују у степену испуњења задатих циљева изабраних критеријума, код чега је очигледно како нити једна варијанта не може бити најприхватљивија по свим параметрима циљева и критеријумима. Затим, често се дешава да су циљеви и критеријуми међусобно конфликтни.

У вишекритеријумским анализама готово увек је присутан мање или више изражен степен конфликтности између постављених циљева (односно одабраних критеријума) који ће се у анализи користити. Ове контрадикторности највише су изражене када се међусобно разматрају трошкови и очекиване користи од реализације неког пројекта.

На примеру пројектовања потпорних зидова, јасно је да се не могу истовремено постићи минимално могући трошкови грађења и експлоатације и минималан негативан утицај на животну средину и максималне добити за кориснике. У зависности од процењеног степена утицаја, разликоваће се и висина трошкова које треба планирати и обезбедити за грађење и експлоатацију пута, а у циљу смањивања његовог утицаја на животну средину. На сличан начин, краткорочне користи могу бити у конфликту са дугорочним - минимизирање инвестиционих трошкова може се показати веома корисним и исплативим у релативно кратком временском периоду, али може имати великог утицаја на обим трошкова за одржавање и управљање путем у будућности.

Вишекритеријумско вредновање се може посматрати и као начин решавања комплексних проблема које карактеришу одређени циљеви који се тичу и материјалних (финансијских) и нематеријалних добити, што га чини идеалним за примену у појединим областима инжењерства. У вишекритеријумској анализи, ради лакшег сагледавања, проблем се може раставити на више делова који се засебно разматрају, да би се потом добила кохерентна слика која ће служити доносиоцу одлуке приликом одлучивања. Кроз низ доступних метода, вишекритеријумско вредновање пружа различите начине рашчлањивања комплексног проблема, затим могућност сагледавања у коликој мери одређена варијанта испуњава постављене циљеве, различите начине одређивања тежинских фактора критеријума и, коначно, рангирање варијантних решења. Данас су доступни многобројни рачунарски програми и апликације за вишекритеријумско вредновање који умногоме олакшавају и убрзавају процес доношења одлука, имајући у виду да савремени проблеми могу да садрже велики број циљева и критеријума.

Вишекритеријумска анализа се представља први пут 1976. године захваљујући Кинија (Keeny) и Раифе (Raiffa). Они своју књигу заснивају на теорији одлучивања, моделирања код неизвесности и функцијама корисности.

Главна претпоставка наглашена у теорији одлучивања је да доносиоци одлуке теже да буду логички доследни приликом доношења одлука. Доносиоци одлуке желе да избегну ситуацију у којој су донесене одлуке (одабир варијантних решења) међусобно контрадикторне, односно не може се успоставити тачан

поредак варијанти. Теорија се развија на основу ове претпоставке о кохерентности и предлаже неке једноставне принципе, као што је принцип транзитивности: уколико је варијанта А повољнија од алтернативе Б, а варијанта Б повољнија од алтернативе В, тада би варијанта А требало да буде повољнија од алтернативе В. Усвајањем овог наочиглед једноставног принципа за аксиом, могуће је доказати друге теорије које нису тако очигледне, а од користи су у процесу доношења одлука. Практичан пример ове тврдње може се наћи у геометрији. Сасвим је логично и очигледно да је најкраће растојање између две тачке права линија..

Кини и Реифа доносе низ аксиома који омогућавају доношење одлука у случајевима постојања вишеструких циљева и критеријума (Multi-criteria analysis:a manual, 2009.). У пракси, вишекритеријумско вредновање се користи као помоћ доносиоцима одлука у одабиру најповољнијег решења (алтернативе). Вишекритеријумски приступ пружа подршку доносиоцима одлука (индивиду или групи) у креирању логичког следа варијанти у оквирима конкретног проблема. Аргументовану одлуку могуће је донети само онда када се алтернативе рангирају од најповољније до најнеповољније.

У својим наредним публикацијама, Кини и Реифа представљају све више апликација вишекритеријумске анализе које су применљиве и у државним и у приватним секторима. То је допринело успостављању и широкој примени вишекритеријумског вредновања као подршке одлучивању у раду различитих владиних агенција, пре свега у Сједињеним Америчким Државама. Овај приступ размишљања и доношења одлука нашао је своје место и на пољу правних наука. Међутим, вишекритеријумско вредновање није увек наилазило на одобравање, пре свега зато што захтева интензивну сарадњу заинтересованих страна и слободан проток информација, те због ситуација у којима су одлуке добијене овим приступом неретко другачије од тежњи и интереса (махом политичке природе) неких заинтересованих страна.

На основу дотадашњег искуства, критика и природе отпора овом приступу подршке одлучивању, дошло се до следећих закључака и препорука (Multi-criteria analysis:a manual, 2009.):

- код пројеката од израженог друштвеног значаја, неопходно је обезбедити улазне податке од стране различитих струка које су у вези са конкретним проблемом, као и стручан и независан надзор над имплементацијом методологије. Аутори препоручују активно учествовање и дефинисање циљева свих релевантних заинтересованих страна, успостављање стандарда одлучивања (критеријума), анализу проблема из свих могућих аспеката и наглашавају важност конструктивне размене мишљења и комуникације између заинтересованих страна;
- препоруке из прве тачке нису неопходне код пројеката који немају толико изражен друштвени значај, тзв. мањих пројеката. Код њих се у обзир узимају више елементи који се тичу социјалног и економског окружења у којим пројекат треба да се реализује;
- још у првим фазама развоја вишекритеријумског приступа решавању проблема, очигледно је да он не треба да буде чисто технички приступ и на томе се инсистира без обзира на ком се пољу примењује. За успешну примену вишекритеријумског вредновања од круцијалног значаја су комуникација и уопште елементи друштвене природе међу којима спадају: међусобно уважавање, спремност на компромис, толеранција, доследност струци, (Multi-criteria analysis:a manual, 2009.).

Наведене препоруке налазе се и данас у употреби и, уз одређене допуне и прилагођавања, представљају незаобилазан елемент у решавању свих проблема применом вишекритеријумске анализе. Штавише, у савременој литератури, оне се постављају као полазна база на основу које се дају друге препоруке код вишекритеријумског приступа проблему, а све у зависности од области и ситуације у којој се приступ примењује

3.1.4 Циљеви, критеријуми и показатељи вредности

Савремене методе вишекритеријумског вредновања могу знатно побољшати процедуру одлучивања привреди, па се зато многи задаци одлучивања могу решити на основу коришћења квантитативних анализа. Наглашава се њихова корисност у службеном одлучивању код великих предузећа, који знатно

упрошћава процедуре одлучивања по питању различитим проблема пословања. При доношењу битних привредних одлука, они се суочавају са многобројним квалитативним и квантитативним критеријумима који се разматрају. Вишекритеријумско вредновања оличава теоријски заокружен и емпиријски потврђен моделитет приликом доношења оптималне одлуке уколико постоји неколико међусобно супротстављених критеријума одлучивања. На овим основама настаје вишекритеријумско вредновање као теоријско-методолошки инструментаријум који проучава и решава проблеме код којих се више аспеката мора узети у обзир.

Спектар проблема за чије је решавање применом техника вишекритеријумског вредновања веома је широк, чак и када проблеми имају неке заједничке елементе:

- бројни критеријуми, односно атрибути одлучивања;
- супротстављеност критеријума;
- неупоредиве мерне јединице код различитих критеријума;
- огроман број решења проблема (алтернатива);
- одабир само једног финалног решења, које је пројекција најбоље или одабир најбоље из скупа претходно дефинисаних алтернатива.

3.2. Методе вишекритеријумског вредновања

Карактеристичан вишекритеријумски задатак математички се представља:

(Lu, Zhang, Ruan i Wu, 2007):

(VKV) { Select: A_1, A_2, \dots, A_m

s.k.: K_1, K_2, \dots, K_n

gde:

$A = (A_1, A_2, A_m)$ представља m варијаната,

$K = (K_1, K_2, K_n)$ скуп од n критеријума који описују прилику у којој одлучује.

Избор се заснива на максимизацији функције вишекритеријумске вредности дате од заинтересованих учесника. Базне податке које се употребљавају у наведеном моделу могуће је приказати помоћу матрице (Lu, Zhang, Ruan i Wu, 2007):

$$\begin{array}{c}
 A_1 \\
 A_2 \\
 A_i \\
 A_m
 \end{array}
 \begin{array}{ccccc}
 K_1 & K_2 & & K_j & K_n \\
 \left| \begin{array}{ccccc}
 x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1j} & x_{1n} \\
 x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2j} & x_{2n} \\
 x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{ij} & x_{in} \\
 x_{m1} & x_{m1} & \dots & x_{mj} & x_{mn}
 \end{array} \right.
 \end{array}
 \quad (3.1)$$

$$W = [W_1, W_2, \dots, W_n],$$

где су:

$A = (A_1, A_2, A_m)$ - варијанте између којих они који доносе одлуке изабарају најподобнију;

K_1, K_2, K_n - критеријуми на основу којих се варијанте вреднују;

$x_{ij}, i=1, \dots, m ; j=1, \dots, n$ - рејтинг варијанте A_i по критеријуму K_j ,

W_j - тежински коефицијент критеријума K_j .

Методе вишеатрибутивне анализе у стручној литератури често се називају „меке" (soft) оптимизационе технике, за разлику од математички строго профилисаних оптимизационих метода (Теорија игара и методе вишециљне оптимизације и анализе). Главна предност ових „меких" метода је што без већих потешкоћа третирају просторе одлучивања и критеријуме изражене у различитим мерним јединицама, као и случајеве

У продужетку су приказане неке од често коришћених метода вишекритеријумског вредновања, и то: VIKOR, PROMETHEE-GAIA, SAW, TOPSIS, SAW, ANP, ELECTRE i GRUBI SKUPOVI.

3.2.1 Метода VIKOR

Метода ВИКОР помоћу програмског пакета (VIKOR) долази од решења задатка оптимизације са неколико хетерогених и међусобно супротстављених критеријумских функција. Добија се компромисно решење, и као такво оно је јединствено или представља скупове сличних решења. Компромисно решење је најсличније идеалном решењу. Идеално решење добијамо по основу најважнијих вредности критеријума и најчешће није у датој групи алтернативних решења (Марковић и др, 2013).

3.2.1.1 Алгоритам по ком ради метода ВИКОР

Алтернативна решења треба рангирати a_1, a_2, \dots, a_j са датим вредностима критеријумске функције f_{ij} , $i=1, n$ и $j=1, J$, када n представља бројчану ознаку критеријума, а J представља бројчану ознаку алтернатива. Рангирања се изводи на наредни начин:

- а) Одређују се најбоље f_i^* и најгоре f_i^- вредности свих критеријумских функција $i=1, 2, \dots, n$;

$$f_i^* = \max_j f_{ij}, \quad f_i^- = \min_j f_{ij}, \quad \text{ако } i\text{-та функција представља профит}$$

$$f_i^* = \min_j f_{ij}, \quad f_i^- = \max_j f_{ij}, \quad \text{ако } i\text{-та функција представља расходе}$$

б) На бази мера S_j и R_j изводи се рангирање алтернатива и врши се одређивање положаја алтернативе a_j на ранг листама $s(a_j)$ и $r(a_j)$, како се величине S_j и R_j , $j=1, 2, \dots, J$ рачунају уз помоћ:

$$S_j = \sum_{i=1}^n \omega_i (f_i^* - f_{ij}) / (f_i^* - f_i^-) \quad (\text{за } p=1) \quad (3.2)$$

$$R_j = \max_i \omega_i (f_i^* - f_{ij}) / (f_i^* - f_i^-) \quad (\text{за } p=\infty) \quad (3.3)$$

где је: n – бројчана ознака критеријума,

p_i – тежинска ознака i -тог критеријума и означава преференцију доносиоца одлуке, тј. Релевантна битност критеријума,

S_j -мера растојања $R(F, I)$ у односу на идеалне тачке за алтернативе j

R_j -мера растојања $R(F, I)$ у односу на идеалне тачке за алтернативе j .

Рангирањем по S_j и R_j долазимо до две ранг листе алтернатива. Да би их ујединили у једну ранг листу можемо применити компромисно програмирање и по њему S_j и R_j критеријумске функције. Па је ново рангирање:

$$Q_j = vQS_j + (1-v)QR_j = v \frac{S_j - S^*}{S^- - S^*} + (1-v) \frac{R_j - R^*}{R^- - R^*} \quad (3.4)$$

где је: $S^- = \max_j S_j$ и $R^- = \max_j R_j$

$v = (n+1) / 2n$ - тежина код стратегије одлучивања групе користи

$(1-v)$ - тежина код индивидуалног незадовољства

QS_j и QR_j су нормализоване вредности. Алтернатива a_j представља

вишекритеријумски бољу алтернативу од алтернативе a_k , ако је $Q_j < Q_k$ и самим тим има супериорнију позицију на ранг листи.

ц) Метода ВИКОР производи даје вишекритеријумски најповољнију варијанту која се налази на почетку компромисне ранг листе за $\nu = 0.5$ искључиво када има:

- (Ц1) – “довољну предност” у односу на алтернативу са следеће позиције. Код вредновања “предности” користи се разлика између мера Q_j . Алтернатива a' има довољну предност у односу на следећу са ранг листе a'' ако је:

$$Q(a'') - Q(a') \geq DQ \quad (3.5)$$

где је DQ “праг предности” и он се добија односно на теоријске вредности Q и броја алтернатива J као:

$$DQ = \min\left(0.25; \frac{1}{J-1}\right) \quad (3.6)$$

Са 0.25 је лимитирани праг случајева са ниским бројем алтернатива.

(Ц2) – Почетна алтернатива компромисе ранг листе је на “довољно” стабилној позицији уколико задовољава барем један од наредних услова:

- на првој је позицији ранг листе по QS ,
- на првој је позицији ранг листе по QR ,
- на првој је позицији ранг листе по Q за $\nu=0.25$ и $\nu=0.75$.

Када почетна алтернатива компромисне ранг листе не може испунити и један и други услов (U1 и U2), можемо рећи да није “довољно” боља од наредне алтернативе. У тим ситуацијама методом ВИКОР образује се група компромисних решења која садржи прву и алтернатива након ње. Уколико примарна алтернатива не може испунити једино услов U2 тада у унију компромисних решења улази једино секундарна алтернатива из компромисне ранг листе. Када услов U1 није испуњен онда група компромисних решења има алтернативе са компромисне ранг листе до оног које задовољава услов да почетна алтернатива нема задовољавајућу предност над том алтернативом.

Као исход методе VIKOR добија се:

- ранг листе по мерама QR , Q (за $v = 0.5$) и QS и
- компромисно решење тј. група компромисних решења.

Дата решења су основа код одлучивања и усвајања најпобнијег (вишекритеријумски оптималног) решења. (Opricović, Tzeng, 2007.)

3.2.2. Метода PROMETHEE- GAIA

PROMETHEE метода се заснива на поређењу сваког пара алтернатива по сваком од изабраних критеријума. Методе су настале почевши од 1982. године у серији радова Белгијске школе операционих истраживача (Brans i Vincke, 1985). За сваки критеријум доносилац одлуке одређује једну од оквирно могућих шест функција преференције које региструју разлике међу алтернативама, а потом се формира укупан износ преференција за сваку алтернативу (позитиван и негативан) и на основу величине разлике између суме позитивних преференција и суме негативних преференција се одређује поредак алтернатива. Предности ове групе метода су што су врло применљиве и када нема потпуних информација и такође што постоје софтвери за ову методу. Недостаци су што није лако одредити критеријумске функције и тежинске коефицијенте. Исто тако као и код других метода може доћи до промене ранга постојећих алтернатива увођењем нове алтернативе

Визуелна интерактивна модулација GAIA представља графичку интерпретацију PROMETHEE методе. Да би се извршило рангирање алтернатива по методи PROMETHEE, потребно је после дефинисања критеријума дефинисати и функцију преференције $P(a,b)$ за алтернативу a и b . Алтернативе a и b представљају алтернативе вредноване по критеријумским функцијама. Узима се да је алтернатива a повољнија од алтернативе b по критеријуму f , уколико је $f(a) > f(b)$. Онај који доноси одлуку има и могућност да по таквом поређењу додели преференцију једној од алтернатива. Преференција узима вредност у интервалу од 0 до 1, а комбинације односа се могу приказати следећим релацијама:

$P(a, b) = 0$ нема преференције, индиференција,

$P(a, b) \approx 0$ слаба преференција $k(a) > k(b)$,

$P(a, b) \approx 1$ јака преференција $k(a) \gg k(b)$,

$P(a, b) = 1$ стриктна преференција $k(a) \gg \gg k(b)$.

Релације се налазе у следећим ограничењима:

$$\begin{aligned} 0 < P(a,b) < 1, \\ P(a,b) \neq P(b,a). \end{aligned} \tag{3.7}$$

Већа преференција се изражава већом вредношћу из датог интервала. Што означава да код сваког критеријума доносилац одлуке разматра одређену функцију преференције (Brans, Mareschal, 1995.). На слици 3.3 дато је шест генералисаних критеријума, шест функција преференције $P(d)$. Свих шест генералисаних критеријума могуће је приказати преко линеарних функција, односно они се добијају избором највише четири тачке унутар критеријумског простора датог критеријума. На слици 3.3 поред функција критеријума дати су и параметри за дате изабране тачке у оквиру критеријумског простора који је приказан на x -оси (d), а на y -оси је дат степен преференције (P). Код IV степенастог критеријума уместо вредности $P(d) = 1/2$ могуће је задати било коју вредност $0 < P(d) < 1$ (Brans, Mareschal, Vincke, 1986.). Онај који доноси одлуке мора да идентификује једну алтернативу оптимизујући све критеријуме. Главни подаци вишекритеријумског проблема дати се у табели одлучивања (слика 3.3).

a	$g_1(\cdot)$	$g_2(\cdot)$	...	$g_j(\cdot)$	...	$g_k(\cdot)$
a_1	$g_1(a_1)$	$g_2(a_1)$	...	$g_j(a_1)$	...	$g_k(a_1)$
a_2	$g_1(a_2)$	$g_2(a_2)$	...	$g_j(a_2)$	...	$g_k(a_2)$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
a_i	$g_1(a_i)$	$g_2(a_i)$	...	$g_j(a_i)$	...	$g_k(a_i)$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
a_n	$g_1(a_n)$	$g_2(a_n)$	...	$g_j(a_n)$	...	$g_k(a_n)$

Слика 3.3 – Табела одлучивања







На слици 3.4 коришћене су следеће ознаке: t - граница индиференције, n - граница строге преференције, σ - средња вредност међу t и n за Гаусов критеријум.

После дефинисања типа општег критеријума, потребно је дефинисати вредност функције преференције акција a у односу на b по сваком критеријуму и

прорачунати индекс преференције (IP) акције a у односу на акцију b . Сваки пар акција се налази у скупу A . Индекс преференције се израчунава на следећи начин:

$$IP(a,b) = \sum_j^n W_j P_j(a,b), \sum_j W_j = 1 \quad (3.7)$$

где је: W_j – тежина j -тог критеријума.

	<p>Tip I: Običan kriterijum</p> $P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq 0 \\ 1, & d > 0 \end{cases}$	-
	<p>Tip II: Kvazi kriterijum</p> $P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq m \\ 1, & d > m \end{cases}$	m
	<p>Tip III: Kriterijum sa linearnom preferencijom</p> $P(d) = \begin{cases} 0, & d < 0 \\ d/n, & 0 \leq d \leq n \\ 1, & d > n \end{cases}$	n
	<p>Tip IV: Nivo kriterijum</p> $P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq 0 \\ 1/2, & m < d < n \\ 1, & d \geq n \end{cases}$	m,n
	<p>Tip V: Kriterijum linearne preferencije sa područjem iniferentnosti</p> $P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq m \\ \frac{d-m}{n-m}, & m < d \leq n \\ 1, & d > n \end{cases}$	m,n
	<p>Tip VI: Gausov kriterijum</p> $P(d) = 1 - e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}}$	σ

Слика 3.4 – Типови функције преференције $P(d)$ са параметрима који их описују

Уколико се деси да сви критеријуми имају исту тежину, односно да је $W_j = 1/n$, тада је индекс преференције:

$$IP(a,b) = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_j^n P_j(a,b) \quad (3.8)$$

и за коју важи следећа релација:

$$0 \leq P_j(a,b) \leq 1 \quad (3.9)$$

Након одређивања индекса преференције $IP(a,b)$, коначно још могуће израчунати индекс тока алтернативе $T(a)$, чија вредност представља важност алтернативе. На основу овог индекса се доноси коначна одлука о логистичкој компетентности једне алтернативе из разматраног скупа алтернатива. Он се одређује као:

$$T(a) = \frac{\sum_{x \in A} IP(x)}{i - 1} \quad (3.10)$$

Код избора критеријума који сачињавају базу за одлучивање, треба водити рачуна да више различитих критеријума дефинише проблем свеобухватно и објективно, сагласно са захтевима које доносилац одлуке задаје (Kolli, Parsaei, 1992.). Овако је утицање искуства и објективне оцене онога који доноси одлуку код одабира генерализованих критеријума доведен до минимума.

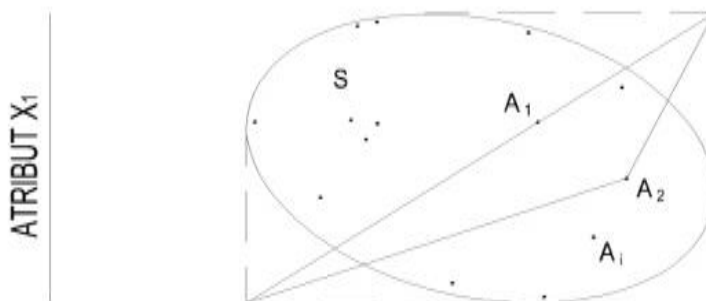
3.2.3 Метода TOPSIS

Методу ТОПСИС су развили Јуна (Yoon) и Хванга (Hwang) 1981. године, и она је заснована на рангирању алтернатива по удаљености од тако званог идеалног решења и анти-идеалног решења које је прво потребно одредити. Решење које је идеално умањује критеријуме издатака, а увећава критеријуме профита; код анти-идеалног решење је важеће супротно. Оптимална алтернатива је у геометријском погледу најприближенија идеалном решењу, тј. најудаљенија од анти-идеалног. Рангирање алтернатива засновано је „релативној сличности са идеалним решењем“ па је ситуацију у којој алтернатива упоредо има идентичну сродност са идеалним и анти-идеалним решењем могуће избећи. Метода TOPSIS се употребљава као алтернативна метода методе ELECTRE. Она анализира удаљење алтернатива од две тако зване идеалне тачке (које одређујемо у самом методу): Термин „најбољи“ и „најгори“ интерпретирају се код сваког критеријума засебно, по томе да ли је у питању максимизација или минимизација критеријума. Критеријуми се представљају у вишедимензионалном координатном систему, при чему сваком критеријуму припада једна координатна оса.

Први услов је да одабрана алтернатива буде на минимално Еуклидском растојању од идеалног решења у геометријском смислу, а други да истовремено буде на максималном растојању од "анти-идеалног" решења. Понекада одабрана алтернатива, која је на најмање Еуклидском растојању од "идеалног" решења, има мање растојање до "анти-идеалног" решења од осталих алтернатива.

Један од алтернатива може подседовати минималну (тежинску) Еуклидску дистанцу у односу на идеално решења у геометријском смислу. Онда истичемо да

би та алтернатива упоредо требала бити на максималном удаљењу од анти-идеалног решења. Некада одабрана алтернатива, која поседује минималну Еуклидску удаљеност у односу на идеално решење, има мању удаљеност у односу на анти-идеално решење а у односу на остале алтернативе. Нпр., слика 3.5 приказује да је алтернатива A_1 на мањем удаљењу (и од идеалног решења A и од анти-идеалног решења A^-) у погледу на другу алтернативу A_2 . Онда се избор алтернативе A_1 доводи у питање. TOPSIS метода симултано проматра растојање од идеалног и анти-идеалног решења у погледу релативне близине идеалном решењу.



Слика 3.5. – Приказ еуклидске удаљености у погледу на идеално и анти идеално решења (у дводимензионалном простору)

Метода TOPSIS подразумева генерисање следеће матрице одлучивања која садржи m алтернатива у односу на n атрибута (или критеријума):

$$D = \begin{matrix} & X_1 & X_2 & \dots & X_j & \dots & X_n \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_i \\ \vdots \\ A_m \end{matrix} & \left[\begin{array}{cccccc} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1j} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2j} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{ij} & \dots & x_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m1} & \dots & x_{mj} & \dots & x_{mn} \end{array} \right. & \end{matrix} \quad \begin{matrix} (3.1 \\ 1) \end{matrix}$$

где је:

A_i – i -та алтернатива,

x_{ij} – нумеричка вредност i -те алтернативе у односу на j -ти критеријум.

Матрица D назива се још и „пејоф“ (енг. payoff), „рејтинг“ или „матрица перформансе“.

Претпоставља се да сваки атрибут у матрици одлучивања узима или монотонно растућу или монотонно опадајућу вредност. Другим речима, што је вредност атрибута већа, биће веће и „користи“, односно мањи „трошкови“. Даље, свака вредност која није представљена у нумеричком облику требало би да се квантификује помоћу одговарајуће скале. Имајући у виду претпоставку да не могу сви критеријуми имати подједнаку важност, доносилац одлуке успоставља одређене тежине за критеријуме.

3.2.4 Метода SAW

Метода SAW спада у најпознатије и најчешће коришћене методе по питању проблематике вишекритеријумског одлучивања. Код примене дате методе потребно је препознавање тежинских вредности неких од критеријума. Онај који доноси одлуку креира нумеричку скалу за вредности критеријума и сваком критеријуму припаја тежинске вредности и оне прелазе у коефицијенте променљивих. Онда доносилац одлуке може прорачунати збирни резултат сваке варијанте множењем вредности рејтинга за сваки критеријум са фактором тежине критеријума и сабирањем њихових производа код свих критеријуме. Када се укупне вредности сваке варијанте израчунају, она са највећим коначним збиром има предност у односу на остале варијанте.

Пре него што се ова метода примени треба урадити нормализацију вредности које неке од алтернатива носи по појединим критеријумима (вредности из основне матрице D):

$$D = \begin{matrix} & X_1 & X_2 & \dots & X_j & X_n \\ A_1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1j} & x_{1n} \\ A_2 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2j} & x_{2n} \\ A_i & x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{ij} & x_{in} \\ A_m & x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mj} & x_{mn} \end{matrix} \rightarrow R = \begin{matrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1j} & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2j} & r_{2n} \\ r_{i1} & r_{i2} & \dots & r_{ij} & r_{in} \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mj} & r_{mn} \end{matrix} \quad (3.1)$$

Елементи без димензије r_{ij} нормализоване матрице R се могу добити на

следећи начин:

- код критеријума „корист“ следећом релацијом:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_j^*} ; \quad x_j^* = \max_i x_{ij} \quad (3.13)$$

- код критеријума „трошкови“ следећом релацијом:

$$r_{ij} = \frac{x_j^*}{x_{ij}} ; \quad x_j^* = \min_j x_{ij} \quad (3.14)$$

Математички израз методе SAW се приказује:

Уколико онај који доноси одлуку припоји атрибутима сет фактора тежине $W = (W_1, W_2, \dots, W_n)$, најповољнија алтернатива A се изабирају:

$$A' = \left(A_i \mid \max_i \frac{\sum_{j=1}^n w_j x_{ij}}{\sum_{j=1}^n w_j} \right) \quad (3.15)$$

Те се x_{ij} односи на i -ту алтернативу и j -ти атрибут код нумерички употребиве скале. Збир фактора је:

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1 \quad (3.16)$$

3.2.5 Метода АНР

Метода АНР је софтвер који се може користити при анализи одлучивања, направљен да обезбеди асистенцију ономе који доноси одлуку код решавања комплексних задатака вредновања код којих могу учествовати многобројни доносиоци одлука и када постоје бројнији критеријуми.

Код организације варијанти наспрам вишеструких критеријума и приликом успостављања одговарајуће хијерархије, метода АНР може обезбедити решавање проблема вишекритеријумског вредновања са великом ефикасношћу. Она помаже у избегавање честих замки и грешака код процеса одлучивања нпр.: недостатак базирања на битне делове, мане при планирању и проматрању питања повезаних за учествовање различитих интересних страна на пројекту, итд. Умањење лоших последица поменутих ситуација је од великог значаја јер су често у кохезији са расходима реализације пројектних задатака и могу онемогућити одабир

најповољнијег решења (Николић, 1996).

Можемо издвојити четири корака код методе АНР (Николић, 1996):

1. Структурисање проблематике - обухвата се декомпоновање ког год комплексног задатака одлучивања у низу хијерархија, при чему сваки део заступа неки број критеријума. Затим се разлажу у следећи комплет елемената који припада наредном степену, итд. Задњи степен је резервисан за варијанте;
2. Скупљање и анализа чињеница– Онај који доноси одлуке припаја релативне оцене паровима критеријума одређеног хијерархијског степена и тако за све степене комплетне хијерархије. Па се употребљава чувена и нашироко употребљавана Сатијева скала од девет оцењивачких вредности;
3. Утврђивање релативне тежине критеријума – код матрице компарације парова може се превести у задатак одређивања сопствених вредности, да би се добили нормализовани и јединствени сопствени вектори тежина код свих критеријума и код сваког нивоа хијерархије - A_1, A_2, \dots, A_p са вектором тежина $t - (t_1, t_2, \dots, t_n)$;
4. Утврђивање решења задатих задатака - значи проналажење такозваног композитног нормализованог вектора. Након одређивања редоследа вектора активности критеријума у моделу у следећем кругу треба дефинисати редослед важности за варијанте модела код сваког разматраног критеријума. На послетку се укупна синтеза проблема може извести на наредни начин: учествовање сваке од варијанти се мултипликује са тежинским фактором разматраног критеријума и затим се ове вредности сабирају за сваку варијанту засебно. Резултат који се добија је тежина посматране варијанте у том моделу. Исто тако резултат се дефинише и код свих наредних варијанти, након тога може доћи до финалног поретка варијанти по којем је могуће извршити избор најповољније.

3.2.6 Метода ELECTRE

Метода ELECTRE се са великим успехом имплементира у разним областима науке. Користи се неколико варијанти поменуте методе и разлике су у детаљима. Метода ELECTRE се користи концептом заснованим елиминацијом неких варијантних решења разматрајући значај појединих критеријума и њихових веза. Метода ELECTRE делимично рангира варијанте, односно нуди могућност елиминације само једне евентуално две варијанте, све остале варијанте остају доминантне. Методу сачињавају компаративне анализе варијанти а неки тежински фактори показују да постоји контрадикторност доминантних веза међу варијантама. Она такође испитује и ниво сагласности и ниво несагласности датих варијанти. Ова метода се заправо и базира на нивоима сагласности и несагласности, те се још и назива анализа сагласности (Хванг и Јоон, 1981).

3.2.7 Груби скупови

Груби скупови представљају најновији математички приступ дефинисању и анализи непрецизности, неодређености и неизвесности. Теорија грубих скупова је погодан алат за системе подршке у одлучивању, нарочито када су у процес одлучивања укључени неодређени појмови и неизвесни подаци (Ћировић и Пламенац, 2005).

Теорија грубих скупова може се генерално посматрати као део “Soft Computing-а “ и као једна од пет кључних “не традиционалних области вештачке интелигенције“ (табела 3.1) (Мунаката, 1998).

Табела 3.1 - Позиција Грубих скупова у Soft Computing – у

Методe/Теорије	Микро, примарно нумеричке	Макро, дескриптивне и нумеричке
Дедуктивне	Теорија хаоса	Теорија fuzzy скупова
Индуктивне	Неуралне мреже, генетски алгоритми	1.1.1.1 Теорија грубих скупова

За разлику од осталих “софт” метода, чија примена захтева додатне моделе претпоставки (репрезентативност прикупљених узорака, модели вероватноће, fuzzy функција, степен веродостојности), у теорији грубих скупова се

употребљавају искључиво унутрашња знања, односно оперативни подаци и беспотребно је ослањање на моделе претпоставки (Ћировић и Пламенац, 2005).

Основни проблеми који се решавају применом теорије грубих скупова су:

- описивање објеката помоћу вредности атрибута;
- описивање зависности (пуне или делимичне) између атрибута;
- редукција атрибута;
- значење атрибута;
- генерисање правила одлучивања.

Теорија грубих и теорија расплнутих скупова представљају два различита приступа непрецизности и неодређености и не могу поправити или решити тешкоће које се јављају у класичној теорији скупова. Теорија расплнутих скупова упућује на постепеност (градуалност) (новолатински: *gradualis*: поступан, постепен) знања, што је изражено *fuzzy* припадношћу. Теорија грубих скупова упућује на грануларност (новолатински: *granulatio* - претварање у зрна) знања, што је изражено релацијом неразликовања. (Ћировић и Пламенац, 2005).

3.2.7.1 Математичка основа

Да би се математички формулисали груби скупови креће се од табела са подацима. Подразумева се коришћење појма атрибут, уместо појма критеријум јер је он знатно уопштенији (Slowinski, Zorounidis, i Dimitras, 1997).

као табела података подразумева се четворострука група података:

$S = (U, A, V, f)$, где су:

U – коначан скуп објеката;

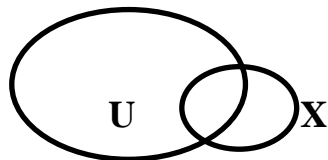
A – коначан скуп атрибута;

Уз сваки атрибут $a \in A$ придружен је скуп V_a његових вредности или процене. Сваки атрибут a одерђују функцију $f_a : U \rightarrow V_a$. Уз сваки подскуп атрибута B од A , придружује се релација неразликовања I на U , означена као, $I(B)$ и према томе дефинисана као:

$$I(B) = \{(x,y) \in U \times U : f_a(x) = f_a(y), \forall a \in B\} \quad (3.17)$$

Сада ће се математички изразити неразликовање и апроксимације у грубим

скуповима. Када је U коначан скуп субјеката – универзум и када постоји X такво да је $X \subseteq U$, при чему $x \in X$ – слика 3.6. Уводи се бинарна релација B на U , тј., релација неразликовања. Нека је B подскуп од A .



Слика 3.6.
Извор: (Ћировић и Пламенац, 2005)

Дефинишу се наредне операције на скуповима:

$B\Phi(X)$ – доња апроксимација од X дефинисана је:

$$B\Phi(X) = \{ x \in U: B(x) \subseteq U \} \quad (3.18)$$

$B^*(X)$ – горња апроксимација од X :

$$B^*(X) = \{ x \in U: B(x) \cap X \neq \emptyset \} \quad (3.19)$$

Гранично подручје X је скуп

$$BN_B(X) = B^*(X) - B\Phi(X) \quad (3.20)$$

Уколико је гранично подручје X празан скуп:

$$BN_B(X) = \emptyset \quad (3.21)$$

скуп X је оштар (јасан, тачан) у односу на B , а у супротном случају:

$$BN_B(X) \neq \emptyset \quad (3.22)$$

скуп X је груб (нејасан, нетачан) у односу на B .

Из саме дефиниције апроксимација се види да су оне изражене у условима (појмовима) гранула знања. Нижа апроксимација скупа је унија свих гранула у потпуности садржаних у скупу. Виша апроксимација је унија свих гранула које

сачињавају не - празан пресек са скупом. Гранични опсег скупа је разлика између више и ниже апроксимације.

3.2.7.2 Груба припадност

Функција грубе припадности означава припадност елемента у односу на појам грубог скупа, и дефинише се коришћењем бинарне релације неразликовања В:

$$\mu_X^B(x) = \frac{|X \cap B(x)|}{|B(X)|}, \text{ при чему } 0 \leq \mu_X^B(x) \leq 1 \quad (3.23)$$

Вредност функције припадности $\mu_X(x)$ може се у неким случајевима тумачити и као условна вероватноћа, и схваћена као степен извесности којим x припада X (или $1 - \mu_X(x)$, као степен неизвесности). Може се приметити да је вредност функције грубе припадности срачуната из расположивих података, односно да није претпостављена, као на пример у случају fuzzy функције припадности (Pawlak, 1997).

Доња и горња апроксимација и гранично подручје скупа могу се формулисати преко функције грубе припадности:

$$B\Phi(X) = \{ x \in U: \mu_X^B(x) = 1 \} \quad (3.24)$$

$$B^*(X) = \{ x \in U: \mu_X^B(x) > 0 \} \quad (3.25)$$

$$BN_B(X) = \{ x \in U: 0 < \mu_X^B(x) < 1 \} \quad (3.26)$$

Из претходних дефиниција се може видети да у теорији грубих скупова постоји стриктна веза између неодређености (vagueness) и неизвесности (uncertainty). Неодређеност се односи на скупове, а неизвесност се односи на елементе скупова. У том смислу апроксимације се користе за неодређене појмове, а груба припадност за неизвесне податке.

Груба припадност је генерализација fuzzy припадности. Поред тога, функција грубе припадности, супротно од функције fuzzy припадности, има пробабилистички карактер.

3.2.7.3 Зависност атрибута

Следеће важно питање у анализи података је откривање зависности између атрибута. Формално, зависност се може дефинисати на следећи начин: Нека су D и C подскупови A . Подразумева се да D потпуно зависи од C ако и само ако $I(C) \subseteq I(D)$. То значи да је партиција генерисана из C “финија” од партиције генерисане из D .

Такође, потребно је формулисати још уопштенији концепт зависности атрибута, који се зове парцијална зависност. То се може дефинисати на следећи начин: Нека су D и C подскупови од A . Подразумева се да D зависи од степена k , $0 \leq k \leq 1$, од C , што је означено као $C \Rightarrow_k D$, ако је $k = \gamma(C,D)$.

Ако је $k = 1$ онда D зависи потпуно од C , и ако је $k < 1$ онда D зависи делимично (у степену k) од C ,

Коефицијент k изражава однос свих елемената универзума, који могу бити исправно класификовани по групама (блоковима) партиције U/D , уз употребу C .

Концепт зависности атрибута је стриктно повезан са конзистенцијом табеле одлучивања.

Ако D зависи у степену k , $0 \leq k \leq 1$, од C онда је:

$$\gamma(C,D) = \frac{|POS_C(D)|}{|U|}, \quad (3.27)$$

где је

$$POS_C(D) = \bigcup_{X \in U/I(D)} C\Phi(X) \quad (3.28)$$

Израз $POS_C(D)$, који се зове позитивни регион партиције U/D у односу на C , представља скуп свих елемената U који могу бити јединствено класификовани по групама (блоковима) партиција U/D са значењем у односу на C . Другим речима, D је потпуно (парцијално) зависна од C , ако ма који од елемента универзума U може бити јединствен класификован по групама партиција U/D , уз употребу C (Pawlak, 1997).

3.2.7.4 Редукција атрибута

Редукција је скуп атрибута који омогућава партицију. То значи да је редукција минимални подскуп атрибута, која обезбеђује истоветну класификацију елемената Универзума, као цео скуп атрибута. Другим речима, атрибути који не припадају редукцији су сувишни, с обзиром на елементе Универзума (Pawlak, 1997).

Редукција има неколико важних особина, од којих су најважније:

Прво, дефинише се појам језгра (енглески core) атрибута. Нека је B подскуп A . Језгро B је скуп свих неопходних атрибута из B . Веома важна особина је веза између појмова језгро и редукција:

$$\text{CORE}(B) = \bigcap \text{Red}(B), \quad (3.29)$$

где је $\text{Red}(B)$ скуп свих редукција у B .

Из разлога што је језгро пресек свих редукција, оно је укључено у сваку редукцију, односно сваки елемент језгра припада неком редуктору.

Прорачун свих редукција из табела података је изузетно сложен и комплексан. Ипак, у многим примерима није потребно прорачунати све редукције, односно пронаћи све редукторе, већ само неке од њих који задовољавају специфичне захтеве, што представља знатно једноставнији задатак.

3.2.7.5 Матрица и функција разликовања

У циљу лакшег израчунавања (изналажења) редукција и језгра користи се матрица разликовања (дисцернибилитет матрикс) (Skowron и Rauszer, 1992). Матрица разликовања система података S (означена као $M(S)$) је симетрична матрица $n \times n$ са записима c_{ij} , који су дати следећим изразом:

$$(c_{ij})_{n \times n} = \{a \in A \mid a(x_i) \neq a(x_j)\} \text{ за } i, j = 1, \dots, n \quad (3.30)$$

Запис матрице c_{ij} је скуп свих атрибута који разликују објекте x_i и x_j . Матрица разликовања $M(S)$ придружује сваком пару објеката x и y подскуп атрибута $\delta(x, y) \subseteq B$, са следећим особинама:

$$\delta(x, x) = \emptyset \quad (3.31)$$

$$\delta(x, y) = \delta(y, x) \quad (3.32)$$

$$\delta(x, z) \subseteq \delta(x, y) \cup \delta(y, z) \quad (3.33)$$

Наведене особине су сличне особинама дистанци у метричком простору и,

према томе, функција δ се може посматрати као квалитативна матрица (qualitative matrix), а $\delta(x,y)$ квалитативна дистанца (qualitative distance). Тако, матрица разликовања се може посматрати као квалитативна матрица.

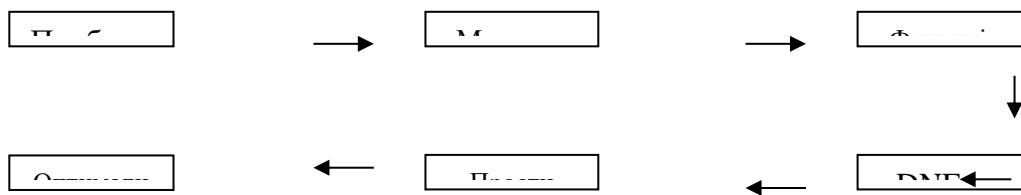
Свака матрица разликовања $M(S)$ одређује јединствену функцију разликовања f_S . Функција разликовања, за систем података S , је Bool – ова функција, која садржи m Bool - ових променљивих a_1^*, \dots, a_m^* (одговарају атрибутима a_1, \dots, a_m), је дефинисана као:

$$f_S(a_1^*, \dots, a_m^*) = \bigwedge \{ \bigvee c_{ij}^* \mid 1 \leq j \leq i \leq n; c_{ij} \neq \emptyset \} \quad (3.34)$$

где је: $c_{ij}^* = \{ a^* \mid a \in c_{ij} \}.$ (3.35)

Функција разликовања представља концизан начин обележавања, који описује како се сваки објекат из система података разликује од других.

Поступак од одређивања матрице разликовања до проналажења оптималних (минималних) редукција приказан је шематски на слици 3.7.



Слика 3.7 - Поступак проналажења оптималних редукција
Извор: (Ћировић и Пламенац, 2005)

3.2.7.6 Правила одлучивања

У табели 2, која представља једну типичну табелу података, приказани су подаци о n разматраних случајева. Табеле података у којима се разликују две класе атрибута (атрибути услова и атрибути одлуке) представљају, у том случају, табеле одлука. Редови у табели обележени су објектима. Ови објекти су представљени правилима одлучивања $\delta(x)$, која су приказана у n редова. Колоне у табели обележене су атрибутима, и то атрибутима услова Au_j ($j = 1, \dots, m$) и атрибутом одлуке Ao . Записи у табели су вредности атрибута, и то au_{ij} ($i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m$) за атрибуте услова и ao_i ($i = 1, \dots, n$) за атрибут одлуке. Овако се сваки ред може посматрати као информација о поједином случају. На овај начин табела одлучивања представља збир правила одлучивања, односно алгоритам

одлучивања који се састоји од правила одлучивања у облику "IF...THEN..." (Skowron и Rauszer, 1992). На пример, ред i се може преко алгоритма одлучивања представити на следећи начин, односно објекат i у табели карактерише следећи скуп атрибута-вредности:

$$IF (Au_1, au_{i1}) \& \dots \& (Au_j, au_{ij}) \& \dots \& (Au_m, au_{im}) \Rightarrow THEN (Ao, ao_i)$$

Табела 3.2 - Карактеристична табела података и одлучивања

$\delta(x)$	Au_1	.....	Au_j	.....	Au_m	Ao_i
$\delta(1)$	au_{11}	.....	au_{1j}	.....	au_{1m}	ao_1
.....
$\delta(i)$	au_{i1}	.....	au_{ij}	.....	au_{im}	ao_i
.....
$\delta(n)$	au_{n1}	.....	au_{nj}	.....	au_{nm}	ao_n

Атрибути услова представљају мерљиве особине објеката, док су атрибути одлуке резултат а постериори класификације (Magnani, 2003). Неопходно је и уочити разлику између табела одлучивања и алгоритма одлучивања. Табела одлучивања је колекција података, док је алгоритам одлучивања колекција импликација, у овом случају, логичких израза. Да би се са подацима владало и поступало генерално се користе различите математичке методе, на пример статистика, али да би се анализирале импликације морају се користити средства логике.

3.3. Место и улога вредновања у процесу пројектовања

Процес креирања пројектних решења представља осмишљавање реалних решења и темељи се на балансирању постављених циљева са једне и ограничења са друге стране. Ово балансирање реализује се кроз одговарајућа пројектна решења на одговарајућим подлогама које су ослоњене на општи ниво сазнања из више научних дисциплина, интуицију и креативне способности стручног тима.

Појам вредновање пројектних решења подразумева процедуру оцењивања и одлучивања рачунајући и поступке дефинисања показатеља и критеријума релевантних за оцењивање и одлучивање у систему осмишљавања оптималног развоја и коришћења. Вредновање се спроводи након и у току сваке фазе

пројектовања - од креирања основних идеја па до Главног и Извођачког пројекта. Пројектовање представља итеративни процес оптимизације решења по низу критеријума који, у својој завршној фази, доводи до најповољнијег решења.

На тај начин, вредновање је интегрисано у процес пројектовања варијантних решења, јер су им суштински задаци, циљеви и значење исти.

У ранијој пракси на овим просторима било је заступљено схватање да се вредновање у процесу планирања и пројектовања посматра изоловано у оквиру појединих струка, пре свих у грађевинској и економској, као и да се вредновање спроводи на крају процеса планирања и пројектовања и то само у случајевима када постоје формално-правне обавезе. На тај начин, вредновању се додељивала пасивна улога, а у екстремним случајевима и негативно активна улога - да оправда технички и економски лоша решења злоупотребом струке.

Да би вредновање довело до оптималних решења, мора се заснивати на четири основне врсте вредновања:

- функционалном вредновању;
- еколошком вредновању;
- економском вредновању и
- инвестиционом вредновању.

Када се ради о мањим интервенцијама (побољшано одржавање, рехабилитација и мање реконструкције) веома поуздане одговоре о оправданости и исправности појединих решења дају анализе трошкова и користи (Cost-Benefit analiza) и трошкови-ефекти (Cost-Effectiveness analiza) у Предвизибилити и Визибилити студијама. Разлог томе су занемарљиво мали посредни ефекти који се јављају као последица интервенција ове врсте.

Када се ради о новоградњи или значајним реконструкцијама јављају се не само посредни ефекти које је веома тешко аналитички обрадити и трансформисати на заједнички именоване (новчану јединицу), већ и циљеви и критеријуми субјективне природе везани како за доносиоца одлуке, тако и за комплетно окружење. Главни недостатак Cost-Benefit анализе у оваквим случајевима представља и склоност ка агрегирањем вредности критеријума (они су веома често конфликтни и изражени у друкчијим мерним јединицама) при чему се губе међусобне зависности различитих ефеката. У оваквим ситуацијама

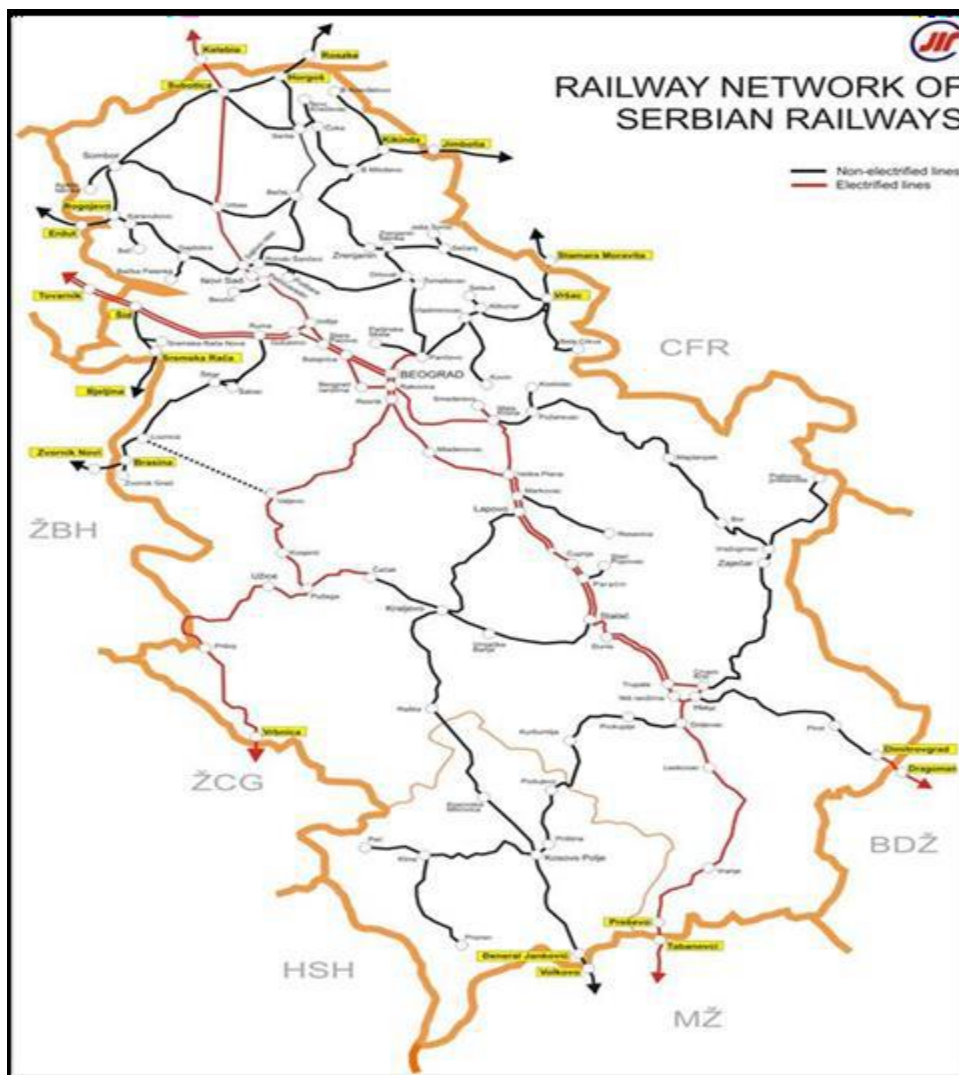
намеће се примена неких од метода вишекритеријумског вредновања. Циљ примене вишекритеријумског вредновања не би требао да буде да се одлучивање претвори у механички посао при чему би нам различити алгоритми бирали најповољнија решења. Стога је неопходно присуство што јаснијег увида у услове који владају у одређеним фазама одлучивања (Davis, Ivan i Campbell, 1996).

4. СТУДИЈА СЛУЧАЈА - ПРИКАЗ И ОБРАДА ПРИКУПЉЕНИХ ПОДАТАКА

4.1. Уводне напомене

Железничка мрежа Србије састоји се од магистралних, регионалних и локалних пруга које чине део пан-европских коридора, линија од међународног значаја које повезују Србију са суседним земљама. Кичма железничке мреже у Републици Србији је Коридор X (Салзбург-Љубљана-Загреб-) Шид- Београд-Ниш-Прешево (-Скопље-Велес-Солун) са крацима преко Суботице према граници са Мађарском и Димитровграда према Бугарској граници. Укупна дужина коридора је 872 км.

Основни циљ железничког транспортног система Србије у склопу кога је и Паневропски железнички Коридор X, је да буде много квалитетнији у контакту са актуелним потребама савременог тржишта превоза. Само ако се ово постигне број превезених путника и интензитет теретног саобраћаја вратиће нивое који су некада били знатно већи од данашњих.



Слика 4.1 Железничка мрежа Србије

Испуњење циља укључује завршетак, модернизацију и одрживи развој железничке пруге на деоници Сталаћ – Ђунис са задатком да се постојећа једноколосечна пруга унапреди у двокколосечну са карактеристикама трасе која обезбеђује брзину до 160 км/х уз омогућавање UIC-C слободног профила и имплементацију ERTMS-а.



Слика 4.2 Деоница Сталаћ-Ђунис на Коридору X

Положај трасе новопроектоване двоколосечне пруге у односу на морфолошке одлике терена, захтева израду одређеног броја и типова потпорних конструкција. Потпорни зидови су конструкције које служе да задрже тло у ситуацијама када је стабилност тла немогуће постићи самим нагибом тла. Обично се такве ситуације дешавају приликом изградње путева када се праве усеци и када је потребно обезбедити стабилност тла које је засечено. Задатак потпорног зида је да се супростави бочним притисцима тла и спрече лом или ерозију тла.

На овој траси предложена су решења потпорних конструкција за 4 деонице и то:

- I деоница од km 177+125.60 до km 177+234.60
- II деоница од km 178+774.11 до km 178+895.00
- III деоница од km 182+220.00 до km 182+327.40
- IV деоница од km 190+440.00 до km 191+200.00

За сваку деоницу разматрано је више варијантних решења.

4.2. Предлог потпорних конструкција за санацију клизишта

Приказана су варијантна решења потпорних зидова за потребе санације клизишта на III деоници од km 182+220.00 до km 182+327.40 у оквиру Генералног пројекта “Реконструкција и модернизација постојећег железничког колосека и изградња другог колосека пруге Београд - Ниш, деоница Сталаћ-Ђунис”.

Осовина пруге је на овом делу трасе постављена на стрму природну косину блиско локалном путу који је на око 15м испод колосека одакле је проистекла потреба за формирањем потпорне конструкције којом би се држао горњи строј двоколосечне железничке пруге. Непосредно пре потпорне конструкције налази се мост дужине 34,0м (од км 182+217.18 до км 182+183.18) након чега се наставља тунел број 4 (стационажа 182+325.00).

Због близине и висинске разлике између пројектоване пруге и локалног пута Сталаћ-Ђунис, труп пруге није могао бити пројектован са косинама са стандардним нагибом. Терен је на овој деоници сачињен од гнајсева и мигматита са дебљином површинске зоне распадања 1м - 6м и добре је носивости.

Предложена су четири варијантна решења потпорних зидова:

- I Варијантно решење - гравитациони армирано-бетонски зид;
- II Варијантно решење - армирано тло са габионима;
- III Варијантно решење - армирано тло са лицем од префабрикованих бетонских елемената;
- IV Варијантно решење - шипови са наглавном гредом.

Извршене су контроле стабилности, димензионисања и геостатички прорачуни као и прорачун стабилности са проценом величине и времена консолидационог слегања високог насипа у алувиону Јужне Мораве. Прорачуни су извршени софтверским пакетима GEO5 – Cantilever Wall, GEO5 – MSE Wall, Rocscience-Phase i Rocscience Slide 6.0v.

Саобраћајно оптерећење са двоколосечне железничке пруге третирано је на основу „Правилника о техничким нормативима за одређивање величине оптерећења и категоризацију железничких мостова, пропуста и осталих објеката на железничким пругама“. Разматране су шеме оптерећења UIC 71 i SW/2.

Реализација (изградња и експлоатација) сваке од анализираних варијанти има за последицу низ директних и индиректних позитивних и негативних ефеката. Сврха примене вишекритеријумске анализе је да се најзначајнији ефекти идентификују за сваку од варијанти, употребе као критеријуми вредновања са циљем минимизирања негативних и максимизирања позитивних ефеката, и на основу резултата примене изабраног метода изврши рангирање варијанти и предложи најприхватљивија варијанта потпорног зида.

4.2.1 I Варијанта – Гравитациони Армирано-бетонски зид

Гравитациони потпорни зидови се само сопственом тежином одупиру бочним притисцима тла. Због овога они морају бити већих димензија како би имали довољно велику тежину која ће омогућити да не дође до клизања, претурања или лома потпорног зида. Армирано-бетонски потпорни зид се састоји од конзолне плоче које је укљештена у темељну плочу. Правилним одабиром димензија и количине арматуре се постиже оптималан потпорни зид који обезбеђује стабилност тла

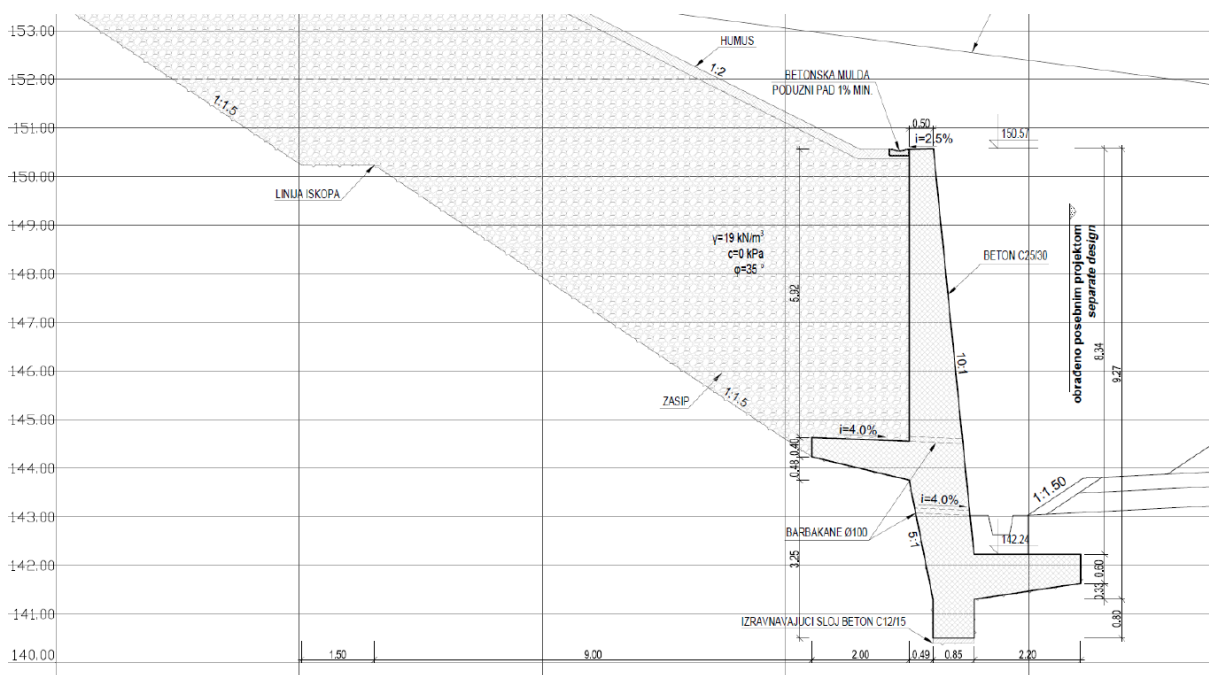
Армиранобетонски гравитациони зид је пројектован са растеретном конзолом, зубом и чеоном темељном плочом. Предвиђена је класа бетона Ц25/30 и арматура Б500Б са границом развлачења 500МПа. Због ниских вредности угла унутрашњег трења на контакту темељне стопе и темељног тла, пројектован је „зуб“ чиме се постиже ангажовање веће запремине тла на пружању пасивног отпора и обезбеђење захтеване стабилности на клизање. Растеретна конзола са належућим засипом и чеона темељна плоча обезбеђују стабилност зида у погледу превртања.

Укупна дужина конструкције је 108.0м и састоји се од 18 кампада дужине 6.0м са дилатационим разделницама на сваких 18м. Висина зида је константна и износи 10.05м укључујући и „зуб“, осим на почетку деонице где износи 7.90м. У подужном правцу, због малог нагиба нивелете (0.48%), темељна стопа прати њен

нагиб док је круна зида обликована сходно морфологији терена, конструктивним и естетским захтевима. Лице зида је у нагибу 10:1 а задња страна са вертикалним горњим делом и доњим у нагибу 5:1. За одводњавање атмосферских вода са платоа иза зида, предвиђена је бетонска ригола са минималним подужним падом од 1%.

Ради спречавања формирања допунског хидростатичког притиска на зид од евентуалних подземних вода, на свакој кампади је предвиђено укупно 6 барбакана пречника 100мм (у 2 нивоа по 3 барбакане на хоризонталном осном растојању од 2.0м). Први ред барбакана је у нивоу растеретне конзоле а други у нивоу одводног канала.

Нагиби ископа су такви да омогућавају извођење ископа на целој деоници одједном. Косине ископа су пројектоване као привремене конструкције са фактором сигурности $\Phi_c=1.15$ при чему је дозвољено корисно оптерећење од механизације на круни ископа 10кН/м^2 . На деловима на којима висина ископа прелази 8м предвиђене су берме ширине 1.5м на половини укупне висине ископа. Свакако у наредним нивоима пројектовања треба размотрити кампадно извођење (разрада сваке треће кампаде) чиме би се нагиб ископа устрмио и постигла извесна уштеда.



Слика 4.3. – Типичан попречни пресек гравитационог АБ зида

Анализа стабилности косине ископа и глобалне стабилности изведене конструкције извршена је разматрањем граничне равнотеже методом ламела, по уопштеном поступку Morgenstern – Price. Прорачун је извршен за ефективне напоне ($f=22^\circ$ и $c=13\text{kPa}$) у програмском пакету Rocscience Slide 6.0v.

У анализи стабилности и статичкој анализи разматрана су следећа три случаја оптерећења:

Основно оптерећење - фаза експлоатације са корисним оптерећењем од 10kN/m^2 иза зида.

Изузетно оптерећење З1 - дејство земљотреса З1.

Изузетно оптерећење З2 - дејство земљотреса З2.

За прорачун стабилности АБ зида коришћен је програмски пакет GEO5 – Cantilever Wall. Усвојени параметри за прорачун стабилности на клизање су $f=30^\circ$ и $c=0$. У следећој табели 4.1. дати су фактори сигурности против превртања, клизања и напони у тлу за разматране случајеве оптерећења:

Табела 4.1. – Фактори сигурности против превртања

	Одновно оптерећење	Земљотрес З ₁	Земљотрес З ₂
F _o	2,42	1,46	1,06
F _{sl}	10,00	11,45	1,91
σ (kN/m ²)	243,53	338,11	2151,56

Контролом глобалне стабилности у програмском пакету Slide 6.0 добијени су следећи фактори сигурности дати у табели 4.2.:

Табела 4.2. – Контрола глобалне стабилности у пакету Slide 6.0

	Одновно оптерећење	Земљотрес З ₁	Земљотрес З ₂
F _s	1,50	1,32	1,21

Носивост темељног тла је рачуната према Анексу Д Еврокода 7 и прорачунском приступу ДА2 где је показано да су напони у деградираном гнајсу за меродавне комбинације оптерећења мањи од дозвољених. Резултати су приказани у следећој табели 4.3.:

Табела 4.3. – Резултати напона у тлу

Прорачунски приступ	Напон у тлу (kN/m ²)	Допуштени напон у тлу (kN/m ²)
ДА2а	305,59	655,81
ДА2б	264,82	753,87

На основу ових резултата закључује се да Армирано бетонски Зид 2 задовољава у погледу локалне и глобалне стабилности као и у погледу носивости темељног тла.

4.2.2 II Варијанта – Армирано тло са габионима

Габионски потпорни зидови се састоје од жичаних корпи које су испуњене ломљеним каменом. Оваква врста потпорних зидова је све популарније због своје једноставности, брзине изградње и естетике. Габионски зидови могу трпети велике деформације, а обављају своју функцију чак и након деформисања.

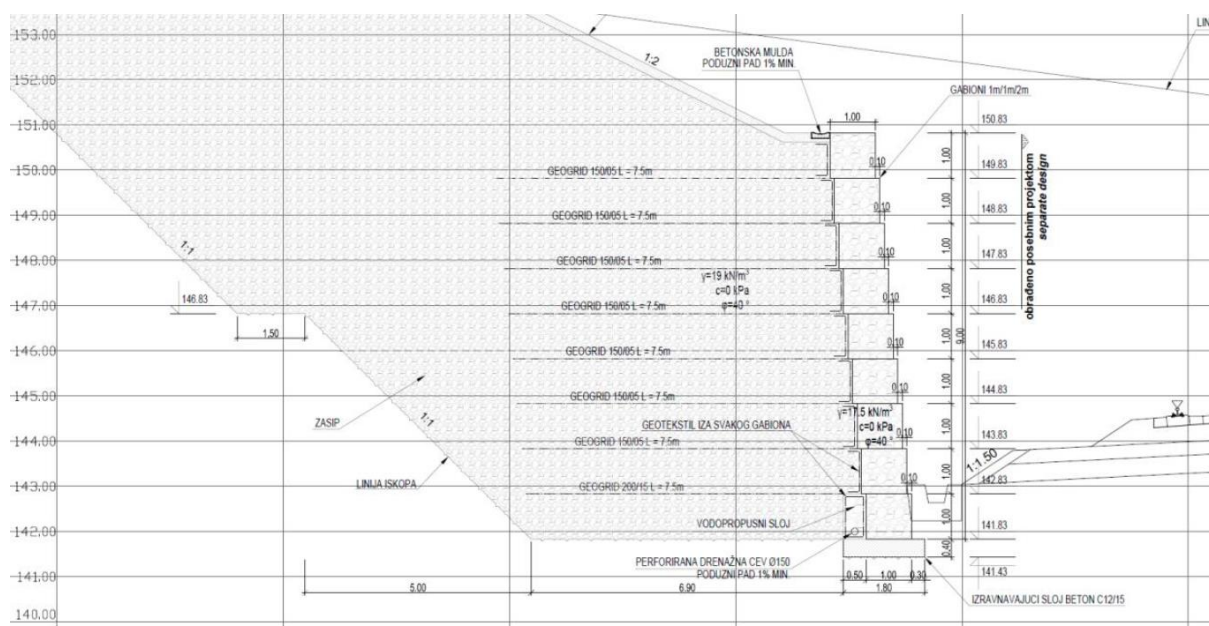
Армирано тло са габионским зидом је пројектовано од габиона са наличјем израђеним од хексагоналне двоструко увијене жице. Димензије габионских блокова су 1м*1м*2м односно 1м*1м*1м. Габиони се преклапају са геомрежама на дужини од 3м чиме се формира смичући спој између габиона и геомрежа способан да прихвати силе затезања. Геомреже у првом (најнижем) реду су са затезном чврстоћом 200kN, а све остале 150kN. Габиони су постављени у смакнутом распореду (гледано по висини, сваки следећи је увучен за 10цм према засипу). Материјал засипа је некохерентан и збија се у слојевима максималне дебљине 50цм до постизања 95% збијености по Proktoгу. Први (најнижи) ред габиона се поставља на хоризонтални слој неармираног бетона класе Ц12/15 димензија у пресеку 180цм*40цм.

Укупна дужина конструкције је 108.0м. Габионски зид је сачињен од 539 габиона дужине 2м и 7 габиона дужине 1м. Висина габионског зида је константна и износи 10.05м. У подужном правцу, слој подножног бетона је хоризонталан чиме је омогућено једноставније постављање габиона и геомрежа. Круна габионског зида обликована је сходно морфологији терена, конструктивним и естетским захтевима. Лице габионског зида је у нагибу 10:1 као и његова задња страна. За одводњавање атмосферских вода са платоа иза потпорне конструкције,

предвиђена је бетонска ригола са минималним подужним падом од 1%.

Материјал габионске испуне је стенског порекла величине 100-200мм. Ради спречавања испирања материјала засипа кроз габионе, на контакту засипа и габиона планирано је постављање заштитног геотекстила. Евакуација подземних вода из залеђа конструкције планирана је преко перфориране дренажне цеви пречника 150мм са минималним подужним падом од 1%. Дренажне цеви се постављају у тампонски слој шљунка димензија 0.50мх1.0м.

Нагиби ископа су такви да омогућавају извођење ископа на целој деоници одједном. Косине ископа су пројектоване као привремене конструкције са фактором сигурности $F_s=1.15$ при чему је дозвољено корисно оптерећење од механизације на круни ископа 10kN/m^2 . До висине од 8.0м ископи су без берме. За веће висине ископа предвиђена је берма ширине 1.50м на половини укупне висине ископа. Ископ је веће ширине у односу на варијанту А због простора потребног за постављање геомрежа (приближно 70% висине конструкције).



Слика 4.4 – Типичан попречни пресек армираног тла са габионским лицем

Анализа стабилности косине ископа и глобалне стабилности изведене конструкције извршена је разматрањем граничне равнотеже методом ламела, по уопштеном поступку Morgenstern – Price. Прорачун је извршен за ефективне напоне у програмском пакету Rocscience Slide 6.0v.

У анализи стабилности и статичкој анализи разматрана су следећа три

случаја оптерећења:

1. Основно оптерећење - фаза експлоатације са корисним оптерећењем од 10kN/m² иза зида.

2. Изузетно оптерећење 31 - дејство земљотреса 31.

3. Изузетно оптерећење 32 - дејство земљотреса 32.

За прорачун стабилности коришћен је програмски пакет GEO5 – MSE Wall. У следећој табели 4.4. дати су фактори сигурности против превртања, клизања и напони у тлу за разматране случајеве оптерећења:

Табела 4.4. – Фактори сигурности против превртања

	Одновно оптерећење	Земљотрес 3 ₁	Земљотрес 3 ₂
F _o	2,42	1,46	1,06
F _{sl}	10,00	11,45	1,91
σ (kN/m ²)	243,53	338,11	2151,56

Контролом глобалне стабилности у програмском пакету Slide 6.0 добијени су следећи фактори сигурности у табели 4.5.:

Табела 4.5. – Контрола глобалне стабилности у пакету Slide 6.0

	Одновно оптерећење	Земљотрес 3 ₁	Земљотрес 3 ₂
F _s	1,34	1,18	1,08

Носивост темељног тла је рачуната према Анексу Д Еврокода 7 и прорачунском приступу ДА2 где је показано да су напони у деградираном гнајсу за меродавне комбинације оптерећења мањи од дозвољених. Резултати се приказују у следећој табели 4.6.:

Табела 4.6. – Резултати напона у тлу

Прорачунски приступ	Напон у тлу (kN/m ²)	Допуштени напон у тлу (kN/m ²)
ДА2а	297,39	2217,50
ДА2б	240,57	2125,30

По основу ових резултата закључује се да Армирано тло са габионима 2 задовољава у погледу локалне и глобалне стабилности као и у погледу носивости темељног тла.

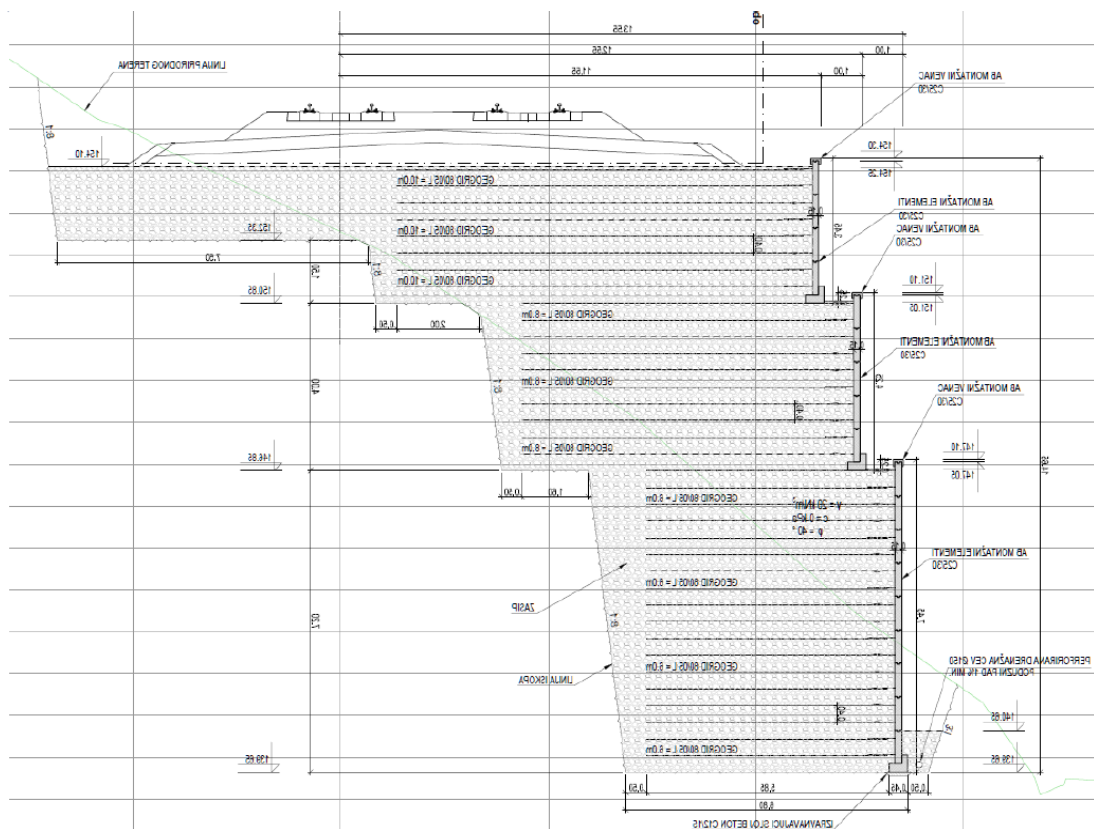
4.2.3 III Варијанта – Армирано тло са лицем од префабрикованих бетонских елемената

Потпорни зидови од армиране земље се почињу користити шездесетих година двадесетог века у Француској. Они се састоје од облоге која се најчешће састој од модуларних блокова, арматурног материјала и земљаног насипа. Данас се као арматурни материјал најчешће користе геомреже док се раније користила челична арматура. Арматурне геомреже се постављају у слојевима, а међупростор се насипа земљом. Бочни притисак који делује на облогу потпорног зида се преко арматурних геомрежа преноси до унутрашњег стабилног тла и на тај начин се обезбеђује стабилност.

Пројектована је потпорна конструкција од армираног тла са лицем од префабрикованих бетонских елемената.

Конструкција је максималне висине 10,05м и дужине 108,00м. Лице конструкције је од армирано бетонских монтажних елемената а тело од насутог и збијеног некохерентног материјала прожетог геосинтетичким једноосним мрежама на међусобном хоризонталном растојању од 0,40м. Бетонско лице је пројектовано у три етаже у смакнутом распореду (свака следећа је у односу на претходну увучена за 1,0м) ради уштеде у материјалу. АБ монтажни елементи су димензија 1,80мх0,80м и ослоњени су на АБ монтажну темељну траку. Из естетских разлога на врху зида сваке етаже предвиђен је АБ монтажни венац.

За све бетонске елементе предвиђен је бетон класе Ц25/30 и арматура Б500Б, док геомреже треба да имају декларисану затезну чврстоћу од 86 kN/m, са деформацијом при прекидној сили од мах 11,5%.



Слика 4.5 – Типичан попречни пресек армираног тла са бетонским лицем

Армирање тла је извршено геомрежама постављеним на хоризонталном растојању од 40цм. Геомреже су анкероване у префабриковане бетонске елементе лица конструкције. Постављају се на претходно збијено тло (95% по Proктору, у слојевима дебљине 40цм).

Различите су дужине, 6,0м, 8,0м и 10,0м за прву, другу и трећу етажу респективно.

Ископи су у нагибу 8:1 са бермама ширине 2,0м. Геометрија ископа је диктирана дужином геомрежа по етажама. Нагиби ископа су такви да омогућавају извођење ископа на целој деоници одједном. Косине ископа су пројектоване као привремене конструкције са фактором сигурности $F_s=1.15$ при чему је дозвољено корисно оптерећење од механизације на круни ископа 10kN/m^2 . Анализа стабилности ископа и глобална стабилност изведене конструкције извршена је разматрањем граничне равнотеже методом ламела, по уопштеном поступку Morgenstern – Price. Прорачун је извршен за ефективне напоне у програмском пакету Rocscience Slide 6.0v.

У анализи стабилности и статичкој анализи разматрана су следећа три случаја оптерећења:

- Основно оптерећење - фаза експлоатације са корисним оптерећењем од 40kN/m² у нивоу двоколосечне пруге.
- Изузетно оптерећење 31 - дејство земљотреса 31 уз присуство половине корисног оптерећења у износу од 20kN/m².
- Изузетно оптерећење 32 - дејство земљотреса 32 уз присуство половине корисног оптерећења у износу од 20kN/m².

Контролом глобалне стабилности у програмском пакету Slide 6.0 добијени су следећи фактори сигурности дати у табели 4.7.:

Табела 4.7. – Контрола глобалне стабилности у пакету Slide 6.0

	Основно оптерећење	Земљотрес 31	Земљотрес 32
F _s	1,56	1,46	1,40

Контрола деформација и статичких утицаја у конструкцији спроведена је коришћењем програмског пакета Rocscience-Phase који се заснива на методи коначних елемената.

4.2.4 IV Варијанта – Шипови са наглавном гредом

Код избора шипова треба узети у обзир све параметре. Основа за одређивање пречника шипа је пре свега захтевана носивост (осна и на савијање), изводљивост и расположива технологија. Дужину шипа по правилу диктирају геомеханички услови, пре свега дубина носећег тла, док се врх шипа одређује на основу изабране концепције, геометрије објекта, профила терена и других специфичности које диктира локација грађења. Треба тежити ка мањем броју шипова већег пречника, јер је неповољан међусобни утицај мањи, чиме је модел преузимања оптерећења јаснији и лакше је праћење тока силе, по могућности шипове треба распоредити тако да није потребна градња превеликих наглавних греда и плоча.

Ова варијанта обрађивана је само у обиму идејног решења. На том нивоу била је претпостављена потребна дужина потпорне грађевине од само 108,0 м.

Састоји се у побијању АБ шипова, пречника 125 цм на растојању од 3 м. Шипови се раде као бушени од бетона МБ30, претходним постављањем кошева од ребрасте арматуре РА400/500. Претпостављено је 36 ком. шипова дужине у просеку 22 м (10 м изнад клизног слоја + 12 испод клизног слоја)

Над њима, пројектована је везна греда димензија $b/h = 140/100$ см од бетона МБ30, М-150, и армирана ребрастом арматуром. Везна греда има функцију да повезивањем шипова уједначи притиске тла на потпорну конструкцију.

Шипови би били такве ситуационе диспозиције да би над њима, односно над везном гредом, могао да се одржи насип под природним нагибом од постојећег материјала на том месту, уз, наравно, одговарајућу обраду косина.

Лоше стране ове варијанте су неприступачност за постављање макаре и то што се на њено изнајмљивање (слободан термин) често чека и по неколико месеци. Време потребно за изградњу приступног пута урачунато је у укупно трајање извођења ове варијанте, а могуће чекање на слободан термин за ангажовање макаре процењен је на 0-4 месеца (0 у случају да успемо одмах да је обезбедимо).

4.3. Предвиђена инвестициона вредност радова

4.3.1 Гравитациони армирано-бетонски зид

Табела 4.8. – Предмер и предрачун радова за гравитациони АБ зид

р.б	ВРСТА РАДОВА	Јед. мере	Количина	Јед. Цена	Укупно РСД
1	Земљани радови	m3	6.629,50	615,00	4.077.142,50
2	Подложни бетон	m3	9,35	9.840,00	92.004,00
3	Бетон	m3	1.099,10	14.760,00	16.222.716,00
4	Арматура	Kg	65.946,00	110,70	7.300.222,20
5	Дренажни засип	m2	2.887,70	1.845,00	5.327.806,50
6	Хумузирање	m3	652,00	147,60	96.235,20
7	Накнадни и непредвиђени радови	Паушално			4.967.418,96
	СВЕГА РСД:				35.083.545,36

4.3.2 Армирано тло са габионима

Табела 4.9. – Предмер и предрачун радова за армирано тло са габионима

р.б	ВРСТА РАДОВА	Јед. мере	Количина	Јед. Цена	Укупно РСД
1	Земљани радови	m3	11.307,10	615,00	6.953.866,50
2	Подложни бетон	m3	79,20	9.840,00	779.328,00
3	Габионски кавези	kom	418,00	7.564,50	3.161.961,00
4	Габионска испуна	m3	836,00	5.535,00	4.627.260,00
5	ГЕОГРИД 200/15	m2	702,90	664,20	466.866,18
6	ГЕОГРИД 150/05	m2	4.076,60	467,40	1.905.402,84
7	Геотекстил	m2	1.379,40	123,00	169.666,20
8	Насипање са збијањем	m3	7.698,40	260,00	18.938.064,00
9	Хумузирање	m3	791,50	146,60	116.825,40
10	Накнадни и непредвиђени радови	Паушално			5.567.866,02
СВЕГА РСД:					42.687.126,14

4.3.3 Армирано тло са лицем од префабрикованих бетонских елемената

Табела 4.10. – Предмер и предрачун радова за армирано тло

р.б	ВРСТА РАДОВА	Јед. мере	Количина	Јед. Цена	Укупно РСД
1	Земљани радови	m3	6.875,90	799,5	5.497.282,05
2	Подложни бетон	m3	5,50	9.840,00	54.120,00
3	Монтажни префабриковани елементи	m3	252,00	16.605,00	4.184.460,00
4	Арматура	Kg	12.600,00	110,70	1.394.820,00
5	ГЕОГРИД 80/05	m2	28.820,00	369,00	10.634.580,00
6	Насипање са збијањем	m3	13.096,50	2.460,00	32.217.390,00
7	Дренажни засип	m3	81,90	1.845,00	151.105,50
8	Накнадни и непредвиђени радови	Паушално			8.120.063,63
СВЕГА РСД::					62.253.821,18

4.3.4 Шипови са наглавном гредом

Табела 4.11. – Предмер и предрачун радова шипова са наглавном гредом

р.б	ВРСТА РАДОВА	Јед. мере	Количина	Јед. Цена	Укупно РСД
1	Земљани радови	m ³	26.440,45	799,5	21.139.142,71
2	Подложни бетон	m ³	240,76	9.840,00	2.369.088,59
3	Арматура	Kg	213.898,35	110,70	23.678.546,94
4	ГЕОГРИД 80/05	m ²	3.846,16	369,00	1.419.232,14
5	Насипање са збијањем	m ³	2.354,58	2.460,00	5.792.257,09
6	Дренажни засип	m ³	279,58	1.845,00	515.831,13
8	Бетон	m ³	3.900,41	14.760,00	57.570.049,34
9	Хумузирање	m ³	2.406,09	147,60	355.138,94
10	Накнадни и непредвиђени радови	Паушално			16.925.823,12
СВЕГА РСД					129.765.110,00

4.3.5 Укупна инвестициона вредност радова по предложеним варијантним решењима:

Табела 4.12. – Укупна инвестициона вредност радова добијена из предмера и предрачуна варијантних решења

Гравитациони армирано-бетонски зид	35.083.545,36
Армирано тло са габионима	42.687.126,14
Армирано тло са лицем од префабрикованих бетонских елемената	62.253.821,18
Шипови са наглавном гредом	129.765.110,00

4.4. Вишекритеријумско вредновање предложених конструктивна решења потпорних зидова

4.4.1 Дефинисање циљева, критеријума и показатеља вредновања

Први и најважнији корак у процесу вредновања варијантних решења је дефинисање циљева и критеријума вредновања и њихових релативних тежина које су нумерички одраз важности циљева односно критеријума. Дефинисани су следећи циљеви:

- Максимална корист за инвеститора – сваки инвеститор тежи да у реализацији своје инвестиције утроши минимум новчаних средстава, водећи при томе рачуна о квалитету уграђених материјала и изведених

радова на терену, као и о минималном времену потребном за сам процес извођења радова. При чему се треба водити рачуна да се радови изводе са квалитетним и доступним материјалима на локалном тржишту, као и о правовременим набавкама истих;

- Минимални трошкови одржавања – у период експлоатације објекта радови на одржавању могу да изискују ангажовање додатних новчаних средстава и знатно угрозе финансијско пословање оно лице које је преузело бригу о одржавању објекта. Због тога је потребно благовремено (у одређеним временским интервалима) предвидети обилазак И стручни преглед стања у ком се објекат налази да би се на време предузеле мере на санацији са циљем да се предупредe већа оштећења која изискују застоје или прекид функционисања објекта ;
- Максимални позитивни утицај на развој подручја – потребно је конструкцију прилагодити условима средине где се гради. По могућности предност дати материјалима који се могу набавити на предметном локалитету и водити рачуна да извођење предвиђене конструкција има што мање негативних утицаја на терен на коме се изводи (деградација шумског и пољопривредног терена). Такође, треба водити рачуна о етапној изградњи како би се омогућило несметано одвијање пољопривредних активности локалног становништва;
- Минималне еколошке просторне последице - подразумевају минимизацију нежељених ефеката по животну средину условљених изградњом будуће потпорне конструкције у погледу повећања нивоа буке, аерозагађења, загађења вода и измена у режиму, загађења и деградација тла, неповољног утицаја на микроклиму, флору и фауну и нарушавања природног наслеђа.

Из набројаних циљева произилазе основни критеријуми и показатељи на којима се заснива вишекритеријумско вредновање разматраних варијантних решења. Дефинисани критеријуми приказани су табели 4.13.

Табела 4.13 – Циљеви и критеријуми вредновања

Циљеви	Критеријуми	Екстр.
максимална корист за инвеститора	укупни трошкови извођења,	мин.
	укупно време извођења,	мин.
минимални трошкови одржавања	еластичност конструкције,	макс.
	деформације конструкције,	мин.
максимални позитивни утицај на развој подручја	површинско земљиште под неповољним утицајем,	мин.
	могућност набавке материјала,	макс.
	етапности грађења,	макс.
минималне еколошке просторне последице	уклопљеност у пејзајж,	макс.
	учешће материјала са локације,	макс.
	не нарушавање природне равнотеже	мин.

Вредности критеријумских функција добијене су делом из пројектне документације (инвестициона вредност, предвиђено трајање радова, препоручени временски интервали прегледа конструкције за потребе одржавања, позајмишта материјала из пројекта организације и технологије грађења), док су остали подаци добијени на основу ранијих искустава са претходних пројеката. Основу за дефинисање критеријума циља Минималне еколошке просторне последице чине резултати пратеће студије животне средине. Тежинске коефицијенте критеријума за овај циљ није могуће одредити на основу егзактно дефинисаних података, већ се они одређују кроз оцене експерата (поступком анкетирања одређених група стручњака) и/или путем анализе претходних процена, одлука или реаговања одређених група становништва кроз које се квантификује став друштвене заједнице према наведеној проблематици.

Добијене вредности приказане су у табели 4.14.

Табела 4.14. - Вредност критеријумских функција

Критеријум		I АБ зид	II габиони	III армирано тло	IV шипови	
мин	укупни трошкови извођења	322,741.91 €	361,755.31 €	527,574.75 €	649,825.28 €	€
мин	укупно време извођења	19	19	16	17	месец
макс	еластичност конструкције	5	10	4	7	оцена
мин	деформације конструкције	4	1	5	0	оцена
мин	површинско земљиште под неповољним утицајем	1	4.5	4	0	оцена
макс	могућност набавке материјала	10	10	10	10	оцена
макс	етапности грађења	10	10	10	10	оцена
макс	уклопљеност у пејзајж	4	10	2	8	оцена
макс	учешће материјала са локације	2,887.70	13,990.00	13,096.50	850.00	м3
мин	не нарушавање природне равнотеже	6,629.50	20,404.00	6,875.00	7,915.45	м3

На основу дефинисаних критеријума за сваки од њих дефинисани су и показатељи вредновања приказаних у табели 4.15.

Табела 4.15 – Показатељи вредновања

Циљеви	критеријуми	показатељи
максимална корист за инвеститора	укупни трошкови извођења	цена радова
	укупно време извођења	трајање радова
		прекид радова због набавке материјала
		прекид радова због кашњења материјала
минимални трошкови одржавања	еластичност конструкције	временски преглед
	деформација конструкције (слегање прслина)	временски преглед
максимални позитивни утицај на развој подручја	површина земљишта под неповољним утицајем	очување пољопривредних и шумских капацитета
	могућност набавке материјала	
	етапност грађења	
минималне еколошке просторне последице	уклопљеност у пејзаж	количина ископа
	учешће материјала са локације	
	не нарушавање природне равнотеже	тло – замена материјала

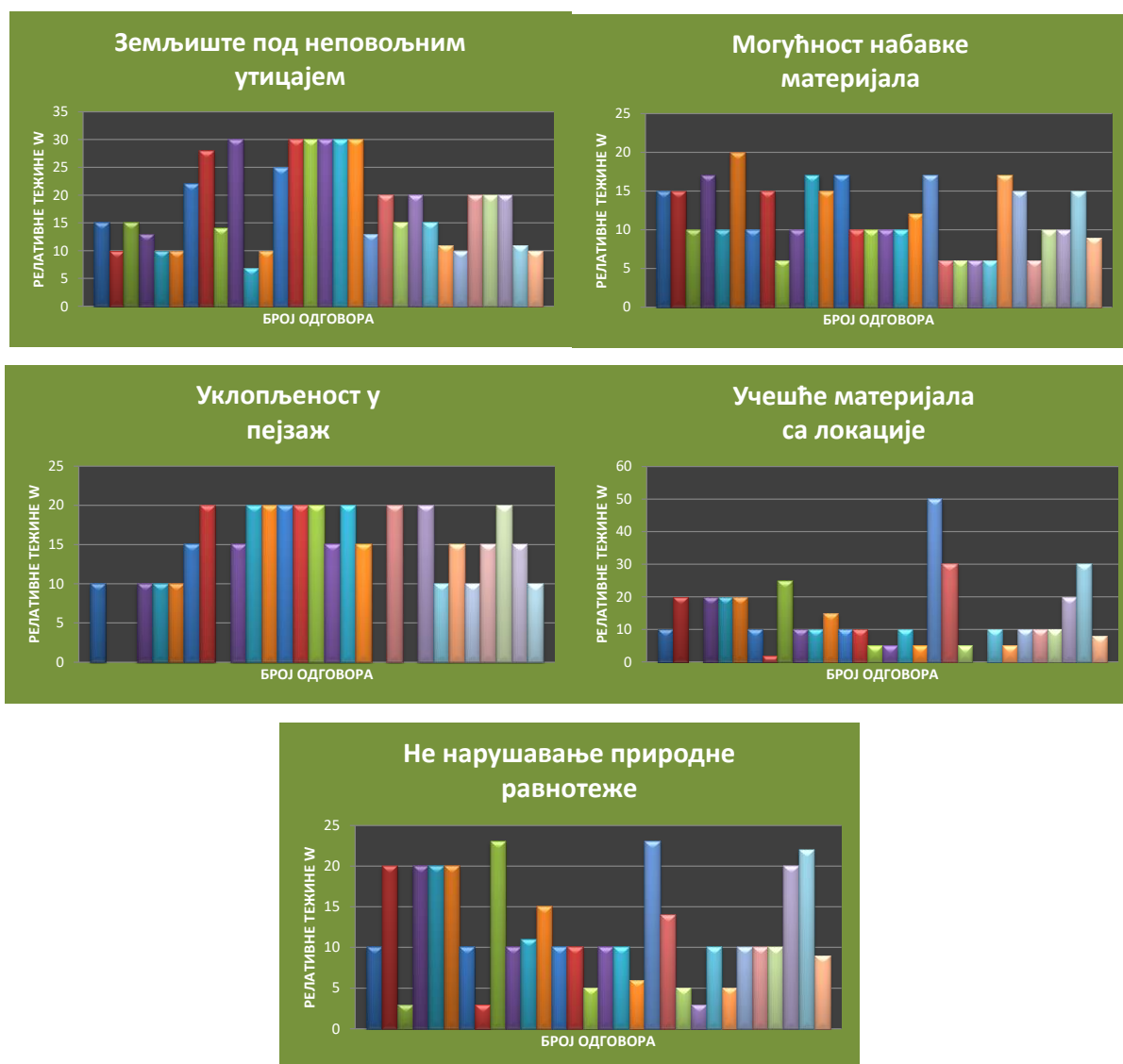
Вредности показатеља за свако од варијантних решења приказане су у табели 4.16.

Табела 4.16 – Показатељи вредновања за предложена варијантна решења

		Варијантно решење					јединица
		I	II	III	IV		
		гравитацион и армирано бетонски зид	армирано тло са габионима	армирано тло са лицем од бетонских монтажних елемената	шипови са наглавном гредом		
показатељи	ехтр	грав	габ	бет	шип		
1	цена	мин	38.083.545,36	42.687.126,14	62.253.821,18	129.765.110,00	динар
2	трајање извођења (по нормативима)	мин	17	18	15	14	месец
3	продужење рока због набавке материјала	мин	0	1	1	0	месец
4	могући застоји због чекање на механизацију	мин	0-4	0	0	0-4	месец
5	еластичност конструкције	макс	5	10	4	7	оцена
6	видљиве пукотине и слегање	мин	4	1	5	0	оцена
7	време за обуку и уходавање радника	мин	0	3	1	1	месец
8	стицање референци и искуства	макс	1	3	2	1	оцена
9	уклапање варијантног решења у амбијент	макс	4	10	2	8	оцена
10	прерада локалног материјала	мин	1	4,5	4	0	оцена






4.4.2 Одређивање релативних тежина

За одређивање релативних тежина, поред квалитативних показатеља, код критеријума код којих је извршено квантитативно оцењивање (критеријуми 1,2,3, 4 и 7), примењена је поједностављена Делфи метода на узорку од 24 експерта и 32 локална експерта из општина. Анкета је рађена уз помоћ упитника. Квалитативне вредности и статистички обрађени резултати оцењивања приказани су као нумеричке вредности критеријума понуђених алтернативних решења на слици 4.6.



Слика 4.6. – Хистограми тежина

Табела 4.17. – Резултати статистичке обраде прикупљених података из
хистограма тежина

		Wsr	S	V	
ЦИЉ 1	Земљиште под неповољним утицајем	18,13	7,9	0,266	
ЦИЉ 2	Могућност набавке материјала	12,83	8,8	0,398	
ЦИЉ 3	Уклопљеност у пејзаж	11,73	4,8	0,25	
ЦИЉ 4	Учешће материјала са локације	13,16	5,3	0,366	
ЦИЉ 5	Не нарушавање природне равнотеже	11,90	7,8	0,538	

У наредној табели 4.18 приказани су коначни резултати, односно релативни значај појединих критеријума.

Табела 4.18. – Коначна матрица циљева, критеријума, показатеља и тежина
критеријумских функција

Циљ	критеријумске функције	показатељи	Wa
максимална корист за инвеститора	укупни трошкови извођења		0,60
	укупно време извођења	трајање радова по норми	0,40
		прекид радова због набавке материјала	
		прекид радова због кашњења материјала	
минимални трошкови одржавања	еластичност конструкције	временски преглед	0,55
	деформација конструкције (слегање прслина)	временски преглед	0,45
максимални позитивни утицај на развој подручја	површина земљишта под неповољним утицајем	очување пољопривредних и шумских капацитета	0,40
	могућност набавке материјала		0,30
	етапност грађења		0,30
минималне еколошке просторне последице	уклопљеност у пејзаж		0,30
	учешће материјала са локације	количина ископа	0,45
	не нарушавање природне равнотеже	тло – замена материјала	0,25

5. АНАЛИЗА И КОМЕНТАР ДОБИЈЕНИХ РЕЗУЛТАТА

У литератури је присутно више метода вишекритеријумског вредновања. У овом раду биће представљене три методе које су у широкој употреби и биће коришћене и за одабир и рангирање алтернатива на реалном примеру.

5.1. Избор оптималне варијанте трасе добијених методом ВИКОР

На основу утврђене методологије, упоредног приказа циљева, критеријума и показатеља са одговарајућим релативним тежинама методом ВИКОР добијени су следећи резултати:

Улазни подаци су из пројекта „Реконструкција и модернизација постојећег железничког колосека и изградња другог колосека пруге Београд-Ниш, деоница Сталаћ-Ђунио“.

Вишекритеријумско рангирање: 3 сценарија према 10 критеријума.

Листа сценарија:

Сценарио 1 - Тежина по оцени експерата

Сценарио 2 - Тежина за предност инвеститора

Сценарио 3 - Тежина за предност животне средине

Допринос пројекта реализацији наведених циљева подразумева разматрање очекиваних ефеката са више аспеката: инвестиционо-грађевински, саобраћајно-експлоатациони, просторно-урбани, еколошки и социо-економски. Из наведених аспеката следе изабрани критеријуми на којима се заснива вишекритеријумско вредновање разматраних варијанти.

Листа критеријума:

- f 1. Укупни трошкови извођења (eur)
- f 2. Укупно време извођења (месец)
- f 3. Продужење због набавке материјала (месец)
- f 4. Могуће чекање на механизацију (месец)
- f 5. Еластичност конструкције (оцена)
- f 6. Видљивост пукотина и слегања (оцена)
- f 7. Време за обуку и уходавање (месец)
- f 8. Стицање референци и искуства (оцена)
- f 9. Уклапање у амбијент (м3)
- f10. Прерада локалног материјала (м3)

Табеле 5.1. - тежина критеријума по оцени експерата

Сценарио 1 - Тежине по оцени експерата

ω_1	0.24
ω_2	0.16
ω_3	0.11
ω_4	0.09
ω_5	0.06
ω_6	0.045
ω_7	0.045
ω_8	0.075
ω_9	0.1125
ω_{10}	0.0625
	1

			Алтер. 1	Алтер. 2	Алтер. 3	Алтер. 4
укупни трошкови извођења	мин	eur	322,741.90	361,755.30	527,574.80	649,825.30
укупно време извођења	мин	месец	19.00	19.00	16.00	17.00
еластичност конструкције	макс	оцена	5.00	10.00	4.00	7.00
деформације конструкције	мин	оцена	4.00	1.00	5.00	0.00
површина земљишта под неповољним утицајем	мин	оцена	1.00	45.00	4.00	0.00
могућност набавке материјала	макс	оцена	10.00	10.00	10.00	10.00
етапност грађења	макс	оцена	10.00	10.00	10.00	10.00
уклопљеност у пејсаж	макс	оцена	4.00	10.00	2.00	8.00
учешће материјала са локације	макс	м3	2,887.70	13,990.00	13,096.50	850.00
не нарушавање природне равнотеже	мин	м3	6,629.50	20,404.00	6,875.00	7,915.00

Табеле 5.2. – вредност критеријумске функције

Вредност критеријумских функција

		I АБ зид	II габиони	III армирано тло	IV шипови	
мин	укупни трошкови извођења	322,741.91 €	361,755.31 €	527,574.75 €	649,825.28 €	€
мин	укупно време извођења	19	19	16	17	месец
макс	продужење због набавке материјала	5	10	4	7	месец
мин	могућност чекања на механизацију	4	1	5	0	месец
мин	еластичност конструкције	1	4.5	4	0	оцена
макс	видљивост пукотина и слегање	10	10	10	10	оцена
макс	време обуке и уходавање	10	10	10	10	месец
макс	стицање референци и искуства	4	10	2	8	оцена
макс	уклапање у амбијент	2,887.70	13,990.00	13,096.50	850.00	м3
мин	прерада локалног материјала	6,629.50	20,404.00	6,875.00	7,915.45	м3

Табеле 5.3. - тежина критеријума за предност инвеститора

Сценарио 2 - Тежине за предност инвеститора

ω_1	0.3
ω_2	0.2
ω_3	0.1375
ω_4	0.1125
ω_5	0.04
ω_6	0.03
ω_7	0.03
ω_8	0.045
ω_9	0.0675
ω_{10}	0.0375
	1

			Алтер. 1	Алтер. 2	Алтер. 3	Алтер. 4
укупни трошкови извођења	мин	eur	322,741.90	361,755.30	527,574.80	649,825.30
укупно време извођења	мин	месец	19.00	19.00	16.00	17.00
еластичност конструкције	макс	оцена	5.00	10.00	4.00	7.00
деформације конструкције	мин	оцена	4.00	1.00	5.00	0.00
површина земљишта под неповољним утицајем	мин	оцена	1.00	45.00	4.00	0.00
могућност набавке материјала	макс	оцена	10.00	10.00	10.00	10.00
етапност грађења	макс	оцена	10.00	10.00	10.00	10.00
уклопљеност у пејсаж	макс	оцена	4.00	10.00	2.00	8.00
учешће материјала са локације	макс	m3	2,887.70	13,990.00	13,096.50	850.00
не нарушавање природне равнотеже	мин	m3	6,629.50	20,404.00	6,875.00	7,915.00

Табеле 5.4. - тежина критеријума за предност животне средине

Сценарио 3 - Тежине за предност животне средине

ω_1	0.12
ω_2	0.08
ω_3	0.055
ω_4	0.045
ω_5	0.1
ω_6	0.075
ω_7	0.075
ω_8	0.135
ω_9	0.2025
ω_{10}	0.1125
	1

			Алтер. 1	Алтер. 2	Алтер. 3	Алтер. 4
укупни трошкови извођења	мин	еур	322,741.90	361,755.30	527,574.80	649,825.30
укупно време извођења	мин	месец	19.00	19.00	16.00	17.00
еластичност конструкције	макс	оцена	5.00	10.00	4.00	7.00
деформације конструкције	мин	оцена	4.00	1.00	5.00	0.00
површина земљишта под неповољним утицајем	мин	оцена	1.00	45.00	4.00	0.00
могућност набавке материјала	макс	оцена	10.00	10.00	10.00	10.00
етапност грађења	макс	оцена	10.00	10.00	10.00	10.00
уклопљеност у пејсаж	макс	оцена	4.00	10.00	2.00	8.00
учешће материјала са локације	макс	m3	2,887.70	13,990.00	13,096.50	850.00
не нарушавање природне равнотеже	мин	m3	6,629.50	20,404.00	6,875.00	7,915.00

На основу утврђене методологије, упоредног приказа циљева, критеријума и показатеља са одговарајућим релативним тежинама методом ВИКОР добијени су следећи резултати

Сценарио 1 – резултати вредновања:

Ulazni podaci su iz zidovi.inp
 POTPORNE KONSTRUKCIJE
 Visekriterijumsko rangiranje 4 alternativa prema 10 kriterijuma

Lista alternativa
 A 1. АЛТЕРНАТИВА 1
 A 2. АЛТЕРНАТИВА 2
 A 3. АЛТЕРНАТИВА 3

A 4. АЛТЕРНАТИВА 4

Lista Kriterijuma

- f 1. Troskovi izgradnje (Eur)
- f 2. Ukpno vreme izvodjenja (Mes)
- f 3. Elasticnost konstrukcije (ordskala)
- f 4. Deformacije konstrukcija (ordskala)
- f 5. Povrsina zemljista pod nepovoljnim uticajem (ordsk)
- f 6. Mogucnost nabavke materijala (ordskala)
- f 7. Etapnost gradjenja (ordskala)
- f 8. Uklopljenost u pejzaz (ordskala)
- f 9. Ucesce materijala sa lokacije (m3)
- f10. Nenarusavanje prirone ravnoteze (m3)

Indeksi ekstremizacije

0. 0. 1. 0. 0. 1. 1. 1. 1. 0.

Vrednosti kriterijumskih funkcija

A 1	322741.906	19.000	5.000	4.000	1.000	10.000
10.000	4.000	2887.000	6629.500			
A 2	361755.312	19.000	10.000	1.000	4.500	10.000
10.000	10.000	13990.000	20404.000			
A 3	527574.750	16.000	4.000	5.000	4.000	10.000
10.000	2.000	13096.500	6875.000			
A 4	649825.250	17.000	7.000	0.000	0.000	10.000
10.000	8.000	850.000	7915.450			
F*	322741.906	16.000	10.000	0.000	0.000	10.000
10.000	10.000	13990.000	6629.500			
F-	649825.250	19.000	4.000	5.000	4.500	10.000
10.000	2.000	850.000	20404.000			

r.b.AL. \ Rang liste po pojedinacnim kriterijumima

A 1	1	3	3	3	2	1	1	3	3	1
A 2	2	4	1	2	4	2	2	1	1	4
A 3	3	1	4	4	3	3	3	4	2	2
A 4	4	2	2	1	1	4	4	2	4	3

Vrednosti tezina w(i)

0.24 0.16 0.11 0.09 0.06 0.05 0.05 0.08 0.11 0.06
Tezina v = 0.550

Rang-Liste po merama : QR , Q i QS

QR - Maximax strategija, Q - Kompromis, QS - Vecinska korist

R.L.QR	R.L.Q i Q(J)	R.L.QS
A 3 0.150	A 2 0.049	A 2 0.329
A 1 0.160	A 3 0.547	A 4 0.485
A 2 0.160	A 1 0.599	A 3 0.487
A 4 0.240	A 4 0.990	A 1 0.488

RANG-LISTA

1. 0.049 АЛТЕРНАТИВА 2
2. 0.547 АЛТЕРНАТИВА 3
3. 0.599 АЛТЕРНАТИВА 1
4. 0.990 АЛТЕРНАТИВА 4

Kompromisno resenje za konacnu odluku
 A 2. АЛТЕРНАТИВА 2

Prednost= 49.8 %

Analiza preferentne stabilnosti

Intervali tezina za pojedine kriterijume

F(i)	S.	FAC.	WD(i)	WD1	W0(i)	WG1	WG(i)	FAC.	S.
F 1	2	0.695	0.180	0.209	0.240	0.348	0.660	6.1	2
F 2	1	0.000	0.000	0.000	0.160	0.182	0.207	1.4	2
F 3	2	0.000	0.000	0.011	0.110	1.000	1.000	888.8	1
F 4	2	0.000	0.000	0.011	0.090	0.319	0.531	11.4	2
F 5	1	0.000	0.000	0.000	0.060	0.151	0.173	3.3	2
F 6	1	0.000	0.000	0.000	0.045	1.000	1.000	888.8	1
F 7	1	0.000	0.000	0.000	0.045	1.000	1.000	888.8	1
F 8	1	0.000	0.000	0.000	0.075	1.000	1.000	888.8	1
F 9	2	0.000	0.000	0.007	0.112	0.245	1.000	888.8	2
F10	1	0.000	0.000	0.000	0.062	0.168	0.184	3.4	3

Razmene - Tradeoffs

F 1.	1.00	Eur/Eur	72685.19	Eur/Mes	24985.53	Eur/ord	24531.25
Eur/ska	18171.30	Eur/lao	+++++++	Eur/rds	+++++++	Eur/kal	12776.69
	11.67	Eur/dsk	6.18	Eur/ala			
F 2.	0.00	Mes/Eur	1.00	Mes/Mes	0.34	Mes/ord	0.34
Mes/ska	0.25	Mes/lao	+++++++	Mes/rds	+++++++	Mes/kal	0.18
	0.00	Mes/dsk	0.00	Mes/ala			
F 3.	0.00	ord/Eur	2.91	ord/Mes	1.00	ord/ord	0.98
ord/ska	0.73	ord/lao	+++++++	ord/rds	+++++++	ord/kal	0.51
	0.00	ord/dsk	0.00	ord/ala			
F 4.	0.00	ska/Eur	2.96	ska/Mes	1.02	ska/ord	1.00
ska/ska	0.74	ska/lao	+++++++	ska/rds	+++++++	ska/kal	0.52
	0.00	ska/dsk	0.00	ska/ala			
F 5.	0.00	lao/Eur	4.00	lao/Mes	1.37	lao/ord	1.35
lao/ska	1.00	lao/lao	+++++++	lao/rds	+++++++	lao/kal	0.70
	0.00	lao/dsk	0.00	lao/ala			
F 6.	0.00	rds/Eur	0.00	rds/Mes	0.00	rds/ord	0.00
rds/ska	0.00	rds/lao	????????	rds/rds	????????	rds/kal	0.00
	0.00	rds/dsk	0.00	rds/ala			
F 7.	0.00	kal/Eur	0.00	kal/Mes	0.00	kal/ord	0.00
kal/ska	0.00	kal/lao	????????	kal/rds	????????	kal/kal	0.00
	0.00	kal/dsk	0.00	kal/ala			
F 8.	0.00	aor/Eur	5.69	aor/Mes	1.96	aor/ord	1.92
aor/ska	1.42	aor/lao	+++++++	aor/rds	+++++++	aor/kal	1.00
	0.00	aor/dsk	0.00	aor/ala			
F 9.	0.09	dsk/Eur	6229.33	dsk/Mes	2141.33	dsk/ord	2102.40
dsk/ska	1557.33	dsk/lao	+++++++	dsk/rds	+++++++	dsk/kal	1095.00
	1.00	dsk/dsk	0.53	dsk/ala			
F10.	0.16	ala/Eur	11754.24	ala/Mes	4040.52	ala/ord	3967.06
ala/ska	2938.56	ala/lao	+++++++	ala/rds	+++++++	ala/kal	2066.18
	1.89	ala/dsk	1.00	ala/ala			

Сценарио 2 – резултати вредновања:

Ulazni podaci su iz zidovi.inp

POTPORNE KONSTRUKCIJE

Visekriterijumsko rangiranje 4 alternativa prema 10 kriterijuma

Lista alternativa

- A 1. АЛТЕРНАТИВА 1
- A 2. АЛТЕРНАТИВА 2
- A 3. АЛТЕРНАТИВА 3
- A 4. АЛТЕРНАТИВА 4

Lista Kriterijuma

- f 1. Troškovi izgradnje (Eur)
- f 2. Ukupno vreme izvođenja (Mes)
- f 3. Elasticnost konstrukcije (ordskala)
- f 4. Deformacije konstrukcija (ordskala)
- f 5. Povrsina zemljišta pod nepovoljnim uticajem (ordsk)
- f 6. Mogucnost nabavke materijala (ordskala)
- f 7. Etapnost gradjenja (ordskala)
- f 8. Uklopljenost u pejzaz (ordskala)
- f 9. Ucesce materijala sa lokacije (m3)
- f10. Nenarusavanje prirode ravnoteze (m3)

Indeksi ekstremizacije

0. 0. 1. 0. 0. 1. 1. 1. 1. 0.

Vrednosti kriterijumskih funkcija

A 1	322741.906	19.000	5.000	4.000	1.000	10.000
10.000	4.000	2887.000	6629.500			
A 2	361755.312	19.000	10.000	1.000	4.500	10.000
10.000	10.000	13990.000	20404.000			
A 3	527574.750	16.000	4.000	5.000	4.000	10.000
10.000	2.000	13096.500	6875.000			
A 4	649825.250	17.000	7.000	0.000	0.000	10.000
10.000	8.000	850.000	7915.450			
F*	322741.906	16.000	10.000	0.000	0.000	10.000
10.000	10.000	13990.000	6629.500			
F-	649825.250	19.000	4.000	5.000	4.500	10.000
10.000	2.000	850.000	20404.000			

r.b.AL. \ Rang liste po pojedinacnim kriterijumima

A 1	1	3	3	3	2	1	1	3	3	1
A 2	2	4	1	2	4	2	2	1	1	4
A 3	3	1	4	4	3	3	3	4	2	2
A 4	4	2	2	1	1	4	4	2	4	3

Vrednosti tezina w(i)

0.30 0.20 0.14 0.11 0.04 0.03 0.03 0.05 0.07 0.04
 Tezina v = 0.550

Rang-Liste po merama : QR , Q i QS

QR - Maximax strategija, Q - Kompromis, QS - Vecinska korist

R.L.QR	R.L.Q i Q(J)	R.L.QS
A 3 0.188	A 2 0.049	A 2 0.336
A 1 0.200	A 1 0.542	A 1 0.504
A 2 0.200	A 3 0.550	A 4 0.518
A 4 0.300	A 4 0.982	A 3 0.524

RANG-LISTA

1. 0.049 АЛТЕРНАТИВА 2
2. 0.542 АЛТЕРНАТИВА 1
3. 0.550 АЛТЕРНАТИВА 3
4. 0.982 АЛТЕРНАТИВА 4

Kompromisno resenje za konacnu odluku

A 2. АЛТЕРНАТИВА 2

Prednost= 49.3 %

Analiza preferentne stabilnosti

Intervali tezina za pojedine kriterijume

F(i)	S.	FAC.	WD(i)	WD1	W0(i)	WG1	WG(i)	FAC.	S.
F 1	2	0.679	0.225	0.258	0.300	0.399	0.708	5.7	2
F 2	1	0.000	0.000	0.000	0.200	0.232	0.258	1.4	2
F 3	2	0.000	0.000	0.018	0.138	1.000	1.000	888.8	1
F 4	2	0.000	0.000	0.017	0.112	0.368	0.585	11.1	2
F 5	1	0.000	0.000	0.000	0.040	0.138	0.187	5.5	2
F 6	1	0.000	0.000	0.000	0.030	1.000	1.000	888.8	1
F 7	1	0.000	0.000	0.000	0.030	1.000	1.000	888.8	1
F 8	1	0.000	0.000	0.000	0.045	1.000	1.000	888.8	1
F 9	1	0.000	0.000	0.000	0.068	0.215	1.000	888.8	2
F10	1	0.000	0.000	0.000	0.038	0.160	0.176	5.5	2

Razmene - Tradeoffs

F 1.	1.00	Eur/Eur	72685.19	Eur/Mes	24985.53	Eur/ord	24531.25
Eur/ska	9691.36	Eur/lao	+++++++	Eur/rds	+++++++	Eur/kal	6132.81
	5.60	Eur/dsk	2.97	Eur/ala			
F 2.	0.00	Mes/Eur	1.00	Mes/Mes	0.34	Mes/ord	0.34
Mes/ska	0.13	Mes/lao	+++++++	Mes/rds	+++++++	Mes/kal	0.08
	0.00	Mes/dsk	0.00	Mes/ala			
F 3.	0.00	ord/Eur	2.91	ord/Mes	1.00	ord/ord	0.98
ord/ska	0.39	ord/lao	+++++++	ord/rds	+++++++	ord/kal	0.25
	0.00	ord/dsk	0.00	ord/ala			
F 4.	0.00	ska/Eur	2.96	ska/Mes	1.02	ska/ord	1.00
ska/ska	0.40	ska/lao	+++++++	ska/rds	+++++++	ska/kal	0.25
	0.00	ska/dsk	0.00	ska/ala			
F 5.	0.00	lao/Eur	7.50	lao/Mes	2.58	lao/ord	2.53
lao/ska	1.00	lao/lao	+++++++	lao/rds	+++++++	lao/kal	0.63
	0.00	lao/dsk	0.00	lao/ala			
F 6.	0.00	rds/Eur	0.00	rds/Mes	0.00	rds/ord	0.00
rds/ska	0.00	rds/lao	????????	rds/rds	????????	rds/kal	0.00
	0.00	rds/dsk	0.00	rds/ala			
F 7.	0.00	kal/Eur	0.00	kal/Mes	0.00	kal/ord	0.00
kal/ska	0.00	kal/lao	????????	kal/rds	????????	kal/kal	0.00
	0.00	kal/dsk	0.00	kal/ala			
F 8.	0.00	aor/Eur	11.85	aor/Mes	4.07	aor/ord	4.00
aor/ska	1.58	aor/lao	+++++++	aor/rds	+++++++	aor/kal	1.00
	0.00	aor/dsk	0.00	aor/ala			
F 9.	0.18	dsk/Eur	12977.78	dsk/Mes	4461.11	dsk/ord	4380.00
dsk/ska	1730.37	dsk/lao	+++++++	dsk/rds	+++++++	dsk/kal	1095.00
	1.00	dsk/dsk	0.53	dsk/ala			
F10.	0.34	ala/Eur	24488.00	ala/Mes	8417.75	ala/ord	8264.70
ala/ska	3265.07	ala/lao	+++++++	ala/rds	+++++++	ala/kal	2066.18
	1.89	ala/dsk	1.00	ala/ala			

Сценарио 3 – резултати вредновања:

Ulazni podaci su iz zidovi.inp

POTPORNE KONSTRUKCIJE

Visekriterijumsko rangiranje 4 alternativa prema 10 kriterijuma

Lista alternativa

- A 1. АЛТЕРНАТИВА 1
- A 2. АЛТЕРНАТИВА 2
- A 3. АЛТЕРНАТИВА 3
- A 4. АЛТЕРНАТИВА 4

Lista Kriterijuma

- f 1. Troskovi izgradnje (Eur)
- f 2. Ukpno vreme izvodjenja (Mes)
- f 3. Elasticnost konstrukcije (ordskala)
- f 4. Deformacije konstrukcija (ordskala)
- f 5. Povrsina zemljista pod nepovoljnim uticajem (ordsk)
- f 6. Mogucnost nabavke materijala (ordskala)
- f 7. Etapnost gradjenja (ordskala)
- f 8. Uklopljenost u pejzaz (ordskala)
- f 9. Ucesce materijala sa lokacije (m3)
- f10. Nenarusavanje prirone ravnoteze (m3)

Indeksi ekstremizacije

0. 0. 1. 0. 0. 1. 1. 1. 1. 0.

Vrednosti kriterijumskih funkcija

A 1	322741.906	19.000	5.000	4.000	1.000	10.000
10.000	4.000	2887.000	6629.500			
A 2	361755.312	19.000	10.000	1.000	4.500	10.000
10.000	10.000	13990.000	20404.000			
A 3	527574.750	16.000	4.000	5.000	4.000	10.000
10.000	2.000	13096.500	6875.000			
A 4	649825.250	17.000	7.000	0.000	0.000	10.000
10.000	8.000	850.000	7915.450			
F*	322741.906	16.000	10.000	0.000	0.000	10.000
10.000	10.000	13990.000	6629.500			
F-	649825.250	19.000	4.000	5.000	4.500	10.000
10.000	2.000	850.000	20404.000			

r.b.AL. \ Rang liste po pojedinacnim kriterijumima

A 1	1	3	3	3	2	1	1	3	3	1
A 2	2	4	1	2	4	2	2	1	1	4
A 3	3	1	4	4	3	3	3	4	2	2
A 4	4	2	2	1	1	4	4	2	4	3

Vrednosti tezina w(i)

0.12 0.08 0.05 0.05 0.10 0.08 0.08 0.14 0.20 0.11
 Tezina v = 0.550

Rang-Liste po merama : QR , Q i QS

QR - Maximax strategija, Q - Kompromis, QS - Vecinska korist

R.L.QR	R.L.Q i Q(J)	R.L.QS
A 2 0.112	A 2 0.000	A 2 0.316
A 3 0.135	A 3 0.500	A 3 0.415
A 1 0.171	A 1 0.843	A 4 0.421
A 4 0.203	A 4 0.861	A 1 0.456

RANG-LISTA

1. 0.000 АЛТЕРНАТИВА 2
2. 0.500 АЛТЕРНАТИВА 3
3. 0.843 АЛТЕРНАТИВА 1
4. 0.861 АЛТЕРНАТИВА 4

Kompromisno resenje za konacnu odluku

Analiza preferentne stabilnosti

Intervali tezina za pojedine kriterijume

F(i)	S.	FAC.	WD(i)	WD1	W0(i)	WG1	WG(i)	FAC.	S.
F 1	2	0.000	0.000	0.001	0.120	0.318	0.607	11.3	2
F 2	1	0.000	0.000	0.000	0.080	0.121	0.141	1.9	2
F 3	1	0.000	0.000	0.000	0.055	1.000	1.000	888.8	1
F 4	1	0.000	0.000	0.000	0.045	0.264	0.452	17.5	2
F 5	1	0.000	0.000	0.000	0.100	0.172	0.181	2.0	4
F 6	1	0.000	0.000	0.000	0.075	1.000	1.000	888.8	2
F 7	1	0.000	0.000	0.000	0.075	1.000	1.000	888.8	2
F 8	2	0.372	0.055	0.104	0.135	1.000	1.000	888.8	1
F 9	3	0.382	0.088	0.132	0.203	0.320	1.000	888.8	2
F10	1	0.000	0.000	0.000	0.112	0.142	0.165	1.6	2

Razmene - Tradeoffs

F 1.	1.00	Eur/Eur	72685.19	Eur/Mes	24985.53	Eur/ord	24531.25
Eur/ska	60570.99	Eur/lao	+++++++	Eur/rds	+++++++	Eur/kal	45996.10
	42.01	Eur/dsk	22.26	Eur/ala			
F 2.	0.00	Mes/Eur	1.00	Mes/Mes	0.34	Mes/ord	0.34
Mes/ska	0.83	Mes/lao	+++++++	Mes/rds	+++++++	Mes/kal	0.63
	0.00	Mes/dsk	0.00	Mes/ala			
F 3.	0.00	ord/Eur	2.91	ord/Mes	1.00	ord/ord	0.98
ord/ska	2.42	ord/lao	+++++++	ord/rds	+++++++	ord/kal	1.84
	0.00	ord/dsk	0.00	ord/ala			
F 4.	0.00	ska/Eur	2.96	ska/Mes	1.02	ska/ord	1.00
ska/ska	2.47	ska/lao	+++++++	ska/rds	+++++++	ska/kal	1.87
	0.00	ska/dsk	0.00	ska/ala			
F 5.	0.00	lao/Eur	1.20	lao/Mes	0.41	lao/ord	0.41
lao/ska	1.00	lao/lao	+++++++	lao/rds	+++++++	lao/kal	0.76
	0.00	lao/dsk	0.00	lao/ala			
F 6.	0.00	rds/Eur	0.00	rds/Mes	0.00	rds/ord	0.00
rds/ska	0.00	rds/lao	????????	rds/rds	????????	rds/kal	0.00
	0.00	rds/dsk	0.00	rds/ala			
F 7.	0.00	kal/Eur	0.00	kal/Mes	0.00	kal/ord	0.00
kal/ska	0.00	kal/lao	????????	kal/rds	????????	kal/kal	0.00
	0.00	kal/dsk	0.00	kal/ala			
F 8.	0.00	aor/Eur	1.58	aor/Mes	0.54	aor/ord	0.53
aor/ska	1.32	aor/lao	+++++++	aor/rds	+++++++	aor/kal	1.00
	0.00	aor/dsk	0.00	aor/ala			
F 9.	0.02	dsk/Eur	1730.37	dsk/Mes	594.81	dsk/ord	584.00
dsk/ska	1441.98	dsk/lao	+++++++	dsk/rds	+++++++	dsk/kal	1095.00
	1.00	dsk/dsk	0.53	dsk/ala			
F10.	0.04	ala/Eur	3265.07	ala/Mes	1122.37	ala/ord	1101.96
ala/ska	2720.89	ala/lao	+++++++	ala/rds	+++++++	ala/kal	2066.18
	1.89	ala/dsk	1.00	ala/ala			

Резултати вредновања методом “ВИКОР“ засновани на презентованим критеријумима указују да је оптимална друга алтернатива.

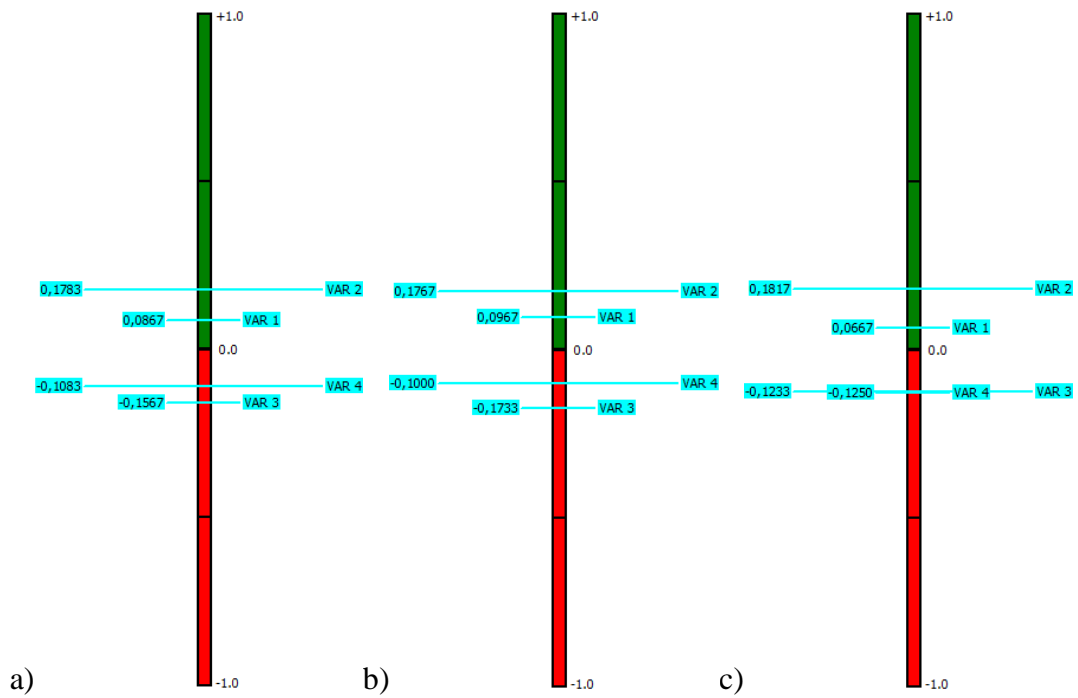
5.2. Избор оптималне варијанте трасе добијених методом PROMETHEE-GAIA

За прорачун по наведеном примеру коришћен је Децисион Лаб софтвер који графички може да прикаже добијене резултате рангирања алтернатива.

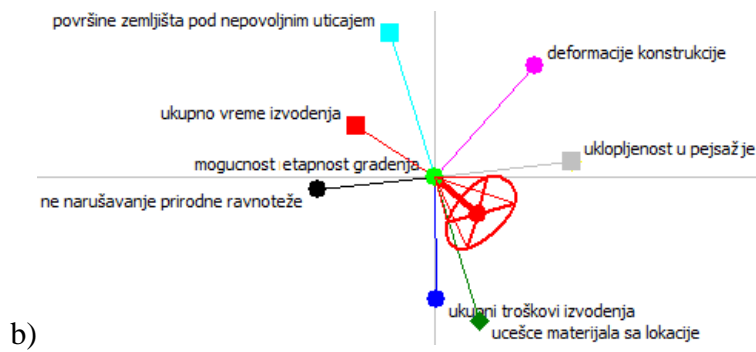
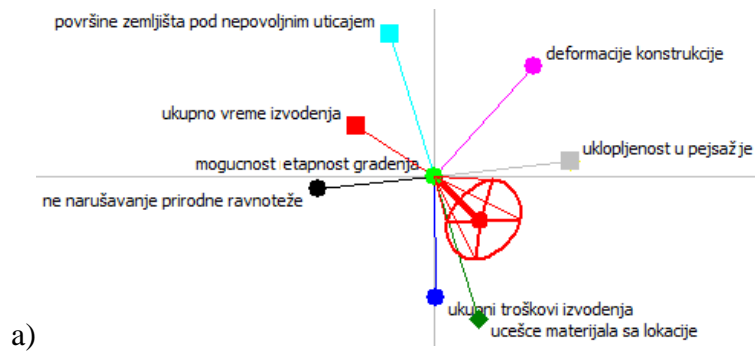
За анализу резултата коришћен је специјализовани софтвер за обраду података D-Sight. Платформа на којој се D-Sight софтвер развија уско је повезана са PROMETHEE методом. D-Sight програм омогућава упрошћавање аналитичког модела PROMETHEE методе кроз следеће кораке: уношење алтернатива, уношења критеријума, уношења тежинских коефицијената за критеријуме појединачно, уношење тежина алтернатива и њихово нормализовање, одређивање функције критеријума и максимализације односно минимализације критеријума и читавање резултата.

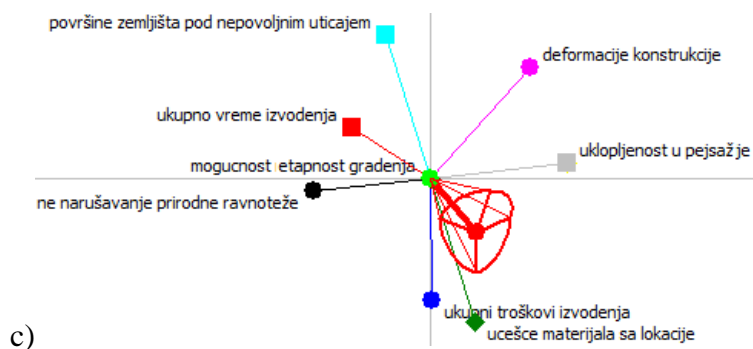
Графички приказ обраде резултата добијен је коришћењем алата Global Visual Analyses (GVA) и приказан је на слици 1. Информација везана за сложени проблем одлучивања који садржи k критеријума може се представити у k -димензионалном простору. GAIA раван представља раван која се добија приликом пројекције укупне информације у дводимензионални простор. У GAIA равни алтернативе су представљене у виду троуглова, а критеријуми у виду квадрата. Црвена тачка означава апроксимативну вредност свих тежина критеријума и визуелно представља оптималну тачку којој теже да достигну понуђене алтернативе. Конфликтне карактеристике критеријума приказане су на дијаграму, конфликтни критеријуми су орјентисани у супротном смеру, док се критеријуми који имају сличне преференције орјентисани у истом смеру. Као додатак у представљану алтернатива и критеријума пројекција тежинских вектора у GAIA равни има одговарајући P_i вектор који показује правац компромисних резултата. Велики број понуђених алтернатива довео је до нагомилавања и непрегледности графичког приказа добијених резултата на слици 6.

Очитавањем решења добијених применом PROMETHEE методе вишекритеријумског одлучивања уз подршку софтвера D-Sight графички потврђује да је оптимална друга варијанта.



Слика 5.1 Рангирање по сценаријима: а) сценарио 1; б) сценарио 2; ц) сценарио 3;

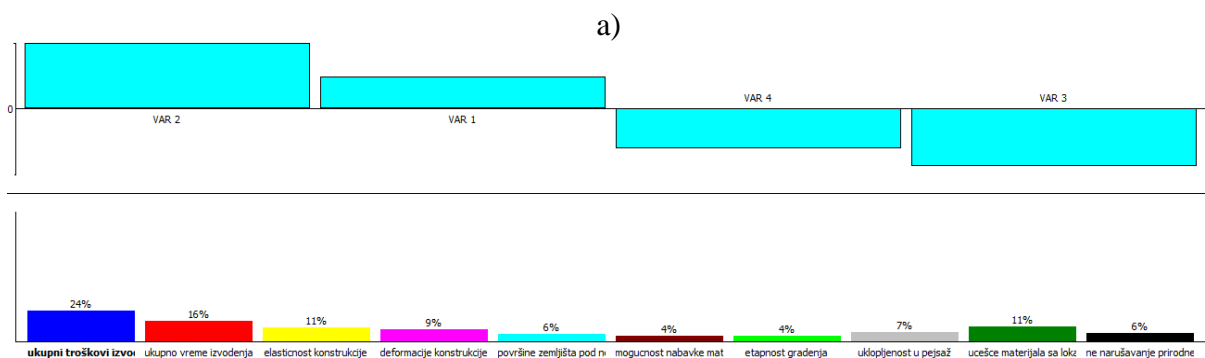


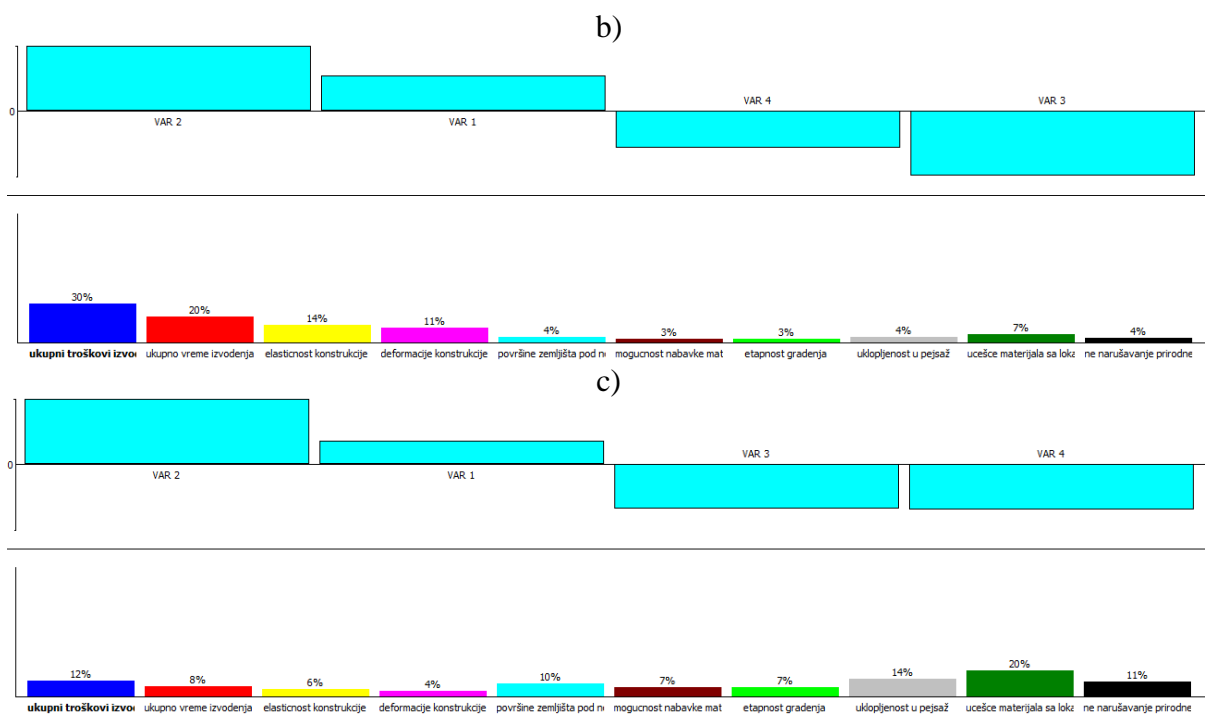


Слика 5.2 Графички приказ оптимизације по сценаријима применом GAIA методе: а) сценарио 1; б) сценарио 2; ц) сценарио 3;

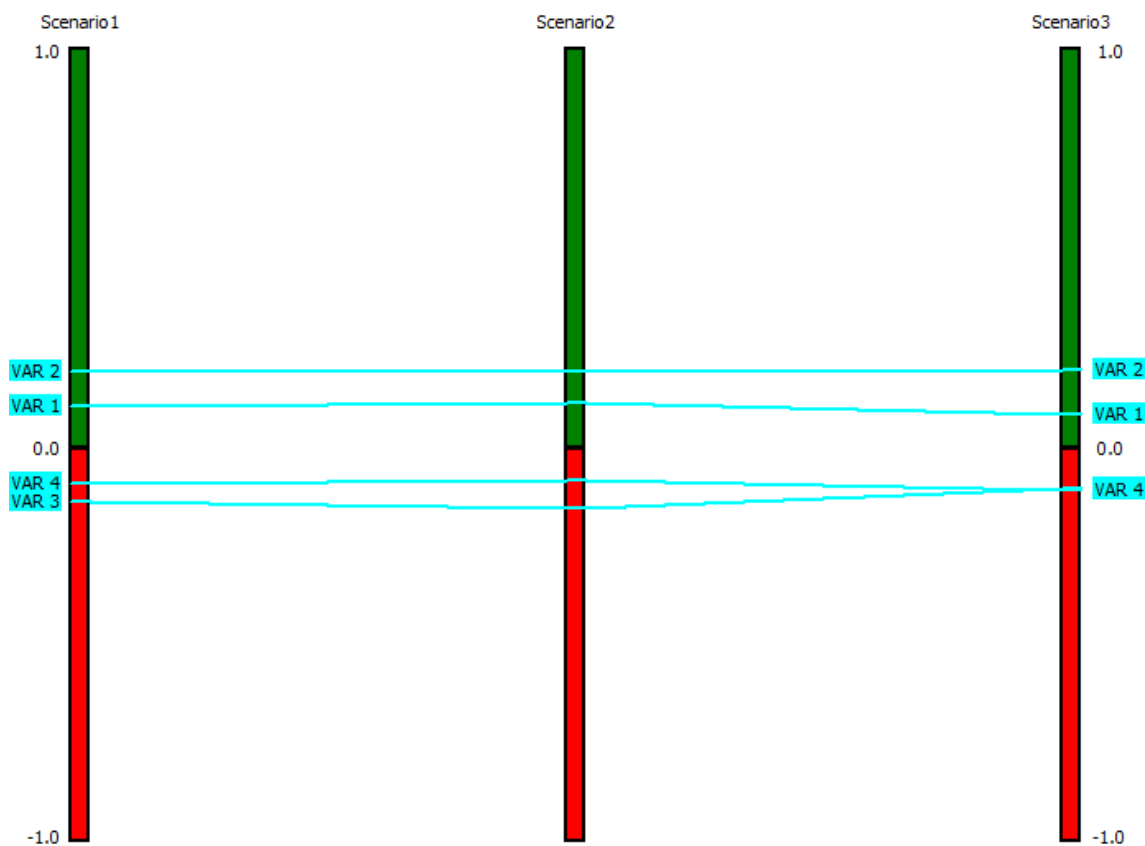
Табела 5.5. - Парцијално и комплетно рангирање засновано на Φ^+ i Φ^- токовима

алтернатива	рангирање	Φ	Φ^+	Φ^-
алтернатива 1	ВАР 2	0.1783	0.5175	0.3392
	ВАР 1	0.0867	0.4717	0.3850
	ВАР 4	-0.1083	0.4008	0.5092
	ВАР 3	-0.1567	0.3767	0.5333
алтернатива 2	ВАР 2	0.1767	0.5250	0.3483
	ВАР 1	0.0967	0.4850	0.3883
	ВАР 4	-0.1000	0.4200	0.5200
	ВАР 3	-0.1733	0.3833	0.5567
алтернатива 3	ВАР 2	0.1817	0.5025	0.3208
	ВАР 1	0.0667	0.4450	0.3783
	ВАР 3	-0.1233	0.3633	0.4867
	ВАР 4	-0.1250	0.3625	0.4875





Слика 5.3 Решење добијено оптимизацијом са процентуалним приказом тежинских коефицијента: а) сценарио 1; б) сценарио 2; ц) сценарио 3;

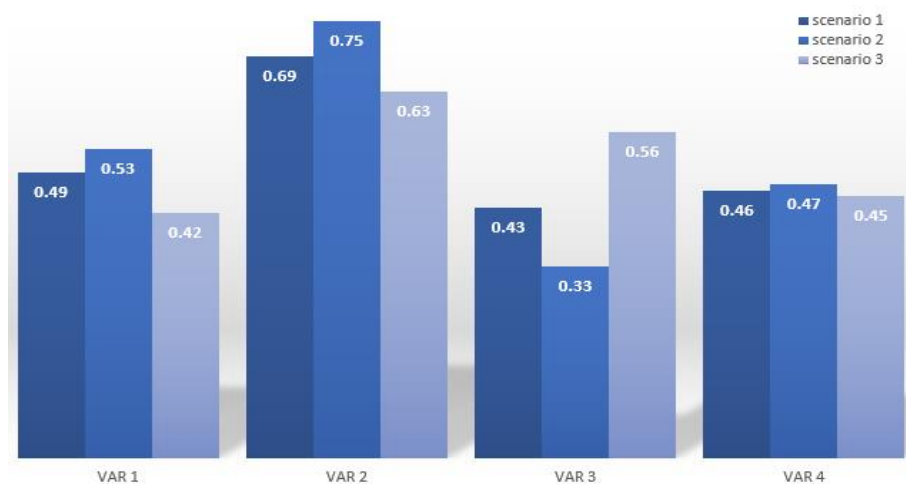


Слика 5.4 Решење добијено упоредним приказом оптимизације по свим сценаријима

Резултати вредновања методом “PROMETHEE-GAIA“ засновани на презентованим критеријумима указују да је оптимална друга варијанта.

5.3. Избор оптималне варијанте трасе добијених методом TOPSIS

Решење добијено TOPSIS (**T**echnique for **O**rders of Preference by **S**imilarity to **I**deal **S**olution) методом је идентично решењу добијено PROMETHEE методом за први и други алтернатива, док за трећи алтернатива постоје извесна одступања у рангирању варијанти, али се као оптимална добија друга варијанта.



Слика 5.5 Рангирање по варијантама за сва три сценарија - оптимална варијанта је варијанта 2 код сва три сценарија

Табела 5.6. - Рангирање према перформансним поенима P_i по варијантама и сценаријама

	рангирање	P_i
сценарио 1	ВАР 2	0.69
	ВАР 1	0.49
	ВАР 4	0.46
	ВАР 3	0.43
сценарио 2	ВАР 2	0.75
	ВАР 1	0.53
	ВАР 4	0.47
	ВАР 3	0.33
сценарио 3	ВАР 2	0.63
	ВАР 3	0.56
	ВАР 4	0.45
	ВАР 1	0.42

Табела 5.7. - Коефицијенти дистанци најгорих S_i^- и најбољих S_i^+ идеализованих критеријума

критеријуми	S_i^-	S_i^+
укупни трошкови извођења	649825.3	322741.9
укупно време извођења	19	16
еластичност конструкције	4	10
деформације конструкције	5	0
површине земљишта под неповољним утицајем	4.5	0
могућност набавке материјала	10	10
етапност грађења	10	10
уклопљеност у пејзаж	2	10
учешће материјала са локације	850	13990
не нарушавање природне равнотеже	20404	6629.5

Резултати вредновања методом “TOPSIS” засновани на презентованим критеријумима указују да је **оптимална друга варијанта**.

5.4. Закључак вишекритеријумског вредновања

С обзиром на најзначајније циљеве изградње потпорног зида на одабраној критичној деоници пројекта “Реконструкција и модернизација постојећег железничког колосека и изградња другог колосека пруге Београд - Ниш, деоница Сталаћ-Ђуниш”, произашао је избор 10 показатеља на којима се заснива и вишекритеријумско вредновање разматраних варијанти.

За релативно рангирање пројектних варијанти примењена је процедура вишекритеријумског вредновања, конкретно методе VIKOR, PROMETHEE-GAIA и TOPSIS.

Резултати вишекритеријумског вредновања делимично су сагласни по методама VIKOR, PROMETHEE-GAIA и TOPSIS. Наиме, по методи VIKOR најповољнија је друга варијанта, док иза ње следе четврта варијанта, трећа па прва варијанта. По

методи PROMETHEE-GAIA, најповољнија је такође друга варијанта, док је као друго-рангирана прва варијанта, па затим четврта и последња трећа варијанта. Са друге стране, по вредновању према методи TOPSIS, добијају се исти резултати рангирања као по методи PROMETHEE-GAIA.

Разлика у вредновању и рангирању приликом примене наведене три методе произилази из различитог принципа одабира и примене тежинских фактора, као и из процедура и основа на којима се заснивају примењене методе. При одабиру и рангирању најповољнијих варијанти, треба користити најмање две методе вишекритеријумског вредновања. Након обављеног вишекритеријумског вредновања варијантних решења коридора аутопута у овом раду, најпоузданији резултати, према мишљењу аутора, добили су се применом метода TOPSIS и PROMETHEE-GAIA.

Сигурно је да се као најповољнија варијанта потпорног зида издваја друга варијанта, а коначни редослед пројектованих варијанти потпорног зида на делу пројекта “Реконструкција и модернизација постојећег железничког колосека и изградња другог колосека пруге Београд - Ниш, деоница Сталаћ-Ђунис”, према аутору овог рада, гласи:

Табеле 5.8. – приказ редоследа варијантних решења од најповољнијег до најнеповољнијег

II Варијанта	Армирано тло са габионима
I Варијанта	Гравитациони Армирано-бетонски зид
IV Варијанта	Шипови са наглавном гредом
III Варијанта	Армирано тло са лицем од бетонских монтажних елемената

6. ЗАКЉУЧЦИ И ПРЕДЛОЗИ ЗА БУДУЋА ИСТРАЖИВАЊА

6.1. Завршна разматрања и закључци истраживања

Као резултат истраживања спроведених у овом раду, дефинисан је модел за вредновања и рангирања код алтернативних решења потпорних конструкција. Дефинисани модел тежи да буде потпун и свеукупан јер га дефинише вишеактерски и вишекритеријумски прилаз решавању проблема оптимизације потпорних конструкција. Заснован је на критеријумима вредновања чија је релевантност доказана научним методама и они су сврстани у правилну хијерархију. Модел са великим успехом интегрише методу МЕТОДА VIKOR, PROMETHEE-GAIA И TOPSIS, као методу „меке“ оптимизације. Модел планира и анализу осетљивости одабраног алтернативног решења на измену тежина неких (или свих) критеријума вредновања, па је самим тим доносиоцу одлуке од велике помоћи при стицању увид у осетљивост одабраног решења.

У овом раду, предложени су модели вишекритеријумског одлучивања који се ослањају на динамичке тежинске коефицијенте. Ови модели су погодни за оцењивање појава са једном доминантном особином јер су конструисани тако да опадањем вредности доминантне особине (у извођењу потпорних зидова то је свакако цена коштања) расте тежински коефицијент те особине, што резултује чињеницом да ако та доминантна особина има вредност нула, онда њен тежински коефицијент постаје један, а самим тим друге особине се занемарују (њихови тежински коефицијенти су 0). Другим речима, коначна оцена неке алтернативе биће нула уколико та алтернатива не испуњава доминантан критеријум и на ту оцену неће утицати вредности алтернативе по другим мање важним (или скоро неважним) критеријумима, у том случају (у ситуацијама када је доминантни критеријум код алтернативе испуњен делимично или потпуно остали критеријуми су јако важни за рангирање и одлучивање). Многе познате методе вишекритеријумског одлучивања имају овај недостатак.

Примен дефинисаног модела верификована је студијом конкретног случаја.

Модел је примењен на 4 варијантна решења потпорних зидова при чему је коришћено 10 критеријума.

Код одређивања тежина критеријума у дисертацији су из наведених циљева и показатеља произишли критеријуми на основу којих се рангирају разматране варијанте. Релативно најповољнија варијанта је она која испуњава задате критеријуме.

На основу утврђене методологије, упоредног приказа циљева, критеријума и показатеља са одговарајућим релативним тежинама методама VIKOR, PROMETHEE-GAIA и TOPSIS, у рангирању варијанти, **као оптимално решење се показала друга варијанта - Армирано тло са габионима. Ово решење** представља најбољи избор по резултатима све три примењене методе.

6.2. Закључци

Током истраживања дошло се и до следећих закључака:

Инфраструктурни линијски објекти и системи, и ако јако разноврсни, имају доста узајамних карактеристика по којима је могуће развити и имплементирати јединствени модел вредновања и рангирања варијантних решења њихових потпорних конструкција;

Могуће је развити математички модел линијског инфраструктурног објекта који даје опис реалног система и тај модел искористити на решавање проблема избора оптималног решења потпорних конструкција линијских објеката;

Благовремена и прикладна инклузија заинтересованих актера у процедуру одлучивања, доприноси јаснијем схватању како самог проблема одлучивања, тако и процеса доношења најприхватљивије решења за све (или барем већег дела) заинтересованих учесника;

Расположиви модели вредновања и рангирања алтернативних решења потпорних конструкција линијских објеката не пружа одговор на два најбитнија питања датог процеса: који су битни критеријуми вредновања и ко су битни доносиоци одлука у процесу;

Свеопшти скуп релевантних критеријума за избор оптималног варијантног решења потпорних конструкција није могуће дефинисати, већ се одређује само прелиминарни скуп критеријума за одлучивање а њихову релевантност је потребно потврдити на научно прихватљив начин за сваки следећи пројекат;

Можемо тврдити да је донесена одлука исправна, односно, одабрано оптимално решење, искључиво уколико анализа осетљивости прикаже да решење није осетљиво на измену вредности појединих (или свих) критеријума вредновања за више од 5%;

Спроведеном студијом случаја верификована је валидност и практична употребљивост сложеног метода VIKOR, PROMETHEE-GAIA и TOPSIS модел, развијеног у овом раду;

Верификација валидности модела показује да је испуњен основни, као и сви

специјални циљеви овог истраживања;

Потврдом веродостојности сложеног метода VIKOR, PROMETHEE-GAIA и TOPSIS модела, дата је потврда свим полазним хипотезама истраживања;

Задати комплексни модел ће засигурно пронаћи реалну примену у процесу планирања и пројектовања инфраструктурних објеката јер се по први пут одговара на два набитнија питања у процесу доношења одлука: ко је релевантан донесиоц одлуке (када то није дефинисано неким обавезујућим прописом) и релевантност критеријума да би донесена одлука била најбоља.

Студија случаја и целокупан процес који је обрађен у овом раду потврдио је полазне хипотезе и то:

Хипотеза 1 - могуће је дефинисати начин који обезбеђује идентификацију, класификацију и валоризацију релевантних заинтересованих актера (учесника) у процесу, те њихово правилно и правовремено укључивање у процес одлучивања на одговарајућем нивоу доношења одлука, а затим утврдити степен њихове релевантности и значај за успех пројекта;

Хипотеза 2: могуће је дефинисати научно утемељен начин идентификације, деривације, груписања (кластерисања) и верификације релевантности критеријума вредновања алтернативних решења, те исте користити као полазну основу за развијање модела одлучивања;

Хипотеза 3: могуће је извршити одабир адекватне методе вредновања и рангирања (методе вишекритеријумске анализе) варијанти решења;

Хипотеза 4: могуће је уз помоћ одабране методе извршити вредновање и рангирање алтернативних решења у складу са њиховим релативним тежинама;

Хипотеза 5: могуће је развити сложени, целовити модел одлучивања који ће у себи интегрисати одабир релевантних учесника, релевантних критеријума и адекватне методе вишекритеријумске анализе, те помоћу њега извршити одабир оптималног решења потпорних конструкција;

Хипотеза 6: развијени модел ће бити употребљив, односно, могуће га је применити на реалне проблеме што је могуће проверити на студији случаја.

6.3. Предлози даљих истраживања

Као један од најважнијих примера шта треба учинити да би се истраживање унапредило, потребно је одредити тежину појединих критеријума и потенцијалну допуну постојећој листи критеријума, уз препоруку да се користи тзв. DELPHI метода.

DELPHI метода се заснива на прикупљању, анализи и усаглашавању одговора великог броја стручњака за одређена питања из области која се истражује. Ангажовањем одређеног броја стручњака који анонимном анкетом дају одговоре на прецизно осмишљена и формулисана питања, а која обично могу имати од 10 до 12 питања (у неким случајевима и много више), добили би смо прецизније одређене тежине одређених критеријума. DELPHI метода се може имплементирати у два или три круга. У првом кругу анкете стручњаци би давали одговоре на питања постављена у упитнику. Добијени одговори би се затим анализирали и систематизовали, а на основу њих би се правио још један упитник. У другом кругу, стручњаци су се информисали о резултатима првог круга истраживања, кроз одређене статистичке показатеље, и поново би одговарали на постављена питања. Понекад се и трећи круг спроводи по процедури описаној за други круг анкете.

Допринос овог рада науци огледа се у дефинисању критеријума за оптимизацију проблема санације клизишта при урушавању тла. У раду се истражују различити сценарији изражени кроз одговарајуће тежинске коефицијенте на редослед анализираних алтернатива. У сваком од дефинисаних сценарија одређене су међусобне вредности редоследа дефинисаних алтернатива. За реалан скуп алтернатива, поступак је детаљно објашњен.

Правци даљих истраживања морају да буду усмерени на проширење постојеће базе накнадно прибављеним подацима везаним за изградњу других потпорних конструкција. Даље унапређење модела би се могло постићи и прикупљањем података о изведеним потпорним конструкцијама.

Правци даљих истраживања ће првенствено бити базирани на проширењу базе података и анализи утицаја нових параметара на прецизност модела. Проширивање базе података у погледу података о самом предмету уговарања, односно будућем објекту, треба да обухвати не само податке из тендерске документације већ и увођење параметара и података који на најбољи начин описују реализоване пројекте. Постоји широк спектар потенцијалних параметара који се могу увести као карактеристике објекта, а у једно би представљале и улазне податке модела за процену. На овај начин се пружа могућност процене трошкова и времена изградње не само у поступку уговарања када је дефинисан предмер радова (упит по тендеру), већ и у случајевима када инвеститор дефинише само смернице, тј. Карактеристике које будући објекат мора да задовољи (упит по функционалним параметрима будућег објекта).

Прецизност модела у процесу процене, што је у неколико наврата и наглашено,

зависи од квалитета података у формираној бази података, што представља кључни фактор касније примене резултата модела.

Поред ажурирања базе података о стварно наплаћеним вредностима за реализацију пројеката потпорних конструкција неопходно је дефинисати стварно изведену количину радова према пројекту изведеног стања, како би процене применом формираних модела били прецизније. Наравно неопходно је проширити базу и са подацима који се односе на време реализације у виду стварно утрошеног времена за реализацију. Увођење параметра који ће дефинисати период у току године педвиђен за реализацију радова (рецимо пролеће, лето, јесен или зима) може битно да утиче на време реализације а самим тим и цену, а наравно и почетак експлоатације будућег објекта.

Сваки период би био праћен анализама као што су утицај кишних дана у току периода реализације,

Имплементација модела би могла да буде истражена и за друга тржишта за која постоји могућност формирања одговарајуће база података. Примењена методологија у истраживању би се уз одређена прилагођавања могла применити и на процену трошкова других фаза у животном циклусу пројекта, а такође и на друге врсте грађевинских објеката.

Значајнијим проширењем базе података за изградњу модела може се истражити примена метода ненадгледаног учења, где би се подаци груписали у одређени број кластера, а затим за сваки од кластера формирали појединачни регресиони модели уместо једног интегралног модела.

Примена хибридних модела ансамбала који би били истовремено састављени од модела неуронских мрежа, регресионих стабала, модела сазнованих на методи потпорних вектора итд. би такође могла бити истражена у наредним истраживањима.

Селекција сценарија, као основних и комбинованих модела сценарија тежинских коефицијената, спроведена је у циљу сагледавања широког спектра ефеката вишекритеријумске оптимизације, у функцији примењених модела санација клизишта.

Литература:

1. Andus V., Maletin M., Metodologija projektovanja puteva, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, Srbija, 1993.
2. Baydas, M.; Elma, O.E. An objective criteria proposal for the comparison of MCDM and weighting methods in financial performance measurement: An application in Borsa Istanbul. *Decis. Making: Appl. Manag. Eng.* **2021**, *4*, 257–279. <https://doi.org/10.31181/dmame210402257b>.
3. Bernard, R. Classement et choix en présence de points de vue multiples (la méthode ELECTRE). *Rev. Inform. Rech. Opérationnelle* **1968**, *VI*, 57–75.
4. Berrittella, M.; Certa, A.; Enea, M.; Zito, P. *An Analytic Hierarchy Process for the Evaluation of Transport Policies to Reduce Climate Change Impacts*. Fondazione Eni Enrico Mattei: Milano, Italy, 2007.
5. Brans, J.P. L'ingénierie de la décision; Elaboration d'instruments d'aide à la décision. La méthode PROMETHEE. In *L'aide à la décision: Nature, Instruments et Perspectives d'Avenir*; Nadeau, R., Landry, M., Eds.; Presses de l'Université Laval: Québec, QC, Canada, 1982, pp. 183–213.
6. Brans, J.P., Mareschal, B. (1995) The PROMETHEE VI procedure. How to differentiate hard from soft multi-criteria problems. *Journal of Decision Systems*, *4*, str. 213-223
7. Brans, J.P., Vincke, Ph., Mareschal, B. (1986) How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method. *European Journal of Operational Research / EJOR*, *24*, *2*, 228-238
8. Brans, J.P.; Mareschal, B. *PROMETHEE-GAIA. Une Méthodologie d'Aide à la Décision en Présence de Critères Multiples*. Ellipses: Paris, France, 2002.
9. Brans, J.-P.; Mareschal, B. The PROMCALC & GAIA decision support system for multicriteria decision aid. *Decis. Support Syst.* **1994**, *12*, 297–310. [https://doi.org/10.1016/0167-9236\(94\)90048-5](https://doi.org/10.1016/0167-9236(94)90048-5).
10. Brans, J.-P.; Mareschal, B. The PROMETHEE VI procedure: How to differentiate hard from soft multicriteria problems. *J. Decis. Syst.* **1995**, *4*, 213–223. <https://doi.org/10.1080/12460125.1995.10511652>.
11. Brans, J.P.; Mareschal, B.; Vincke, P. PROMETHEE: A New Family of Outranking Methods in Multicriteria Analysis. In *Operational Research' 84*; Brans, J.P., Ed.; Elsevier Science: North-Holland, Amsterdam, 1984; pp. 477–490.
12. Brans, J.P.; Mareschal, P. The PROMETHEE-GAIA decision support system for multicriteria investigations. *Investig. Oper.* **1994**, *4*, 107–117.

13. Brans, J.P.; Vincke, P. A Preference Ranking Organisation Method (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making). *Manag. Sci.* **1985**, *31*, 647–656.
14. Brans, J.P.; Vincke, P. A preference ranking organisation method: The PROMETHEE method for MCDM. *Manag. Sci.* **1985**, *31*, 647–656.
15. Brans, J.P.; Vincke, P.; Mareschal, B. How to select and how to rank projects: The Promethee method. *Eur. J. Oper. Res.* **1986**, *24*, 228–238. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(86\)90044-5](https://doi.org/10.1016/0377-2217(86)90044-5).
16. Ćirović, G. Plamenac, D., The Flow Networks Approach to Decision Analysis in Construction Industry“, YUJOR – Yugoslav Journal of Operations Research 17(2007) Number 1, pp. 107-124.
17. Ćirović, G.: „Managing Uncertainty in the Construction Industry Through the Rough Set Theory“, YUJOR – Yugoslav Journal of Operations Research 11(2001) Number 2
18. Ćirović, G.: „Primena teorije grubih skupova u analizi odlučivanja u građevinarstvu“ Izgradnja 10/51, (1997).
19. Ćirović, G.; Plamenac, D., Grubi skupovi – primena u građevinarstvu, Monografija, Društvo operacionih istraživača, Beograd, 2005.
20. Davis C., Ivan J., Campbell G., Application of Multi-Criteria Decision Making and Risk Analysis to Congestion Management, University of Connecticut, Connecticut, USA, 1996.
21. de Steiguer, J.E.; Duberstein, J.; Lopes, V. The Analytic Hierarchy Process as a Means for Integrated Watershed Management. In *First Interagency Conference on Research on the Watersheds*; Renard, K.G., Ed. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service: Benson, AZ, USA, 2009; pp. 736–740.
22. Forman, E.H.; Gass, S.I. The Analytic Hierarchy Process—An Exposition. *Oper. Res.* **2001**, *49*, 469–486. <https://doi.org/10.1287/opre.49.4.469.11231>.
23. *Geološka Terminologija i Nomenklatura VIII-2, Inženjerska Geologija, Zavod za Regionalnu Geologiju I Paleontologiju Rudarsko-Geološkog Fakulteta (Geological Terminology and Nomenclature VIII-2, Engineering Geology, Department of Regional Geology and Paleontology, Faculty of Mining and Geology)*; Univerzitet u Beogradu: Brograd, Srbija, 1978.
24. Hwang C., Yoon K., Multiple Attribute Decision Making: Methods and applications, Springer, New York, USA, 1981.
25. Hwang, C.-L.; Lai, Y.-J.; Liu, T.-Y. A new approach for multiple objective decision making. *Comput. Oper. Res.* **1993**, *20*, 889–899. <https://doi.org/10.1016/0305->

0548(93)90109-v.

26. Hwang, C.L.; Yoon, K. *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Springer-Verlag: New York, NY, USA, 1981.
27. Kabir, G.; Sadiq, R.; Tesfamariam, S. A Review of Multi-Criteria Decision-Making Methods for Infrastructure Management. *Struct. Infrastruct. Eng.* **2014**, *10*, 1176–1210.
28. Keeney, R. L., & Raiffa, H. (1976). *Decisions with multiple objectives: Preferences and value tradeoffs*. Cambridge University Press.
29. Kolli, S., Parsaei, H.R. (1992) Multicriteria analysis in the evaluation of advanced manufacturing technology using PROMETHEE.
30. Kuzović, L. *Vrednovanje u Optimiziranju Planova i Projekata Puteva (Evaluation in Optimizing Road Plans and Projects)*; SIT Saobraćaja i veza Jugoslavije: Beograd, Serbia, 1984.
31. Kuzović, L. *Vrednovanje u Upravljanju Razvojem i Eksploatacijom Putne Mreže (Evaluation in Managing the Development and Operation of the Road Network)*. Univerzitet u Beogradu: Beograd, Serbia, 1994.
32. Lu J., Zhang G., Ruan D., Wu F., *Multi Objective Group Decision Making Methods, Software and Applications With Fuzzy Set Techniques*, Imperial College Press, London, Engleska, 2007.
33. Magnani, M., *Tehcnical report on Rough Set Theory for Knowledge in Data Bases*, University of Bologna, 2003.
34. Marković, Lj., Cvetković, M., Milić Marković, Lj., „Multi-Criteria Decision-Making when Choosing Variant Solution of Highway Route at the Level of Preliminary Design“ *FACTA UNIVERSITATIS Series Architecture and Civil Engineering*, 11(1) (2013) 71-87.
35. Martel, J.-M.; Matarazzo, B. Other Outranking Approaches. In *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*; Figueira, J., Greco, S., Ehrogott, M., Eds.; Springer: New York, NY, USA, 2005; pp. 197–259. https://doi.org/10.1007/0-387-23081-5_6.
36. Muhammad, L.J.; Badi, I.; Haruna, A.A.; Mohammed, I.; Academy, M.L. Selecting the Best Municipal Solid Waste Management Techniques in Nigeria Using Multi Criteria Decision Making Techniques. *Rep. Mech. Eng.* **2021**, *2*, 180–189. <https://doi.org/10.31181/rme2001021801b>.
37. Mukhametzyanov, I. Specific character of objective methods for determining weights of criteria in MCDM problems: Entropy, CRITIC and SD. *Decis. Making: Appl.*

- Manag. Eng.* **2021**, 4, 76–105. <https://doi.org/10.31181/dmame210402076i>.
38. Munakata, T., *Fundamentals of the new artificial intelligence: Beyond traditional paradigms*, Springer – Verlag, 1998.
 39. *N 1997-1:2004, Eurocode 7: Geotechnical Design—Part 1: General Rules*; - European Committee For Standardization; Georisk: Brussels, Belgium, 2004.
 40. Navneet, B.; Kanwal Rai, K. *Strategic Decision Making: Applying the Analytic Hierarchy Process*. Springer-Verlag: London, UK, 2004. ISBN 978-1-85233-756-8.
 41. Nikolić I., *Višekriterijumska optimizacija*, Vojnoizdavački zavod, Beograd, Srbija, 1996.
 42. Opricović, S. *Optimizacija Sistema (System Optimization)*; Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu: Beograd, Serbia, 1992.
 43. Opricović, S. *Vikor za Višekriterijumsku Optimizaciju (Victor for Multicriteria Optimization)*; Saobraćajni insitut CIP: Beograd, Serbia, 2010.
 44. Opricović, S. *Višekriterijumska Optimizacija Sistema u Građevinarstvu (Multicriteria System Optimization in Construction)*; Građevinski Fakultet Univerziteta u Beogradu: Beograd, Serbia, 1998.
 45. Opricović, S., G.H. Tzeng, – Extended VIKOR method in comparison with outranking, *European Journal of Operational Research* 178, No.2, pp. 514-529, 2007.
 46. Prašćević,Ž., *Operaciona istraživanja i neke njihove primene u građevinarstvu*, *Izgradnja*, 61, 2007.
 47. Puška, A.; Stojanovic, I.; Maksimović, A.; Osmanović, N. Project Management Software Evaluation by Using the Measurement of Alternatives and Ranking According to Compromise Solution (MARCOS) Method. *Oper. Res. Eng. Sci. Theory Appl.* **2020**, 3, 89–101. <https://doi.org/10.31181/oresta2001089p>.
 48. Rangel, L.A.D.; Gomes, L.F.A.M.; Moreira, R.A. Decision theory with multiple criteria: An aplication of ELECTRE IV and TODIM to SEBRAE/RJ. *Pesqui. Oper.* **2009**, 29, 577–590. <https://doi.org/10.1590/s0101-74382009000300007>.
 49. Rawlings, J., Pantula, S., Dickey, D. *Applied Regression Analysis: A Research Tool*, Springer: New York, NY, USA, 1998.
 50. Saaty, T.L. Relative measurement and its generalization in decision making why pairwise comparisons are central in mathematics for the measurement of intangible factors the analytic hierarchy/network process. *RACSAM 2008 - Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Serie A. Matemáticas*, 102, 251–318. <https://doi.org/10.1007/bf03191825>.
 51. Saaty, T.L.; Peniwati, K. *Group Decision Making: Drawing out and Reconciling*

- Differences*. Pittsburgh; RWS Publications: Pittsburgh, PA, USA, 2008. ISBN 978-1-888603-08-8.
52. Saracoglu, B.O. An Experimental Research Study on the Solution of a Private Small Hydropower Plant Investments Selection Problem by ELECTRE III/IV, Shannon's Entropy, and Saaty's Subjective Criteria Weighting. *Adv. Decis. Sci.* **2015**, 2015, 1–20. <https://doi.org/10.1155/2015/548460>.
 53. Saracoglu, B.O. Selecting industrial investment locations in master plans of countries. *Eur. J. Ind. Eng.* **2013**, 7, 416. <https://doi.org/10.1504/ejie.2013.055016>.
 54. Shanian, A.; Savadogo, O. A non-compensatory compromised solution for material selection of bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) using ELECTRE IV. *Electrochimica Acta* **2006**, 51, 5307–5315. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2006.01.055>.
 55. Skowron, A., Rauszer, C., The discernibility matrices and functions in information system. In R. Slowinski (Ed.), *Intelligent Decision Support – Handbook of Applications and Advances of the Rough Sets Theory*, Kluwer, Dordrecht, 1992.
 56. *Tehnička dok. sanacije klizišta na deonici državnog puta Šabac-Tekeriš-Zavlaka (Technical Documentation for Landslide Remediation on the Section of the State Road Sabac-Tekeriš-Zavlaka)*; Institut za ispitivanje materijala IMS: Beograd, Serbia, 2014.
 57. *Tehnička dokumentacija sanacije klizišta na delu regionalnog puta R-261 od Zajačara ka Boljevcu na km6+412,70 do km 6+540,30, kod toponima "Lubnica" (Technical Documentation for the Rehabilitation of the Landslide on the Part of the Regional Road R-261 from Zajacar to Boljevac at km6 + 412.70 to km 6 + 540.30, near the toponym "Lubnica")*; Institut za Ispitivanje Materijala IMS: Beograd, Serbia, 2010.
 58. *Tehnička dokumentacija sanacije klizišta na delu regionalnog puta IIA-137 (P-127), deonica Krupanj-Mačkov Kamen, km 6+900 (Technical Documentation for Landslide Remediation on the Part of the Regional Road IIA-137 (R-127), Section Krupanj-Mačkov Kamen, km 6 + 900)*; Institut za Ispitivanje Materijala IMS: Beograd, Serbia, 2014.
 59. *Tehnička Dokumentacija Sanacije Klizišta na delu Regionalnog puta II reda P234, Novi Pazar-Rajetiće, na lokalitetu kod fabrike obuće (Technical Documentation for Landslide Remediation on the Part of the Regional Road II Row P234, Novi Pazar-Rajetiće, on the Site Near the Shoe Factory)*; Institut za Ispitivanje Materijala IMS: Beograd, Serbia, 2010.

60. *Tehnička dokumentacija sanacije klizišta na lokalitetu Jezgoviće (Technical Documentation for Landslide Remediation at the Jezgoviće Site)*; Institut za Ispitivanje Materijala IMS: Beograd, Serbia, 2013.
61. *Tehnička dokumentacija sanacije klizišta na lokalitetu Kominje (Technical Documentation for Landslide Remediation at the Kominje Site)*; Institut za Ispitivanje Materijala IMS: Beograd, Serbia, 2013.
62. *Tehnička dokumentacija sanacije klizišta na lokalitetu Pejčina krivina (Technical Documentation for Landslide Remediation at the Pejčina Krivina Site)*; Institut za Ispitivanje Materijala IMS: Beograd, Serbia, 2014.
63. Yorulmaz, K.; Yıldırım, S.K.; Yıldırım, B.F. Robust Mahalanobis Distance based TOPSIS to Evaluate the Economic Development of Provinces. *Oper. Res. Eng. Sci. Theory Appl.* **2021**, *4*, 102–123. <https://doi.org/10.31181/oresta20402102y>.
64. Youssef, M.I.; Webster, B. A multi-criteria decision making approach to the new product development process in industry. *Rep. Mech. Eng.* **2022**, *3*, 83–93. <https://doi.org/10.31181/rme2001260122y>.
65. Visual PROMETHEE 1.4 Manual, 2013, <http://www.promethee-gaia.net> (posećeno:11.1.2022.)
66. <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/LandslideWarning/?src=share> (posećeno:11.1.2022.)
67. http://geoliss.mre.gov.rs/beware/form/guest_page.php (posećeno:11.1.2022.)
68. <http://landslides.usgs.gov/learn/majorls.php> (posećeno:11.1.2022.)
69. <http://prezentacije.mup.gov.rs/sektorzazastituispasavanje/HTML/karta%20rizika%20od%20elementarnih%20nepogoda.html> (posećeno:11.1.2022.)

ПРИЛОГ 1.

редни број циља	ЦИЉЕВИ (КРИТЕРИЈУМИ) ЗА ВРЕДНОВАЊЕ ВАРИЈАНТНИХ РЕШЕЊА	оцена важности циља
1.	Минимални ТРОШКОВИ ИЗГРАДЊЕ	
2.	Минимални ТРОШКОВИ ОДРЖАВАЊА (трошкови редовног периодичног и зимског одржавања)	
3.	Минимални ТРОШКОВИ ЕКСПЛОАТАЦИЈЕ (највиши ниво услуге, најкраће време путовања, најмањи транспортни рад)	
4.	Максимална БЕЗБЕДНОСТ и УДОБНОСТ (просечна брзина вожње, најмањи број саобраћајних незгода)	
5.	Минималне ПОСЛЕДИЦЕ НА ЖИВОТНУ СРЕДИНУ (загађење ваздуха, саобраћајна бука, загађење вода и земљишта)	
6.	Минималне ПРОСТОРНЕ ПОСЛЕДИЦЕ (очување постојећих просторних целина и утицај на природно и културно наслеђе)	
Ако сматрате да је изостављен неопходан циљ коме треба тежити приликом пројектовања, молимо Вас да га допишете		
7.		
8.		
$\Sigma =$		100

У П И Т Н И К

ЗА ПОТРЕБЕ ВРЕДНОВАЊА ВАРИЈАНТНИХ РЕШЕЊА

Подаци о учеснику анкете:

- струка

- година радног стажа

- да ли сте ангажовани на изради Идејног пројекта?

ДА / НЕ

Поштоване колеге,

У циљу објективног упоређења варијантних решења _____

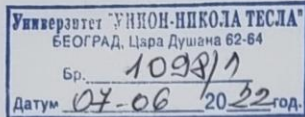
молимо Вас да одговорите на овај упитник, тако што ће те да:

- размотрите наведене циљеве и формирате сопствену представу о важности сваког појединачног циља имајући у виду карактеристике простора и конструкције, и на основу те представе у рубрике упишите оцену њихове важности у распону од 0 до 100;

- већа оцена значи и већу важност циља; ако нпр., циљу 1 доделите оцену 20, а циљу 2 оцену 10, то значи да је циљ 1 два пута важнији од циља 2;

- када се оцене за сваки од наведених циљева саберу, збир мора бити 100; ако једном циљу придодате 100 поена то значи да сви остали циљеви нису важни (тј. имају оцену 0).

Хвала на сарадњи



Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани **Никола Гвоздовић**

број уговора са датумом потписивања 2129 од 22.10.2012.

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

**„ПРИМЕНА ВИШЕКРИТРИЈУМСКЕ ОПТИМИЗАЦИЈЕ КОД ИЗБОРА
КОНСТРУКТИВНОГ РЕШЕЊА САНАЦИЈЕ КЛИЗИШТА“**

- 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 ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

У Београду, 07.06.2022.

Потпис докторанда

Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора **Никола Гвоздовић**

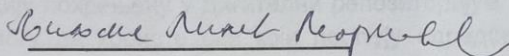
Број уговора са датумом потписивања **2129 од 22.10.2012.**

Студијски програм **Грађевинарство**

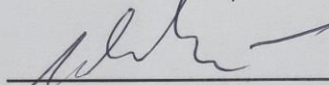
Наслов рада **„ПРИМЕНА ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКЕ ОПТИМИЗАЦИЈЕ КОД ИЗБОРА
КОНСТРУКТИВНОГ РЕШЕЊА САНАЦИЈЕ КЛИЗИШТА“**

Ментор Проф. др Љиљана Милић Марковић

Ко-ментор Проф. др Горан Ћировић



потпис ментора



потпис ко-ментора

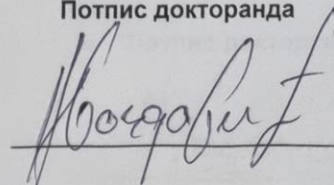
изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао Универзитетској библиотеци Универзитета „Унион-Никола Тесла“ у Београду.

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 у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета „Унион- Никола Тесла“ у Београду.

У Београду, 07.06.2022.

Потпис докторанда



Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку Универзитет „Унион-Никола Тесла“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета унесе моју докторску дисертацију под насловом:

„ПРИМЕНА ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКЕ ОПТИМИЗАЦИЈЕ КОД ИЗБОРА КОНСТРУКТИВНОГ РЕШЕЊА САНАЦИЈЕ КЛИЗИШТА“

која је моје ауторско дело.

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

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

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

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

У Београду, 07.06.2022.

Потпис докторанта

