

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
РУДАРСКО-ГЕОЛОШКИ ФАКУЛТЕТ

Александар М. Додеровић

**РАЗВОЈ ХИБРИДНОГ МОДЕЛА ЗА
ОПТИМИЗАЦИЈУ ЗАВРШНЕ КОНТУРЕ
ОДЛАГАЛИШТА У ПОВРШИНСКОЈ
ЕКСПЛОАТАЦИЈИ ЛЕЖИШТА
МИНЕРАЛНИХ СИРОВИНА**

докторска дисертација

Београд, 2024.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MINING AND GEOLOGY

Aleksandar M. Doderović

**HYBRID MODEL DEVELOPMENT FOR
OPTIMISATION OF WASTE DUMP DESIGN IN
SURFACE MINING OF MINERAL RESOURCES**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2024.

Ментор:

др Дејан Стевановић, вандредни професор,

Ужа научна област: Пројектовање и планирање површинских копова

Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет

Комисија:

др Владимир Чебашек, редовни професор,

Ужа научна област: Механика стена

Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет

др Томислав Шубарановић, вандредни професор,

Ужа научна област: Површинска експлоатација лежишта минералних сировина

Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет

др Даниел Кржановић, виши научни сарадник,

Ужа научна област: Техничко-технолошке науке-Рударство

Институт за рударство и металургију Бор

Датум одбране: _____

Захвалност

Велику захвалност, у првом реду, дугујем свом ментору проф. др Дејану Стевановићу, који је прије свега дефинисао занимљиву и инспиративну тему дисертације, на несебичној помоћи, бројним савјетима, константном усмјеравању и подршци, људској и професионалној.

Израда хибридног модела не би била могућа без подршке, стрпљења, разумјевања и безрезервне братске помоћи мог млађег брата Светозара-Милана Додеровића.

Захвалност колегама из одјелења Угаљ инжењеринг, првенствено Саши Степановићу на безрезервној помоћи.

Највећу захвалност за подршку, разумјевање, стрпљење и то што ме трпи такав какав сам дугујем супрузи Тијани.

И на крају захвалност родитељима што сам постао то што јесам.

РАЗВОЈ ХИБРИДНОГ МОДЕЛА ЗА ОПТИМИЗАЦИЈУ ЗАВРШНЕ КОНТУРЕ ОДЛАГАЛИШТА У ПОВРШИНСКОЈ ЕКСПЛОАТАЦИЈИ ЛЕЖИШТА МИНЕРАЛНИХ СИРОВИНА

Резиме

Површинска експлоатација минералних сировина захтијева претходно откопавање значајних (милионских) количина јаловине, које је неопходно транспортовати до локације на којој ће се она трајно одложити. Традиционални приступ избора локације и дизајна одлагалишта се карактерише парцијалним приступом, заснованом на анализи неколико водећих критеријума као и на личном искуству инжењера, често занемарујући синергетски ефекат осталих утицајних фактора

Технолошке операције које се односе на манипулацију јаловином, међу којима предњачи транспорт, генеришу највећи дио трошкова у површинској експлоатацији. Такође, цјелокупан процес експлоатације додатно је ограничен еколошким и административним нормама. Самим тим оптимизација одлагања, којом би се обухватили сви елементи попут дефинисања дизајна одлагалишта, минимизација негативних економских и еколошких фактора јесте начин да се на читав систем експлоатације оствари највећи позитиван утицај.

У склопу дисертације приказано је истраживање чији је циљ формирање хибридног модела за оптимизацију завршне контуре одлагалишта. Формирани модел је заснован на кординисаној примјени савремених и верификованих метода (Monte Carlo, генетски алгоритам, АНР) са искуством инжењера (хеуристичка анализа резултата).

У научном смислу потврђена је могућност развоја хибридног модела способног да на нов, јединствен и свеобухватан начин, омогући генерисање оптималне (или блиске оптималној) завршне контуре одлагалишта. Практичан допринос огледа се у могућности примјене формираног модела као алата за генерисање оптималног рјешења у графичком и аналитичком облику на реалним примјерима. На овај начин оптимизују се трошкови **експлоатације и побољшавају перформансе пројекта.**

Кључне ријечи: оптимизације завршне контуре одлагалишта, хибридни модел, површинска експлоатација, генетски алгоритам

Научна област: Рударско инжењерство

Ужа научна област: Пројектовање и планирање површинских копова

УДК број: 622.063.8:622'17:005.591.1(043.3)

HYBRID MODEL DEVELOPMENT FOR OPTIMISATION OF WASTE DUMP DESIGN IN SURFACE MINING OF MINERAL RESOURCES

Abstract

Surface mining operations involve the initial excavation of significant quantities of waste, often on the scale of millions of cubic meters, requiring their subsequent transport to dedicated disposal sites. Traditional methodologies for site selection and waste dump design typically take a fragmented approach, relying on the analysis of specific criteria and the empirical knowledge of engineers, potentially overlooking the synergistic interactions among various influential factors.

Technological procedures, particularly transportation, are the primary cost drivers in waste management within surface mining contexts. Additionally, compliance with environmental regulations and administrative standards further limits mining activities as a whole. Consequently, optimizing waste disposal strategies, including careful design considerations and the mitigation of adverse economic and environmental impacts, is of paramount importance for enhancing the overall efficiency of mining operations.

Presented dissertation is a comprehensive investigation aimed at developing a hybrid model for optimizing the final waste dump design. This model integrates contemporary, validated methodologies, including Monte Carlo simulation, Genetic algorithms, and Analytic Hierarchy Process (AHP), supported by empirical insights derived from engineering expertise.

In a scientific sense, the possibility of development and the use of a hybrid model capable of generating an optimal (or close to optimal) waste dump design in a new, unique and comprehensive way, has been confirmed.

The practical contribution is reflected in the possibility of applying the formed model as a tool for generating a set of optimal solutions in graphic and analytical form on real examples. In this way, exploitation costs are optimized and project performance is improved.

Keywords: waste dump design optimization, hybrid model, surface mining, genetic algorithm

Scientific field: Mining engineering

Scientific subfield: Design and planning of surface mines

UDC: 622.063.8:622'17:005.591.1(043.3)

САДРЖАЈ

1	Увод	13
1.1	Значај и циљ истраживања	14
1.2	Структура дисертације са кратким прегледом поглавља	15
2	Преглед литературе	18
2.1	Кратак опис проблема одлагања јаловинског материјала	18
2.2	Постојећи модели и преглед литературе	19
2.3	Недостаци савременог приступа	21
3	Технолошка фаза одлагања јаловинског материјала	22
3.1	Формирање одлагалишта у површинској експлоатацији	23
3.2	Критеријуми и ограничења дефинисања завршне контуре одлагалишта	24
3.3	Основни типови одлагалишта	27
3.3.1	Подјела одлагалишта према локацији	29
3.3.2	Подјела одлагалишта према броју ревира које опслужују	33
3.3.3	Подјела одлагалишта према животном вијеку одлагалишта	34
3.3.4	У складу са морфологијом терена и позицијом формирања одлагалишта	34
3.3.5	Подјела одлагалишта према конзистенцији одложеног материјала	38
3.3.6	Подјела одлагалишта према примјењеној опреми за одлагање	41
3.3.7	Подјела одлагалишта према току материјала	47
3.3.8	Подјела одлагалишта према начину транспорта јаловине	47
3.3.9	Подјела одлагалишта према напредовању и динамици развоја радова	48
3.3.10	Подјела одлагалишта према броју етажа (слојева)	50
3.4	Геометријски параметри одлагалишта	53
3.4.1	Површина основе одлагалишта	55
3.4.2	Завршна косина одлагалишта	55
3.4.3	Радна косина одлагалишта	56
3.4.4	Бочне косине одлагалишта	57
3.4.5	Етажа одлагалишта	57
3.4.6	Горња површина одлагалишта	58
3.5	Технолошки параметри рада опреме на одлагању	59
3.6	Рекултивација и еколошки аспекти	63
4	Развој хибридног модела за оптимизацију завршне контуре одлагалишта	65
4.1	Циљ и задатак развијеног модела	66
4.2	Коришћене методе	66
4.2.1	Метода аналитичко хијерархијског процеса (АНР метода)	67
4.2.2	Monte Carlo метода (Monte Carlo симулација)	69
4.2.3	Генетски алгоритам	70
4.3	Алгоритам развијеног хибридног модела	74
4.3.1	Корак 1 - Припрема података и дефинисање почетне популације тачака (рјешења) 76	
4.3.2	Корак 2 - Оптимизација одлагалишта – функција циља, ограничења и варијабле	83
4.3.3	Корак 3 - Хеуристичка анализа резултата оптимизације и коначно пројектовање одлагалишта	89
5	Примјер употребе развијеног хибридног модела на металном лежишту	92

5.1	Опис локације површинског копа Бувач	92
5.2	Поступак оптимизације завршне контуре спољашњег одлагалишта на површинском копу Бувач	96
5.2.1	Анализа ширег подручја површинског копа Бувач	96
5.2.2	Дефинисање радног простора (интересна зона).....	99
5.2.3	Подијела интересне зоне	100
5.2.4	Процијена вриједности земљишта унутар интересне зоне	104
5.2.5	Оптимизација.....	105
5.2.6	Резултати оптимизације.....	107
5.2.7	Хеуристичка обрада резултата рада хибридног модела.....	108
6	Закључак и препоруке за даљи рад	113
	Литература	117

Списак слика

Слика 3.2.1 Утицајни фактори на избор локације одлагалишта према Hawley и Cuning [44]	26
Слика 3.3.1 Спољашње одлагалиште Јагњило [43]	29
Слика 3.3.2 Унутрашње одлагалиште Дрмно [43]	30
Слика 3.3.3 Примјер анализираних позиција фронта радова унутрашњег одлагалишта и откопних етажа на крају 2023. и 2028. године [52]	31
Слика 3.3.4 Позиција спољашњег и унутрашњег одлагалишта површинског копа Гацко-Централно поље [43]	32
Слика 3.3.5 Унутрашње одлагалиште поље Б - Гацко [43]	33
Слика 3.3.6 Равничарски тип одлагалишта [53]	35
Слика 3.3.7 Брдски тип одлагалишта [54]	35
Слика 3.3.8 Одлагалиште формирано унутар долине [43]	36
Слика 3.3.9 Модел одлагалишта управног на долину	37
Слика 3.3.10 Одлагалиште чврстог отпада [43]	39
Слика 3.3.11 Одлагалиште мокрог отпада са формираним насипом од материјала који се депонује [43]	40
Слика 3.3.12 Изградња касета за депоновање гипса на унутрашњем одлагалишту површинског копа Дрмно [56]	41
Слика 3.3.13 Формирање одлагалишта одлагачем директно повезаним на роторни багер [57]	42
Слика 3.3.14 Одлагалиште формирано транспортним мостовима [58]	43
Слика 3.3.15 Примјер формирања одлагалишта у комбинацији жељезничког транспорта и ужетног багера кашикара [59]	44
Слика 3.3.16 Примјер камионског одлагалишта [60]	45
Слика 3.3.17 Континуални и дисконтинуални транспорт [43]	48
Слика 3.3.18 Паралелан развој фронта радова	49
Слика 3.3.19 Лепезасти развој фронта радова	49
Слика 3.3.20 Кружни развој фронта радова	50
Слика 3.3.21 Комбиновани (лепезасто-паралелно) развој радова	50
Слика 3.3.22 Једноетажно одлагалиште откопаног материјала на откопаном на површинском копу Велики Кривељ [61]	51
Слика 3.3.23 Примјер двоетажног одлагалишта [54]	52
Слика 3.3.24 Унутрашње вишеетажно одлагалиште површинског копа Дрмно [43]	53
Слика 4.4.1 Основни елементи одлагалишта	54
Слика 4.4.2 Конструктивни (геометријски) елементи одлагалишта	54
Слика 4.4.3 Основе одлагалишта	55
Слика 4.4.4 Рад одлагача формирањем дубинске и висинске подетаже [43]	58
Слика 3.5.1 Технолошка шема одлагања дисконтинуалном опремом	61
Слика 3.5.2 Технолошка шема одлагања континуалном опремом	62
Слика 3.6.1 Рекултивисано спољашње одлагалиште површинског копа Дрмно [43]	64
Слика 4.2.1 Илустративна шема функционисања АНР методе [1]	68
Слика 4.2.2 Генерални алгоритам детерминистичких симулација [91]	69
Слика 4.2.3 Генерални алгоритам детерминистичких симулација [91]	70
Слика 4.2.4 Општи пример и фазе функционисања Гентског алгоритма [1]	73
Слика 4.3.1 Алгоритам хибридног модела [1]	75
Слика 4.3.2 Примјер подјеле Зоне интереса на зоне и подзоне (парцеле)	78
Слика 4.3.3 Просторни распоред насумично генерисаних тачака	81
Слика 4.3.4 Формирање контура одлагалишта од насумичних тачака [1]	83
Слика 4.3.5 Аналитички облик резултата оптимизације [1]	89
Слика 4.3.6 Аналитички облик резултата оптимизације [1]	90
Слика 5.1.1 Позиција површинског копа Бувач [1] [107]	93

Слика 5.1.2 Површински коп Бувач [108]	94
Слика 5.1.3 Распоред рударских објеката у окружењу површинског копа Бувач [107]	95
Слика 5.2.1 Распоред природних и вјештачких објеката на површини терена [107]	97
Слика 5.2.2 Просторни распоред земљишта према врсти [107]	98
Слика 5.2.3 Граница радног простора и интересне зоне [107]	100
Слика 5.2.4 Подјела интересне зоне на подзоне [107]	102
Слика 5.2.5 Просторни распоред генерисаних одлагалишта [1]	109
Слика 5.2.6 Просторни распоред генерисаних одлагалишта [1]	111
Слика 5.2.7 Изглед пројектованих завршних контура одлагалишта [1]	112

Списак табела

Табела 5.2.1 Фактори и коефицијенти из АНР анализе [1].....	104
Табела 5.2.2 Основни параметри оптимизација.....	107
Табела 5.2.3 Карактеристике 15 најбољих одлагалишта [1].....	109
Табела 5.2.4 Поређење перформанси анализираних варијанти [1].....	110

*„И ријека није била ријека у самом почетку,
и није пужно да не буде попорница до краја“*

Бранимир Џони Штулић



1 УВОД

Површинска експлоатација минералних сировина реализује се након и током откопавања потребних количина откривке и јаловине. Та потребна количина зависи од конкретних ситуација, односно услова који владају у лежишту, а описује се односом количине откривке (јаловине) неопходне за експлоатацију јединичне количине руде (коэффицијент откривке). Што је већа вриједност коэффицијента то су потребне количине откопане откривке и јаловине већа. Поред откривања и припреме одређених количина минералне сировине, током процеса експлоатације откопавање подразумева обезбјеђење сигурних услова рада људи и опреме, као и стабилност косина. Све откопане количине јаловине неопходно је премјестити на нову локацију и тамо их одложити.

Процес управљања јаловинским материјалом подразумева манипулацију великим количинама јаловинског материјала које могу да износе и неколико стотина милиона m^3 и заузимање велике површине терена. Поред тога, транспорт значајних (милионских) количина материјала се одвија на растојањима која се по правилу мјере са више километара. Све поменуте технолошке операције које се односе на манипулацију јаловином, међу којима предњачи транспорт, по правилу генеришу највећи дио укупних трошкова у површинској експлоатацији. У исто вријеме, јасно је, али и важно напоменути, да се процес управљања јаловинским материјалом не може избјећи, односно представља неизоставну технолошку операцију у процесу експлоатације минералних сировина.

У стручној јавности широко је прихваћена чињеница да је највриједнији објекат површинске експлоатације сам површински коп, међутим често се занемарује значај одлагалишта. Разлог за ово лежи у чињеници што вриједност одлагалишта има негативан предзнак, односно њиховим формирањем се не генерише профит већ искључиво неизоставан трошак рударског пројекта. Имајући у виду да се одлагањем третирају стотине милиона кубних метара материјала, чији је раст трошкова ближи експоненцијалном него линеарном кроз вријеме, јасно је да се успјешним управљањем овом технолошком операцијом у значајној мјери могу унаприједити економске перформансе цјелокупног рударског пројекта.

На основу наведеног, али и примјера из праксе, може се рећи да технолошки процес одлагања представља један од кључних дијелова у процесу експлоатације на површинским коповима са технолошког, економског и еколошког аспекта. За разлику од рада са минералном сировином, чије се евентуално депоновање врши на припремљеним дијеловима индустријског комплекса (депонијама), код одлагања јаловине ситуација је нешто другачија и комплекснија. Димензије депонија минералне сировине одговарају капацитету производње за максимално неколико мјесеци, док се на одлагалиштима врши константно одлагање јаловине, а количина одложеног материјала кумулативно увећава. Одлагалиште, за разлику од депоније, готово увијек има трајни карактер.

Самим тим, оптимизација одлагања, којом би се обухватили сви елементи попут одабира локације и дефинисања дизајна одлагалишта, минимизације негативних економских и еколошких фактора, јесте предуслов за остварење укупног потенцијала сваког рударског пројекта.



О потреби да се одлагање јаловине оптимизује доста говоре околности у којима се реализује савремена рударска активност, а два најважнија аспекта су економски и еколошки. Тржишна утакмица све више заоштрава економске услове у којима се експлоатација на површинским коповима одвија, док су еколошке последице експлоатације често на удару организација за заштиту животне средине. У постојећој законској регулативи која се примјењује у Републици Србији, а слична рјешења су примјењена у региону, дате су основе и ограничења за рјешавање проблема одлагања јаловине и рударског отпада у цјелини. Осим националне законске регулативе данас постоји обавеза да се овај процес одвија и у складу са директивама Европске уније.

1.1 Значај и циљ истраживања

Дефинисање завршне контуре одлагалишта, и дизајна и локације, се врши на основу објективних фактора и услова, у складу са општим препорукама, али често инжењерске одлуке имају значајну субјективну компоненту засновану на личном искуству или преференцијама. Рјешења и одлуке која се доносе на овај начин су најчешће засноване на једном (или пар) водећих критеријума (најчешће минимизација трошкова), а ријетко уз узимање у обзир свих релевантних фактора, који у стварности дефинишу оптималну завршну контуру одлагалишта. Неријетко се у оваквим ситуацијама доношење одлуке заснива на разматрању више различитих фактора, приликом чега је елемент субјективности пројектанта присутан. С обзиром на фактор субјективности, подједнако искусни пројектанти доћи ће до мање или више различитих рјешења (никад истих). Оваква ситуација негативно утиче на потенцијал рударског пројекта, што у значајној мјери смањује маневарски простор и онемогућава му да оствари максималне економске и технолошке перформансе. У случају посебно значајних грешака, може довести и до фаталног исхода за цјелокупан пројекат.

Читав процес дефинисања завршне контуре одлагалишта, без неког оптимизационог алгоритма, је комплексан и временски захтијеван процес, а резултат цјелокупног процеса у значајној мјери се заснива на искуству. Ово се нарочито одражава на потребу сагледавања свих утицајних фактора, као и међусобних интеракција истих. Свеобухватност великог броја фактора добија на значају ако се узме у обзир да се све ово ради у почетним фазама експлоатације, када је доступност и поузданост информација о простору на коме је предвиђена реализација пројекта веома мала. Све упућује на закључак да се генерисање оптималних рјешења (блиским оптималном) не може обезбиједити без постојања комплексног оптимизационог алгоритма.

Рјешавање једног овако комплексног проблема, на који утиче више фактора о којима се има мало сазнања, није изводљива примјеном једне универзалне методе. Да би се у почетним фазама експлоатације, фазама планирања и пројектовања, могле донијети оптималне и исправне одлуке погодно је у сам процес увести више метода. Оне служе као подршка при доношењу одлуке у процесу планирања и пројектовању будућих активности и обезбјеђује да се недостаци једне методе неутралишу примјеном других.

Основни циљ истраживања предметне докторске дисертације је развој хибридног модела за оптимизацију завршне контуре одлагалишта. Ово подразумева оптимизацију према задатим критеријумима (технолошким, економским, еколошким, итд.) и аутоматско или семиаутоматско дефинисање оптималне локације и геометрије одлагалишта. Развијени модел,



заснован је на савременим научним методама, а бенефити приступа пластично су приказани на примјерима из праксе.

Сврха модела је да:

- ✕ Идентификује и квантификује битне параметре при конструкцији оптималне контуре одлагалишта површинског копа.
- ✕ За задате критеријуме обезбједи генерисање оптималне (или блиске оптималној) завршне контуре одлагалишта.
- ✕ Смањи ниво субјективних одлука, а тиме и нивоа грешака, у процесу стратешког и инвестиционог планирања површинске експлоатације.
- ✕ Смањи број потребних инжењерских сати рада и тиме олакша процес пројектовања.

Методологија примјењена у развоју модела, као и флексибилна могућност употребе утицајних критеријума, проширује функционалност модела и на проблеме одабира прелиминарне локације не рударског отпада, као и депонија минералних сировина.

Основна хипотеза је да се развојем и примјеном хибридног модела може дефинисати оптимална контура спољашњег одлагалишта јаловине и тиме значајно оптимизовати неизбјежна, технолошка операција одлагања, а са њом и цјелокупан процес површинске експлоатације.

Генерална замисао је да на идејном нивоу хибридни модел функционише тако да Стохастичким одабиром (Монте Карло метода) основних геометријских параметара одлагалишта, могу се генерисати вишеструка изводљива рјешења одлагалишта. Која се даље примјеном оптимизационог алгорита (Генетски алгорита) могу унаприједити до нивоа оптималног или рјешења блиског оптималном. Вриједновање, оцјењивање и рангирање рјешења (унутар генетског алгорита) вршиће се на основу критеријума чији се тежински утицај одређује вишекритеријумским методама (АНР).

Крајњи производ хибридног модела биће генерисана оптимална контура одлагалишта са генералном геометријом, представљена на начин који омогућава детаљно приказивање и манипулацију у CAD софтверима. Модел је хибридан јер у различитим фазама рада укључује и повезује различите оптимизационе методе.

1.2 Структура дисертације са кратким прегледом поглавља

Цјелокупна дисертација је подјељена у 6 поглавља у складу са постављеним циљевима и примјењеном методологијом. Свако поглавље се састоји, из више потпоглавља у складу са комплексношћу обрађеног дијела дисертације.

Прво поглавље је уводно поглавље, у склопу кога је приказан кратак преглед проблематике која је у фокусу дисертације, кратак опис хибридног модела и примјењених метода, али и осврт на претходно дефинисан циљ и основну хипотезу дисертације.

Друго поглавље даје кратак преглед актуелних истраживања и коришћене литературе у области одлагања јаловине и откривке на површинским коповима. Такође, приказана је и



примјена савремених метода оптимизације (са освртом на стохастичке) за цјелокупан процес одлагања, као и појединачних дијелова који се односе на избор локације одлагалишта, дефинисање дизајна и смањење трошкова одлагања.

Треће поглавље даје опис технолошке фазе одлагања, од момента избора локације одлагалишта и анализе утицајних фактора, до фаза рекултивације и осврта утицаја одлагалишта на животну средину. Посебно мјесто у склопу поглавља припало је и дијелу који се односи на подјелу одлагалишта, основне геометријске елементе одлагалишта и технологију одлагања и формирања одлагалишта. У склопу овог поглавља приложен је већи број фотографија прикупљен у дужем временском периоду. С обзиром на неправедно запостављање процеса одлагања, направљен је осврт на цјелокупну технолошку операцију одлагања и формирања одлагалишта.

Четврто поглавље даје теоретске основе и детаљан опис развоја хибридног модела за оптимизацију завршне контуре одлагалишта. Поред циља и задатка модела, у посебном потпоглављу приказане су и описане коришћене методе које су интегрисане и представљају саставни дио хибридног модела. У посебном дијелу четвртог поглавља дат је детаљан опис структура хибридног модела, редослијед радњи и поступака, као и моменти у којима се и на који начин примјењују одређене методе.

Пето поглавље даје примјер примјене хибридног модела за оптимизацију завршне контуре одлагалишта у реалним условима (површински коп Бувач, ArcelorMittal доо Приједор). Кроз студију случаја на реалном примјеру приказан је начин на који се примјењује формирани хибридни модел у цјелости, али и појединачана примјена сваке методе. Опис начина на који функционише модел обухватио је и цјелокупан сет припремних радњи за обрађивани примјер, али и сет општих препорука. Како би се што боље објаснио начин функционисања модела и приказали његови бенефити, сам сценарио студије случаја је поједностављен. Кроз приказани примјер извршена је верификација функционалности формираног хибридног модела

Шесто поглавље се односи на стручне закључаке цјелокупне дисертације и остварених резултата, уз осврт на остварене научне и практичне доприносе како цјелокупне дисертације тако и самог модела. Поред изнијетих закључака на приказане учинке у склопу овог поглавља дате су и препоруке за наставак научно-истраживачког рада како би се постојећи хибридни модел у будућности унаприједио.

Након тога приказан је списак коришћене литературе у дисертацији, хронолошки у складу са редослиједом појављивања у дисертацији.



Слика 1.1 Приказ структуре дисертације



2 ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ

2.1 Кратак опис проблема одлагања јаловинског материјала

Савремено рударство, а нарочито површинска експлоатација лежишта минералних сировина је веома значајна привредна грана, чији је утицај на друштво стално присутан, још од развоја првих цивилизација. Кроз историју, снага заједница мјерила се у степену развијености привредне, а нарочито тешке индустрије, чије је функционисање незамисливо без квалитетних сировина. Овај утицај није се промјенио до модерног доба, а континуитет утицаја је неспоран.

На процес експлоатације утиче велики број фактора, који генеришу међусобно супростављене утицаје. Бројност фактора, њихов карактер, међусобни однос и последица њиховог дјеловања основни је разлог сложености рјешавања проблематике експлоатације и процеса одлагања јаловине унутар система експлоатације веома сложен за рјешавање и реализацију.

Успијешност пословања рударских компанија на тржишту и реализација рударских пројеката у великој мјери зависи од управљања трошковима [1]. Конкретно, манипулација великим количинама материјала (нарочито сегмент транспорта) има највећи утицај на генерисање трошкова у цјелокупном процесу рударске активности, што је потврђено искуствима из процеса производње, као и великим бројем публикованих радова [2, 3, 4, 5, 6, 7]. Поред трошкова, које генерише рударска активност, на њихово повећање додатно утиче и један новитет, а то је транзиција од енергије фосилних горива ка чистој енергији. У фокусу ове транзиције се све више налази модерна рударска индустрија [1]. Многе земље широм свијета су прихватиле принципе транзиције чисте енергије као званичну политику. Тенденција овог новог приступа је да се дефинишу строге границе емисије CO₂, као облик борбе против климатских промјена интеграцијом више зелене и енергије из обновљивих извора [8]. Многи аутори су објавили радове на ову тему у области прераде угља [9] и металних руда [8, 10, 11].

При експлоатацији неопходно је откопати и транспортовати велике количине откривке и јаловине на локацију изван површинског копа (у великом броју случајева) како би се обезбиједили услови да се реализује откопавање руде [12]. Мањи дио јаловинских материјала који се откопавају у процесу експлоатације могуће је користити за израду путева, насипа и других објеката у функцији експлоатације [13, 14], док је већи дио неопходно одлагати на одлагалиштима [15]. У појединим случајевима, поред основне минералне сировине, могу се јавити и пратеће сировине које се могу експлоатисати повремено или стално, са константним или промјенљивим капацитетом, те оне могу имати двојак карактер, као минерална сировина или као јаловина када се не пласира на тржиште. Рад са јаловином, откопавање, транспорт и одлагање су операције које искључиво генеришу трошкове, за разлику од истих ових операција са рудом. Однос количине руде и јаловине које је потребно откопати у циљу реализације експлоатације у рударству је дефинисана коефицијентом откривке. У већини случајева вриједност овог коефицијента је већа од један (постоје веће количине откривке и јаловине од руде), као и чињеницом да су капацитети и раздаљине транспорта руде приближно константне. Процес депоновања и одлагања јаловине, карактерише да се количина одложеног материјала акумулира, за разлику од руде која се на депонијама задржава привремено или се директно из површинског копа усмјерава према потрошачу. Резултати континуираног одлагања јаловине огледају се у све већим трошковима који су последица повећања



удаљености и висине до које се транспортује материјал, а у складу са ширењем депоније у хоризонталној и вертикалној равни [16].

Технолошке операције које се односе на рад са јаловином утицаће на повећавање укупних трошкова и у будућности. Пад квалитета руде у лежиштима и тренд смањења граничних садржаја, директно се одражавају на повећање коефицијента откривке [17, 18, 19, 20] и потребом за ископавањем већих количина јаловине по јединици руде. Стога, оптимизација управљања јаловинским материјалом (посебно транспорта и одлагања) има потенцијал да значајно побољша укупну вриједност пројекта и веома је пожељна. Иако је ово широко признато, многи аутори се слажу да управљању отпадом није посвећена довољна научна и стручна пажња. Li у својим радовима [16, 21, 22] са сарадницима тврди да је тренутно у рударској пракси фокус усредсређен на палирање процеса експлоатације, односно на руду и да је мало пажње посвећено одлагању јаловине. Fu и остали аутори [23], наводе да се планирање процеса одлагања и управљања отпадом своди на ручни (интуитивни) избор локације отпада по принципу најкраћа дистанца- најбоље рјешење. На овај начин се обезбјеђује смањење (тренутних) трошкова, односно испуњавање краткорочних циљева, док су сви дугорочни циљеви занемарени. Овакав приступ и однос према технолошкој операцији која генерише највећи дио трошкова може да се окарактерише као веома потцијењивачки. Све ово указује и на то да постоји велика потреба и простор за унапређење цјелокупне приче која је везана за управљање јаловинским материјалом, како са научне тако и са практичне стране.

2.2 Постојећи модели и преглед литературе

У стручној и научној пракси постоји много радова који се баве проблематиком управљања јаловином, којима су обухваћени специфични дијелови овог процеса. Од свих описаних тема најчешће анализирана метода је избор оптималне локације одлагалишта. Kumral и Dimitrakopoulos [12] развили су Tabu алгоритам за претрагу (TS) чији је циљ избор оптималних одлагалишта јаловине. Приликом анализе и разраде модела аутори су узели у обзир финансијске, еколошке и безбједносне аспекте како би оптимизовали могућност одлагања отпада на пет потенцијалних локација из шест унапред дефинисаних рудника. Najarian и Osanloo [24] идентификовали су факторе који имају највећи утицај приликом избора локације одлагалишта. Том приликом развили су математички модел заснован на линеарном програмирању за проналажење одговарајуће локације одлагалишта, а главни параметар одлучивања односио се на трошкове изградње транспортних путева. Закључак који износе аутори је да најближа одлагалишта нису неминовно и оптимална рјешења. Ближа одлагалишта генеришу мање нормативне трошкове, али како аутори наводе потребно је узети у обзир земљане радове и трошкове изградње саобраћајнице. Последњих година, примјетан је нешто већи број радова који избор одговарајуће локације одлагалишта базирају на примјени метода вишекритеријумског одлучивања [25, 26, 27, 28], а такође је значајна и примјена географских информационих система (GIS) приликом избора локације одлагалишта [29]. Код ових метода главни фокус је на правилном одабиру фактора који утичу на избор локације одлагалишта и његовим управљањем током животног вијека. У наведеним радовима користе се различите математичке методе и велики број различитих фактора груписаних у скупове како би се одредила одговарајућа локација одлагалишта. Међутим, анализиране локације за одлагалиште су углавном унапред дефинисане и бира се најбоља из скупа од неколико локација сличних карактеристика.



Управљање процесом одлагања јаловине и откривке, свакако је препознат као проблем, што је и очекивано за технолошку операцију која генерише већину трошкова. Метода мјешовитог цјелобројног програмирања (MIP) је доста често примјењивана приликом обрађивања теме одлагања и оптимизације одлагалишта. Li и остали аутори ову методу користе у циљу смањења укупне транспортне удаљености која је дефинисана као функција циља, односно смањење броја камиона у сусједним годинама експлоатације [22]. Поред смањења трошкова насталих транспортом исти аутор у радовима [16, 21, 22] ову методу користи и у циљу спречавања нежељених ефеката на животну средину. Уз помоћ ове методе аутоматски је генерисан план одлагања сваког блока јаловине на тачно одређено мјесто. На овај начин отклоњена је могућност негативног еколошког утицаја одлагалишта на животну средину кроз могућност формирања киселих дренажних вода. Ови фактори и ограничења кориштени су као објективне функције које могу да имају утицај на оптималан распоред јаловине приликом одлагања. У поменутиим студијама разматрано је управљање јаловином у случају претходно дефинисаних контура одлагалишта, односно није разматрано оптимизовање завршене контуре одлагалишта, као и избор оптималне локације одлагалишта.

Одлагање откривке и јаловине на унутрашња одлагалишта одлагалиста разматрана је у неким студијама и оцењена као веома повољна опција. [30, 31, 32, 33]. Формирање унутрашњих одлагалишта је најчешће везано за површинске копове угља, али не и искључиво само за њих. Услови који владају у лежишту, облик и локација лежишта, су фактори који директно утичу на могућност формирања унутрашњих одлагалишта. Sari и Kumral [34] су развили модел заснован на MIP, који поред одлагања јаловине на спољашња одлагалишта обухвата и формирање и унутрашњих одлагалишта, а све у циљу повећања нето садашње вриједности (NPV) пројекта. Peng и Zhang [35] развили су математички модел за оптимизацију висине унутрашњег одлагалишта и минимизацију трошкова.

Тематика која је слабо обрађена у студијама случаја публикованих радова, је сам дизајн одлагалишта, а нарочито кад се узме у обзир колико је широко обрађена тематика дизајна површинских копова. Свакако, радова који у свом фокусу обрађују тему дизајна контуре одлагалишта има, али се у великом броју случајева они односе на појединачне сегменте контуре одлагалишта, као што је висина одлагалишта. Такође, ови радови су већином фокусирани (као и раније поменути радови) на избор оптималног дизајна одлагалишта из скупа већ претходно дефинисаних одлагалишта, на основу економских, геотехничких или еколошких услова [36, 37, 38]. Један од примјера употребе MIP методе у циљу оптимизације дизајна одлагалишта дао је Ortiz у свом раду [39]. Тачније, он оптимизује однос броја етажа и доње површине одлагалишта, односно простор који одлагалиште заузима, по принципу да одлагалишта која су виша (имају већи број етажа) заузимају мању површину. У овом раду, као и у претходно описаним аутор је обрађивао једно предодређено одлагалиште, није се бавио његовим дизајном или избором локације.

Проблематику дизајна одлагалишта обрадио је Dimitrov са осталим ауторима на примјеру формирања одлагалишта мјешовитог отпада [40]. Приликом дефинисања дизајна одлагалишта аутори су на претходно одређеној локацији конструисали одлагалиште које може да задовољи потребе у погледу капацитета, као и да се његовим формирањем заузме што мање простора. Том приликом аутори нису користили ниједну оптимизациону методу већ су ручно конструисали контуру одлагалишта.



2.3 Недостаци савременог приступа

Присуство теме одлагања јаловине, формирања одлагалишта, његовог лоцирања, управљања отпадом и оптимизациом дизајна и цјелокупног процеса, као и управљањем трошковима одлагања је неправедно запостављено. Не може се рећи да тема одлагања није обрађивана, али је то у знатно мањем обиму, за разлику од теме у чијем су фокусу експлоатација и управљање квалитетом руде као и оптимизације дизајна контуре површинског копа. Имајући у виду природу рударске праксе јасно је да је практични и научни фокус везан за површински коп, односно експлоатацију минералне сировине с обзиром да ова технолошка операција генерише профит. Међутим успјех неког пројекта у великој мјери зависи управо од оптимизације и управљања трошковима, а то у случају рударства између осталог значи и оптималним процесом одлагања јаловине.

Досадашња истраживања обухватила су широк спектар проблема који су присутни у процесима манипулације откритком и јаловином. Тренутно, најчешће се ова тема обрађује парцијално. Аутори обрађују појединачне сегменте цјелокупног процеса, тако да је могуће пронаћи радове који се баве искључиво посебним дијеловима процеса одлагања и формирања одлагалишта. Па је тако у радовима примјетна тематика стабилности одлагалишта, избором локације, начином и динамиком смјештаја материјала који се депонује, избор одговарајуће опреме и начина развоја радова или конструкције завршне контуре одлагалишта. Неријетко, аутори обрађују више елемената одлагања, али само начелно, док је главни фокус студија и даље на једном сегменту. Поред тога у великом броју случајева проблем се ријешава унутар неког претходно суженог оквира могућности, односно до рјешења се долази избором једног (најповољнијег) рјешења из претходно дефинисаног скупа одређених рјешења. На овај начин је извршена локализација проблема.

Један од уочених недостатака приступа ријешавања проблема одлагања огледа се баш у локализацији проблематике. Развој савремених информатичких система и могућност интеграције савремених оптимизационих метода пружају прилику и могућност за интегралан приступ и у случају процеса одлагања. Под овим не подразумјева се разматрање цјелокупног простора у непосредној контури површинског копа, већ и обухватање широког спектра утицајних фактора. Евалуацијом већег броја утицајних фактора, а по могућности свих оних који владају на одређеном простору могуће је чак и у ранијим фазама пројектовања процјенити трошкове и изабрати економски најбоље одлагалиште.

Оваква ситуација, као и могућност примјене интегралног сагледавања проблема отвара довољно простора за унапређење система оптимизације одагалишта. На бази описаних искустава, уоченим индивидуалним и групним недостацима, рјешавање проблема оптимизације може се побољшати и подићи на знатно већи ниво.



3 ТЕХНОЛОШКА ФАЗА ОДЛАГАЊА ЈАЛОВИНСКОГ МАТЕРИЈАЛА

У овом поглављу описана је технолошка фаза одлагања јаловине, почев од функција због којих се формирају одлагалишта, преко описа самих одлагалишта, њихове подјеле и дефинисања основних параметара. Поред дијела који се односи на технологију формирања одлагалишта, дио текста у склопу поглавља је резервисан за дефинисање услова или група услова које утичу на избор локације одлагалишта, као и на дио који се односи на рекултивацију одлагалишта и њихов утицај на животну средину.

Прије свега на почетку је потребно да се дефинише сам појам одлагалише. Једна од дефиниција је и она из важећег Закона о рударству и геолошким истраживањима који одлагалиште дефинише као простор предвиђен за гомилање или слагање рударског отпада независно од његове конзистенције, па отпад који се одлаже може бити у чврстом или течном стању или у облику раствора и суспензија [41].

Веома често у непосредној близини основних рударских објеката (површинског копа и одлагалишта) налазе се и остали машински и грађевински објекти у функцији рударства као што су, постројења за прераду, термоелектране, топионице, челичане и други сличини објекти за чије се потребе реализује процес експлоатације. Ови објекти приликом свог рада генеришу одређену количину нуспроизвода, односно отпада. Према већ поменутом Закону отпад који настане у технолошким процесима који подразумијевају топљење, термо процесе производње и металуршке процесе, изузев печења кречњака не спадају у рударски отпад. Док отпад настао приликом геолошких истраживања, експлоатације, припреме и складиштења минералних сировина, као и отпад добијен у процесу припреме руде који подразумијева механички, физички, биолошки, топлотни или хемијски поступак као што су измјена димензија, сепарација и излуживање, прерада раније одбаченог отпада и нафтна исплака спадају у рударски отпад [41].

Одлагалишта као неизоставни рударски објекти везани су за површинску експлоатацију, али и подземну експлоатацију изискују формирање одлагалишта (како за материјале који настају као последица експлоатације, али и у процесу припреме минералних сировина). На слици 3.1 приказани су примјери одлагалишта насталих у процесу површинске и подземне експлоатације лежишта минералних сировина. На слици 3.1.a приказано је унутрашње одлагалиште површинског копа Потрелица. На слици 3.1.6 приказано одлагалиште настало приликом експлоатације магнезита на простору општине Чајетина. [42]



Слика 3.1 Примјер одлагалишта у површинској и подземној експлоатацији [43]

3.1 Формирање одлагалишта у површинској експлоатацији

Сви разлози за формирања одлагалишта произилазе из примарне функције рударства, која се огледа у експлоатација корисне минералне сировине. Откопавање откритке и јаловине у процесу експлоатације је операција која присутна током већег дијела (а најчешће током цијелог) вијека експлоатације. Једном откопани материјал, небитно да ли је у питању руда или јаловина, потребно је негдје одложити. Када је у питању руда за то су предодређене локације као што су депоније, са којих се откопана руда предаје или крајњим купцима или наставља



свој ток на даље степене прераде. Па је тако простор депоније дефинисан и ограничен на очекивани капацитет. Са откривком и јаловином је нешто другачија ситуација, овај материјал се након откопавања трајно одлаже. У изузетним ситуацијама се јаловински материјал узима са ових локација када одложени материјал има економску или употребну вриједност за неку другу индустрију или за потребе рудника као што је (насипање путева или послови рекултивације и сл).

Рударска активност је таквог карактера да одлагање откривке и јаловине на површинским коповима представља неизоставну технолошку операцију приликом експлоатације минералних сировина. На површинским коповима технолошка операција одлагања јавља се непосредно после минирања (ако је присутно), затим откопавања и транспорта. Процес одлагања откривке и јаловине која је претходно откопана на површинским коповима представља депоновање откопаних количина откривке и јаловине, како би се омоућила експлоатација корисне минералне сировине. Свакако, одлагање откопаних маса је континуални процес који прати експлоатацију, са тим да интензитет одлагања у различитим периодима рада рудника може да варира.

Генерално одлагалишта јаловине и откривке представљају рударске објекте на којима се одлагање реализује дужи временски период. Количине материјала којима се кроз рударске процесе манипулише износе и по неколико стотина милиона m^3 . Тренд повећања количине јаловине ће се извјесно наставити нарочито када се узме у обзир да се савремена површинска експлоатација одвија на лежиштима или дијеловима лежишта нижег квалитета и већег учешћа јаловине (већи коефицијент откривке), а процеси експлоатације се одвијају на све већим дубинама.

У складу са тим одлагалишта представљају рударске објекте на којима се депонује хетерогени материјал у погледу величине комада и врсте (минералoшки и структурно).

3.2 Критеријуми и ограничења дефинисања завршне контуре одлагалишта

Уз остале услове димензионисано одлагалиште треба да обезбједи прихватање пројектоване количине јаловине. Поред капацитета приликом димензионисања треба да се дефинише облик (дизајн) одлагалишта који ће да обезбједи дуготрајну стабилност цјелокупног објекта након његовог формирања и завршетка радова.

Како би се приликом дефинисања, али и формирања завршне контуре одлагалишта задовољили потребни услови неопходно је да се дефинисано рјешења прилагоди широком спектру утицајних фактора. Избор одговарајуће локације и дизајна одлагалишта захтјева разматрање и уравнотежење широког спектра често супротстављених критеријума и конкурентних циљева. Да би се смањили потенцијални сукоби и кашњења, перспективе свих кључних актера морају се размотрити у раној фази процеса [44]. Анализом више публикација у којима се описује проблематика одлагања и формирања одлагалишта, аутор дисертације је извршио подјелу утицајних фактора на:

⊗ Географске.



РАЗВОЈ ХИБРИДНОГ МОДЕЛА ЗА ОПТИМИЗАЦИЈУ ЗАВРШНЕ КОНТУРЕ ОДЛАГАЛИШТА У ПОВРШИНСКОЈ ЕКСПЛОАТАЦИЈИ ЛЕЖИШТА МИНЕРАЛНИХ СИРОВИНА



- ✕ Геолошке.
- ✕ Рударске (техничке).
- ✕ Социо-еколошке факторе.

Ова подјела представља генерализовано груписање у циљу лакшег приступа конкретној проблематици и не примјењују је сви аутори у овом облику. Лазић у својој књизи „Пројектовање површинских копова са моделирањем система експлоатације“ [45] утицајне факторе је подјелио на оне који утичу на избор локације одлагалишта и оне на основу којих се врши обликовање (дизајн) одлагалишта. Фактори који утичу на избор локације одлагалишта су:

- ✕ запремина простора за прихватање потребних количина јаловине,
- ✕ дужина транспорта,
- ✕ економска вриједност локације
- ✕ могућност уклапања у окружење (непосредно и шире).

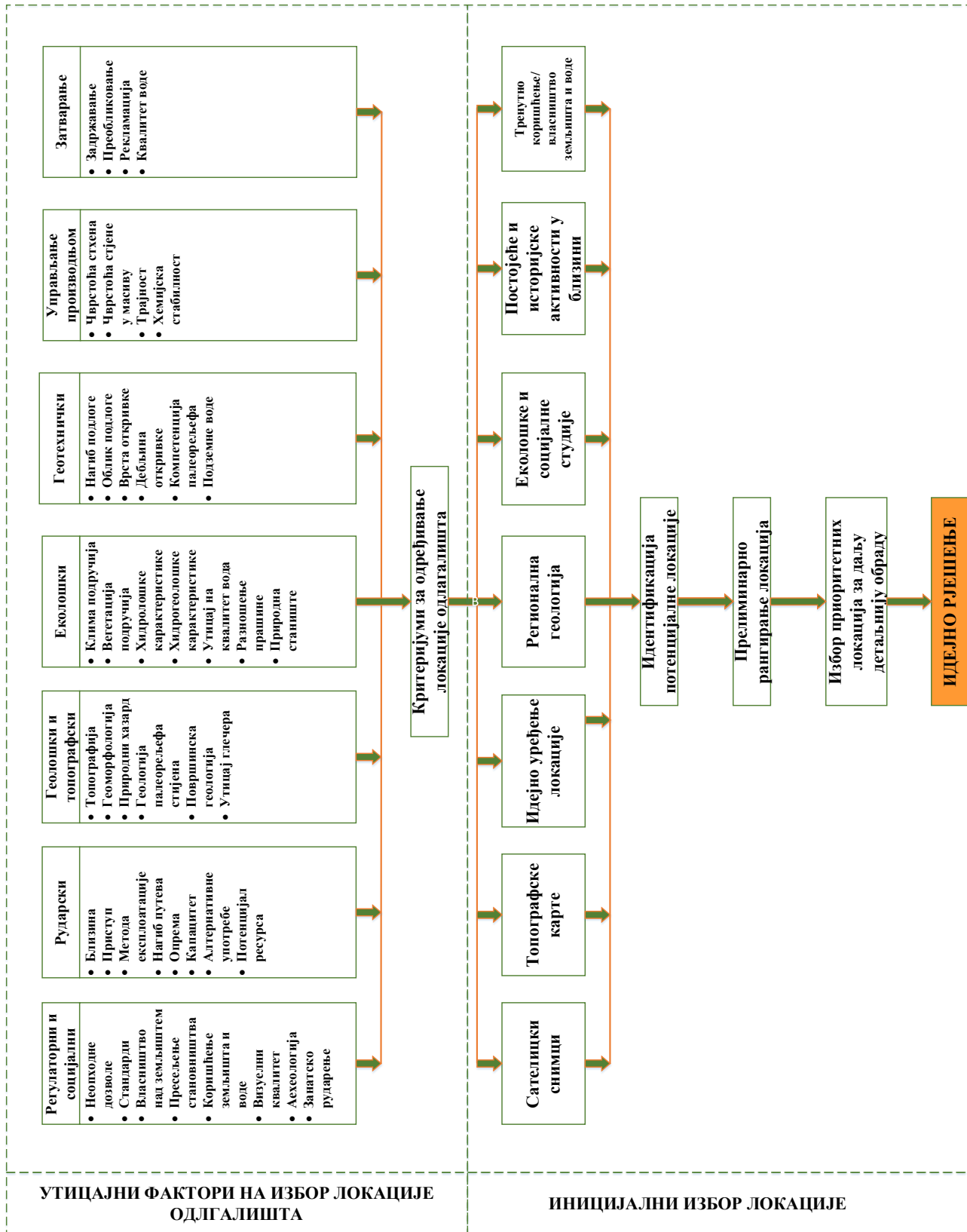
Поред поменутих фактора он наводи да се приликом избора локације мора обратити пажња и на присутне специфичне геолошке, геомеханичке, хидрогеолошке и инжењерско-геолошке услове који карактеришу подлогу одлагалишта. Такође, поред ових фактора неопходно је обратити пажњу и на специфичне услове везане за могућност прилаза и развој етажа на спољашњем одлагалишту. Сви ови фактори груписани су у следеће категорије и то на начин:

- ✕ Техничко-технолошке, који се односе на технологију откопавања и одлагања јаловине;
- ✕ Геомеханичке и геолошке услове, који подразумевају инжењерско-геолошке, хидрогеолошке и остале услове везане за носивост и стабилност подлоге одлагалишта и
- ✕ Економске услове који подразумевају трошкове откупа и припреме локације за одлагање, затим трошкове транспорта и одлагања и трошкове за рекултивацију.

Фактори који утичу на дефинисање дизајна одлагалишта, односно његово обликовање директно су повезани са правцем и развојем радова. Два главна параметра која је утичу на дизајн су:

- ✕ одржавање тежишних растојања транспорта откривке и јаловине и
- ✕ морфолошко уклапање одлагалишта у окружење (непосредно и шире).

Hawley и Cunping дали су нешто детаљнији приказ утицајних фактора на избор одговарајуће локације одлагалишта. Они наводе седам кључних фактора које је потребно размотрити приликом избора одговарајуће локације одлагалишта, а то су регулаторни и социјални, рударски, геолошки и топографски, еколошки, геотехнички, управљање производњом и затварања. На слици 3.2.1 приказан је график утицајних фактора и група фактора које су Hawley и Cunping дали у својој публикацији.



Слика 3.2.1 Утицајни фактори на избор локације одлагалишта према Hawley и Cuning [44]



У суштини и једна и друга подјела су доста сличне и компатибилне, а видљиво је велико преклапање са подјелом која је дата у књизи *Стабилност одлагалишта на површинским коповима*. У овој књизи Гојковић и остали аутори као главне утицајне факторе за избор локације одлагалишта наводе топографију терена, геолошке прилике у целини и геомехничке особине материјала [46].

На бази ових, али и других мишљења која нису приказана у дисертацији, сви поменути утицајни фактори подјелени су у четири групе и приказани су у табели 3.2.1.

Табела 3.2.1 Груписање утицајних фактора

Географски фактори	Геолошки фактори
Конфигурација терена локације одлагалишта	Геомеханичке карактеристике одложеног материјала
Климатске карактеристике подручја	Хемијске карактеристике одложеног материјала
Хидрографска мрежа на локацији одлагалишта	Геолошко-структурне карактеристике подлоге
Биодиверзитет локације одлагалишта	Хидрогеолошке карактеристике простора
	Присуство потенцијално корисних минералне сировине на разматраном простору
Рударски (технички) фактори	Социо-еколошки фактори
Технологија експлоатације	Удаљеност одлагалишта од насељених места и инфраструктурних објеката
Дужина и начин транспорта материјала	Удаљеност одлагалишта у односу на заштићене зоне
Технологија одлагања	Утицај прашине и буке
Тип одлагалишта	Време почетка рекултивације
Конструктивни параметри одлагалишта	Уклапање одлагалишта у околни терен
Заштита одлагалишта од вода	Степен деградације земљишта
	Утицај на површинске и подземне воде

3.3 Основни типови одлагалишта

Подјелу и груписање одлагалишта могуће је извршити на више начина и са више аспеката. У домаћој литератури неколико аутора је у својим публикацијама дало подјелу одлагалишта са појашњењима. Међу првима подјелу одлагалишта дао је Јанош Кун у књизи *„Површинска експлоатација лигнита I Књига“* [47] из 1981. године и *„Површинска експлоатација лигнита II Књига“* [48] из 1982. године. У II књизи Кун нешто детаљније врши подјелу одлагалишта и то на следећи начин:

- ✕ По локацији одлагалишта.
- ✕ По висини одлагалишта.
- ✕ По начину одлагања.
- ✕ По примјењеној опреми.

Хронолошки, 1984. године Немања Поповић је у књизи *„Научне основе пројектовања површинских копова“* [49] дао сличну подјелу одлагалишта и то:

- ✕ По локацији одлагалишта.
- ✕ По броју етажа (слојева).



- ✕ По механизацији процеса одлагања.
- ✕ По броју ревира које опслужује.
- ✕ По рељефу терена.

У књизи „Пројектовање површинских копова са моделирањем система експлоатације“ [45] аутора Андрије Лазића из 1998. године одлагалишта су подјелењена на следећи начин:

- ✕ У односу на позицију површинског копа.
- ✕ Према примјењеној опреми за одлагање.
- ✕ Према начину транспорта јаловине.
- ✕ Према генералном систему експлоатације.
- ✕ У складу са морфологијом терена и позицијом формирања одлагалишта.
- ✕ Према напредовању и динамици развоја радова. [45]

У страниј литератури истиче се један начин на који су подјелењена одлагалишта и то у складу са њиховим изгледом и у односу на конфигурацију терена на којој се формира одлагалиште. Ову подјелу је први дао Wahler у свом раду „*A perspective – mine waste disposal structures – mine dumps, and mill and plant impoundments*“ из 1979. године. [50]

Овај принцип подјеле кориштен је у књизи *Guidelines for Mine Waste Dump and Stockpile Design* [44] (Смјернице за пројектовање одлагалишта и депонија) аутора Mark Hawley и John Cuning, као и у *SME Mining engineering handbook* (Приручник за рударске инжењере) аутора Peter Darling [51].

Разлика је у томе што су Hawley и Cuning у свом раду извршили основну подјелу одлагалишта и депонија отпада на основу њихове предвиђене намјене, као и врсте материјала од којих се формира одлагалиште. Док Darling врши категоризацију одлагалишта према врсте отпада која је одложена, намени одлагалишта и релативним односима према рељефу.

Сам аутор дисертације током свог рада био је ангажован на пројекту *Катастар рударског отпада у Републици Србији* и том приликом посјетио велики број напуштених одлагалишта на територији Републике Србије. Према захтјевима Инвеститора, основна подјела одлагалишта је урађена на основу врсте материјала која се експлоатисала на одређеном локалитету и том приликом је формирано одлагалиште. Тако да су одлагалишта подјелењена на одлагалишта формирана експлоатацијом металичних, неметаличних и енергетских минералних сировина. У каснијој фази одлагалишта су подјелењена према утицају депонованог отпада на животну околину и издвојене су двије врсте одлагалишта, одлагалишта са депонованим опасним и неопасним (инертним) отпадом. На основу тога која врста отпада је одложена на одлагалишту и којој групи припада одлагалиште зависио је и приступ приликом, узорковања и анализирања, али и приједлог санације. Ово наводи на закључак да је подјела одлагалишта често последица функције у којој подјела врши.

Подјела одлагалишта може се реализовати на више различитих начина, тако да једно одлагалиште спада у више различитих категорија. У складу са приказаним подјелама које представљају резултате истраживања у наставку текста приказана је обједињена подјела одлагалишта како је аутор дисертације види. Поред подјеле свака од приказаних категорија је описана и допуњена графичким примјерима и форографијама. Подјелу одлагалишта могуће је извршити на следеће начине:



- ✕ према локацији одлагалишта,
- ✕ према броју ревира које опслужује,
- ✕ према животном вијеку одлагалишта,
- ✕ у складу са морфологијом терена и позицијом формирања одлагалишта,
- ✕ према врсти и конзистенцији одложеног материјала,
- ✕ према примјењеној опреми за одлагање,
- ✕ према току материјала,
- ✕ према начину транспорта јаловине,
- ✕ према напредовању и динамици развоја радова,
- ✕ према броју етажа (слојева).

3.3.1 Подјела одлагалишта према локацији

Неопходност формирања одлагалишта је једна од одлика површинске експлоатације лежишта минералних сировина. У зависности од позиције одлагалишта у односу на позицију површинског копа, односно локацију на којој се врши експлоатација одлагалишта се могу подјелити на унутрашња и спољашња. Спољашње одлагалишта се формирају ван контуре површинског копа (слика 3.3.1), док се у случају одлагања јаловине унутар контуре површинског копа формирају унутрашња одлагалишта (слика 3.3.2).



Слика 3.3.1 Спољашње одлагалиште Јагњило [43]



Слика 3.3.2 Унутрашње одлагалиште Дрмно [43]

У површинској експлоатацији унутрашња одлагалишта имају предност. Знатно краће транспортне дужине, избегава се нарушавање и откуп великих површина терена око површинског копа и дјелимично врши попуњавање откопаног простора и враћање простора у првобитно стање су бенефити одлагања јаловине унутар контуре површинског копа. Са друге стране постојање спољашњих одлагалишта представља неминовност технолошког процеса и последицу редослиједа радова на експлоатацији. У већини случајева површинска експлоатација је незамислива без формирања спољашњих одлагалишта. Како би се створили услови за формирање унутрашњег одлагалишта неопходно је уклонити дио откривке и јаловине, откопати минералну сировину и тек онда отпочети са одлагањем унутар активног површинског копа [45]. Приликом пројектовања цјелокупног система експлоатације два веома битан параметра која се тичу процеса одлагања су:

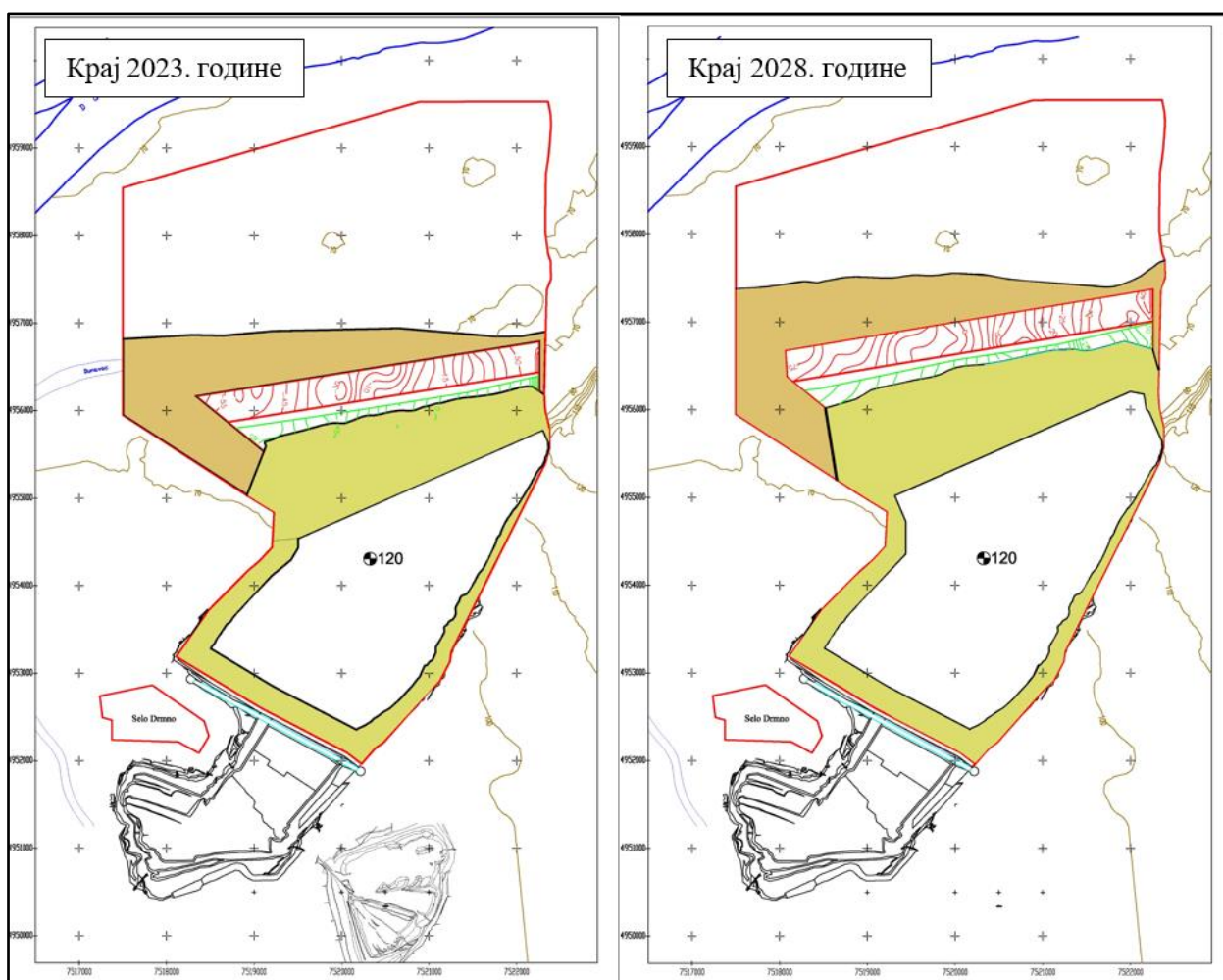
- ⌘ Избор правог момента за прелазак на одлагање унутар контуре површинског копа.
- ⌘ Одржавање растојања између откопног фронта и фронта на одлагању.

Прави моменат за прелазак на одлагање унутар контуре површинског копа је тај када се створи довољно слободног простора да се обезбједи сигурно формирање унутрашњег одлагалишта. На овај начин избегава се могућност да фронт радова унутрашњег одлагалишта превише брзо напредује и сустигне откопни фронт, а на тај начин и угрози експлоатацију минералне сировине са најнижих етажа. Моменат преласка на унутрашње одлагање требао би се догодити што раније у процесу експлоатације како би се минимизирале масе на спољашњем одлагалишту, а тиме и трошкови.

Смањење трошкова експроприације и ефекта деградације терена и животне средине је значајан код одлагања киселих стијена на спољашње одлагалиште. Контакт воде (снијег или киша) са оваквом врстом стијена може да изазове промјену рН вриједности воде. Разношење и воде и одложених комада са оваквих одлагалишта може да проузрокује негативне ефекте на животну средину, у зони одлагалишта али и шире. Одлагањем ових стијена унутар откопаног простора

површинског копа у знатној мјери се олакшава начин прихватања контаминираних вода и њиховог пречишћавања. Уз одговарајуће мјере одводњавања (израда дренажних канала) отклања се могућност негативног утицаја на подземне воде, а тиме и на животну средину.

Проблематика формирања унутрашњег одлагалишта у ситуацији када је очекивано сустизање два фронта радова аутор дисертације је обрађивао у Завршном раду на крају основних студија. Том приликом студија случаја се односила на површински коп Дрмно и проблем момента у коме већ постојеће унутрашње одлагалиште улази сужени дио откопаног простора, док се ширина откопног фронта шири. На слици 3.3.3 приказана је примјер анализиране позиције фронта радова унутрашњег одлагалишта и откопних етажа на крају два периода експлоатације.



Слика 3.3.3 Примјер анализиране позиције фронта радова унутрашњег одлагалишта и откопних етажа на крају 2023. и 2028. године [52]

У зависности од конфигурације трена, угла под којим залијеже лежиште, начина развоја радова на експлоатацији и могућности формирања спољашњег одлагалишта, унутрашње одлагалиште не мора да гарантује краће транспортне дужине. Код лежишта чије је залијегање косо или стрмо формирање унутрашњег одлагалишта је тешко изводљиво или у потпуности немогуће. У оваквим примјерима до формирања унутрашњих одлагалишта долази у каснијим фазама експлоатације. Велика удаљеност откопног фронта радова од локације на којој је



могуће формирати унутрашње одлагалиште ствара услове да се и поред могућности унутрашњег одлагалишта дио маса одложи на спољашњем одлагалишту. Јаловину и откривку откопану на највишим етажама могуће је одложи на погодној локацији ван контуре површинског копа. Овакав сценарио је повољан на основу досадашњих искустава да се већина трошкова генерише баш у процесу транспорта.

Досадашња искуства у површинској експлоатацији нам говоре да се код већине површинских копова метала одлагање реализује на спољашњим одлагалишту, док код површинских копова на којима се експлоатише угаљ одлагање се врши на спољашњем и на унутрашњим одлагалишта. Оваква ситуација генерисана је структуром лежишта, а последично и укупном геометријом површинских копова. На слици 3.3.4. приказана је позиција спољашњег и унутрашњег одлагалишта површинског копа Гацко-Централно поље.



Слика 3.3.4 Позиција спољашњег и унутрашњег одлагалишта површинског копа Гацко-Централно поље [43]

Локација на којој се формира спољашње одлагалиште је веома значајна за економичност цјелокупне рударске активности, али може бити и пресудна. У колико не постоји могућност формирања одговарајућег спољашњег одлагалишта које ће да обезбједи економски одржив начин експлоатације, то може да доведе до одустајања од површинске експлоатације. У складу са овом чињеницом на избор локације спољашњег одлагалишта утиче велики број техничких, геолошких, еколошких и економских фактора о којима је било више ријечи у поглављу 3.2.

У ситуацији већих лежишта и великих рударских комплекса, а нарочито приликом експлоатације хоризонталних и благо нагнутих лежишта угљева постоји могућност одлагања материјал унутар контуре површинских копова на којима је претходно завршена експлоатација. На овај начин се формирају спољашња одлагалишта и ако се процес одлагања реализује унутар контура површинских копова на којима се не одвија експлоатација. Овакве ситуације су веома повољне из разлога што се избјегава додатно деградирање терена, а уједно се врши и поправка претходно деградираног простора, али за последицу може да генерише нешто веће трошкове транспорта јаловине.



Слика 3.3.5 Унутрашње одлагалиште поље Б - Гацко [43]

3.3.2 Подјела одлагалишта према броју ревира које опслужују

Експлоатација минералних сировина у склопу једног рударског комплекса, басена или експлоатационог поља може да се реализује на више локација. Свака од експлоатационих локација захтијева откопавање одређених количина јаловине и њихово одлагање. У зависности од тога да ли се на одлагалишту врши одлагање откопане јаловине са једне или више експлоатационих зона, површинских копова или ревира могуће је подјелити одлагалишта.

Принцип рада када један површински коп има једно спољашње одлагалиште је типично за рударство. Нарочито ако у непосредној близини не постоји дуги површински коп или зона експлоатације. Примјери оваког рада могу се видјети у пљеваљском и костолачком угљеном басену. Површински копови Боровица и Потрлица иако се налазе у склопу истог басена на великој су удаљености па су оба површинска копа формирала сопствена одлагалишта. Слична ситуација је и у Костолачком угљеном басену. Површински коп Ћириковац и Дрмно одлагање откривке реализују на засебним локацијама. Сличан принцип одлагања реализован је и приликом експлоатације руде жељеза који је приказан у студији случаја ове дисертације. Површински коп Језеро на коме је вршена експлоатација руде жељеза прије отварања површинског копа Бувач имао је сопствено одлагалиште. Након отпочињања експлоатације на површинском копу Бувач дио јаловине је одлаган унутар контуре површинског копа Језеро, док је дио одлаган на новом спољашњем одлагалишту. Одлагање на спољашњем одлагалишту површинског копа језеро завршено је оног момента када је завршена и експлоатација на овом површинском копу.

Примјери одлагалишта која опслужују више површинских копова може се видјети на простору коубарског и гатачког угљеног басена. Од почетка експлоатације угља у западном дијелу гатачког угљеног басена отварањем поља А површинског копа Грачаница 1982. године па се до данас када се експлоатација реализује у склопу Кровинске експлоатационе зоне одлагање се врши на Великом спољашњем одлагалишту.

Тренутно у западном дијелу колубарског басена експлоатација се одвија на построу површинског копа Тамнава-Западно поље и на површинском копу Радљево-Север. И са једног



и са другог површинског копа откопана јаловина се одлаже на простору унутрашњег одлагалишта површинског копа Тамнава западно поље.

Принцип одлагања јаловине са више површинских копова на једно одлагалиште углавном је везан за локације на којима се експлоатација врши дужи временски период, али и у ситуацијама када се експлоатационе зоне настављају једна на другу. Овакав начин развоја рударских радова и одлагања унутар њих, проузрокује да се радови одвијају на већем простору, у дужем временском периоду те се процес рекултивације не реализује док рударски радови трају.

3.3.3 Подјела одлагалишта према животном вијеку одлагалишта

У складу са временским оквиром постојања одлагалишта је могуће подјелити на привремена и трајна одлагалишта.

У појединим случајевима током процеса експлоатације, поред основне минералне сировине, могу се јавити и пратеће сировине које се могу експлоатисати повремено или стално, са константним или променљивим капацитетом те оне могу имати двојак карактер, као јаловина или као минерална сировина када се не пласира на тржиште. Такође, одређене количине јаловинских материјала као што су кречњак, глина или лапорац повољнијих физичко-механичких карактеристика могу се користити за израду објеката у функцији експлоатације. Том приликом могуће је њихово депоновање у непосредној локацији уградње до момента крајње употребе.

3.3.4 У складу са морфологијом терена и позицијом формирања одлагалишта.

Конфигурација и рељеф терена у непосредној близини површинског копа је веома занчајна за формирање одлагалишта. На основу тога у стручној пракси има више подјела, тако да Поповић одлагалишта према рељефу дијели на равничарска и брдска [49]. Детаљнијег образложења ове подјеле нема, па се може закључити да је подјела урађена у складу са самом конфигурацијом локалитета (да ли је у питању брдски или равничарски крај) на коме се формира одлагалиште. Равничарска одлагалишта су формирана на хоризонталном или благо нагнутом терену, примјер једног таквог одлагалишта дат је на слици 3.3.6. Брдска одлагалишта се формирају на терену са стрмим падинама и код оваквих одлагалишта до изражаја долази утицај гравитације. Ова одлагалишта се по правилу карактеришу великим висинама одлагања. На слици 3.3.7. приказан је брдски тип одлагалишта формиран на површинском копу Терамиде.



Слика 3.3.6 Равничарски тип одлагалишта [53]



Слика 3.3.7 Брдски тип одлагалишта [54]



Поред Поповића и Лазић је извршио подјелу одлагалишта на висинска и дубинска. Тачније, он наводи да у складу са морфологијом терена могуће је формирати висинска и дубинска одлагалишта [45]. Ова подјела је идентична као и претходна, само је разматрана са другог аспекта. У колико се одлагалиште формира на равном терену неопходно је да формирају висинске етаже, а тиме и надвиси цјелокупан околни терен. Када се одлагање врши низ природну падину са одлагањем материјала испод нивоа стајања опреме, што је карактеристично за брдске терене, на тај начин се формира дубинско одлагалиште, односно одлагалиште чије нивелете не прелазе коте околног терена.

Подјела коју је дао Wahler 1979. године одлагалишта дијели на следећих 5 категорија:

- ✕ одлагалиште унутар долине (valley-fill),
- ✕ управна одлагалишта на долину (cross-valley),
- ✕ одлагалишта на падинама (sidehill structure),
- ✕ одлагање на гребену (ridge embankment),
- ✕ одлагалишта формирана на равном терену (diked embankment и heaped fills).

У наставку текста описане су и приказане категорије отпада на основу описа који су дали у својим публикацијама Hawley и Cuning [44] и Darling [51], односно опис подјеле коју је дефинисао Wahler 1979. године [50].

Одлагалишта унутар долина –(valley-fill)

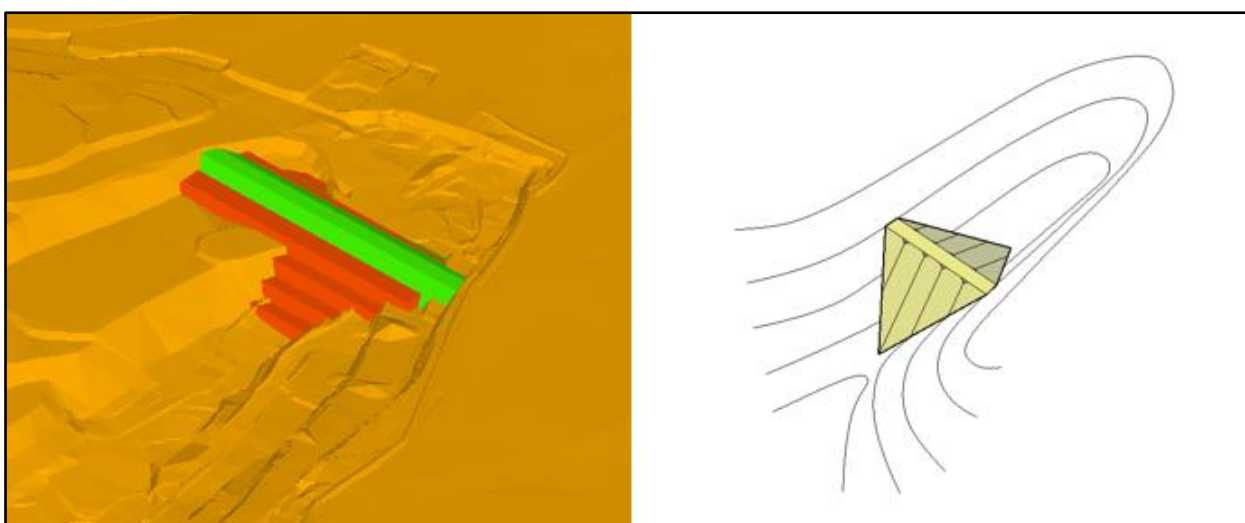
Одлагање јаловине унутар неке природне или вјештачке увале или долине је доста често примјењивана метода, а два најчешћа примјера су флотацијска јаловишта и унтрашња одлагалишта. На овај начин се избјегава деградација економски вриједнијих површина у околини површинског копа, а у случају изградње флотацијских јаловишта неопходно је формирати само предњу, чеону брану. Проблем који се јавља код оваквих одлагалишта је утицај воде, и атмосферских падавина, али и природних водотокова који протичу дном долина унутар којих се одлаже материјал. У циљу заштите овог типа одлагалишта од вода неопходно је изградити систем ободних канала, али и систем дренажних канала испод самог одлагалишта, док се горња површина одлагалишта одржава у благом паду у правцу етажних канала. На слици 3.3.8. приказано је одлагалиште флотацијске јаловине формирано у долини.



Слика 3.3.8 Одлагалиште формирано унутар долине [43]

Управна одлагалишта на долину (cross-valley)

Одлагање материјала у циљу спајања двије сусједне стране долине могуће је реализовати у циљу формирања транспортних путева. На овај начин је могуће остварити комуникацију везу за транспортна средства. Проблем утицаја воде на формирану насип (одлагалиште) је значајан, тако да је неопходно изградити систем за заштиту одлагалишта од вода. Намена формираног насипа може да буде двојака. Поред обезбеђења транспорте комуникације, насип може да обавља функцију бране и да се унутар узводног дијела долине реализује одлагање јаловине. У случају да се изградња насипа реализује у складу са прописима на који се дефинише формирање брана флотациских јаловишта, иза њих је могуће одлагати јаловину течне и кашасте конзистенције.



Слика 3.3.9 Модел одлагалишта управног на долину

Одлагалишта на падинама (sidehill structure)

Код овог типа одлагалишта одлагање се врши низ стрме падине, а косина одлагалишта прати нагиб терена. Иако се ножица одлагалишта формира у дну долине или на дијелу падине са блажим нагибом, одложени материјал не блокира дно долине и омогућава слободно отицање воде. У појединим ситуацијама стабилизација одлагалишта реализује се формирањем ојачања у ножици одлагалишта или подјелом цјелокупне косине на више етажа. Веома стрме падине у периодима великих киша могу да проузрокују спирање материјала и нестабилност целокупне косине. Као би се спријечиле овакве појаве неопходно је изградити систем канала како би се сва вода прихватила и усмјерила. Одлагалиште формирано низ косину природне падине на површинском копу Ћерамиде приказано је на слици 3.3.7.

Одлагање на гребену (ridge embankment)

Одлагање јаловине код овог типа одлагалишта релизује се са обе стране гребена. За разлику од неких других типова одлагалишта (одлагалишта код којих се материјал одлаже у циљу повезивања две стране долине или код одлагалишта формираних на косини падине) оваква одлагалишта се не формирају у случају одлагања ситнозрног и течног материјала.

Одлагалишта формирана на равном терену (diked embankment и heap)



Формирање одлагалишта на равном терену могуће је формирати одлагалишта чврстог крупнокомодног отпада (*heap*), али и фирмирање одлагалишта за депоновање флотацијске јаловине и других врста кашасте и течне јаловине (*diked embankment*). Карактеристика ових одлагалишта је да се формирају висински од површине основног терена на горе. Примјер флотациског јаловишта форманог на равном терену приказан је на слици 3.3.6.

3.3.5 Подјела одлагалишта према конзистенцији одложеног материјала

Подјела јаловинских материјала може да се реализује на више различитих начини. Различит поглед на одређени проблем може да утиче и на различиту класификацију јаловинског материјала. У колико ову подјелу гледамо из угла експлоатације, јаловину је могуће подијелити на ону која је настала у процесу експлоатације и јаловину која је настала у процесу припреме минералних сировина, независно до примјењене методе. Са друге стране ако класификацију јаловине вршимо из угла припреме минералних сировина онда је могуће користити подјелу коју је дао Динко Кнежевић у књизи „Припрема минералних сировина“, а према њој јаловина се дијели на суву и хидрауличку (мокру) [55]. У складу са описаним подјела одлагалишта се могу подјелити на:

- ✕ Одлагалишта чврстог отпада и
- ✕ Одлагалишта моктог (хидрауличног) отпада.

На одлагалиштима чврстог отпада депонује се јаловински материјал који је настао директним откопавањем или јаловина настала у процесу припреме минералне сировине без употребе воде. Овдје се могу сврстати одлагалишта коповске јаловине, јаловина настала у процесу уситњавања (дробљења и мљењења) и просијавања, као и јаловина настала у сувом процесу припреме минералних сировина. Приликом формирања ових одлагалишта користи се дисконтинуална опрема или континуални системи са траком. На слици 3.3.10 приказано је одлагалиште чврстог отпада.



Слика 3.3.10 Одлагалиште чврстог отпада [43]

У групу мокрих отпада спада јаловина настала у процесу припреме минеалних сировина са примјеном воде, а најпознатији примјер је флотациска јаловина. У ову групу може се сврстати и јаловина настала у процесу прања угља и његове припреме (нпр. плива-тоне методе), али и материјал које се уклања са путева и јаловина настала примјеном хидромонитора или експлоатациом из водених површина. За одлагање овакве врсте отпада неопходно је унутар контуре одлагалишта формирати систем насипа, прелива и дренаже како би се обезбједило таложење материјала и отицање воде.

У зависности од врсте материјала од кога се формирају насипи за одлагање мокре јаловине одлагалишта се могу подјелити на одлагалишта израђена од материјала из позајмишта и на одлагалишта изграђена од материјала који се депонује [55]. На слици 3.3.11 приказан је дио флотациској јаловишта у склопу рударско-топионичарског басена Трепча у Лепосавићу са формираним насипом од материјала који се депонује.



Слика 3.3.11 Одлагалиште мокрог отпада са формираним насипом од материјала који се депонује [43]

У ситуацији када се насипи јаловишта граде од јаловине настале у процесу откопавања на површинском копу тада се формирају одлагалишта мјешовитог отпада. На сличан начин реализовано одлагање нуспродуката сагорјевања угља у термоелектранама на одлагалиштима површинског копа Дрмно и Гацко. Један дио одлагалишног простора је резервисан и уређен у скаду са прописима за смјештај гипса (Дрмно) и пепла у облику хидромјешавине (Гацко).



Слика 3.3.12 Изградња касета за депоновање гипса на унутрашњем одлагалишту површинског копа Дрмно [56]

Изабрани начин транспорта мокрог отпада у овој подјели има значајну улогу. Генерално, у пракси се јаловина која настаје у процесу флотирања, односно јаловина настала у процесу припреме минералне сировине са коришћењем воде транспортује као хидромјешавина. Док су одлагалишта на којима се овај тип јаловине одлаже припремљена за његово прихватање. Такође, увијек постоји могућност да се из материјала у процесу одводњавања одстрани већи дио воде, а да се материјал после тога одвезе и одложи дисконтинуално или континуалном опремом са траком.

Поред ове двије основне категорије могуће је формирати и одлагалишта мјешовите јаловине. У овој ситуацији се од чврсте јаловине откопане на површинском копу израђују насипи и бране, док се унутар овако формиране шкољке депонује кашаста или течна јаловина.

3.3.6 Подјела одлагалишта према примјењеној опреми за одлагање

Одлагање откопане јаловине у савременом рударству реализује се опремом широког спектар, засебним машинама намјењеним искључиво за одлагање, главном откопном опремом или помоћном механизацијом, али и директним одагањем из транспортних средстава. У складу са конкретном опремом која реализује радњу одлагања, одлагалишта се могу подјелити на:

- ⊗ Одлагалишта формирана одлагачима са траком.
- ⊗ Одлагалишта формирана транспортним мостовима.
- ⊗ Одлагалишта формирана багером са једним радним елементом.
- ⊗ Одлагалишта формирана булдозерима.
- ⊗ Одлагалишта формирана скреперима.
- ⊗ Одлагалишта која се формирају хидромеханизацијом.



3.3.6.1 Одлагалишта формирана одлагачима са траком

Одлагалишта формирана одлагачима са траком, поред одлагалишта формираних комбинованим радом камион-булдозер, представљају најчешће заступљени тип одлагалишта. У склопу цјелокупног система којим се рализује откопавање јеловине одлагач као машина представља самосталну јединку у склопу цјелокупног описаног система, било да се ради о БТО или ДТО система. Наведена опрема представља опрему са континуалним дејством, односно континуалним током материјала.

Основни радни елемент код одлагача је одлажућа стријела на којој се налази транспортер са траком, док се прихватање материјала може вршити на два начина и то пресицањем материјала са транспортера са траком или захватањем материјала помоћу ведрица које се налазе на роторним точком или бесконачном ланцу из рова у који се празне вагони из жељезничке композиције.

Данас се у експлоатацији већином користе одлагачи са траком. Захваљујући ефикасном уклапању у рад, како са континуалном тако и са дисконтинуалном опремом увезаном у комбиноване система обезбједило је да овај тип одлагача и начин формирања одлагалишта преузме примат на површинским коповима. Поред капацитативних захтијева на које савремени одлагачи могу да одговоре, велику предност у раду им дају димензије пријемне, а нарочито одлажуће стријеле. Захваљујући овим предностима обезбеђује се значајно вријеме рада опреме у једом положају одлагача или одлагалишних транспортера.

На слици 3.3.13 приказан је примјер формирања унутрашњег одлагалишта одлагачем са траком који је директно повезан на роторни багер. Код плитких и хоризонталних лежишта могуће је примјенити овакав метод рада.



Слика 3.3.13 Формирање одлагалишта одлагачем директно повезаним на роторни багер [57]

3.3.6.2 Одлагалишта формирана транспортним мостовима

Формирање одлагалишта транспортним мостовима могуће је реализовати приликом рада са материјалима који имају повољне геомеханичке карактеристике, како би се омогућило формирање одлагалишта већих висина.



Слика 3.3.14 Одлагалиште формирано транспортним мостовима [58]

3.3.6.3 Одлагалишта формирана багерима са једним радним елементом

Код формирања одлагалишта багерима са једним радним елементом у употреби су и багери кашикари (ужетни) и багери дреглајни, али услови у којим се примјењују ова два типа багера су разлиучити. Главна одлика бегра дреглајна, али и ужетних багера кашикара су велики радијус истресања материјала (већа дужина стријеле) и запремина кашике, која је знатно већа од бегра намјењених за утовар транспортне опреме. Ова предност им омогућава примјену у директном пребацивању материјала са откопних етажа до одлагалишта. Приликом овакавог начина рада могуће је да се пребацивање материјла реализује директно, тако да се материјал са откопне етаже пребаци на етажу одлагалишта или да се одлагање реализује из више пута. Код оваквог начина рада багер откопани материјал привремено одложи у зони максималног радијуса одлагања, након чега тај материјал захвата други багер и пребацује га или до наредног привременог одлагалишта или на одлагалишне етаже.

Багере кашикаре и дреглајне могуће је користити и приликом дисконтинуалног жељезничког или камионског транспорта. Код жељезничког транспорта, вагони са откопаном јаловином се празне у припремљени ров у близини колосјека. Одбачени материјал се откопава багером кашикаром или дреглајном и одлаже на простору одлагалишних етажа. За разлику од одлагања плуговима, код овог начина рада могуће је формирање и висинске и дубинске етаже. Примјер

формирања одлагалишта у комбинацији жељезничког транспорта и ужетног багера кашикара приказана је на слици 3.3.15.



Слика 3.3.15 Примјер формирања одлагалишта у комбинацији жељезничког транспорта и ужетног багера кашикара [59]

За рад на камионском одлагалишту нешто је повољнија примјена багера дреглајна од ужетних багера кашикара. Приликом рада на камионском одлагалишту багер дреглајн формира плато на који се одлаже јаловина из камиона, након чега је захвата багером дреглајном и пребацује на простор висинске или дубинске етаже. Том приликом багер може бити постављен на нивоу на коме се довози материјал или на вишој подетажи.

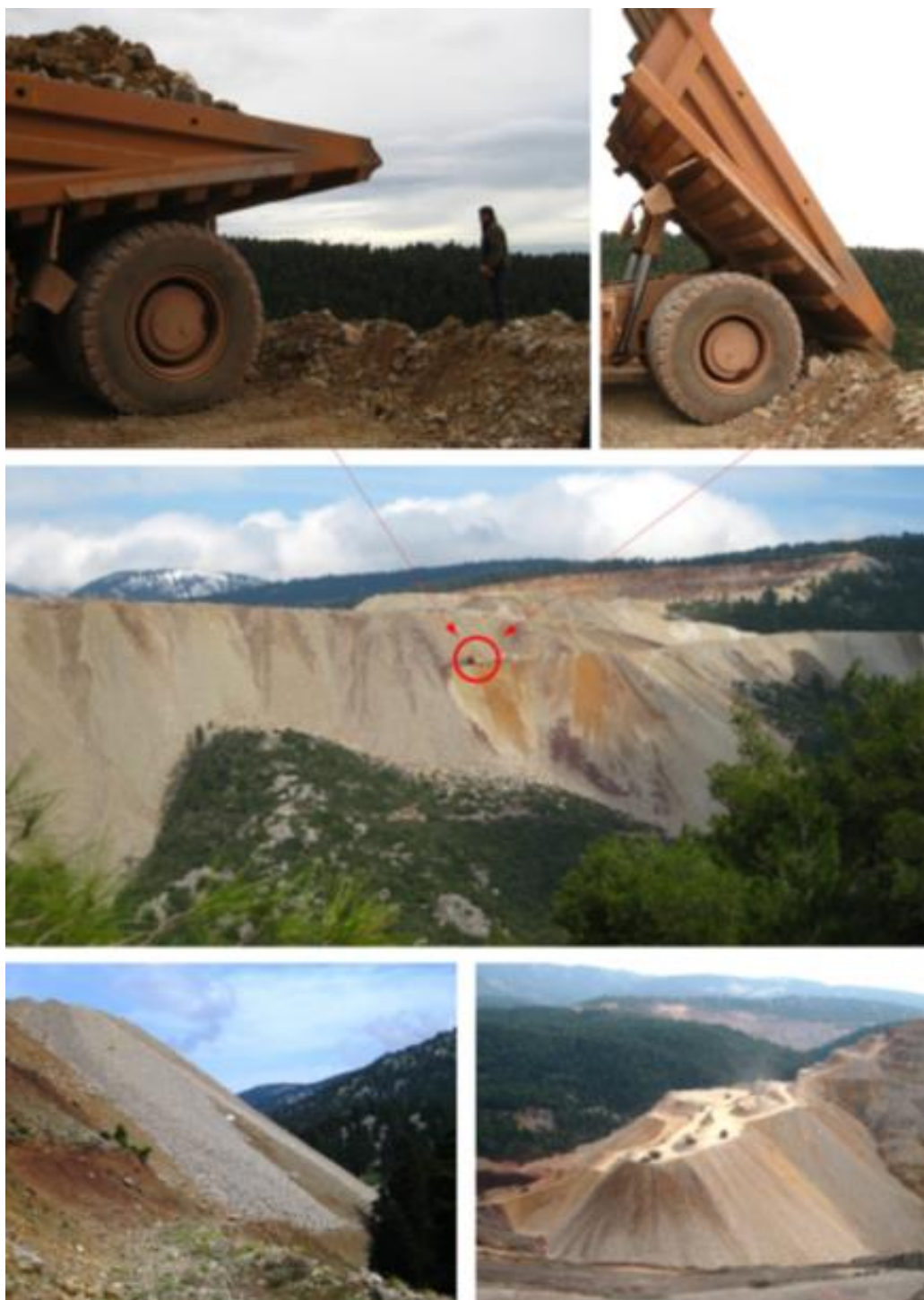
3.3.6.4 Одлагалишта формирана булдозерима (дисконтинуална)

Формирање булдозерских одлагалишта реализује се у комбинацији са дисконтинуалним транспортом, а том приликом формирају се дубинска одлагалишта чија висина данас прелази 30 m. Иако је употреба булдозера у процесу одлагања неизоставна како би се обезбједили радни услови за одлажућу (континуалну) опрему и сама радилишта одржавала, код примјене дисконтинуалног транспорта булдозери се користе као главна одлажућа опрема.

Формирање булдозерских одлагалишта реализује се на начин да дисконтинуална транспортна опрема врши пражњење камиона на дозвољеној удаљености од ивице етаже. Депоновани материјал се транспортује булдозером до ивице етаже и транспортује низ косину одлагалишта. Предност булдозерских одлагалишта је исказана кроз маневричност самих булдозера тако да је једним булдозером могуће одржавати више мањих сусједних радилишта.

Поред одлагалишта која настају комбинованим радом камиона и булдозера, могуће је формирати одлагалишта као искључиво камионска. Том приликом могуће је формирати и

дубинску, али и висинску етажу (системом подетажа) одлагалишта. Формирање дубинских одагалишта реализује се на начин да камион прилази ивици одлагалишта у зони заштитног насипа и врши пражњење сандука директно на косину одлагалишта. Код овог начина рада дуж читаве горње ивице одлагалишта неопходно је постојање сигурносног насипа, али и ангажовање радника који врше навођење камиона приликом приласка ивици одлагалишта. На слици 3.3.17 приказан је примјер формирања камионског одлагалишта.



Слика 3.3.16 Примјер камионског одлагалиште [60]



3.3.6.5 Одлагалишта формирана скреперима

Ангажовање скрепера на површинским коповима реализује се на пословима откопавања меких стијена, чишћењу кровине или откопавању међуслојне јаловине. Такође поред директног рада у експлоатацији скрепери се користе и за помоћне радове као што је насипање путева, откопавање канала и сл.

Након откопавања материјала скрепер одвози материјал до одлагалишта, гдје у танким слојевима од 0.2 m до 0.6 m врши одлагање дуж радилишта. Пажњење сандука се реализује приликом кретања, а у ријетким конструкцијама скрепера одлагање се врши отварањем сандука са задње стране или принудно. Шема кретања скрепера може бити:

- ⊗ прстенасто кретање без и са укрштањем,
- ⊗ спирално кретање,
- ⊗ кретање по валовитој кривој - синусоиди (цик-цак).

3.3.6.6 Одлагалишта која се формирају хидромеханизацијом

Одлагање јаловине у облику пулпе (хидромјешавине) могуће је реализовати искључиво за пјесковите или шљунковите материјале. Јаловина се до мјеста одлагања транспортује цјевоводима, а сам процес одлагања се реализује слободним истицањем материјала у претходно припремљени простор. Одлагање се реализује унутар неке природне или вјештачке депресије (површински коп на коме је завршена експлоатација) и да се изгради систем насипа унутар кога се врши одлагање.

Поред система насипа како би се повећала стабилност одлагалишта у склопу објекат потребно је да функционише дренажни систем за прикупљање, као и систем за евакуацију воде која доспије на простор одлагалишта. Воде која се једном користи за транспорт и одложе се унутар одлагалишта може се поново користити у процесу транспорта.

3.3.6.7 Одлагалишта формирана плуговима

Својевремено се транспорт јаловине реализовао возовима, а одлагање материјала се вршило плуговима. Дуж ивице етажне одлагалишта налази се колосјек преко кога се креће композиција која транспортује јаловину. На одговарјућој локацији врши се пражњење вагона у правцу косине, а већина материјала се задржава на косини и на тај начин формира нови слој. Након одласка композиције дуж колосјека пролази плуг (самоходни или у склопу локомотиве) и материјал који је остао у уз колосјек гура низ косину одлагалишта.

Развој технологије и промјена метода експлоатације и одлагања истиснуо је примјену жељезничког транспорта из зоне рударских радова, па се одлагање плуговима и транспорт јаловине данас ријетко користе у пракси.



3.3.7 Подјела одлагалишта према току материјала

На исти начин на који су подјељени системи експлоатације могуће је подјелити и одлагалишта, тако да у складу са тим имамо одлагалишта формирана радом:

- ✕ континуалних система.
- ✕ дисконтинуалних системе.
- ✕ комбинованих системе.

И континуални и дисконтинуални системи имају јако велику заступљеност у раду, а њихова примјена је условљена потребама и условима који владају на одређеној локацији. Развојем дробилица мобилног и полумобилног типа омогућено је комбиновање предности претходна два. Маневарске способности и прилагодљивост опреме, висок капацитет и већа резна сила на откопавању су предности дисконтинуалног начина експлоатације који су задржани у комбинованом систему. Са друге стране континуалност транспорта, висока капацитивност транспортера са траком, ниски трошкови рада и могућност транспорта на велике раздаљине са знатно мањим трошковима (за разлику од дисконтинуалног) су предности које су преузете са континуалних система. Овдје је свакако битна дробилица као елемент који повезује ова два дијела комбинованог система, а уједно омогућава и континуално одлагање претходно откопаних комада знатно већих димензија од димензија транспортера са траком. На примјеру површинског копа Потрлица у Црној Гори и Бувач у Републици Српској могуће је видјети рад комбинованог система са материјалом који се минира, док се на површинском копу Гацко-Централно поље ова овакав начин рада користи за тврде лапорце који се откопавају багерима запремине кашике 12 m^3 .

У зависности од услова у лежишту и расположиве опреме на површинском копу могуће је користити само један систем експлоатације или више. Приликом примјене комбинованих система, у склопу површинског копа систем је организован да у случају престанка рада континуалног дијела система експлоатација може да се настави дисконтинуално.

3.3.8 Подјела одлагалишта према начину транспорта јаловине

Примјењена врста транспорта којом се реализује премјештање откопане јаловине од откопних етажа унутар површинског копа до одлагалишта има значајан утицај на рад цјелокупног система експлоатације. Избор опреме за одлагање, начин на који се развијају радови и реализује сам процес одлагања зависи од врсте транспорта. Генерална подјела одлагалишта по овом критеријуму може се извршити на:

- ✕ одлагалишта код којих је ток тј. транспорт материјала континуиран
- ✕ одлагалишта код којих материјал пристиже у пакетима у пакетима



Слика 3.3.17 Континуални и дисконтинуални транспорт [43]

Код континуалног транспорта превоз материјала се реализује транспортерима са траком, док се одлагање реализује одлагачима са траком или транспортним мостовима. Овакав начин транспорта је резервисан за чврсту и уситњену суву јаловину. Поред транспорта транспортерима са траком у употреби је и хидраулични транспорт за мокру јаловину (хидромјешавине) код кога се процес транспорта реализује помоћу пумпи и потисних цјевовода, а одлагање се реализује хидроциклонима или директним истицањем хидромјешавине.

У случају дисконтинуалног транспорта материјал се камионима или возовима са откопних етажа транспортује до одлагалишта. Поред ова два начина транспорта принцип директног или вишеструког багерског пребацивања спада у групу дисконтинуалног транспорта.

3.3.9 Подјела одлагалишта према напредовању и динамици развоја радова

Развој радова, односно начин на који напредује фронт одлагалишта зависи од методе одлагања, односно од врсте транспортне опреме. Свакако овдје треба додати конфигурацију



терена, рељеф саме локације, који диктира начин на који ће се развијати радови. Начин на који је могуће развијати фронт радова према напредовању су:

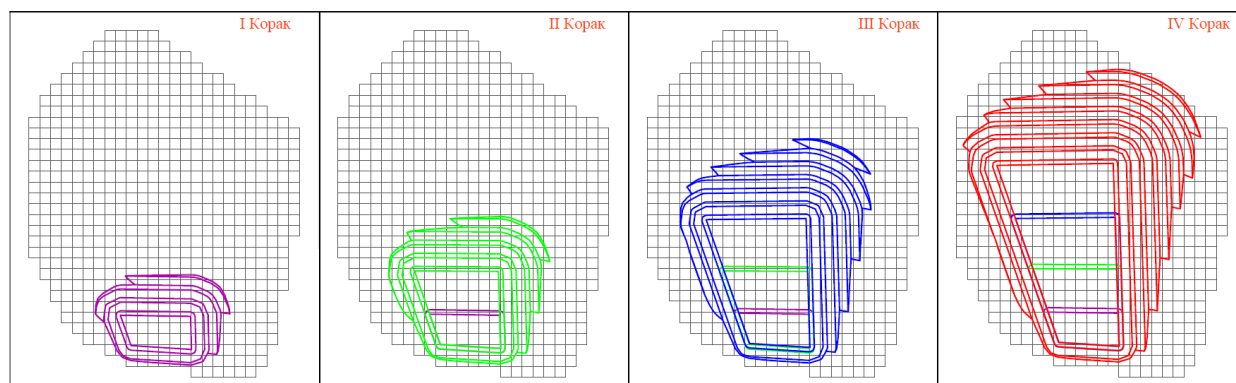
- ✕ Паралелно (слика 3.3.18),
- ✕ Лепезасто (слика 3.3.19),
- ✕ Кружно (слика 3.3.20),
- ✕ Комбиновано-паралелно и лепезасто (слика 3.3.21),

према почетном положају:

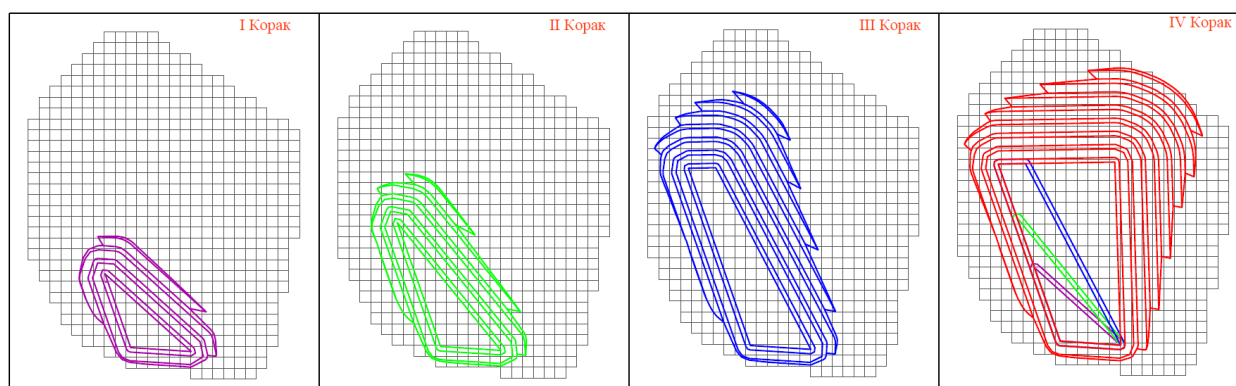
- ✕ периферно,
- ✕ централно,

и према броју праваца напредовања:

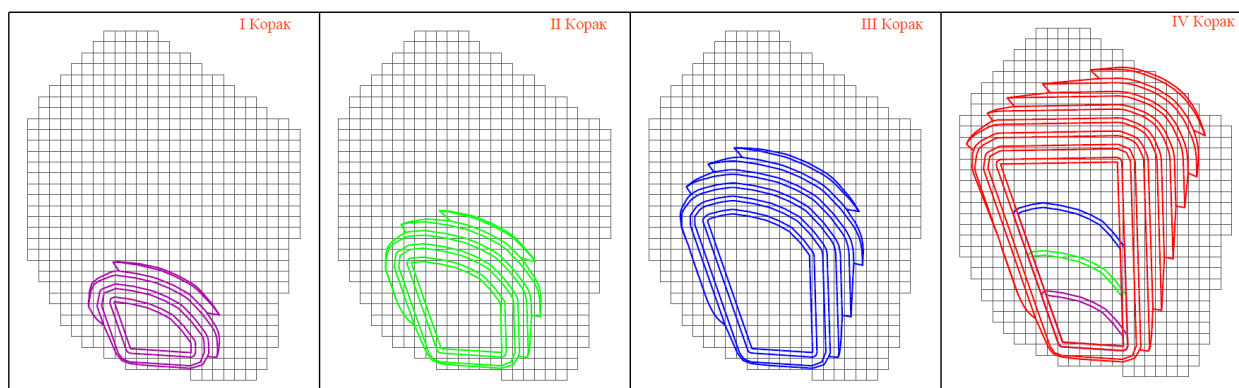
- ✕ једнокрилно,
- ✕ вишекрилно.



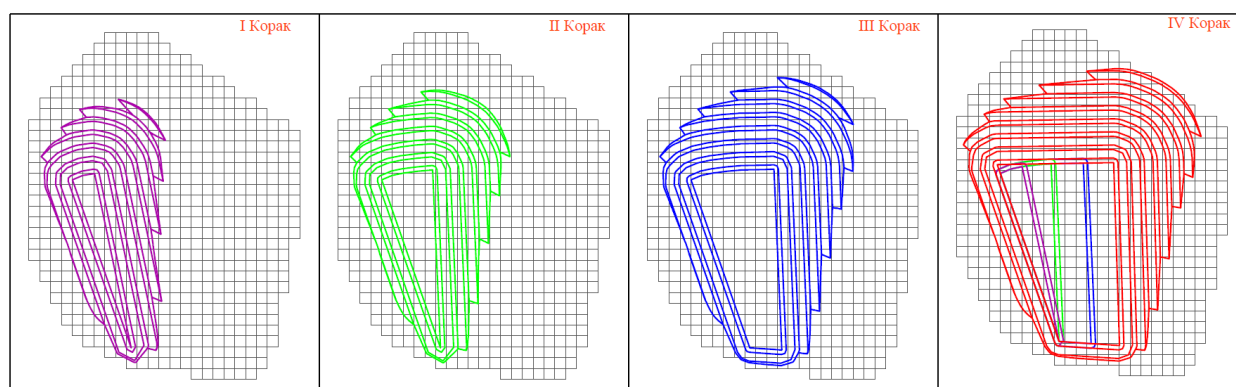
Слика 3.3.18 Паралелан развој фронта радова



Слика 3.3.19 Лепезасти развој фронта радова



Слика 3.3.20 Кружни развој фронта радова



Слика 3.3.21 Комбиновани (лепезасто-паралелно) развој радова

Примјена паралелног и лепезастог развоја фронта радова, као и њихова комбинација, карактеристична је за континуални начин транспорта и одлагања јаловине на одлагалишту. Код камионског начина транспорта фронт радова је могуће развијати кружно или паралелно, док је приликом примјене жељезничког транспорта развој фронта радова лепезаст или кружни (у случају захтева за великим капацитетима).

3.3.10 Подјела одлагалишта према броју етажа (слојева)

У складу са начином на који је формирана генерална косина одлагалишта, тачније од тога на колико се етажа врши одлагања извршена је подјела на:

- ✕ Једноетажна одлагалишта.
- ✕ Двостажна одлагалишта.
- ✕ Вишеетажна одлагалишта.

Формирање сваког од ова три типа одлагалишта има своје предности и недостатке, а избор и могућност примјене зависи првенствено од топографије терена и примјењене опреме за транспорт и одлагање.

Формирања одлагалишта са једном косином могућа је у колико се испуне два основна услова. Први се односи на конфигурацију терена. Најбољи начин да се искористе бенефити једноетажног одлагалишта су у ситуацији када се материјал одлаже у неку природну или

вјештачку депресију са основног терена. На овај начин избјегава се често помјерање одлагача (код континуалног начина рада), а при њиховом помјерању корак напредовања је кратак, као и периодично помјерање транспортера са траком. Други предуслов се односи на опрему којом се врши одлагање. Радне карактеристике опреме требају да задовољи све потребне захтјеве како би се одлагање реализовао на безбједан и сигуран начин. Дужина одлагајуће стријеле треба да обезбједи довољан радијус одлагања и довољну удаљеност одлагача од косине, али и реалтивно мали специфични притисак на тло.

На овакав начин подједнако се формирају одлагалишта континуалном и дисконтинуалном опремом (камионско-булдозерска). Одлагање откопане откривке са површинског копа Велики Кривељ у Бору (слика 3.3.22) врши се формирањем једне цјеловите косине одлагалишта.



Слика 3.3.22 Једноетажно одлагалиште откопаног материјала на откопаног на површинском копу
Велики Кривељ [61]

У ситуацији када је косина одлагалишта сачињена од две етаже тада се ради о двоетажном одлагалишту. Код овог типа одлагалишта искоришћена је могућности формирања одлагалишта са једном дубинском етажом, а поред тога врши се одлагање материјала висински на основном нивоу. Овако описан примјер нашао је примјену код одлагања одлагачима са траком. Како би се повећао капацитет на одлагању, али и цјелокупног система и уштедило додатно вријеме на постављању транспортера у нови положај одлагач формира висинску етажу на нивоу стајања до максималне висине одлагања. Код оваквог начина рада неопходно је ускладити корак напредовања и дубинске и висинске етаже, како би се избјегло сустизање етажа, али и формирање непопуњеног простора између одложеног материјала висинске етаже.

Формирање двоетажних одлагалишта дисконтинуалном опремом није непознато. Код ових одлагалишта свакао је искоришћена предност конфигурације терена. На површинском копу техничког камена Терамиде формирано је спољашње двоетажно одлагалиште тако што је са обе етаже на којима се откопава откривка израђен пут до платоа ниже етажа. Након што је створено довољно простора на берми ниже етаже на њој је почело одлагање и формирање висинске етаже (слика 3.3.23).



Слика 3.3.23 Примјер двоетажног одлагалишта [54]

Поред конфигурације терена и радних карактеристика опреме формирање одлагалишта са једном или двије етаже могуће је у ситуацијама када радне карактеристике материјала омогућавају формирање косина великих висина. Формирање оваквих одлагалишта примјењује се у случајевима када је могуће објединити више транспортних система на један систем одлагања, а доста често се на овакав начин формирају одлагалишта мањег капацитета.

Формирање вишеетажних одлагалишта је доста чест примјер и везан је за сложене системе великих капацитета експлоатације, тако да откопни системи имају сопствени простор за одлагање. Код континуалних система на вишеетажним одлагалиштима се формирају и висинска и дубинска подетажа у склопу једне етаже. Такође, на овај начин је могуће обезбједити боље збијање (слијегање) материјала. Ово је нарочито карактеристично за одлагалишта материјала слабијих физичко-механичких карактеристика и одлагалишта веће запремине. На површинском копу Дрмно и Тамнава западно поље формирана су унутрашња вишеетажна одлагалишта унутар активних површинских копова континуалном опремом. На површинском копу Потрлица формирано је комбиновано унутрашње одлагалиште примјеном и дисконтинуалне и континуалне одлажуће опреме (слика 3.310). Код формирања унутрашњих одлагалишта она су по правилу вишеетажна.



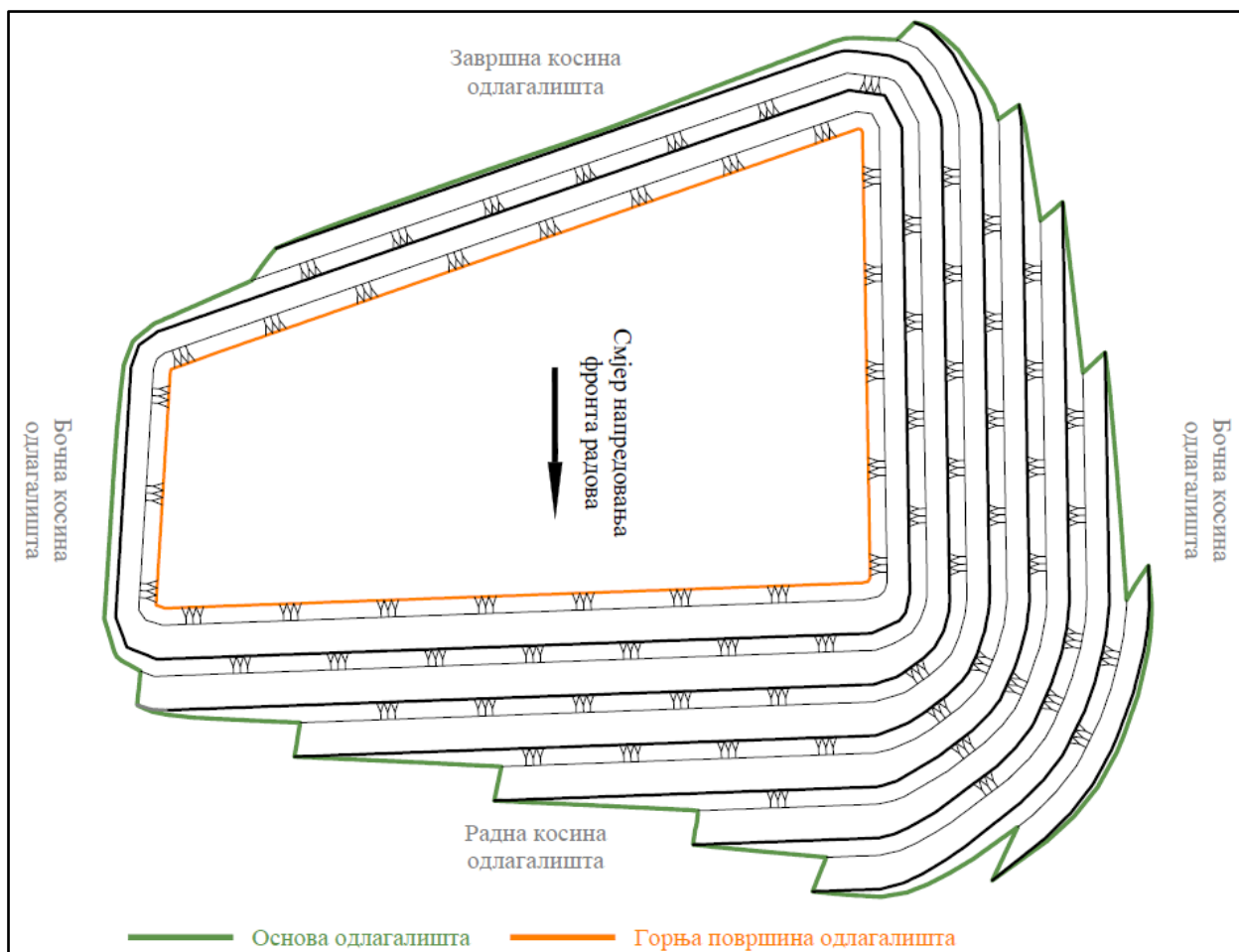
Слика 3.3.24 Унутрашње вишеетажно одлагалиште површинског копа Дрмно [43]

3.4 Геометријски параметри одлагалишта

Код описа одлагалишта са стручне стране потребно је разликовати две основне групе појмова и то основне елементе одлагалишта и основне конструктивне (геометријске) параметре одлагалишта.

Основни елементи одлагалишта су:

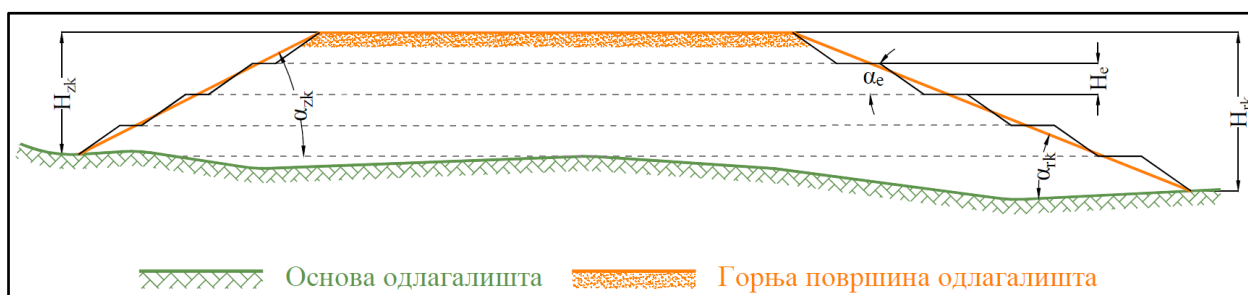
- ✕ површина основе одлагалишта,
- ✕ завршна косина одлагалишта,
- ✕ радна косина одлагалишта,
- ✕ бочне косине одлагалишта,
- ✕ етажа одлагалишта,
- ✕ горња површина одлагалишта.



Слика 3.4.1 Основни елементи одлагалишта

Основне елементе одлагалишта дефинишу конструктивни (геометријским) параметри одлагалишта, а то су:

- ⊗ висина завршне косине одлагалишта (H_{zk}),
- ⊗ угао нагиба завршне косине одлагалишта (α_{zk}),
- ⊗ висина система радних косина одлагалишта (H_{rk}),
- ⊗ угао нагиба система радних косина одлагалишта (α_{rk}),
- ⊗ висина етажа на одлагалишту (H_e),
- ⊗ угао нагиба косина етажа одлагалишта (α_e).

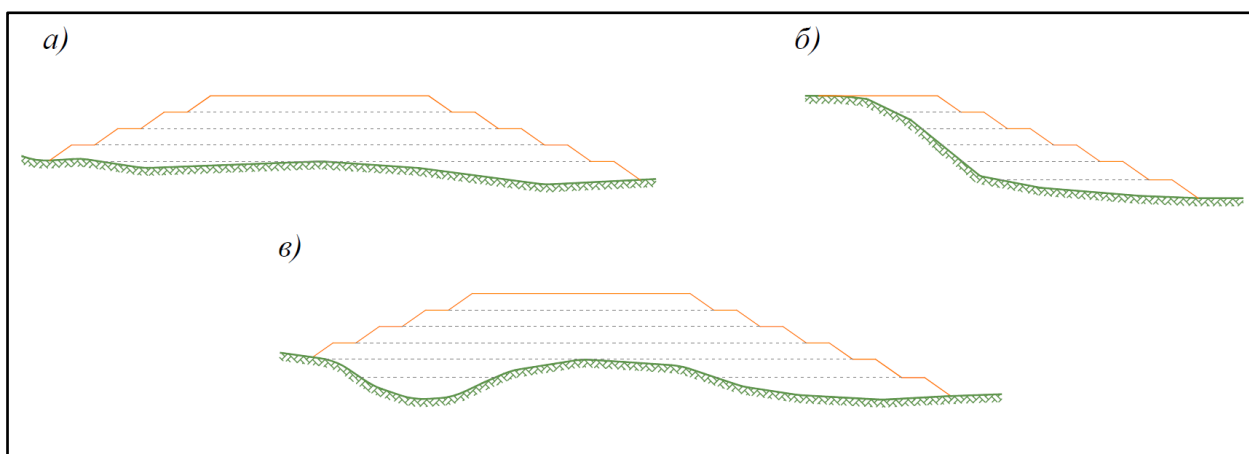


Слика 3.4.2 Конструктивни (геометријски) елементи одлагалишта



3.4.1 Површина основе одлагалишта

Простор на коме се формира одлагалиште, односно она површина терена која је заузета технолошком операциом одлагања јаловине представља основу одлагалишта. Заузимање простора могуће је извршити формирањем једне или више етажа, на шта пресудан утицај има конфигурација терена. У случају хоризонталног или благо нагнутог терена цјелокупна основа одлагалишта се налази испод једне етаже (слика 3.4.3 а), док код формирања одлагалишта на стрмом терену могуће је да се на основу одлагалишта ослони више етажа (слика 3.4.3 б).



Слика 3.4.3 Основе одлагалишта

Дефинисање основе одлагалишта врши се на начин да простор који је предвиђен за формирање одлагалишта треба да омогући одлагање потребне количине јаловине на што мањој површини терена. Поред капацитета одлагалишта на дефинисње основе утиче планирани развој радова, као и технологија одлагања. У складу са тим облик одлагалишта треба да обезбједи што већи континуитет дужине фронта радова током његовог развоја.

Примјер повољне конфигурације терана за формирање спољашњих одлагалишта, ако се изузме простор површинских копова на којима је завршена експлоатација, су благо-таласати терени или терен испуњем природним депресијама, јамама и вртачама (слика 3.4.3 в).

Димензије основе одлагалишта могуће је одредити у складу са пројектованом количином јаловине коју је потребно одложити на одлагалишту и форме геометриског облика којој облик спољашњег одлагалишта одговара. Оквирна процјена површине терена коју заузима основа одлагалишта у случају одлагања одређене количине јаловине могуће је дефинисати помоћу једначине за прорачун запремине зарубљене купе. На овај начин могуће је процјенити димензије заузетог простора приликом пројектовања и формирања одлагалишта на хоризонталном и благо нагнутом терену, али не и на терну са стрмом и таласастом конфигурацијом.

3.4.2 Завршна косина одлагалишта

Завршна косина одлагалишта, представља систем етажа, односно дио одлагалишта на коме су радови на одлагању јаловине завршени и не налази се опрема којом се врши одлагање.



Основни геометриски елементи завршне косине одлагалишта су висина и угао нагиба завршне косине.

Вертикално растојање од површине основе одлагалишта, односно површине терена на којој је одложена јаловина до горње површине одлагалишта у дијелу гдје су завршени радови представља висину одлагалишта у завршној форми. У зависности од нагиба подлоге на којој се формира одлагалиште у различитим дијеловима, одлагалишта имају различиту висину. У складу са тим могуће је имати максималну и минималну висину одлагалишта.

Ограничење висине одлагалишта, односно надморска висина на којој се формира горња површина условљена је са више различитих елемената као што су геомеханички параметри материјала који се одлаже, односно угла нагиба завршне косине одлагалишта, изабране технологије транспорта и одлагања. Поред природних и техничких елемената, висину одлагалишта може да дефинише и законска регулатива, али и потреба за уклапањем одлагалишта у рељеф локалитета на коме се врши одлагање.

Угао који заклапа замишљена линија која спаја доња ивица најниже и горња ивица највише етаже одлагалишта у завршној контури одлагалишта са хоризонталном равни је угао нагиба завршне косине одлагалишта.

Угао под којим се пројектује и формира завршна косине одлагалишта дефинише се према фактору сигурности и у директној је вези са врстом материјала који се одлаже и њиховим физичко-механичким карактеристикама материјала. Приликом геомеханичке провјере стабилности анализа се реализује методама које одговарају карактеристикама одложеног материјала, а који су по правилу растресити са веома малом вриједношћу кохезије или са њеним потпуним одсуством.

У појединим ситуацијама довођење угла завршне косине у пројектовани нагиб који обезбеђује дугорочну стабилност реализује се додатним помоћним радовима. Ово је нарочито изражено код континуалних система експлоатације, код којих се због габарита опреме финално уређење и достизање пројектованог угла завршне косине реализује у процесу техничке рекултивације.

3.4.3 Радна косина одлагалишта

Радна косина одлагалишта је косина на чијим етажама је позиционирана опрема за одлагање и до које транспортна средства довозе откопану јаловину. Активно ангажовање опреме за одлагање и извођење радова за последицу има перманентно помјерање косине у времену и простору, што је последица активног извођења радова. За разлику од завршне косине генерални нагиб радне косине је већи, односно косина се формира под стрмијим нагибом. Основни геометриски елементи радне косине одлагалишта су висина и угао нагиба радне косине.

Вертикално растојање од површине основе одлагалишта, односно површине терена на којој се активно врши одлагање јаловине до горње површине одлагалишта на радној косини представља висину радне косине одлагалишта. У зависности од нагиба подлоге на којој се



формира одлагалиште у различитим дијеловима одлагалишта имају различиту висину. У складу са тим могуће је имати максималну и минималну висину одлагалишта.

Угао који заклапа замишљена линија која спаја доња ивица најниже и горња ивица највише етаже одлагалишта у дијелу одлагалишта на коме се још изводе радови са хоризонталном равни је угао нагиба радне косине одлагалишта.

Висина и угао нагиба радне косине представљају најважније елементе радне косине одлагалишта. Оба ова елемента су у зависности од броја етажа и карактеристика материјала који се одлаже. Са становишта функционалности рада цјелокупног система експлоатације код континуалног начина откопавања, транспорта и одлагања (рад БТО система) најповољнији принцип је да свака етажа на којој се врши откопавање има своју етажу на одлагалишту. Поред овог приступа, у складу са условима рада и карактеристикама опреме, могуће је обједињавање више откопних система на један или више одлагалишних етажа. Овакав принцип рада смањује број елемената система, али захтијева усаглашавање опреме различитог капацитета и технолошких карактеристика.

У случају дисконтинуалног функционисања система експлоатације, нарочито приликом примјене камионског транспорта, до изражаја долазе маневарске способности ове транспортне опреме. Приликом оваквог формирања одлагалишта могуће је једно мјесто откопавања повезати са више мјеста на одлагању. Пројектовање и формирање етажа на одлагалишту реализује се у зависности од дужине и висине транспорта јаловине, али и од пројектованог капацитета.

3.4.4 Бочне косине одлагалишта

Поред радне и завршне косине одлагалишта, током процеса одлагања формирају се и бочне косине. Оне су паралелене са правцем напредовања одлагалишта и формирају се постепено како се формира одлагалиште. Дуж бочних косина су постављени главни транспортни и сервисни путеви.

Угао под којим се формирају бочне косине приближан је углу под којим се формира завршна косина одлагалишта. За разлику од завршне косине на бочним косинама одлагалишта због присуства опреме и повремених активност процес биолошке и техничке рекултивације се одвија у нешто каснијим фазама.

3.4.5 Етажа одлагалишта

Као и у зони експлоатације и откопавања јаловине тако и на одлагалиштима етажа представља основни параметар цјелокупне конструкције. Основни конструктивни параметри етажа на одлагалишту су висина и угао нагиба етаже, док су основни елементи етаже горња и доња површина етаже, док косина која спаја ова два елемента назива се чело етаже. Подјела косине одлагалишта на етаже, односно њихов број, висина и угао под којим се формирају зависе од карактеристика материјала који се одлаже, али и од карактеристика опреме којом се врши одлагање.



У зависности од примјењеног система експлоатације на различит начин се врши и формирање етажа дуж радне косине одлагалишта. Код примјене камионског транспорта формирају се дубинске етаже. Риједак је примјер формирања висинских етажа на камионско-булдозерским одлагалиштима, али је он могућ и више везан за нетипичне ситуације. Код примјене транспорта жељезницом, у колико се одлагање материјала реализује багером кашикарном или дреглајном могуће је формирати и висинске етаже.

Континуални начин одлагања омогућава са се приликом рада одлагача формира дубинска и висинска подетажа. Тачније код великих система као што је на простору Србије површински коп Дрмно радом одлагача формира се дубинска и висинска подетажа (слика 3.4.4).



Слика 3.4.4 Рад одлагача формирањем дубинске и висинске подетаже [43]

3.4.6 Горња површина одлагалишта

Паралелно са развојем радова и формирања одлагалишта формира се и његова горња површина. Израдом висинске подетаже код континуалних система формира се и горња површина одлагалишта, док у случају дисконтинуалних одлагалишта (камионско-булдозерска одлагалишта) горња површина одлагалишта представља плато по коме се крећу камиони до радне косине.

Током процеса експлоатације услед планираних и предвиђених радова или вандредних околности могуће је да једно одлагалиште током свог формирања има двије горње површине одлагалишта. Ово је могуће у ситуацијама када је неопходно извршити надвишење претходно пројектованих и формиранних одлагалишта.

Облик горње површине одлагалишта у већини случајева прати и облик нижих етажа, као и облик пресјечне линије одлагалишта са тереном. Ово је нарочито значајно код пројектовања одлагалишта и оптимизације њихове завршне контуре. Пројекцијом горње површине одлагалишта, односно њене ободне линије под углом завршне косине према терену могуће је конструисати завршну контуру одлагалишта (без етажа и берми). На овај начин за релативно



кратко вријеме са великом прецизношћу могуће је одредити капацитет одлагалишта и простор на коме ће одлагалиште бити формирано.

3.5 Технолошки параметри рада опреме на одлагању

Технолошки системи у рударству генерално се могу сврстати у производне технолошке системе који се најчешће дефинишу као функционални скуп предмета рада, средстава за рад, људског рада и пројектоване технологије [62].

На овај начин су побројани и елементи система експлоатације који за основни циљ има обезбјеђење крајњег производа, минералне сировине у одговарајућој количини, одговарајућег квалитета и по цијени која обезбеђује економичност цјелокупне активности. И поред тога што је могуће повући јасну паралелу технолошких система у другим производним областима и система експлоатације минералних сировина, постоји и низ специфичности који се прије свега огледају у познавању својстава радне средине које су увек дефинисане са мањом или већом поузданошћу, али никада и потпуно. Током цјелокупног периода експлоатације, рударска активност се одвија у променљивим структурно-геолошким, инжењерско-геолошким, хидрогеолошким, квалитативним, хидрографским, топографским, метеоролошким еколошким и другим условима, а на које се може дјеловати и контролисати их само у одређеној мјери. Ово су најважнији фактори који суштински дефинишу систем експлоатације на површинским коповима као и реалције између појединих дијелова система.

Прилагођавајући се поменутим специфичностима у овој области постоји више дефиниција система, а једану од најприхваћенијих дефинисао је Владимир Павловић на начин да систем површинске експлоатације представља редослед радова на откривци и минералној сировини којим се обезбеђује економична и сигурна експлоатација са задатом производњом и рационалним искоришћењем лежишта. Основу за дефинисање технике производних процеса и технологије површинске експлоатације као елемената система површинске експлоатације чини лежиште минералне сировине са специфичним геолошким, топографским, хидрогеолошким и климатским особинама [63].

Попут других производних система и систем површинске експлоатације се састоји од низа технолошких процеса, а ови опет од захвата, покрета и микропокрета. Поменути елементи који су у међусобној релацији дефинисаној одговарајућом процедуром, редослиједом активности, заједно чине оно што се у рударству назива технологија рада. Два елемента која одређују технологију рада одлагалишне опреме су техничке карактеристике опреме и параметри радне средине. Технологија рада и параметри рада опреме у рударству су у потпуности описани технолошким шемом рада.

Досадашња пракса је показала да парцијално разматрања технолошког процеса одлагања и технологије рада одлагалишне опреме унутар цјелокупног система експлоатације и пред тога што представља делимично поједностављење, је сасвим прихватљиво са аспекта утицаја технологије рада на дефинисање конструктивних и динамичких параметара одлагалишта откривке и јаловине. Ово важи због тога што су фактори који утичу на дефинисање одлагалишта као цјелине уједно и исти они који утичу на технологију рада одлагалиштне опреме те ни један елемент технолошког процеса одлагања није у потпуности независан. Тако да разматрање технологије рада одлагалишне опреме независно од технологије цјелокупног



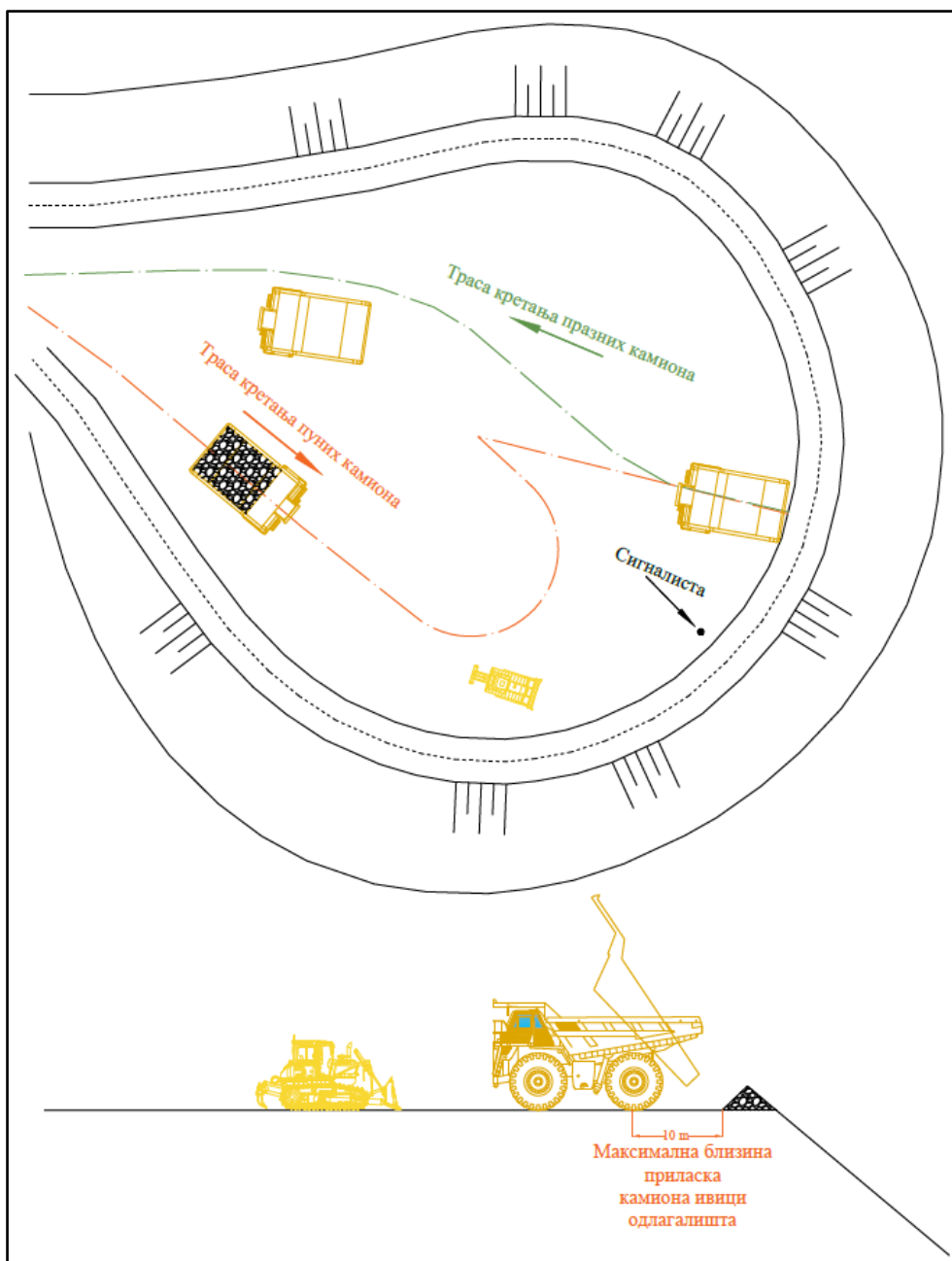
система експлоатације је прихватљиво. Са друге стране приликом оптимизације технолошког процеса одлагања, односно дефинисања локације и дизајна одлагалишта технологију треба разматрати заједно са свим осталим утицајним факторима.

Генерална подјела технологије рада одлагалишне опреме заснована је на мјери континуитета тока материјала и дјели се на дисконтинуалну и континуалну технологију. Карактеристични пример дисконтинуалне технологије одлагања откривке и јаловине је одлагање камионима, док се у случају континуалне технологије одлагање одлагачима са траком најчешће сусреће. На сликама 3.5.1 и 3.5.2 дати су примери технолошких шема рада ових најкарактеристичнијих технологија одлагања.

Поред побројане опреме које карактеришу и континуални и дисконтинуалну технологију одлагања у поглављу 3.3.6. Према примјењеној опреми приказана је подјела одлагалишта према примјењеној опреми за одлагање за осталу механизацију.

Како би се велика разноврсност технологија одлагања, примјењене опреме и параметара рада опреме структурирао за различите случајеве уобичајено је да технолошке шеме рада садрже неке основне заједничке елементе. У ситуацији дисконтинуалног одлагања камионима важећи Правилник о техничким захтевима за површинску експлоатацију лежишта минералних сировина [64] дефинише шта технолошка шема мора да садржи, а то су следећи елементи:

- ✕ начин приласка камиона ивици одлагалишта,
- ✕ маневрисања и позицију пражњења камиона,
- ✕ минимално одстојање прилаза пуног камиона ивици одлагалишта,
- ✕ маневрисања празног камиона,
- ✕ планирање радних површина и припрему за прјем наредних маса откривке и јаловине.

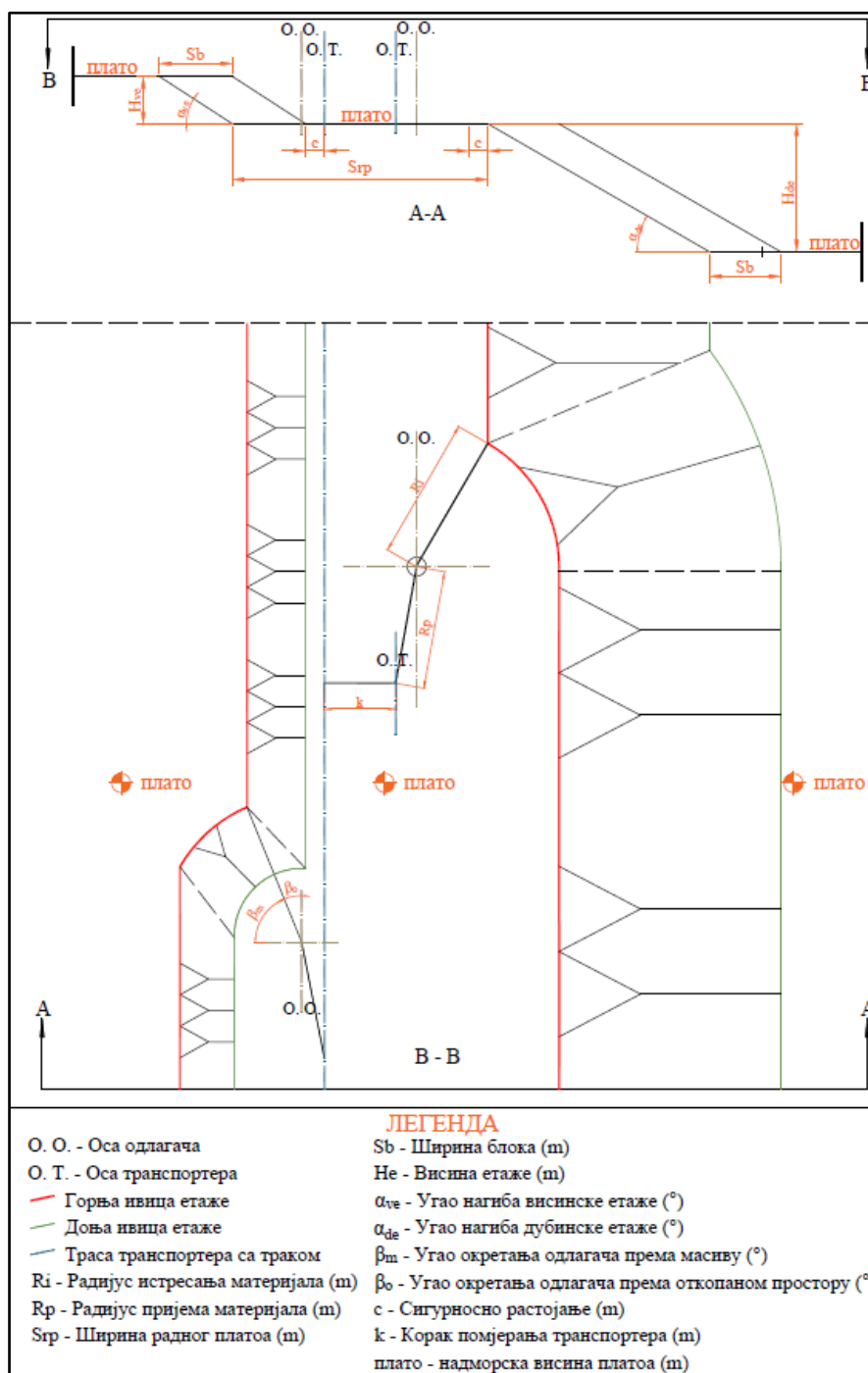


Слика 3.5.1 Технолошка шема одлагања дисконтинуалном опремом

При раду одлагача са траком технолошка шема садржи следеће:

- ✘ трасу транспортера са транспортном траком и трасу кретања одлагача са траком као и њихов положај при одлагању са једне и друге стране транспортера,
- ✘ елементе захвата и покрета одлагача попут углова окретања стреле одлагача као откопаном простору и ка одложеном материјалу, висина одлажуће стреле одлагача са траком при дубинском и висинском раду, итд.
- ✘ положај одлагача са траком у односу на чеону и бочну ивицу берме етажне на одлагању који осим што мора да обезбједи геомеханичку стабилност опреме зависи и од начина и редослиједа формирања одложеног материјала,

- ✂ основне геометријске елементе етаже одлагалишта (висина етаже/подетаже, ширина блока, ширина радне површине, сигурносна растојања, углови радних косина итд.) који зависе од тога да ли одлагач са траком ради и дубински и висински, у блоку, полублоку (боку) или фронту.



Слика 3.5.2 Технолошка шема одлагања континуалном опремом

Елементи технолошке шеме треба да испуне критеријуме безбедног рада људства и опреме, реализацију одговарајућег капацитета, минимизацију трошкова рада опреме и најмањи могући



негативан утицај на окружење. Технологије рада одлажуће опреме дефинисана у складу са поменутим критеријумима обезбеђују постизање повољних параметра технолошког процеса одлагања у цјелини.

3.6 Рекултивација и еколошки аспекти

Површинска експлоатација са свим својим елементима, од контуре површинског копа до постројења за припрему минералних сировина, и природно окружење чине нешто што је Владимир Павловић дефинисао као природно-технолошки екосистем [65]. Димензије овог екосистема су знатно веће од граница које су прописане законском регулативом или пројектном документацијом, а мјере се утицајем експлоатације на природну околину.

Утицај површинске експлоатације, а тиме и формираних одлагалишта, на животну средину највећи је у самом центру природно-технолошког екосистема, око локације на којој се реализује рударска активност. Негативни утицаји цјелокупне рударске активности одражавају се на ваздух, воду и тло, али и на биљни и животињски свијет. На човјека као саставног чиниоца природно-технолошког екосистема рударска активност дјелује двојако. Позитивни утицај површинске експлоатације одражава се кроз социо-економски аспект, у виду отварања радних мјеста, повећане флукуације новца у најчешће малим и руралним срединама и развој инфраструктуре. Негативан утицај огледа се у погоршавању животних услова, измјене рељефа и нарушавању терена.

Конкретан утицај површинске експлоатације и формирања спољашњих одлагалишта на животну средину огледа се у:

- ✕ Измјени рељефа и нарушавању терена,
- ✕ Емисији чврстих честица услед дејства атмосферских падавина и вјетра,
- ✕ Утицај на подземне и површинске воде,
- ✕ Емисију буке.

Спољашња одлагалишта по својим димензијама представљају највеће објекте у плану и простору, који су везани за површинску експлоатацију. То их чини знатно уочљивијим и од самог површинског копа или грађевинских објеката у функцији експлоатације. Њиховим формирањем долази до вјештачке промјене животног окружења и измјене рељефа за веома кратак временски период. Поред драстичне измјене рељефа, формирање одлагалишта може да проузрокује промјену климе на локалном нивоу, као што је измјена доминантног правца струјања вјетра.

Како би се смањио утицај одлагалишта на окружење, законска регулатива данас (локална, државна и стручна) прописује низ мјера и ограничења која се односе на пројектовање и формирање одлагалишта. Поред поступка континуалног мониторинга и праћења стања животне средине, правним прописима, али и еснафском етиком дефинисана су ограничења висине одлагалишта.

Емисија чврстих честица ситног гранулометриског састава услед дејства вјетра је утицај чији се ефекти примјећују знатно изван граница унутар којих се обавља експлоатација. Разношење ситнозрних честица значајно је током сушног перијода, као и током сувих и хладних зимских



мјесеци када је појачано струјање вјетра. Изградњом спољашњих одлагалишта повећава се могућност емисије, али и дomet до које се прашина простира.

Очекивана и неминовна последица рударске активности измјена хидрографских и хидрогеолошких параметара ужег, али и ширег локалитета. Утицај површинских и подземних вода на површинску експлоатацију је јако значајан и отежавајући. Како би се створили повољни услови за експлоатацију и смањено негативан утицај вода радови који претходе односе се на регулацију и измјештање ријечних корита, исушивање плавних и мочварних дијелова простора предвиђеног за рударску активност. Сви ови радови утичу на промјену рељефа, али и на измјену микроклиме и локалних екосистема.

Процес површинске експлоатације прати и измјена нивоа подземних вода, планском изградњом бунара којима се врши обарање нивоа подземних вода или природним истицањем подземних вода у контуру површинског копа. Обарање нивоа подземних вода, обара се и ниво воде у бунарима које локално становништво користи за водоснабјевање. Поред водоснабјевања обарање нивоа подземних вода утиче и на пољопривредну активност.

Подручија обухваћена рударском активношћу током тог процеса пролазе кроз значајну измјену и нарушавање. Без обзира на размјере девастације, цјелокупан простор је могуће рекултивисати и прилагодити новој намени у постексплоатационом периоду. Примјеном савремених мејра техничке и биолошке рекултивацијне нарушених површина, могуће је повећати биолошку вриједност и колико је могуће прилагодити барем у том погледу првобитној намени.

Овакав приступ потврђује тезу о одрживом развоју у рударству и да једна грана индустрије са израженим утицајем на животну средину, иза себе може да остави измјењен али уређен рељеф. Неминовно је да оно што савремени човек наруши због својих потреба, буде неповратно изгубљено, већ напротив, могуће је уз добру, правилну и бескомпромисну примјену законске регулативе засноване на резултатима научних истраживања, да се унаприједи и свестрано користи [66].

Добар примјер рекултивације спољашњег одлагалишта површинског копа Дрмно приказан је на слици 3.6.1.



Слика 3.6.1 Рекултивисано спољашње одлагалиште површинског копа Дрмно [43]



4 РАЗВОЈ ХИБРИДНОГ МОДЕЛА ЗА ОПТИМИЗАЦИЈУ ЗАВРШНЕ КОНТУРЕ ОДЛАГАЛИШТА

У склопу дисертације представљен је хибридни модел за оптимизацију завршне контуре одлагалишта на површинским коповима. За разлику од досадашњих примјера оптимизације одлагалишта (који су приказни у поглављу 2. *Преглед литературе*) примјеном развијеног хибридног модела, добијају се рјешења, која у обзир узимају и компоненту положаја и дизајна одлагалишта. Рјешења се генеришу у аналитичком, али и графичком облику, због чега су погодна за даљи детаљни дизајн. Крајњи резултат оптимизације је прелиминарна контура одлагалишта, чији су конструктивни параметри оптимизовани по вишеструким критеријумима сведеним на принцип најнижих трошкова по метру кубном одложеног материјала у оквиру дефинисаних ограничења. Слично као у случају примјењених алгоритама за оптимизацију површинских копова (нпр. Lerch-Grossman алгоритам) генерисано оптимизовано рјешење одлагалишта погодно је за процесе детаљног дизајна завршне контуре одлагалишта.

Приликом разраде модела цјелокупан процес је посматран из перспективе рударства и са циљем да се пројектовање завршне контуре одлагалишта олакша и убрза. У складу са тим посебна пажња је посвећена рударским факторима, као што су технологија одлагања, транспорт откопаног материјала и конструктивним елементима одлагалишта. Са друге стране, модел није обухватио технологију селективног одлагања и управљање различитим врстама јаловине (реактивна и инертна) унутар једне контуре одлагалишта. Тако да је модел развијен за дизајн одлагалишта са хетерогеним материјалом, али се његова функционалност може искористити и за селективно одлагање под условом да се за сваку врсту или тип материјала формира засебно одлагалиште.

Такође, у обзир су узете и посебна пажња је посвећена условима и ограничењима проистеклим из захтијева за очувањем животне средине. Поред рударских технолошких процеса, који су обрађени кроз технологију откопавања, транспорта и одлагања и сегмент заштите животне средине, представља елемент који је интегрисан у сам модел и утиче на избор оптималне контуре одлагалишта. Цјелокупан процес експлоатације у свим фазама и сегментима се одвија са одређеним неизвјесностима и несигурностима, било да је у питању могући пад цијене минералне сировине, промјене закона или немогућности откупа земљишта. Сви ови елементи такође у великој мјери утичу и на формирање одлагалишта, па су из тог разлога уврштени у модел.

У геометријском смислу оптимизација завршне контуре одлагалишта реализује се кроз оптимизовање дијела конструктивних параметара одлагалишта. Њиховим варирањем мијења се позиција одлагалишта у простору, на тај начин генеришу се вишеструка рјешења одлагалишта како по питању локације тако и по питању дизајна. Поред утицаја на просторни аспект формирања одлагалишта (позиција, заузете запремине и површина терена) утицај конструктивних елемената је значајан и за технолошки аспект формирања одлагалишта. Избор оптималне контуре одлагалиште врши се на основу критеријума минималних укупних трошкова који се генеришу формирањем одлагалишта. У развијеном оптимизационом алгоритму модела управо критеријум минималних трошкова дефинише функцију циља.



4.1 Циљ и задатак развијеног модела

Основни циљ цјелокупног истраживања је развој хибридног модела за оптимизацију завршне контуре одлагалишта. У складу са тим наведени циљ подразумева израду алата помоћу кога би се реализовала оптимизација завршне контуре одлагалишта према задатим критеријумима (технолошким, економским, еколошким, итд.) и аутоматско или семиаутоматско дефинисање оптималне локације и геометрије одлагалишта. Модел који је приказан, заснива се на савременим научним методама, које су директно или индиректно коришћене у раду.

Шира лепеза циљева развијеног модела обухвата:

- ✕ Идентификацију и квантификацију битних параметара при конструкцији оптималне контуре одлагалишта површинског копа.
- ✕ Обезбјеђење генерисања оптималне или суб-оптималне (блиске оптималној) завршне контуре одлагалишта.
- ✕ Смањење нивоа субјективних одлука, а тиме и нивоа грешака, у процесу стратешког и инвестиционог планирања површинске експлоатације.
- ✕ Смањење броја потребних инжењерских сати рада и тиме олакшање процеса пројектовања.

Задатак развоја модела по природи ствари проистекао је из циља и представља опсежно истраживање са више различитих становишта и прикупљање чињеница које су везане за услове, циљеве, начине, последице и потешкоће које утичу на формирање одлагалишта. На овај начин створена је јаснија и прецизнија слика о свим аспектима који имају већи или мањи, позитиван или негативан утицај на оптимизацију завршне контуре одлагалишта.

4.2 Коришћене методе

Рјешавање сложених проблема, на чији исход по правилу утиче већи број релевантних, разноврсних утицајних фактора, по правилу није могуће реализовати примјеном једне методе. Увођењем у цјелокупан процес више различитих метода, њиховим координисаним радом и прилагођавањем омогућава се ефикасно рјешавање проблема. Примјена више метода са друге стране изискује више времена у изради алгорита и њихову синхронизацију, али и сам начин функционисања чини комплекснији и временски дужи.

Овај принцип је коришћен и приликом развоја хибридног модела за рјешавање проблема оптимизације завршне контуре одлагалишта. У склопу модела коришћене су 4 методе и то:

- ✕ Вишекритеријумско одлучивање – АНР метода – за дефинисање вриједности утицајних фактора.
- ✕ Случајни избор (Monte Carlo симулација) – за симулацију геометрије потенцијалних рјешења и генерисање почетне популације тачака (рјешења).
- ✕ Генетски алгорита – за оптимизацију рјешења.
- ✕ Хеуристички метод – за стручно тумачење и финализацију рјешења.



Свака од наведених метода користи се у различитим корацима рада модела. Тако да се метода АНР примјењује у припремној фази модела, метода Monte Carlo се користи у почетној фази оптимизације, а генетски алгоритам је резервисан за дио модела у коме се врши оптимизација. Хеуристичка обрада и тумачење рјешења су резервисани за завршну фазу оптимизације.

4.2.1 Метода аналитичко хијерархијског процеса (АНР метода)

Доношење одлука је саставни дио свакодневног живота, било да се ради о веома озбиљним пословним одлукама чије су последице далекосежне и имају утицај на велики број људи или је у притању дневна рутина појединца. Крајњи резултат доношења одлуке у великој мјери зависи од доносиоца одлуке. Односно од тога колико је доносилац одлуке упознат са проблематиком, али и од његовог објективног става и стручног знања.

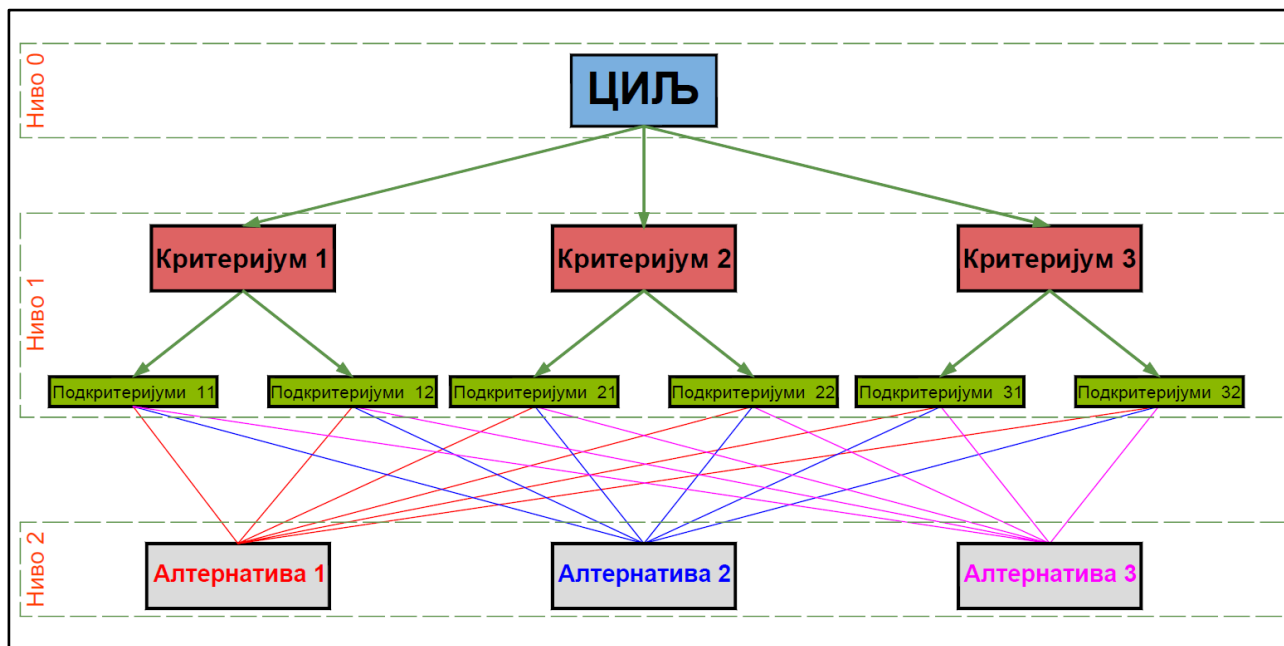
Како би се олакшало доношење одлука развијене су методе вишекритеријумског одлучивања. Худеј у својој дисертацији наводи основне одлике метода вишекритеријумског одлучивања које се огледају у томе да постоје проблеми за чије је рјешавање неопходно узети у обзир више различитих критеријума. По правилу критеријуми по свом карактеру и утицају нису компатибилни, већ управо супротно, најчешће су међусобно конфликтни и опречни. Из ове чињенице произилази да и различита рјешења (алтернативе) по различитим критеријумима нису подједнако добра. Различите особе имају различит поглед на одређену ситуацију, што је сасвим природно и прихватљиво, али и у складу са ставом да се на рјешавање одређеног проблема може и мора сагледати из више различитих углова. У оваквој ситуацији доношење крајње одлуке није могуће без укључивања и доносица одлуке, односно његових афинитета. Са друге стране оног момента када је у процес доношења одлуке укључен доносилац, постоји ризик од већег или мањег утицаја субјективности тј. субјективне објективности на крајњи резултат, односно крајњу одлуку. Из тог разлога развијене методе вишекритеријумског одлучивања посједују механизам за отклањање и препознавање објективности приликом доношења одлука. Из већ поменутог разлога различитости, али и потребе да се одлука донесе на основу сагледавања проблема из више различитих углова, анализирањем и међусобним поређењем више различитих критеријума, рјешење које је донешено примјеном ових метода није оптимално, већ компромисно. Разлог за то је што једно рјешење не може бити најбоље по свим критеријумима, па тако не може бити ни оптимално [67].

Данас се користи велики број ових метода, међу којима су најзначајније АНР, VIKOR, TOPSIS, PROMETHEE и многе њихове варијације. Поред ових, често примјењиваних метода, развијене су и нове методе [68]. Примена ових метода поред систематичности која је неопходна приликом доношења одлука, у знатној мјери може да убрза и олакша цјелокупан процес [69].

Постоји јако велики број примјера примјене метода вишекритеријумског одлучивања како у области рударства [67, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76], тако и у другим аспектима науке [77, 78, 79].

У приказаном моделу коришћена је метода аналитичког хијерархијског одлучивања, односно **The Analytic Hierarchy Process (АНР)**. Ова метода је развијена у периоду од 1971. до 1974. године, а развио је Thomas L. Saaty и до данас представља једну од најчешће примјењених метода вишекритеријумског одлучивања [80].

Разлог због кога је баш метода АНР изабрана и примјењена у раду огледа се у самом начину функционисања ове методе, односно у хијерархијском разлагању цјелокупног проблема, независно од тога колико су они компликовани. На врху хијерархије увијек се налази циљ док се на нижим нивоима налазе критеријуми, подкритеријуми и алтернативе. Saaty је у свом раду [80] из 1987. године дао прост илустративни приказ како функционише ова метода, а који је кроз вријеме еволуирао и приказан је у великом броју радова и има облик сличан као на слици 4.2.1. Као илустрација, на слици 4.2.1 приказан је примјер са једним циљем, три критеријума (и шест подкритеријума) и три алтернативе.



Слика 4.2.1 Илустративна шема функционисања АНР методе [1]

Како би се стекао бољи увид у проблем неопходно га је познавати, али и сагледати из више углова. То је уједно и концепт АНР методе, а постављен је на међусобном поређењу алтернатива. Сам доносилац одређује интезитет и тежину преференције једне алтернативе у односу на другу, унутар задатих критеријума, које такође упоређује према својим преференцијама и интензитету [67] [69].

Битан аспект на који АНР метода посебно води рачуна је тај да приликом доношења одлуке доносилац одлуке остане доследан и на тај начин равномјерно пореди све понуђене алтернативе. Свакако мала недоследност у процесу доношења одлуке није лоша, у супротном људи би били роботи који би обављали посао без могућности на промјену мишљења у складу са новим чињеницама и доношење одлука у складу са њиховим мишљењем, ставовима и преференцијама [81].

У приказаном хибридном моделу метода АНР је коришћена за потребе одређивања вриједности земљишта унутар разматраног простора за формирање одлагалишта. Вриједност одређеног простора (подзоне или парцеле) у рударским пројектима не може се разматрати искључиво кроз откупну цијену из разлога што је цјелокупан разматрани простор оптерећен великим бројем неизвјесности, али и широким спектром различитих фактора. Конкретно метода АНР је кориштена у циљу евалуације утицаја одређеног фактора или ризика за



разматрани простор. Јединична откупна цијена одређеног простора се увећава за вредност евалуираног утицаја односно коефицијента, који је добијен методом АНР.

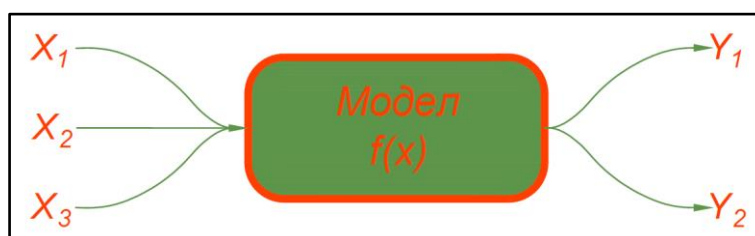
4.2.2 Monte Carlo метода (Monte Carlo симулација)

Monte Carlo метода нашла је широку примјену у савременој научној и стручној пракси. Области примене методе од момента када је публикована 1949. године [82] од стране аутора Nicholas Metropolis и Stanislaw Ulam, до данас знатно се проширио. Тако да је могуће видјети њену примјену у областима, као што су: биологија, математика, генетика, физика, статистика, као и у широком спектару инжењерских дисциплина. Значајном развоју и проширењу примјене методе допринио је развој информатичке технологије, нарочито са аспекта брзине рада. У области рударства метода Monte Carlo примењује се приликом анализе ризика, али и као пратећа метода у анализи постигнутих рјешења [83] [84] [85] [86] [87].

Информације о примјени методе постоје и прије њеног објављивања, али о томе нема доказа у публикованим документима [88]. Развој методе је везан за пројекат Manhattan, који је био назив за заједнички тајни пројекат влада САД, Канаде и Уједињеног краљевства чији је циљ био развој атомске бомбе. Симулација је коришћена да би се одредила случајна дифузија неутрона [89].

Метода Monte Carlo је симулација чији је циљ одређивање резултата, заснован на великом броју понављања и статистичкој анализи узорака. Овакав приступ методу чини веома блиском нечему што се зове случајним експериментом. Односно оним експериментима код којих резултат није унапријед познат [90]. У суштини метода Monte Carlo се састоји од групе алгоритама који резултате процеса приказују у нумеричком облику, али је могуће и њихово превођење у графички облик, као у моделу који је приказан у дисертацији [91].

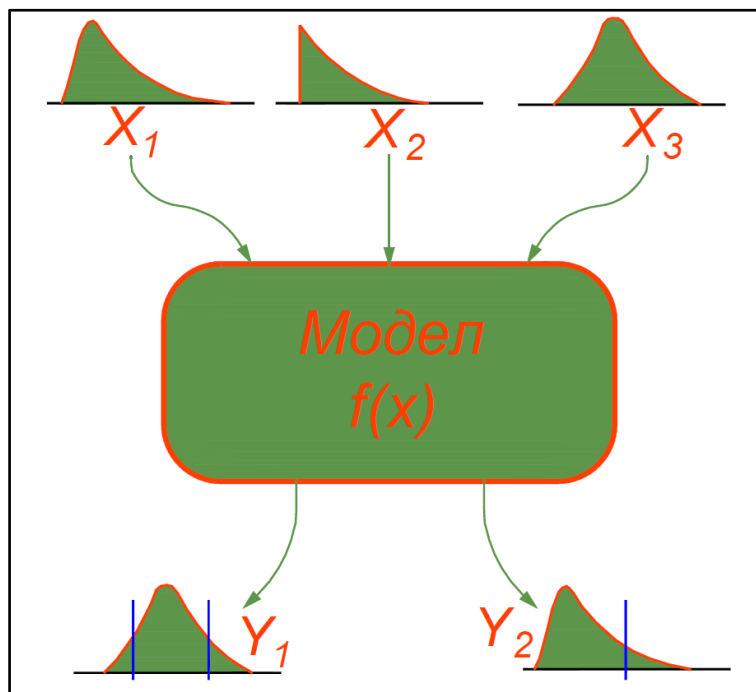
Приликом примјене методе Monte Carlo велики број симулација, односно понављања, генерише јединствено рјешење (рјешења) које је одабрано као случајна вриједност из скупа улазних параметара. За разлику од класичних детерминистичких метода код којих се за сваку конкретну промјену улазних параметара добија јединствено рјешење анализираног модела [91].



Слика 4.2.2 Генерални алгоритам детерминистичких симулација [91]

Резултати Monte Carlo методе представљају вјероватноћу појављивања различитих вриједности одређене величине. Преуслов за то лежи у томе да је неопходно анализирани физички систем описати функцијама расподеле вјероватноће. Monte Carlo симулација се реализује случајним избором вриједности из формираних, улазних функција. Рјешења добијена на овај начин су пробалистичка, а представљају резултат одабира случајно узетих

вриједности улазних параметара. Могућност формирања пробалистичких рјешења омогућава примјену методе Monte Carlo за анализу неизвесности [91].



Слика 4.2.3 Генерални алгоритам детерминистичких симулација [91]

Начин на који функционише метода може да се подјели у 4 корака или фазе и то:

1. Генерисање статичког модела (процесне функције).
2. Дефинисање улазних параметара преко функција расподеле вјероватноће.
3. Генерисање резултата на основу случајних променљивих из скупа дистрибуције улазних параметара.
4. Анализа добијених резултата.

Ова четири корака представљају основе фазе кроз које одређени проблем пролази приликом његове обраде [90]. Са друге стране различити аутори на поједине проблеме, а уједно и на њихово рјешавање гледају са већим или мањим бројем детаља, па је тако и број корака функционисања методе већи или мањи [92] [93]. Суштинских разлика нема већ се код неких аутора методологија Monte Carlo методе дискретније посматра што резултује већим бројем мањих корака (K. Rezaie a, M.S. Amalnik, A. Gereie, B. Ostadi, M. Shakhseeniae, 2007, Eriçok Ö.,2004),), док други имају много општији поглед са мањим бројем фаза (Raychaudhuri, S. 2008.) [91]. Број корака и подкорака зависности од броја укључених фактора и комплексности проблема, па и саме симулације могу бити веома сложене [94].

4.2.3 Генетски алгоритам

Оптимизација представља операцију која је саставни дио свакодневнице и неминовност савременог живота и присутна је код сваког процеса доношења одлука. Одговор на питање шта је то оптимизација, са математичке стране може се описати, као сваки поступак који



стреми ка оправданом квантитативном рјешењу у коначном броју итерација, који се одвија унутар ограничења која су наметнута проблемом. У пракси постоји велики број математичких оптимизационих метода, а њиховом подјелом и груписањем се бавио велики број аутора. Све у циљу како би се дефинисала способност неке методе да ријеша одређене оптимизационе проблеме, односно међусобно повезане групе проблема којима је одређена метода и намјењена [95].

Ако би смо направили паралелу између оптимизационих метода и еволуционих процеса у природи, можемо доћи до закључка да су еволуциони процеси у природи у одређеном смислу оптимизациони процеси. Кроз генерације се оптимизују особине организама тако да буде што боље прилагођен околини [91]. Концепт природне селекције први је формулисао Charles Darwin и сматра се да је од велике важности у еволуцијској биологији, односно у еволуцији човечанства.

На бази природне селекције, тј. на принципу да преживљавају само најјаче/најквалитетније јединке из популације и да се оне даље размножавају и формирају нове генерације јединки, настао је генетски алгоритам [96]. Њега је почетком 70-их година двадесетог вијека објавио Holland [97]. Користећи основне идеје еволуције и основне генетичке трансформације: селекцију, укрштање и мутацију, генетски алгоритам ријешава проблеме оптимизације. Допринос генетског алгорита у историји хеуристичке оптимизације је изузетно значајан, како за развој оптимизационих метода, тако и за ријешавање комплексних оптимизационих проблема. Значај ове методе се огледа и у њеној веома дугој примјени, кроз коју је доживјела велики број измјена од свог изворног облика [95].

Генетски алгоритам спада у групу хеуристичких оптимизационих алгоритама, односно у ширу групу метахеуристичких алгоритама глобалне оптимизације, чији је основни циљ потрага за минимум односно максимум неке функције (глобални оптимум). Практично гледано генетски алгоритми треба да, као свој резултат, генеришу тачно или приближно рјешење неког проблема оптимизације или претраге. Резултат може бити нумеричка вриједност, математичка функција, график итд [98].

Како би се детаљније објаснио начин функционисања генетског алгорита претходно је неопходно приказати и описати најважније елементе који су укључени у процес оптимизације, а то су:

- ✕ Јединка (јединке);
- ✕ Почетна популација јединки;
- ✕ Генерација;
- ✕ Генерација родитеља;
- ✕ Генерација потомака;
- ✕ Функција циља;
- ✕ Функција ограничења;
- ✕ Варијабле;
- ✕ Дегенеративне појаве;

Цјелокупан процес оптимизације се реализује на скупу **јединки**, кроз које се у датом (почетном) моменту апроксимира рјешење проблема који се ријешава. Тако да је свака од њих потенцијално рјешење [99]. Као и у природи, ћелије живих организама (јединки) састоје



се од хромозома, а хромозоми су сачињени до скупа гена (**варијабли**), који појединачно описују одређену особину живих организама (јединки). Продужавање врсте и настајање нових генерација се реализује комбинациом гена родитеља уз мали број мутација [98].

Почетна група јединки са којом се улази у цјелокупан процес оптимизације назива се **почетна популација**. Што је већа међусобна разлика између јединки у почетној популацији то је шире поље претраге. Генерисање почетне попуације јединки насумично није риједак случај у пракси. Такође, према Duc Truong Pham и Dervis Karaboga генерисање почетне популације је могуће кориштењем априори знања о проблему оптимизације. На овај начин се на основу знања о самом проблему добија скуп захтева и прикупљају рјешења која те захтеве задовољавају. У овом случају, генетски агоритам започиње оптимизацију са скупом приближно познатих рјешења и стога конвергира до оптималног рјешења за мање времена него код насумичног генерисања [100].

Процес оптимизације генетским алгоритмом се састоји из итеративних поступака, који карактерише све хеуристичке методе. Почетак оптимизације започиње проласком почетне популације кроз сва три корака генетског алгоритма, **селекцију, укрштање и мутацију**.

Кроз корак селекције долази до издвајања оних јединки које имају већу вјероватноћу појаве и могућност да се пренесу у нову генерацију. Вјероватноћа појављивања јединке свакако зависи од вриједности саме јединке и у директној су вези. Вриједновање јединки врши се на основу **функције циља** или **циљне функције (fitness function)**. У зависности од тога да ли се приликом оптимизације тражи максимална или минимална вриједност функције циља, тако ће и јединке које су ближе минимуму или максимуму имати већу вјероватноћу појављивања у новој генерацији. Дефинисање функције циља није једноставан процес и њу дефинише крајња сврха оптимизације. Банковић и други аутори користе генетски алгоритам како би оптимизовали рад више БТД система, а том приликом за функцију циља користе одређену вриједност квалитета угља [101]. Са друге стране приликом ријешавања проблема оптимизације обрадних процеса на примјеру стругања Петровић и Радовановић за функцију циља користе минималну цијену коштања брушења, која се валоризује кроз брзину и корак резања [102]. Суштински дефинисање функције циља почиње вербалним описом циља, а завршава се дефинисањем њеног коначног математичког облика [102]. Вриједности функције циља требају да нам дају неку физичку вриједност на основу које је могуће поредити добијена рјешења кроз генерације.

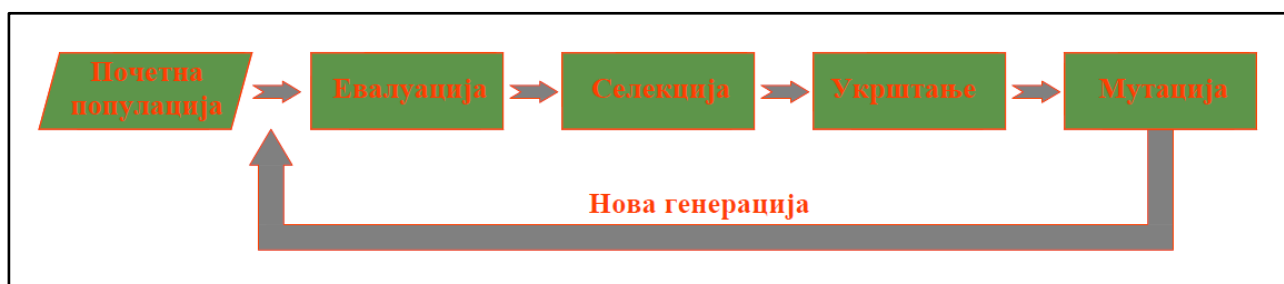
Издвојене јединке у процесу селекције се у наредном кораку (**корак укрштања**) међусобно спајају (**укрштају**) и формирају **генерацију потомака**. Само прва генерација потомака се формира од почетне популације, док се све остале генерације потомака формирају укрштањем јединки из **генерације родитеља**. Број јединки кроз све генерације остаје непромјењен, како би се одржао овакав систем неопходно је да се од два родитеља формирају два потомка.

Фаза или корак **мутације** најчешће се реализује независно од корака селекције и укрштања. Основни задатак мутације у цјелокупном процесу оптимизације је да се промјеном генетске структуре дође до нових рјешења, тако да се овим измјенама формирају рјешења која није могуће добити кроз друге фазе. Формирање уникатних рјешења кроз фазе оптимизације је веома важно и неизбежно за успјешну оптимизацију нарочито што се на овај начин постиже претрага по цијелом дозвољеном домену, а рјешења не могу превремено да конвергирају. Са



друге стране како би се избегла неконтролисана, стохастичка и пре свега случајна претрага заступљеност ове фазе треба да је мала, од 0.001% до 0.01% [95].

Цјелокупан описани процес представља једну **генерацију**, чији је крајњи продукт нова генерација јединки чије су карактеристике (вриједност функције циља) боље од карактеристика генерације родитеља. Понављањем изнова и изнова овог процеса реализује се процес оптимизације генетским алгоритмом. Што је већи број понављања, односно генерација, то је тачност рјешења већа. На слици 4.2.4 приказан је општи примјер и фазе функционисања генетског алгоритма.



Слика 4.2.4 Општи пример и фазе функционисања Генетског алгоритма [1]

Као и све методе и генетски алгоритам има својих недостатака, па тако као и у природи и у раду са генетским алгоритмом може доћи до дегенерација у популацији. У оваквим ситуацијама јединке из генерације потомака немају боље карактеристике од јединки из генерације родитеља [91]. Вриједност функције циља за ову врсту јединки биће лошији (даљи од оптималног рјешења) па ће оне бити искључене у процесу селекције.

Поред појаве оваквих рјешења један од честих проблема који се јављају приликом рада генетског алгоритма је рана конвергенција. Ситуација ране конвергенције се дешава када популација приликом оптимизације достигне субоптимално стање да генетски оператори више не могу да производе потомство са бољим перформансама од својих родитеља. Па тако еволуциони алгоритми остају заробљени у домену локалног оптимума [103].

David E. Goldberg у својој књизи [104] наводи разлику између генетског алгоритма и сличних и сродних оптимизационих алгоритама у самом процесу који се реализује на четири начина:

1. Генетски алгоритам ради са дефинисаним (кодираним) скупом параметара, а не са самим параметрима.
2. Генетски алгоритам врше претрагу популације, одржавајући скуп потенцијалних рјешења (појединача) и развијајући их током генерација кроз процесе као што су селекција, укрштање и мутација. Док преостале методе користе једно рјешење.
3. Генетским алгоритмом доношење одлуке и развој рјешења реализује се на основу успјеха или погодности потенцијалних рјешења, без потребе за додатним информацијама као што су градијенти или деривати који се обично користе у другим методама оптимизације.
4. Генетски алгоритам користе пробабилистичка транзициона правила, а не детерминистичка правила.

Због природе проблема која подразумјева потенцијално бесконачан број могућих рјешења (распон могућих висина, позиција и облика одлагалишта) као и позитивних и негативних

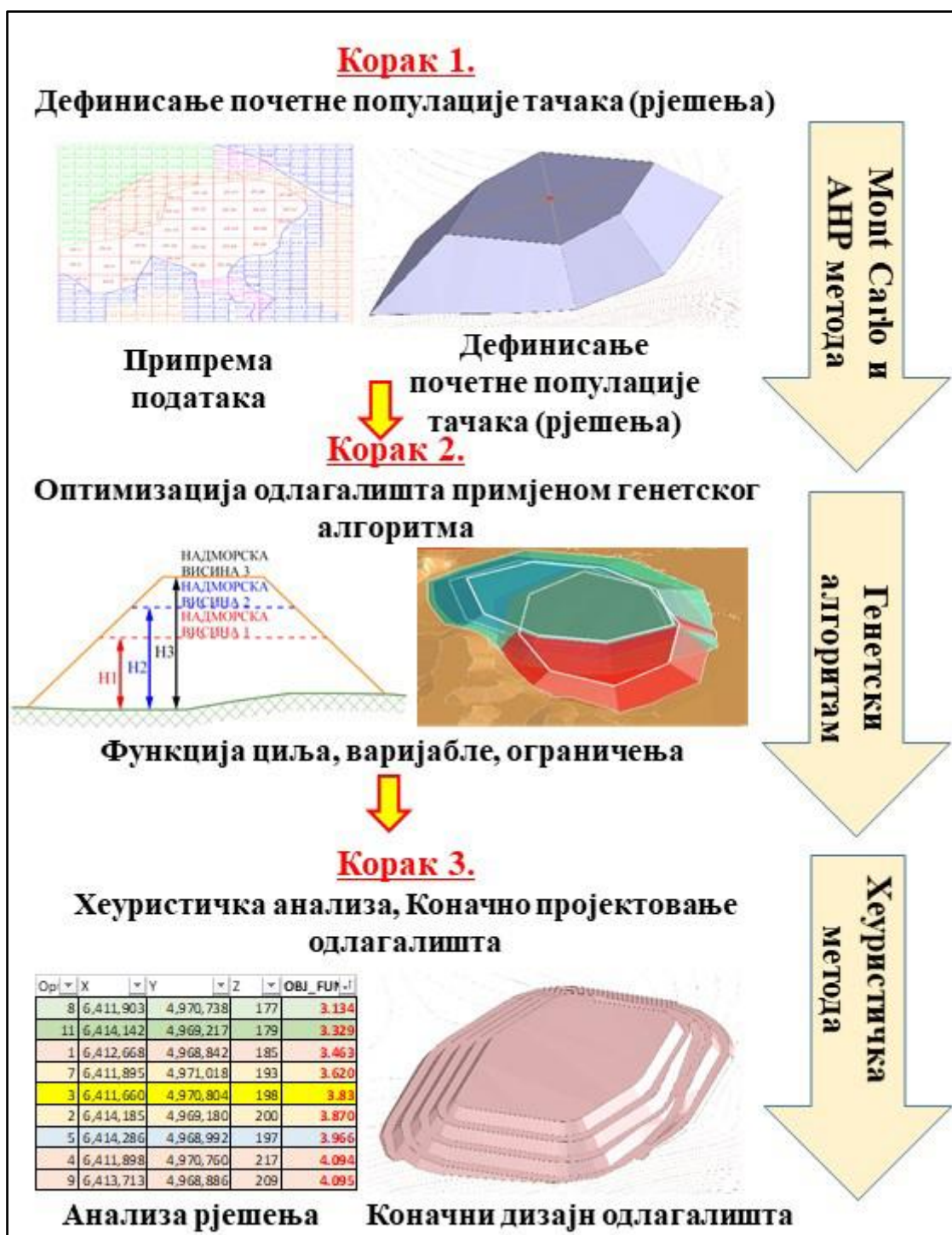


карактеристика, за потребе избора оптимизованог дизајна завршне контуре и локације одлагалишта у површинској експлоатацији, коришћен је генетски алгоритам. У развијеном моделу појава формирања лоших јединки унутар генерације потомака као и проблем ране конвергенције, рјешава се самом методологијом инкорпорираној у процес функционисања генетског алгоритма (примјеном функције циља, уграђеним мутацијама и понављањем процеса оптимизације).

4.3 Алгоритам развијеног хибридног модела

Алгоритам приказаног хибридног модела може да се подели у 3 корака и то:

1. Корак 1- Припрема података и дефинисање почетне популације тачака (рјешења).
2. Корак 2- Оптимизација одлагалишта – дефинисање функција циља, ограничења и варијабли.
3. Корак 3- Хеуристичка анализа резултата оптимизације и коначно пројектовање одлагалишта.



Слика 4.3.1 Алгоритам хибридног модела [1]

Приказани кораци на слици 4.3.1 представљају три основна корака у моделу, тачније пут који је потребно прећи од прикупљања података до конструисања оптимизоване завршне контуре одлагалишта. Сваки од приказаних корака састоји се из одређеног број подкорача, чији број зависи од комплексности проблема који се обрађује. У даљем тексту сваки корак развијеног алгоритма је детаљно описан. Важно је напоменути да је функционалност модела пластично приказана и верификована на конкретном примјеру, који је приказан у поглављу 5. Студија



случаја. Такође, за проблем оптимизације одлагалишта, примјена хибридног модела је универзална односно применљива и на неком другом примјеру, уз одређене измјене, које се односе на припрему података у кораку 1.

4.3.1 Корак 1 - Припрема података и дефинисање почетне популације тачака (рјешења)

Први корак у процесу оптимизације можемо подијелити на два одвојена подкорака и то, прикупљање свих неопходних података и дефинисање почетне популације тачака (рјешења). Припрема и прикупљање података је фаза која се реализује знатно прије почетка оптимизације, за разлику од фазе дефинисања почетне популације тачака односно рјешења која се врши непосредно прије самог процеса оптимизације.

Добра и квалитетна припрема у великој мјери може да утиче на крајњи резултат оптимизације. Прикупљање података који ће се користити у моделу имају значајан аспект, а детаљно познавање проблема и свих утицајних фактора може имати пресудан утицај. Чињеница је да на формирање одлагалишта и његов дизајн утичу фактори који се налазе знатно изван разматраног простора. Карактер фактора је такође различит, па је приликом оптимизације неопходно размотрити и знатно шири спектар фактора него што су технички (рударски) фактори. Правни прописи и обавеза као што су међудржавни споразуми и спорови могу обухватити знатно већи простор од зоне у којој се изводи експлоатација.

Рад са прикупљеним подацима није искључиво везана за први корак, током кога се прикупљају, сагледавају и организују. Главна употреба ових података је у везана за други корак и процес оптимизације. Током кога се подаци употребљавају и ангажују по потреби у различитим подкорацима, једном или у више наврата.

Подаци који се прикупљају могу се подијелити у двије групе и то:

- ✕ Техничко-технолошке карактеристике одлагалишта.
- ✕ Просторна ограничења и карактеристике.

4.3.1.1 Техничко-технолошке карактеристике одлагалишта

Са аспекта оптимизације завршне контуре одлагалишта најзначајна су два техничка параметра одлагалишта и то:

- ✕ Капацитету одлагалишта.
- ✕ Угао нагиба завршне косине одлагалишта.

Капацитет одлагалишта је у директној вези са пројектованим количинама откопаног материјала на површинском копу, увећаним за коефицијент растреситости. Савремени услови рударске праксе повремено изискују формирање више мањих одлагалишта услед недостатка простора или потреба за селективним одлагањем различитих материјала. У таквим ситуацијама капацитет одлагалишта није везан за укупне количине пројектоване откривке или жаловине, већ за очекивану количину материјала и динамику његовог одлагања.



Са друге стране угао нагиба завршне косине одлагалишта зависи од својстава отпадног материјала, односно од карактеристика материјала који се одлаже. Како је угао нагиба завршне контуре одлагалишта, техничка карактеристика у функцији геомеханичких карактеристика откопаног, јаловинског метеријала, његова вриједност се у моделу, користи као константа, односно задато ограничење у процесу оптимизације.

4.3.1.2 Просторна ограничења и карактеристике

Формирањем спољашњих одлагалишта изискује заузимање одређеног простора у непосредној близини површинског копа. Карактеристике простора на коме се формира одлагалиште, односно унутар кога се врши оптимизација, свакако су од пресудног значаја за цјелокупан процес. У зависности од врсте, намјене, али и утицајних фактора који дјелују на простор предвиђен за оптимизацију разликоваће се и резултати. Овим кораком се дефинишу следећи просторни подаци:

- ✕ Ограничење ширег простора унутар кога се врши оптимизација.
- ✕ Дефинисање зона терена које треба анализирати моделом и евалуација њихове вриједности, односно одбацивање зона дуж којих није могуће генерисање ријешења.
- ✕ Позиција центара маса на откопавању унутар површинског копа.
- ✕ Максимална надморска висина до које је могуће формирати одлагалиште.

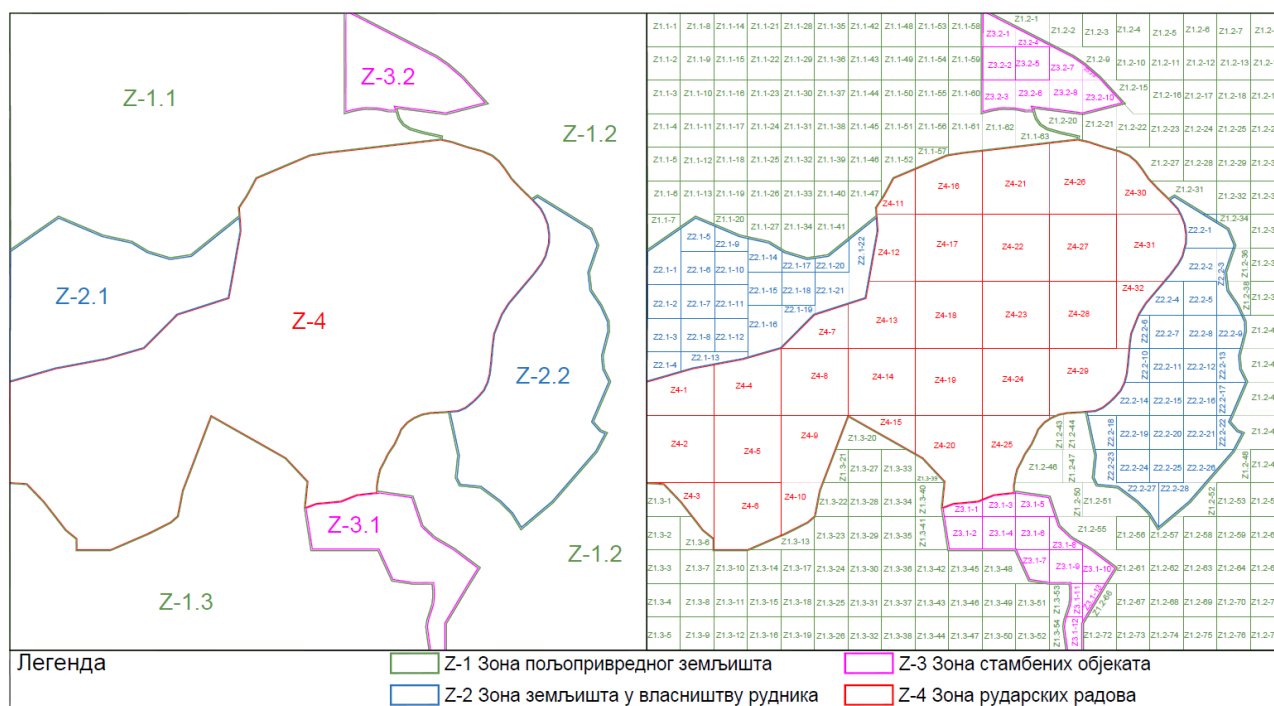
Простор унутар кога је могуће формирати одлагалиште је омеђен одређеним видљивим или невидљивим границама. Постојање граница може бити утемељено у законској регулативи и правним нормама, али и у просторном распореду природних и вијештачких објекта на површини терена. Сублимациом ограничења, просторних и правних, као и техничких и технолошких параметара експлоатације стварају се услови за одређивање границе простора унутар кога се реализује процес оптимизације. Овај ограничени простор назван је интересна зона. У зависности од примјера до примјера прије почетка оптимизације могуће/потребно је дефинисати нешто шире ограничење од интересне зоне, границу радног простора. Са становишта процеса оптимизације овај простор није од пресудне важности и намјена му је искључиво визуелна. Предност дефинисања и разматрања ширег простора од интересне зоне обезбеђује се квалитетније моделовање површина терена.

Након дефинисања границе простора унутар кога ће се одвијати процес оптимизације, односно интересне зоне, а по потреби и границе радног простора, неопходно је тај простор подјелити на зоне и извршити евалуацију њихових вриједности. Овај корак могуће је реализовати на више начина и у суштини зависи од примјера до примјера и прилагођен је самом процесу оптимизације. Анализом цјелокупног простора могуће је издвојити одређене дијелове интересне зоне по карактеристикама које преовладавају. Тако да се унутар интересне зоне могу дефинисати зоне пољопривредног, стамбеног или индустриског (рударског) земљишта. Са друге стране зонирање је могуће извршити искључиво према врсти земљишта, односно на зоне са ораницама, пашњацима и шумским земљиштем. Притом зоне које су дефинисане на овај начин знатно су већих димензија, па је неопходна њихово додатно уситњавање, па је тако могуће у складу са просторним распоредом зоне подјелити на подзоне. Начин који је најближи реалним условима, односно симулацији реалних услова, а једно и најзхтијевнији зареализацију је подјела интересне зоне на катастарске парцеле.

Комбинација описаних начина подјеле интересне зоне представља најбољи начин којим се постиже одређени степен детаљности (кроз парцеле) али и упрошћености кроз генералну подјелу простора на зоне и подзоне. На слици 4.3.2 приказан је примјер из публикованог рада Hybrid Model for Optimisation of Waste Dump Design and Site Selection in Open Pit Mining [1] на којој се види могућа подјела интересне зоне на зоне, подзоне и парцеле.

Током разраде модела појавила се потреба за издвајањем дијела простора унутар интересне зоне на коме није могуће формирати одлагалиште. Овдје се првенствено мисли на тренутно активне рударске објекте, па је из тог разлога дефинисана рударска зона. У склопу граница ове зоне налазе се и они дијелови терена на којима је предвиђена рударска активност у будућности. Приликом процеса оптимизације овај простор је у потпуности искључен. Унутар њега није могуће формирати ни почетну популацију тачака, ни касније рјешења, као ни генерисати контуре одлагалишта.

Дискредитација интересне зоне на зоне и подзоне је неопходан корак у процесу процјене вриједности земљишта. Који омогућава да се приликом оптимизације у крајњу вриједност функције циља урачунају и вриједности земљишта увећане за утицај свих осталих фактора.



Слика 4.3.2 Примјер подјеле Зоне интереса на зоне и подзоне (парцеле)

Као што је споменуто раније у тексту, вриједност земљишта на коме се формира одлагалиште представља значајан дио укупног трошка, поред трошкова транспорта. Из тог разлога, посебна пажња у моделу дата је врједновању земљишних зона на чијем простору се реализује процес оптимизације. Важно је напоменути да вриједност земљишта не значи само вриједност која би се могла добити једноставном куповином земљишта, већ се на овај начин узимају у обзир и други утицајни фактори. Спектар фактора је веома широк, ту се могу убројати фактори који укључују различите неизвјесности. Постојање административних препрека или проблема у вези са стицањем власништва, могућност од ширења рудника дуж зоне ван тренутне завршне



контуре површинског копа, утицај одлагалишта на животну средину, и још много других фактора могу се коришћењем мултикритеријумских метода међусобно рангирати и свести на заједнички именитељ – трошак. У оваквој ситуацији цјелокупан простор треба евалуирати зависно од различитих утицајних фактора. Прецизније, читаву интересну зону потребно је „провући кроз филтере“ утицајних фактора. На овај начин извршен је први корак валоризација вриједности земљишта.

За прецизну процјену вриједности земљишта, односно њихову валоризацију кориштена је метода вишекритеријумског одлучивања, конкретно АНР метода. Увођење АНР методе у процедуру развијеног хибридног модела извршено је ради прецизнијег одређивања улазних параметара (прије свега процјену вриједности земљишта на основу многобројних фактора) и на тај начин стварања потпунијих услова за успешну оптимизацију. Важно је напоменути да употреба АНР методе у представљеном моделу није обавезна и да се може избећи ако нема довољно података за анализу или није потребна детаљна процена.

Свакој подзони додељује се номинална вриједност (€/m^2) на основу припадности одговарајућој зони (најчешће подјела на основу врсте земљишта). Ова вриједност се увећава за коефицијенте добијене примјеном АНР методе. Кроз ове коефицијенте могуће је представити све додатне факторе (велики број неизвјесности, административне препреке, утицај на животну средину, природни фактори) који су карактеристични за сваку подзону. Додатни фактори су специфични за сваки рударски пројекат и могу се модификовати према потребама и реалним условима сваке локације. Овдје не треба заборавити и факторе који се односе на стање површинских и подземних вода и њихово уређење, те неопходно оптерећење процеса одлагања пословима уклањања хумуса и његовог депоновања. Коначно, ако у подзони постоје цивилни, инфраструктурни или индустријски објекти чије је уклањање или измјештање неопходно у случају потенцијалног формирања одлагалишта, тој подзони се додају додатни трошкови.

Вриједност појединачне подзоне (i) у моделу се рачуна на основу једначине:

$$MV_{sz_i} = V_{z_i} \times A_{sz_i} \times \sum(1 + k_1 + \dots + k_n) + V_{a_i}, \quad (1)$$

гдје је:

V_{sz_i} – Вриједност подзоне i (€),

V_{z_i} – Вриједност подзоне i , на основу врсте земљишта (€/m^2),

A_{sz_i} – Површина подзоне (m^2)

$k_1, \dots, k_n$ – Коефицијенти добијени АНР методом за све додатне факторе,

V_{a_i} – Додата вриједност ако се на подзоне i налазе цивилни, инфраструктурни, индустријски и други објекти (€).

Процес експлоатације и откопавања откривке и јаловине је процес који се реализује дужи низ година и који карактерише перманентно помјерање фронта радова. Како би се поједноставио



прорачун транспорта у рударској пракси се користи појам центар маса. Који је представљен једном тачком са X , Y и Z координатама, а представља пондерисану вриједност укупних маса са одређеног простора и за одређени временски оквир. Центар маса може бити одређен за једну етажу или за више њих, или за цио површински коп, који се може односити на одређени временски оквир нпр. од једне године, до цјелокупног вијека експлоатације.

Приликом разраде и формирања модела користи се центар маса за циљани капацитет одлагалишта. У колико се одлагалиште формира за читав радни вијек рудника, у том случају се користи центар маса јаловине за цјелокупну запремину површинског копа. Са друге стране ако је одлагалиште формира за дио маса јаловине или за одређену врсту материјала или за одређени период експлоатације центар маса се доређује само за дјелове површинског копа гдје се налазе оконтурене количине јаловине, односно за простор који ће се експлоатисати у одређеном временском периоду.

Простирање одлагалишта у простору, како у плану тако и по висини је појава/елемент који има директан утицај на формирање одлагалишта и његов капацитет. Са аспекта оптимизације одлагалишта значајан елемент је ограничење надморске висине до које је могуће формирати одлагалиште. Са повећањем висине одлагалишта повећава се простор за смјештај јаловине, а са друге стране смањује се и површина заузетог протора, али и могућност даљег разношења прашине услед дјеловања еолске ерозије.

Опсег надморске висине се креира емпиријски, а у пракси је скуп могућих вриједности често ограничен постојећим административним ограничењима. Максимална надморска висина објекта у одређеној зони може да представља ограничавајући фактор, па се у складу са тим административним ограничењем мора ускладити и максимална висина одлагалишта. Са друге стране спољашња одлагалишта предствљају објекте који својом висином знатно доминирају у односу на околни терен и мјењају изглед рељефа кроз вријеме. Овај елемент такође може да се сматра ограничењем у погледу формирања одлагалишта.

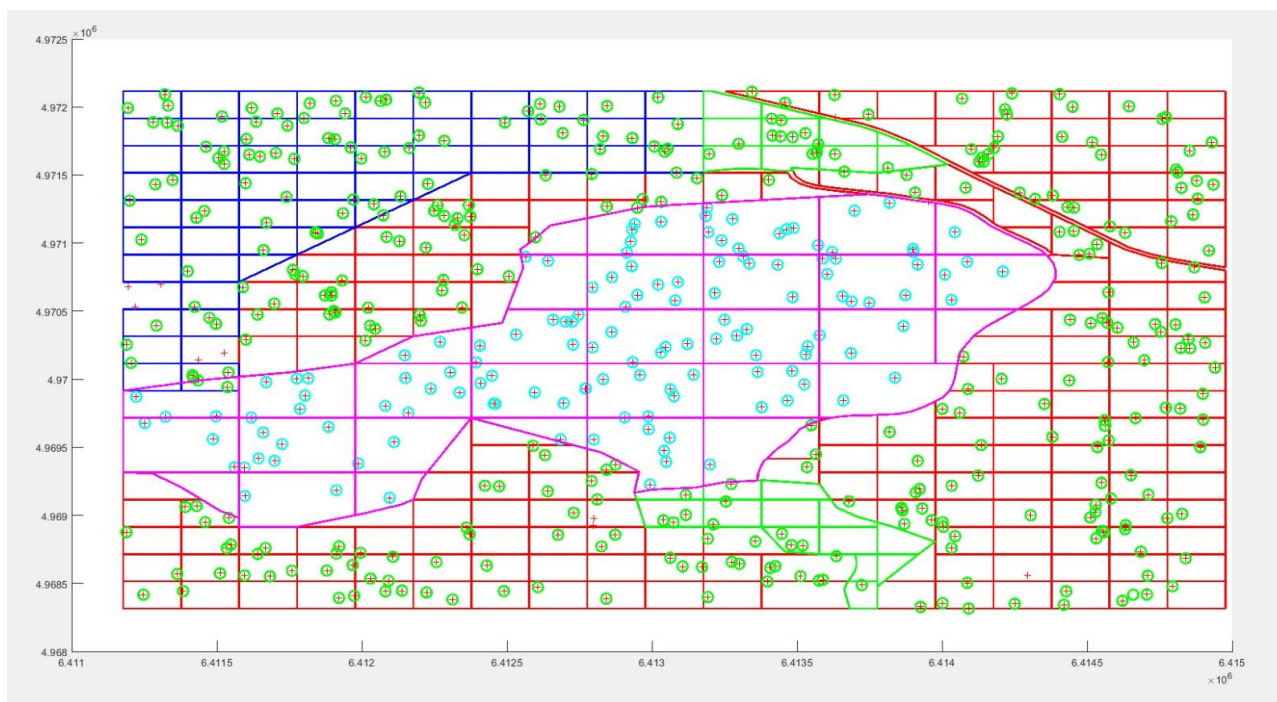
4.3.1.3 Дефинисање почетне популације тачака (рјешења)

Како би се генерисао облик одлагалишта (формирао скуп рјешења почетне популације) неопходно је у првом кораку дефинисати максималну висину одлагалишта али и облик и опсег максималне димензије оса, горње површине одлагалишта. Ова два елемента су неопходна за процес оптимизације, али и за генерисање почетне популације потенцијалних рјешења.

Прва ствар коју је неопходно разјаснити јесте да се дефинише разлика између почетне популације тачака и рјешења. Први корак у генерисању овога скупа је насумично генерисање тачака унутар границе радног простора. Последњи корак у цијелом процесу је предаја несумично генерисаних контура одлагалишта генетском алгоритму. Како цјелокупан процес почиње од тачака, али се оптимизација реализује на контурама одлагалишта, које су настале из тих истих тачака могуће је користити и један и други појам. Пошто је у питању дисертација из области рударског инжењерства у нставку ће се користити појам рјешења, изузев оних дијелова текста у којима се описује генерисање почетне популације тачака.

Дефинисање почетне популације рјешења за оптимизацију у приказаном хибридном моделу почиње генерисањем тачака са насумично одабраним X , Y и Z координатама. Као што се може

видјети на слици 4.3.3 генерисане су тачаке са насумичним просторним распоредом унутар граница радног простора, а у складу са осталим геометријским ограничењима. Ова операција у развијеном моделу изводи се примјеном Monte Carlo методе. Приликом насумичног генерисања тачака могуће је да дође до њиховог међусобног преклапања или насумичног груписања. Како би се избегла оваква могућност и постигао бољи просторни распоред генерисање (а тиме и квалитетнија претрага простора) се врши у више понављања са мањим бројем тачака.



Слика 4.3.3 Просторни распоред насумично генерисаних тачака

Прва тријажа насумично генерисаних тачака у процесу формирања овог скупа потенцијалних рјешења захтијева да генерисане тачке морају бити унутар интересне зоне. Односно њихова позиција у простору мора да је дефинисана X и Y координатама које су унутар полигона који ограничава интересну зону. Док Z координата (кота) одабраних тачака мора да буде у опсегу између максималне дозвољене надморске висине за формирање одлагалишта и површине терена.

Поред тачака које се налазе изван интересне зоне у процесу прве тријаже одбацују се и оне тачке које се налазе унутар рударских зона или других недоступних зона. Односно оних дјелова интересне зоне на којима није могуће формирати одлагалиште због постојања природних, административних, индустријских препрека или објеката као и због тренутне или потенцијалне будуће рударске активности у одређеним зонама.

Провјера испуњености услова Z координате реализује се у наредном подкораку. Од преосталих насумично генерисаних тачака (користећи њихову Z координату) формирају се контуре одлагалишта. Генерисањем неколико оса кроз насумично одабрану тачку (на истој надморској висини на којој се налази тачка), могуће је формирати горњу површину одлагалишта. Процес почиње цртањем прве осе (k-оса, слика 4.3.4) са изабраном дужином и правцем, у односу на правац сјевера. И дужину и правац прве осе корисник може одредити и

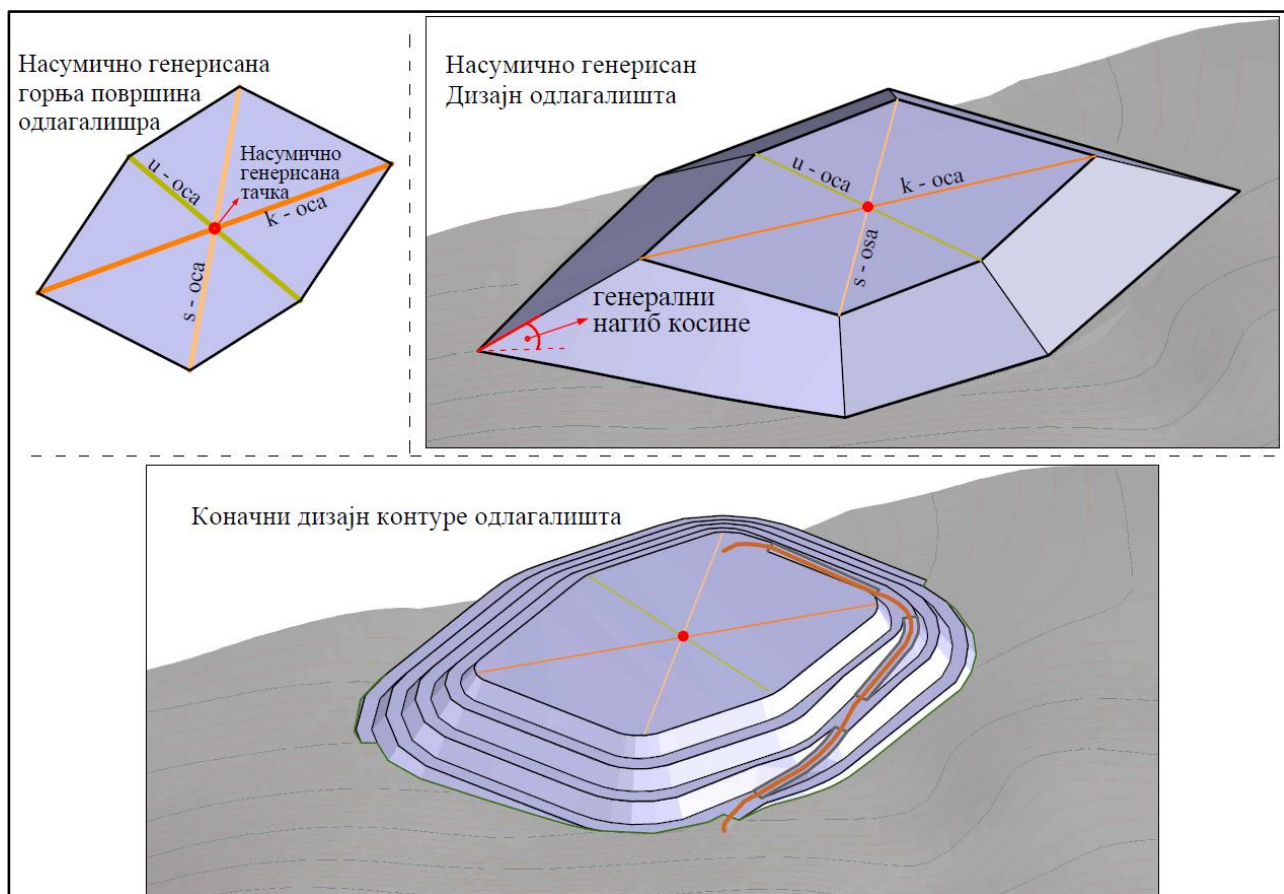


они могу бити насумично одабрани из опсега креираних вриједности. Препоручује се да се правац прве k -осе поклапа са најдужом осом зоне терена. Да би се добио изводљив врх одлагалишта, треба да се генеришу још најмање двије, друге осе (оса - u и оса - s , слика 4.3.5.). Правци оса могу (али не морају) бити подједнако подјељени ($360^\circ/\text{број оса}$). Дужине новоформираних оса су дјелимично контролисане дужином прве осе у смислу да дужине између осе не могу бити превише различите како се не би креирали технолошки неизводљиви (конкавни) облици врха одлагалишта. Повезивањем крајева генерисаних оса ствара се горња површина одлагалишта.

У колико би се ободна линија горње површине одлагалишта пројектовала у складу са углом нагиба завршне косине до нивелете која се налази 30 m испод најниже тачке терена, формирала би се насумично генерисана контура одлагалишта. Оне контуре одлагалишта које формирају пресјечну линију са тереном испуњавају услов Z координате и остају у склупу потенцијалних рјешења. Док се преостале контуре избацују и више се не користе. На овај начин је завршен други степен тријаже насумично генерисаних тачака, односно рјешења. Након овог корака више се не користе насумично генерисане тачке, већ се цјелокупан процес реализује на формираним контурама одлагалишта.

Последњи (трећи) корак у тријажи анализира просторни распоред генерисаних контура. Контуре које су у потпуности унутар интересне зоне и не налазе се унутар простора на коме није могуће формирати одлагалиште представљају почетну популацију рјешења која улази у процес оптимизације.

Претходно описани процес формирања контуре одлагалишта од насумично генерисаних тачака користи се и приликом процеса оптимизације. На слици 4.3.4 илустративно је приказан описани начин формирања контура одлагалишта.



Слика 4.3.4 Формирање контуре одлагалишта од насумичних тачака [1]

Кроз остале кораке, након процеса оптимизације генетским алгоритмом и хеуристичке анализе генерисаних рјешења, креира се коначни облик одлагалишта (слика 4.3.4).

4.3.2 Корак 2 - Оптимизација одлагалишта – функција циља, ограничења и варијабле

Након што је генерисана почетна популација тачака за оптимизацију, дефинисана интересна зона и валоризована вриједност подзона унутар ње, спроводи се процес оптимизације. Са строго теоријске тачке гледишта, број могућих рјешења за локацију и изглед одлагалишта је практично бесконачан. Свако може да замисли одлагалиште које је неколико метара више или ниже, неколико метара шире или уже, или на локацији која је померена у одређеном правцу. С обзиром на природу проблема и бесконачан број могућих ријешења, генетски алгоритам је изабрана за оптимизацију.

Почетак оптимизације примјеном оптимизационог генетског алгоритма започиње дефинисањем функције циља [105]. Поред функције циља цјелокупан процес није могућ без претходно дефинисаних елемента који се оптимизују (варијабле), као и њихових граница (функције ограничења) [102]. Такође, на самом почетку процеса оптимизације потребно је дефинисати број јединки у почетној популацији, као и број генерација.



4.3.2.1 Дефинисање функције циља

Рад са откривком или јаловином је операција која искључиво генерише трошкове. Смањењем ових трошкова, учинак рударског пројекта може се значајно побољшати. Имајући наведено у виду, функција циља развијеног модела своди се на минимизирање трошкова формирања одлагалишта. То значи да се рјешење са најнижом цијеном по метру кубном одложеног материјала, сматра најбољим. Важно је напоменути да се применом АНР методе у предложени модел могу укључити додатни фактори који немају новчану вриједност (потенцијалне административне и правне препреке, могући утицај на животну средину и сл.) и помоћу ње валоризовати.

У конкретном случају, на цијену формирања одлагалишта могу утицати различити фактори, али генерално, двије основне категорије (присутне у стварању било којег одлагалишта) су:

1. Трошкови у вези са вриједношћу земљишта на коме се формира одлагалиште и
2. Трошкови транспорта.

Из тог разлога, посебна пажња у моделу је посвећена овим двијема категоријама.

Трошкови повезани са вриједношћу земљишта дефинисани су у једначини 1, док се трошкови транспорта могу подјелити на двије компоненте, трошкови хоризонталне и вертикалне компоненте транспорта. Ова подјела транспорта је од суштинског значаја за функционисање алгоритма. Управо однос између трошкова хоризонталне и вертикалне транспортне компоненте представља један од фактора оптимизације (да ли је боље имати одлагалиште веће површине и мање висине или обрнуто?). Локација одлагалишта је такође у великој мјери детерминисана трошковима транспорта (одлагалиште ближе површинском копу и на нижој надморској висини ће генерисати ниже трошкове). Узимајући све ово у обзир, функција циља се може написати у општем облику:

$$\text{Minimize } C_{min} = C_1 + C_2 + C_3, \quad (2)$$

гдје је:

C_1 – трошак који се односи на вриједност земљишта дуж којег се формира одлагалиште и дефинише се једначином 1,

C_2 – трошкови хоризонталне компоненте транспорта,

C_3 – трошкови вертикалне компоненте транспорта.

Хоризонтална компонента трошкова транспорта представља трошкове који би настали да се јаловина транспортује искључиво хоризонталном трасом (дионице без нагиба). Ово подразумјева транспорт од центра масе на откопавању унутар површинског копа до центра масе на одлагалишту. Дефинисањем максималне вриједности ове компоненте практично се дефинише радијус у оквиру кога је могуће формирати одлагалишта. То конкретно значи да преко вриједности максималног радијуса (због удаљености од центра маса на откопавању,



односно високих трошкова транспорта) није рационално конструисати одлагалиште. Генерално што је ова вриједност хоризонталне компоненте транспорта већа то су већи трошкови транспорта и ограничења у погледу могућности формирања одлагалишта строжија. Трошкови хоризонталне компоненте транспорта дефинисани су једначином:

$$C_2 = V * L_t * C_t, \quad (3)$$

гдје је:

V – запремина растреситог јаловинског материјала који се одлаже на одлагалишту (m^3),

L_t – хоризонтално растојање између центра масе на откопавању унутар површинског копа и одлагалишта (km),

C_t – трошкови транспорта $1 m^3$ јаловине на хоризонталну удаљеност од 1 km ($€/m^3/km$).

Вредност C_t се може добити из статистичких резултата постојећег површинског копа (или са сличних рударских објеката) или из приручника произвођача рударске опреме.

Вертикална компонента трошкова транспорта представља додатни трошак подизања материјала од коте центра маса на откопавању у контури површинског копа до коте центра маса на одлагалишту. Он у суштини представља трошкове транспорта на дионицама пута са нагибима и на тај начин у функцију циља уводи реалну вриједност транспорта, а дефинисана је једначином:

$$C_3 = V * \frac{\Delta H}{i} * C_t * k, \quad (4)$$

гдје је:

V – запремина растреситог јаловинског материјала који се одлаже на одлагалишту (m^3),

ΔH – висинска разлика између центара масе на откопавању унутар површинског копа и центра маса на одлагалишту (m),

i – просјечни нагиб транспортног пута (%),

$\frac{\Delta H}{i}$ – дужина транспортног пута сведена на хоризонталну пројекцију (m),

C_t – трошкови транспорта $1 m^3$ јаловине на хоризонталну удаљеност од 1 km ($€/m^3/km$),

k – коефицијент односа трошкова хоризонталне и вертикалне компоненете транспорта.

Транспорт материјала по косим дионицама пута негативно утиче на потрошњу енергије, брзину кретања камиона и повећава укупно оптерећење на машину (више о томе може се наћи у [15] и бројним приручницима различитих произвођача рударске опреме). Из тог разлога,



цијена транспорта на косим дионицама пута је знатно већа од цијене на хоризонталним дионицама пута. Ова разлика је представљена коефицијентом односа трошкова између хоризонталне и вертикалне компоненте (у једначини 4, означен са k). Ли и остали аутори у свом раду на сличан начин рјешавају проблем свођење вертикалне на хоризонталну компоненту транспорта [106]. Генерално, коефицијент k ће варирати на различитим локацијама (различитим површинским коповима) и зависиће од многих фактора (квалитета израде пута, типа камиона, организационих услова на површинском копу, нагиба трасе, итд.).

Имајући у виду горе наведено, функција циља се може дефинисати следећом једначином:

$$\text{Minimize } C_{\min} = V_{zi} \times A_{sz_i} \times \sum (1 + k_1 + \dots + k_n) + V_{a_i} + V * L_t * C_t + V * \frac{\Delta H}{i} * C_t * k, \quad (5)$$

Подразумева се да сваки рударски пројекат има своје јединствене услове експлоатације, односно различити скупови фактора могу утицати на структуру трошкова формирања одлагалишта у већој или мањој мјери. Имајући ово у виду, јасније је да једначине 2 и 5 дају само општу структуру најчешћих трошкова формирања одлагалишта, а да се за одређени рударски пројекат ова једначина може проширити додатним категоријама трошкова. Такође треба напоменути да ове једначине дају само почетне трошкове формирања одлагалишта. Коначни трошкови могу значајно варирати и биће прецизније познати тек након фазе детаљног пројектовања и посебно у фази реализације пројекта.

4.3.2.2 Дефинисање варијабли и ограничења

Поред функције циља за функционисање генетског алгоритма неопходно је дефинисати варијабле (промјењиве) и ограничења. Сви геометријски параметри који дефинишу изглед одлагалишта могу се посматрати као промјенљиве у оптимизационом алгоритму заснованом на генетском алгоритму. У суштини промјењиве су гени једне јединке чије се карактеристике (димензије) у процесу оптимизације насумично мијења (мијењају). Избор параметара чија ће се вриједност мијењати за добијање нових рјешења у процесу оптимизације зависи од услова под којима се врши оптимизација и подлежу инжењерским одлукама.

У разрађеном моделу оптимизације завршне контуре одлагалишта варирају се два конструктивна елемента одлагалишта и то:

- ⊗ Висина одлагалишта и
- ⊗ Ширина одлагалишта.

За оба ова елемента неопходно је дефинисати опсег унутар кога ће се варирати. На овај начин скуп потенцијалних рјешења се ограничава, а сам процес оптимизације уобразава.

Висина врха одлагалишта не би требало да пређе разумну вриједијност ($Z_{\max}$). Максимална надморска висина одлагалишта обично је ограничена неком административном нормом или могућношћу формирања стабилне завршне косине при максималној висини. Ово ограничење уводи се на основу истраживања које је спроведено у првом кораку. Минимална кота врха потенцијалног одлагалишта мора бити већа од најниже коте терена ($Z_{\min}$). Опсег ограничења у вези са висином одлагалишта формулисан је једначином:



$$Z_{t_{min}} < Z \leq Z_{t_{max}}, \quad (6)$$

Начин на који се реализује формирање контуре одлагалишта у моделу описан је у подпоглављу 4.3.1.3. *Дефинисање почетне популације тачака (рјешења)*. Елементи који су неопходни за овај дио функционисања модела су насумично генерисана тачака (тачке) и вектора k . Преко Z координате тачке варира се висина одлагалишта, док се преко вектора k варира ширина горње површине одлагалишта. Опсег варирања дефинише се у складу са дефинисаном циљаном запремином и креће се од k_{min} до k_{max} и дефинисан је једначином 7.

$$k_{min} \leq k \leq k_{max}, \quad (7)$$

Увођење ограничења у алгоритам оптимизације смањује се скуп (број) могућих рјешења, што значајно убрзава функционисање модела. Ограничења треба дефинисати на начин да се одбаце технички неизводљива рјешења (неизводљиве варијанте насталих одлагалишта). У исто вријеме, ограничења треба пажљиво дефинисати како се не би одбацила рјешења која имају потенцијал. Правилним избором ограничења дефинише се скуп унутар кога ће се наћи оптимално рјешење. У моделу су поред ограничења варијабли још уграђена и следећа ограничења:

- ⊗ Опсег запремине одлагалишта (капацитет одлагалишта),
- ⊗ Ограничење простора у коме је могуће формирати одлагалиште.

Капацитет одлагалишта одређен је запремином материјала који се откопава на површинском копу, увећаном за коефицијент растреситости. Тачна вриједност потребног капацитета не може се формулисати као ограничење, јер би то значајно смањило број могућих рјешења. Из тог разлога, ограничење капацитета погодније је поставити као опсег вриједности око тачно потребне запремине. Широ опсег запремине, од минималне запремине (V_{min}) до максималне запремине (V_{max}), повећаће скуп потенцијалних рјешења, али и вријеме оптимизације. Искуство стечено током развоја и тестирања модела сугерише да сва рјешења до 5% мања и 10% већа од захтјеваног капацитета треба размотрити за даљу оптимизацију (следећа генерација у генетском алгоритму). Ограничење у вези са капацитетом одлагалишта је формулисано једначином:

$$V_{min} \leq V \leq V_{max}, \quad (8)$$

Генерисана одлагалишта (потенцијална рјешења) морају се налазити у границама подручја погодног за одлагање отпада, односно унутар интересне зоне. Ово ограничење је формулисано као једначином:

$$(WD_{i,...,n}) \in \text{Зона интереса}, \quad (9)$$

гдје је:



WD-потенцијално рјешење одлагалишта i (где је i од 1 до n -број потенцијалних рјешења).

Сви конструктивни параметри одлагалишта као што су облик горње површине или основе одлагалишта, угао нагиба завршне косине и кота врха одлагалишта, утицаће на крајњи изглед одлагалишта, а њихова насумична варијација генерисаће нова рјешења у току оптимизације. Пошто је доња површина одлагалишта у предложеном моделу одређена (контролисана) конфигурациом терена, а како је угао завршне косине заснован на својству одложеног материјала (користи се највећи угао који гарантује стабилност), само висина и облик горње површине одлагалишта се третирају као промјенљиве. На овај начин се врши оптимизовање ових конструктивних параметара, односно последично и оптимизовање контуре одлагалишта.

4.3.2.3 Механизам оптимизације генетским алгоритмом

Реализацијом корака 1 и похрањивањем прикупљених података у различите елементе оптимизационог алгоритма (дио корака 2) створени су услови за отпочињање процеса оптимизације.

У моменту када почиње оптимизације генетском алгоритму на располагању стоји почетна популација рјешења (насумично конструисана одлагалишта) дефинисана у складу са задатим ограничењима. Оптимизација започиње тако што генетски алгоритам преузме једну (прву) контуру одлагалишта из скупа почетне популације рјешења за оптимизацију и на њеном мјесту формира онолико контура колико је дефинисано да почетна популација има јединки. Свака од n формираних контура одлагалишта има различите параметре варијабли, тј. коту горње површине одлагалишта и ширину одлагалишта.

У складу са функциом ограничења свако од формираних одлагалишта пролази кроз процес провјере, тако да у следећој генерацији могу да се појаве искључиво оне контуре одлагалишта које задовољавају задате функције ограничења. У наставку се за сваку преосталу контуру одлагалишта рачуна функција циља. У кораку селекције долази до одбацивања оних рјешења (дизајна одлагалишта) код којих је вриједност функције циља највећа (тежи се минималној вриједности трошкова по метру кубном откривке).

Након операција филтрације кроз функцију ограничења и селекције најповољнијих рјешења на преосталом скупу формираних одлагалишта спроводи се операција укрштања. У овом кораку долази до „спајања“ карактеристика формираних одлагалишта из почетне популације (родитеља) и формирања прве генерације потомака. Односно до формирања новог скупа контура одлагалишта, заснованих на карактеристикама претходне генерације. У том укрштању генетски алгоритам реализује и процес мутације, чиме долази до измјене неке од варијабли одлагалишта и на тај начин, у новој генерацији, формирају се насумично модификована рјешења односно контуре одлагалишта. Увођењем мутације смањује се могућност ране конвергенције рјешења. Ова процедура се понавља онолико пута колико је задато генерација, у реализацији процеса оптимизације.

Описана процедура се спроводи на цјелокупном скупу почетне популације рјешења. У складу са тим крајњи производ процеса оптимизације завршне контуре одлагалишта, примјеном оптимизационог генетског алгоритма, је рангирани скуп рјешења. Избор јединственог најбољег рјешења из скупа рангираних рјешења према вредностима функције циља (што мања



вредност трошкова, то је ранг бољи) врши се у кораку 3, односно хеуристичком анализом резултата оптимизације.

Резултати оптимизације приказују се на два облика, у аналитичком као *.csv формат и графички као *.dxf формат.

4.3.3 Корак 3 - Хеуристичка анализа резултата оптимизације и коначно пројектовање одлагалишта

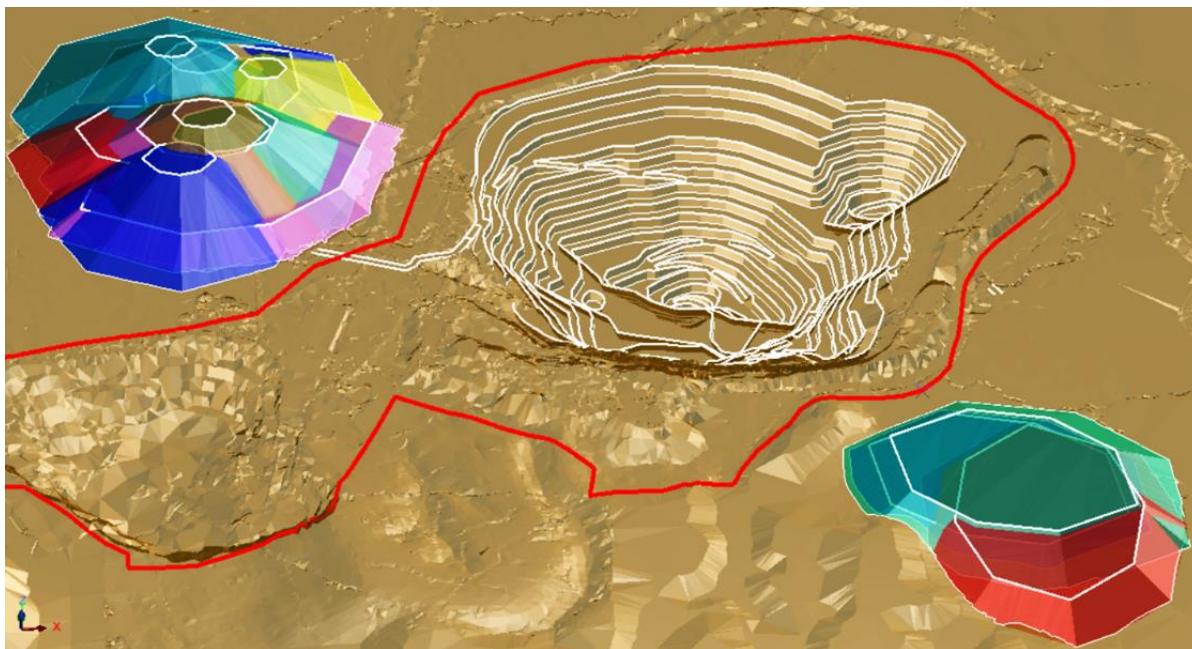
Током рада алгоритма генерише се велики број рјешења (контура одлагалишта). Захваљујући функцији ограничења, неизводљива рјешења, односно она која не испуњавају дата ограничења, одбацују се током процеса оптимизације. Перформансе изводљивих рјешења су различите, у погледу конструктивних карактеристика и вриједности варијабли. За даљу детаљнију инжењерску обраду користи се рјешење за чије се формирање генершу најнижи трошкови (€/m^3 одложеног материјала).

Као што је напоменуто резултати оптимизације се приказују у аналитичком и графичком облику. Оба формата садрже довољан број података који је потребан за даљу обраду и пројектовање, али је свакако потребна додатна хеуристичка обрада рјешења да би се формирала финална контура одлагалишта. Аналитичка форма (формат csv датотеке) даје основне улазне параметре и резултате процеса оптимизације. На слици 4.3.5 може се видјети примјер извезене табеле са ранжираним резултатима (по функцији циља тј. €/m^3 одложеног материјала) за 15 најбољих рјешења једног процеса оптимизације. У даљој анализи за најбоље рангирана рјешења додатно се анализирају генерисани графички облици.

Ранг рјешење	Кординате тачке центра врха одлагалишта			Компоненета транспорта (m)		Трошкови (милиона EUR)			Запремина одлагалишта (10^6 m^3)	Функција циља (EUR / m^3)
	X	Y	Z	Хори.	Вертк.	C ₁	C ₂	C ₃		
1.	6,411,903	4,970,738	177	1288	1740	13.82	28.02	0.19	13.05	3.13
2.	6,414,142	4,969,217	179	1459	1786	10.21	18.75	0.14	8.12	3.33
3.	6,411,895	4,971,018	193	1430	2053	13.68	29.46	0.14	11.96	3.62
4.	6,412,230	4,971,409	192	1465	2048	21.05	44.15	0.20	17.97	3.64
5.	6,411,660	4,970,804	198	1537	2158	12.23	25.76	0.14	9.95	3.83
6.	6,414,185	4,969,180	200	1516	2207	24.22	52.90	0.18	20.48	3.87
7.	6,414,286	4,968,992	197	1719	2150	24.70	46.32	0.20	17.96	3.97
8.	6,411,898	4,970,760	217	1301	2537	16.43	48.06	0.15	15.79	4.09
9.	6,411,834	4,971,128	209	1543	2374	10.63	24.53	0.11	8.61	4.10
10.	6,412,016	4,971,044	216	1348	2520	9.36	26.26	0.12	8.68	4.12
11.	6,411,836	4,970,765	216	1359	2524	20.39	56.78	0.16	18.75	4.12
12.	6,411,942	4,970,816	220	1286	2598	19.81	60.04	0.16	19.26	4.15
13.	6,411,761	4,970,614	220	1378	2606	14.70	41.73	0.12	13.34	4.24
14.	6,411,836	4,970,765	236	1359	2912	21.73	69.84	0.17	19.98	4.59
15.	6,411,745	4,971,070	238	1584	2963	25.19	70.69	0.18	19.88	4.83

Слика 4.3.5 Аналитички облик резултата оптимизације [1]

Приказ овог истог скупа рјешења у графичкој форми (*dxg* формат датотеке) је погодна за даљу графичку обраду. Као што се може видјети на слици 4.3.6. приказ одлагалишта је релативно прост и састоји се од горње површине одлагалишта и њене пројекције под углом завршне косине до нивелете која се налази 30 m испод најниже коте терена.



Слика 4.3.6 Аналитички облик резултата оптимизације [1]

Графичка интерпретација рјешења не даје све детаље присутне у финалном дизајну одлагалишта (дат је генерални изглед али не и етаже одлагалишта). Овај облик приказивања је свакако довољан за наставак даље обраде кроз неки од савремених софтвера за 3D пројектовање, уз чију помоћ је могуће формирати финални облик најбољег рјешења. На основу генерисаних контурних линија (чија еквидистанца одговара коти етажа одлагалишта), конструише се финална контура одлагалишта. Овај последњи корак (од контурне линије до коначних контура) реализују инжењери на основу свог искуства.

Повезаност аналитичког и графичког приказивања података извршена је повезивањем редног броја (примарни кључ у бази података рјешења) који одређује свако појединачно рјешење у скупу аналитичких рјешења са називом слоја (*layer*) у графичкој интерпретацији резултата.

У складу са конкретним примјером за који се реализује процес оптимизације, модел може да функционише у два режима.

Први режим рада подразумјева формирање једног интегралног одлагалишта чија је запремина једнака укупној количини материјала које је неопходно откопати на површинском копу, увећан за коефицијент растреситости.

У другом режиму рада у складу са захтевима оптимизације, задати капацитет је мањи од укупне количине материјала који је потребно да се одложи. Овакав начин рада је карактеристичан за случајеве када је неопходно реализовати селективно одлагање откопаног материјала. На посебно издвојеним локацијама депонују се откопани материјали различитих



РАЗВОЈ ХИБРИДНОГ МОДЕЛА ЗА ОПТИМИЗАЦИЈУ ЗАВРШНЕ
КОНТУРЕ ОДЛАГАЛИШТА У ПОВРШИНСКОЈ ЕКСПЛОАТАЦИЈИ
ЛЕЖИШТА МИНЕРАЛНИХ СИРОВИНА



карактеристика. Тако на примјер могуће је одлагати одвојено рекултивациони слој и откривку, јаловину и сиромашну руду, реактивну и нереактивну јаловину. Поред селективног одлагања откопаног материјала, овакав режим рада могуће је примјенити у случајевима када у ширем простору површинског копа нема довољно мјеста за формирање једног интегралног одлагалишта, па се откопани материјал одлаже на више различитих локација. Такође, овакав начин рада је примењив за површинске копове који имају изражено напредовање фронта радова или се центар маса откопаног материјала временом премјешта па се у циљу смањења трошкова транспорта у различитим фазама експлоатације формирају мања одлагалишта откопаног материјала. Збир запремина свих формираних одлагалишта једнак је збиру укупне количине материјала који је потребно да се одложи.



5 ПРИМЈЕР УПОТРЕБЕ РАЗВИЈЕНОГ ХИБРИДНОГ МОДЕЛА НА МЕТАЛИЧНОМ ЛЕЖИШТУ

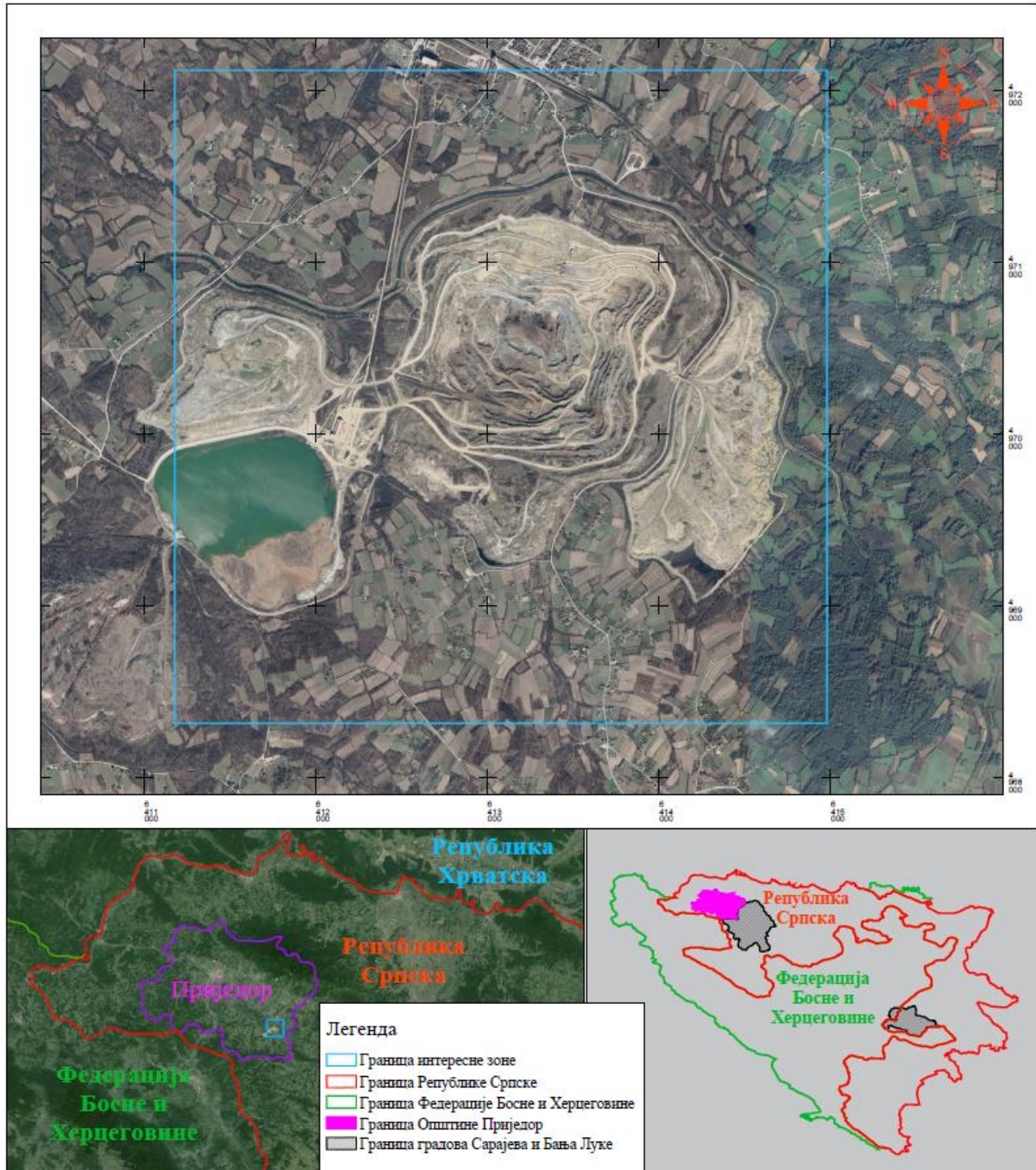
Израда и развој хибридног модела могуће је реализовати примјеном симулационог експеримента у окружењу постојеће локације експлоатације. Услови реалног простора у којима је развијан модел и могућност праћења и провјере резултата у реалном окружењу је веома значајан, а прије свега користан за верификацију самог модела. На овај начин је могуће пратити и провјеравати резултате рада модела и степен напретка дизајна модела. У том погледу коришћени су услови експлоатације за површински коп Бувач код Приједора. Израда и развој модела реализовани су на основу искустава и сазнања са других локација на којима се реализује експлоатација, као што су површински коп Цигануша – рудника Љубија, Дрмно – Рударског басена Костолац, Гацко-Централно Поље – Рудника и термоелектране Гацко, Потрлица – Рудника угља Пљевља.

Конкретан симулациони експеримент у студији случаја има за циљ да имплементира и илуструје ефекте оптимизације завршне контуре одлагалишта у површинској експлоатацији лежишта минералних сировина.

Симулација која је приказана у тексту представља допуњену студију случаја која је описана у публикованом раду Hybrid Model for Optimisation of Waste Dump Design and Site Selection in Open Pit Mining [1]. Рад је објављен у специјалном издању часописа Minerals под називом Future Mines: Intelligent and Digital Methods for Mine Safety, Mining Optimization, and Mineral Materials Application.

5.1 Опис локације површинског копа Бувач

Површински коп Бувач као и дио преосталих лежишта која припадају компанији ArcelorMittala доо Приједор налазе се на простору општине Приједор у сјеверо-западном дијелу Републике Српске, у непосредној близини ентитетске границе (слика 5.1.1).



Слика 5.1.1 Позиција површинског копа Бувач [1] [107]



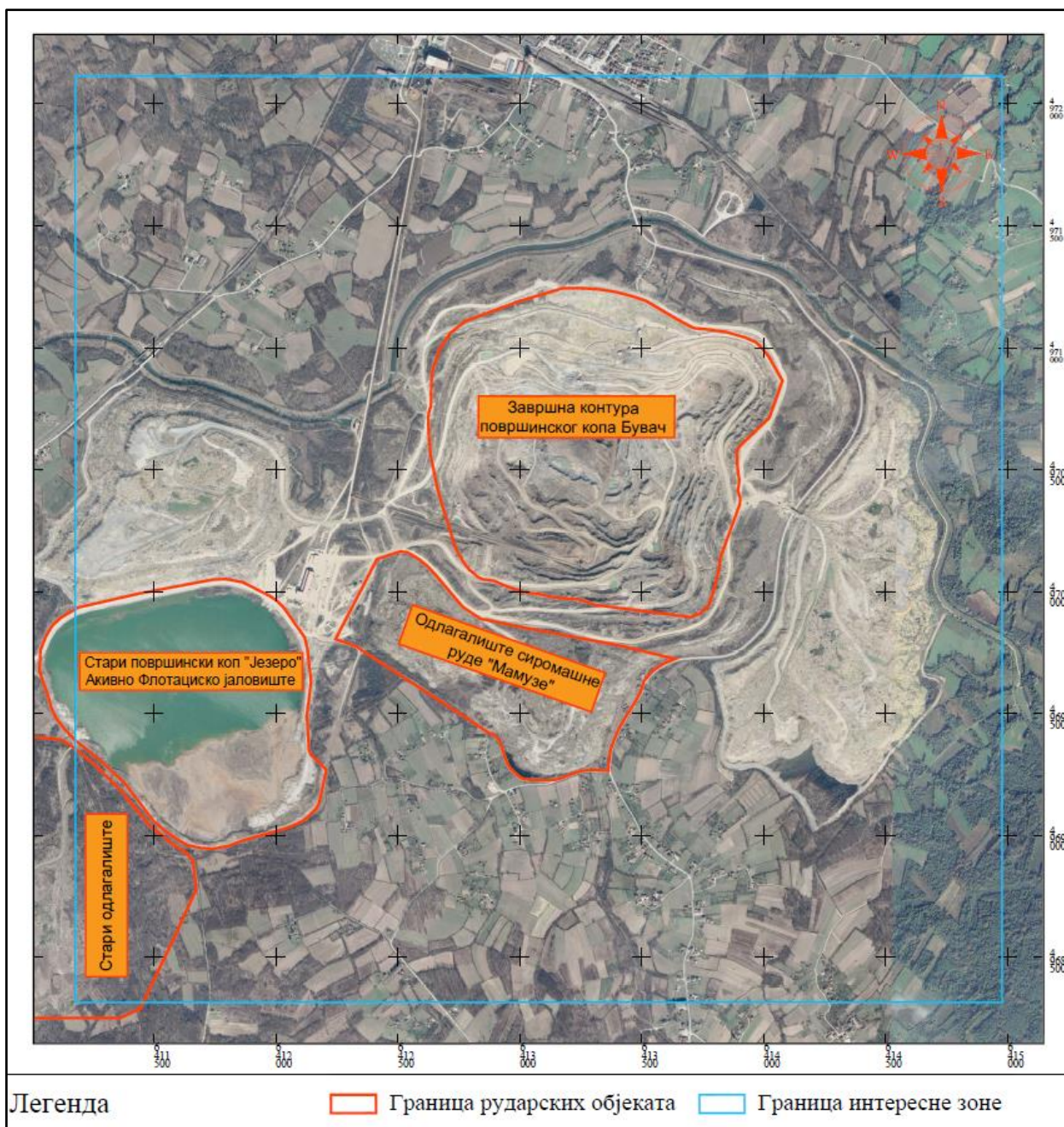
Слика 5.1.2 Површински коп Бувач [108]

Рударска активност на експлоатацији руде гвожђа на овом просотру има дугу традицију, још од почетка 20 вијека, али и раније [1]. Док се експлоатација на простору садашњег површинског копа одвија од 2008. године.

Експлоатација руде реализује се дисконтинуално, након дезинтеграције масива минирањем материјал се хидрауличним багерима кашикарима утовара у камионе и транспортује до дробилице која је позиционирана у дијелу северозападне границе контуре површинског копа. Након дробљења руда се транспортује транспортерима са гуменом траком до постројења за припрему минералних сировина.

Откопавање јаловине реализује се такође дисконтинуалном опремом, с'тим што се транспорт и одлагање реализују искључиво дисконтинуално. Поред руде гвожђа и јаловине процесом експлоатација обухваћена је и сиромашна руда, дио масива из кога тренутним начином прераде није могуће добити економски исплатив и технолошки прихватљив концентрат.

На слици 5.1.2 приказан је распоред рударских објеката у окружењу површинског копа површинског копа Бувач.



Слика 5.1.3 Распоред рударских објеката у окружењу површинског копа Бувач [107]

У складу са захтевима тржишта и плановима компаније годишње је предвиђено да се са овог површинског копа откопава 1.500.000 тона руде гвожђа. Како би се откопала планирана годишња количина руде неопходно је до краја експлоатације откопати и 16.500.000 m³ јаловине и одложити је на одлагалиште на технолошки ефикасан, јефтин и еколошки прихватљив начин [1].

Важно је напоменути да већина откопаног материјала који се одлаже на предвиђеним одлагалиштима чини откривка (око двије трећине маса), док преостали дио материјала чини јаловина [1].



5.2 Поступак оптимизације завршне контуре спољашњег одлагалишта на површинском копу Бувач

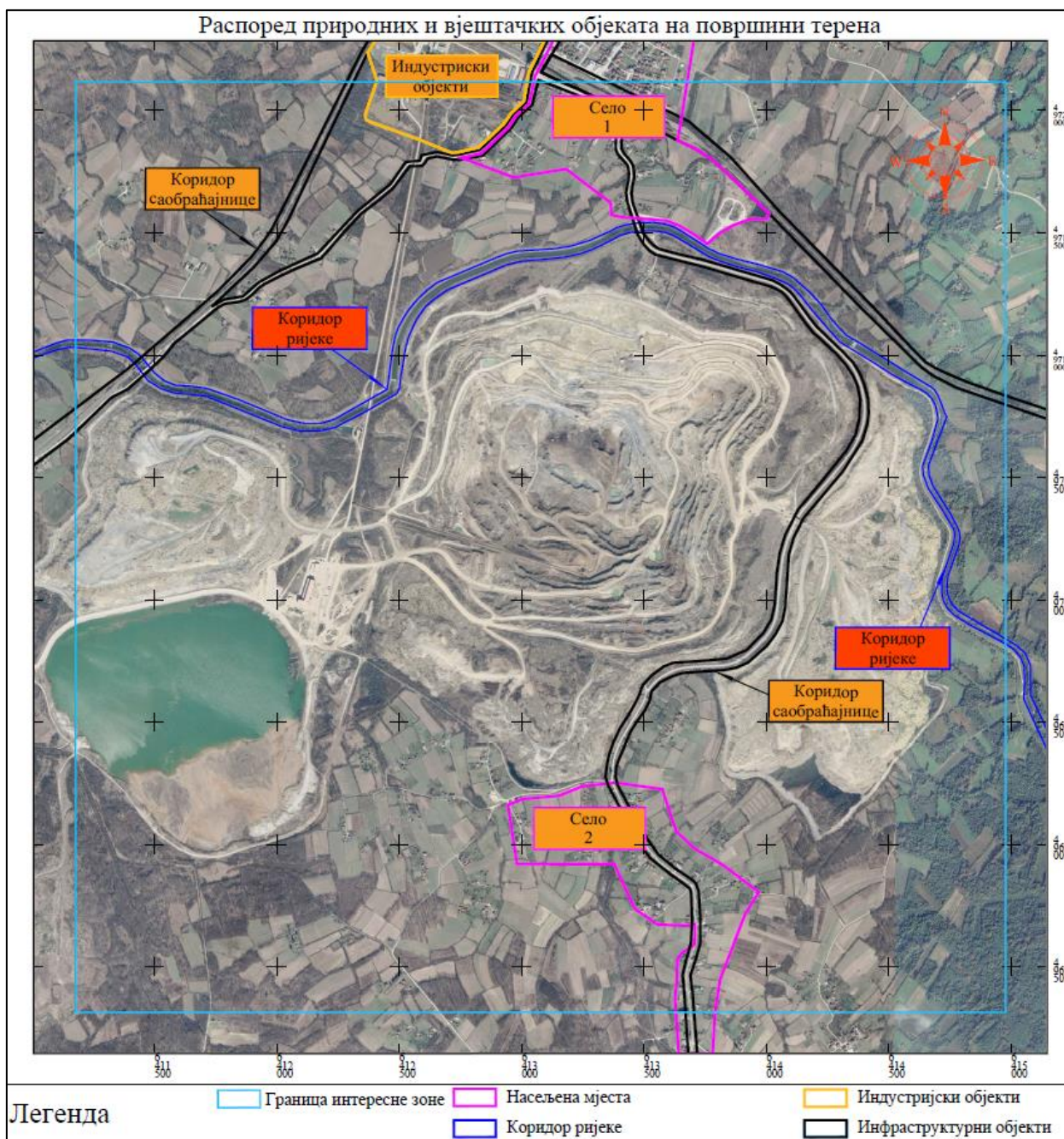
У студији случаја извршена је оптимизација завршне контуре одлагалишта јаловине за цијели предвиђени вијек експлоатације површинског копа Бувач. Дефинисање завршне контуре одлагалишта, као и његове позиције спада у стратешке одлуке које инвеститор доноси у почетној фази експлоатације, а сама одлука има дугорочне последице на цијелокупан процес експлоатације. Како би се симулирао цијелокупан процес приликом рада коришћен је распоред објеката из периода почетка експлоатације, као и завршна контура површинског копа Бувач, која је дефинисана у Главном рударском пројекту експлоатације жељезне руде лежишта Омарска – локалитет Бувач, РГФ, 2023.год [109].

У склопу потпоглавља која се налазе у наставку текста описани су кораци и поткораци, као и начин функционисања модела у реалним условима. У спровођења развијеног модела, на примјеру из праксе, већи дио времена утрошен је на прикупљање података и припрему за процес оптимизације, као и за обраду (хеуристичку) резултата оптимизације. Док се сам процес оптимизације реализује релативно брзо.

Представљени модел је развијен коришћењем образовне верзије Matlab софтвера [110], са интегрисаним модулима за Monte Carlo симулацију и генетски алгоритам. Метода АНР је примењена како би се извршила валоризација терена око површинског копа Бувач и развијена је у Microsoft Excel-у [111], док је Surpac [112] софтвер коришћен за хеуристичку анализу података и детаљни инжењеринг. Цио процес је спроведен на рачунару релативно скромних карактеристика (12 GB RAM меморије, 7. генерација I7 процесора, интегрисана графичка картица).

5.2.1 Анализа ширег подручја површинског копа Бувач

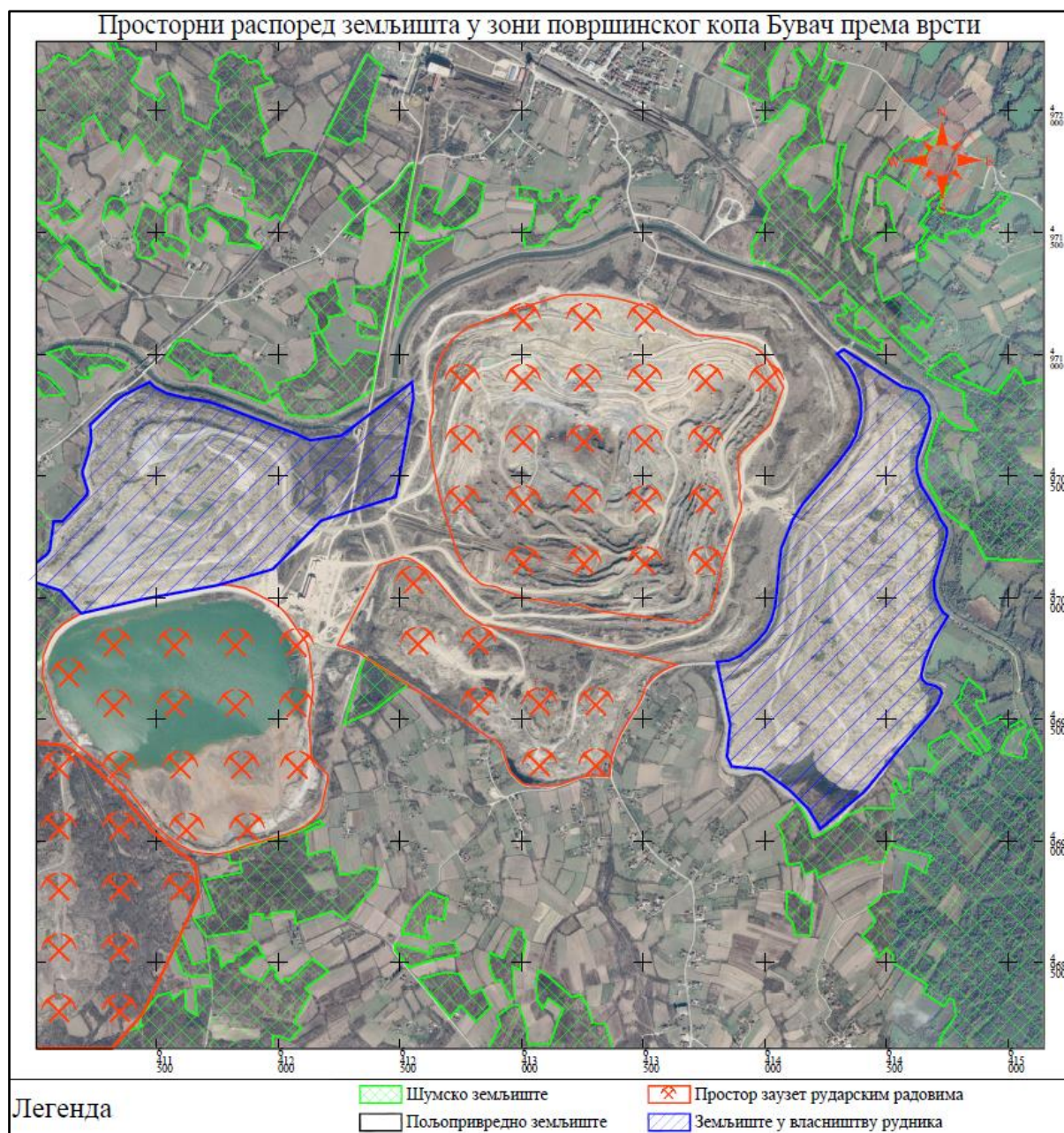
Анализом ширег подручја површинског копа Бувач прикупљени су подаци о утицајним факторима на процес оптимизације. У складу са тим, али и са анализом утицајних фактора која је урађена у поглављу 3, допуњен је садржај слике 5.1.2 и приказан је на слици 5.2.1.



Слика 5.2.1 Распоред природних и вјештачких објеката на површини терена [107]

Као што се може видјети на слици 5.2.1 заједно са позицијом значајних рударских објеката обиљежене су и позиције насељених мјеста. Поред обиљежених локалитета, који имају видљиву другу намјену на разматраном простору, могуће је дефинисати и просторни оквир који припада другом ентитету. И ако се цјелокупан простор налази унутар једне административне цјелине (општина, град, ентитет) и унутар њега се не налазе просторне цјелине, као што су објекти од изузетног природног и историског значаја, друго експлоатационо поље, национални парк, на којима није могуће формирати одлагалиште, индустријски објекти и објекти инфраструктуре свакако овакав тип ограничења могуће је евидентирати и интегрисати у модел.

Поред распореда објеката, анализиран је простор са становишта врсте земљишта. У складу са тим цјелокупан простор је подијељен на пољопривредно, шумско и земљиште у власништву рудника. На слици 5.2.2. приказан је просторни распоред земљишта према врсти, односно намени.



Слика 5.2.2 Просторни распоред земљишта према врсти [107]

У складу са приказним информацијама на сликама 5.1.2, 5.2.1 и 5.2.2 у наредним корацима дефинисани су преостали параметри потребни за оптимизацију.



5.2.2 Дефинисање радног простора (интересна зона)

Ограничење радног простора унутар кога ће се реализовати оптимизација преставља један од првих корака у цијелокупном процесу. Облик и димензије интересне зоне зависе од великог броја фактора, али су свакако подложне измјенама, нарочито у фази истраживања и припреме за оптимизацију. У конкретном примјеру дефинисање границе интересне зоне извршено је у складу са:

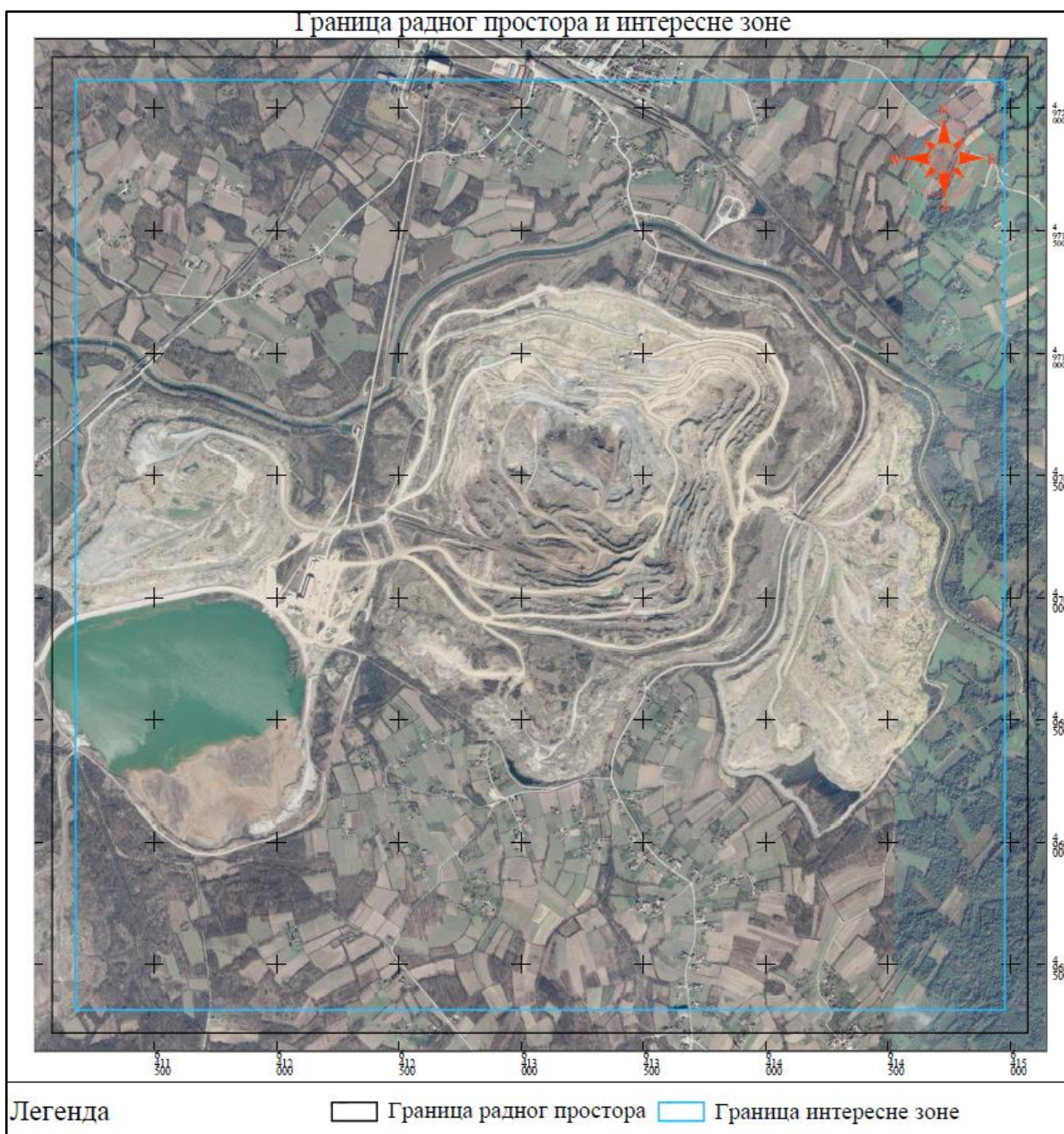
- ⌘ Административним,
- ⌘ Просторним и
- ⌘ Технолошким факторима.

Са административног аспекта одлагалиште мора да се налази унутар експлоатационог поља односно концесионе границе која је додијељена инвеститору, али и да не ремети друга постојећа административна ограничења. Простор који је обухваћен експлоатационим пољем заузима знатно веће дијелове терена који су на великој удаљености од локације на којој ће се реализовати експлоатација. Из тог разлога неопходно је извршити ограничење дијела простора унутар концесионе границе на нешто мањи и примјењиви простор. Превише удаљене локације или локације до којих није могуће обезбједити ефикасне и безбједне транспортне трасе свакако не представљају добро рјешења. Анализом просоторног распореда објеката у широј зони површинског копа и примјене ограничења дужине дисконтинуалног транспорта дефинисана је граница зоне интереса.

Положај природних и вјештачких објеката на површини терена у великој мјери је одредио простор унутар кога је могуће формирати одлагалиште. Док је фактор дужине транспорта већ сведени простор ограничио.

Удаљавањем границе интересне зоне од контуре површинског копа ствара се већа могућност да се обухвати простор који је повољан за формирање одлагалишта. Ово је нарочито изражено са становишта капацитета и погодности подлоге у смислу конфигурације терена и цијене откупа. Са друге стране удаљеније локације захтијевају веће ангажовање транспортних средстава па самим тим и повећање трошкова формирања одлагалишта. Из тог разлога усвојено је ограничење транспорта до 2000 m. По потреби је могуће обухватити знатно шири простор, али свакако у складу са препорукама и искуствима рада дисконтинуалне транспортне опреме чија границе дужине транспортних траса достижу вриједност и до 8000 m [113].

У складу са свим обухваћеним чињеницама дефинисана је граница интересне зоне квадратног облика, дужине странице од 3800 m. На слици 5.2.3 приказана је позиција интересне зоне у односу на контуру површинског копа и околни простор.



Слика 5.2.3 Граница радног простора и интересне зоне [107]

5.2.3 Подијела интересне зоне

Подјела простора интересне зоне извршена је у два нивоа, на зоне и подзоне, а све у циљу како би се створио основ за ефикасну валоризацију земљишта. Основа за одређивање граница зона може бити било која разлика у карактеристикама простора која се јавља унутар интересне зоне. Не постоји јединствено правило за реализацију овог корака, али принципи који су коришћени у разрађеном моделу имају висок степен универзалности. Информације и подаци који су

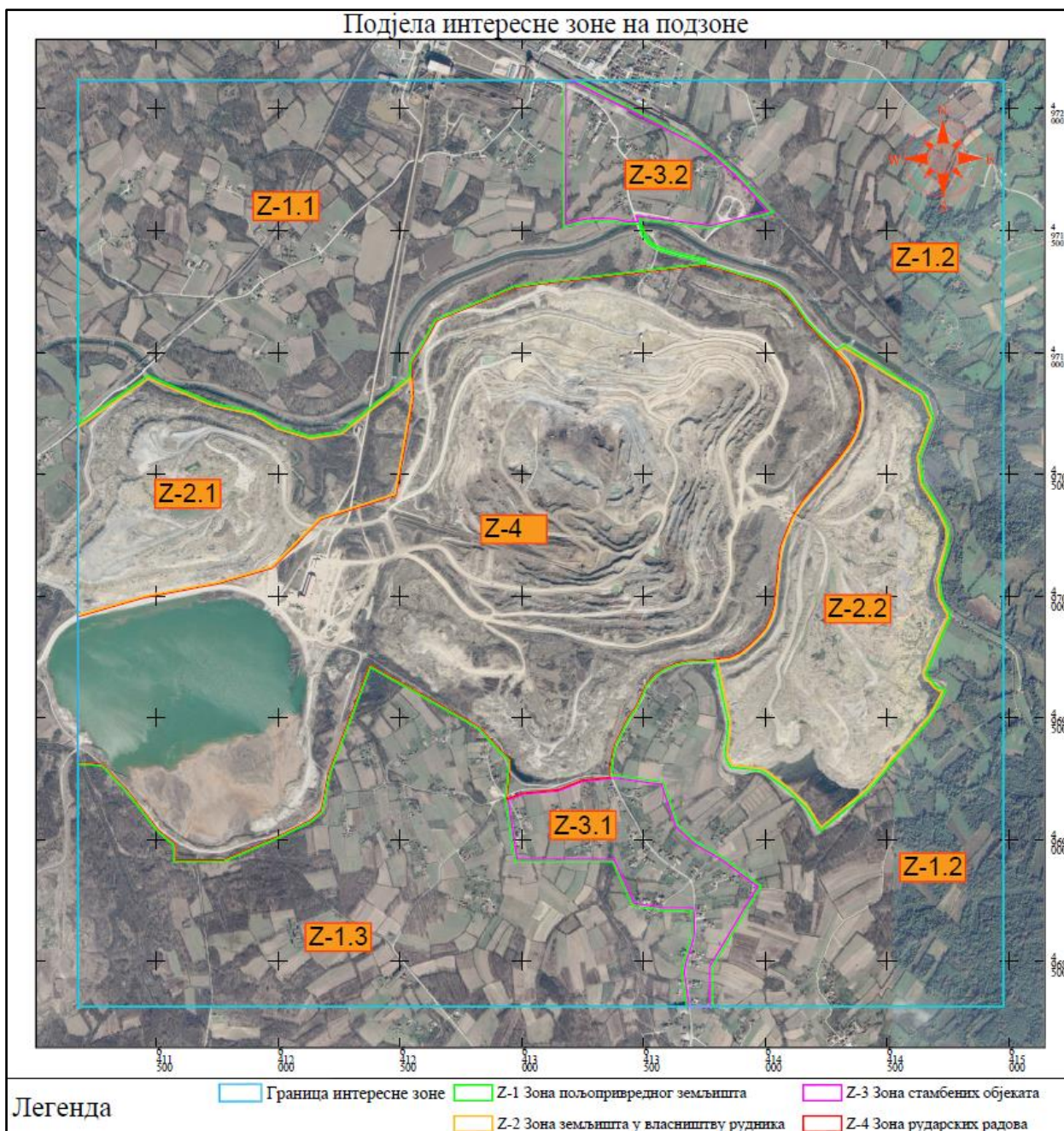


скупљени и приказани на сликама 5.1.2, 5.2.1 и 5.2.2 представљају основ за подијелу простора на зоне. У складу са тим унутар интересне зоне дефинисан је просторни распоред:

- ✕ Рударских објеката (слика 5.1.2).
- ✕ Стамбених објеката (слика 5.2.1).
- ✕ Земљишта према врсти (слика 5.2.2).

Преклапањем информација приказаних на сликама 5.1.2, 5.2.1, и 5.2.2 стекао се увид о могућностима и ограничењима формирања одлагалишта на одређеном простору. На бази оваквог приступа извршена и подијела простора на 4 зоне, односно 8 подзона.

Подијела простора на зоне представља „карактерну“ подјелу простора који се налази унутар интересне зоне. Са друге стране подијела простора на подзоне представља физичко раздвајање простора и исцртавање гарница по „карактерима“ који преовлађују у различитим дијеловима интересне зоне. Број подзона нема директан утицај на оптимизацију или евалуацију и вриједновање земљишта. Њихов број, као и облик и распоред искључиво зависи од међусобног распореда карактеристика унутар интересне зоне. Границе подзона су просторни подаци који су неопходни за оптимизацију и представљају обавезну процедуру којом се врши подијела простора. На слици 5.2.4 приказана је подијела интересне зоне на подзоне.



Слика 5.2.4 Подјела интересне зоне на подзоне [107]

Као што се може видјети унутар Зоне интереса дефинисане су четири зоне (са подзонама) и то:

- ⊗ Зона пољопривредног земљишта (Зона-1)
- ⊗ Зона земљишта у власништву рудника (Зона-2)
- ⊗ Зона стамбених објеката (Зона-3)
- ⊗ Зона рударских радова (Зона-4)



5.2.3.1 Зона пољопривредног земљишта (Зона-1)

Највећи дио анализираног простора заузима пољопривредно земљиште, које је уједно и најповољније за формирање одлагалишта, првенствено ради цијене откупа. Чињеница да пољопривредно земљиште у великој мјери окружује завршну контуру површинског копа доприноси погодности формирања одлагалишта на овом простору.

5.2.3.2 Зона земљишта у рударском власништву (Зона-2)

Развој рударских радова од компанија захтјева да у свом власништу посједује простор на којима ће се тек у нешто даљој будућности реализовати радови. Откуп земљишта или закупљивање на одређени временски период се у већини случајева реализује на цијелокупној површини катастарских парцеле. Димензије парцела, односно простор који заузимају у неким случајевима неће се корисити за потребе експлоатације и у том дјелу је могуће формирање одлагалишта. Баш овај простор, односно простор који је у власништву рудника, а на коме се неће реализовати експлоатација обухваћен је Зоном-2.

Пошто је ријеч о парцелама које се налазе у власништву рудника, односно већ су откупљене оне представљају нешто повољнији простор са економске стране за формирање одлагалишта.

5.2.3.3 Зона стамбених објеката (Зона-3)

Постојање стамбених зона у непосредно окружењу локација на којима се одвија рударска активност ситуацију не чини повољнијом, већ супротно. Експлоатација и формирање одлагалишта на овим зонама (или у њиховој близини) су значајно неповољнији, али свакако нису немогући. Примјери оваквих подухвата нису страни и Димитријевић у свом докторату наводи неколико примјера ефикасног измјештања насеља и рекултивације простора након реализоване експлоатације [71].

Измјештање цијелих насеља, тачније њихов откуп и пресељење становништва је обавеза коју рударске компаније не прихватају тако лако. У оваквим ситуацијама поред финансиског аспекта значајан је и социјални утицај на цијелокупан процес. Из тог разлога простор двије густо насељене површине (село 1 и село 2) унутар интересне зоне је издвојен као засебна зона.

5.2.3.4 Зона рударских радова (Зона-4)

Простор који је обухваћен рударским радовима и рударским објектима подразумјева дио интересне зоне на коме је планирано да се спроведу одређене рударске активности. Поред завршне контуре површинског копа у склопу Зоне-4 уврштени су и већ постојећи рударски објекти. Реализација процеса одлагања на објектима као што су стари површински коп Језеро које је тренутно у функцији флотацијског јаловишта и одагалишта сиромашне руде Мамузе није изводљива због постојања њихове намјене.

Из тог разлога Зона-4, односно зона рударских радова, је у формираном моделу означена као елиминациона и унутар ње није могуће формирати одлагалиште. Сва рјешења која модел



дијелимично или у потпуности конструише унутар Зоне-4 се искључују у фази креирања почетне популације тачака, док она рјешења која се формирају у процесу оптимизације имају значајно већу вриједност функције циља.

Поред активних рударских објеката Зона-4 је обухватила и постојање сигурносне зоне око завршне контуре површинског копа, као и важне инфраструктурне објекте у окружењу.

Зоном забрањених радова није обухваћен простор постојећих спољашњих одлагалишта, односно дио источне косине који се налази унутар интересне зоне. Овај простор се налази унутар простора на коме је могуће формирати одлагалиште.

Студија случаја спроведена је коришћењем реалних података са терена. На овај начин обезбеђује се реалнији пример и веродостојнија рјешења у процесу верификације модела.

5.2.3.5 Подијела подзона на парцеле

Како би се приказаним моделом симулирала реална ситуација цјелокупан простор поред тога што је простор интересне зоне подјелењен на зоне и подзоне, потребно је разматрати простор подијелити у складу са просторним распоредом катастарских парцела. Како податак о распореду катастарских парцела и власничкој структури није био доступан приликом разраде модела и примјене истог на конкретном примјеру, процијењена вриједност земљишта је генерисана за 1 m² заузетог простора а не за цјелокупне парцеле.

5.2.4 Процијена вриједности земљишта унутар интересне зоне

Вриједновање земљишта унутар интересне зоне утврђено је на основу карактеристика одређеног простора и коефицијената добијених примјеном АНР методе (фактори и остали детаљи АНР методе приказани су у табели 5.2.1). О карактеристикама простора речено је нешто више у претходном поглављу, на основу чега је и извршена подијела простора на зоне.

Са друге стране битан чинилац у процијени вриједности земљишта су утицајни фактори који у већој или мањој мјери утичу на повећање вриједности земљишта. Свакако број ових фактора је велики, а у разрађеном моделу кориштени су:

- ⊗ Фактор могућег проширења површинског копа.
- ⊗ Потенцијалне административне препреке.
- ⊗ Утицај формирања одлагалишта на животну средину.

Табела 5.2.1 Фактори и коефицијенти из АНР анализе [1]

Фактор	Коефицијент	Ранг	Индекс
Фактор могућег проширења површинског копа	0.657	1	k1
Потенцијалне административне препреке	0.105	3	k2
Утицај формирања одлагалишта на животну средину	0.238	2	k3



Примјена и евалуација што већег броја фактора свакако би допринјела реалнијем сагледавању и рјешавању проблема, али би процес сакупљања података за функционисање модела захтевао знатно веће временске ресурсе.

Коначни изглед завршне контуре површинског копа није обухватио цијело лежиште, већ само оне дијелове где је експлоатација била економски оправдана [1]. Промена економских параметара експлоатације, пре свега цијене минералне сировине и трошкова, као и развој нових технологија (прераде) и повећање капацитета откопне опреме може за последицу да има економску оправданост експлоатације дубљих и сиромашних дијелова лежишта, односно може да се манифестује у проширењу контуре површинског копа. Из тог разлога остављена је бафер зона око граница површинског копа како би се фактор могућег проширења граница површинског копа обухватио овом студијом случаја. Такође, ову зону је по правилу потребно оставити за потенцијални развој инфраструктуре у непосредној близини површинског копа.

Стицање права на извођење радова на одређеном простору захтева од рударских компанија испуњавање одређених административних услова и стицање права над одређеним катастарским парцелама. Овај процес није једноставан и са собом носи одређене потешкоће, чије последице могу да се огледају у временском заостатку са реализованим радовима или у екстремним случајевима потпуним напуштањем дела или цјелокупног пројекта. Досадашња рударска пракса се доста пута сусретала са оваквим изазовом па је из тог разлога и овај фактор обухваћен.

Утицај било које људске активности, па тако и формирање одлагалишта дуж различитих подзона имаће већи или мањи утицај на животну средину (неизбежне емисије буке и прашине, утицај на водене токове, итд.). Утицај на животну средину сваке подзоне је процењен појединачно, у зависности од локације подзоне у односу на постојећа насеља.

Оно што је потребно напоменути приликом процјене вриједности земљишта кориштена је јединична вриједност цијене земљишта, која је била везана за вриједност пољопривредног земљишта. У ситуацијама, када се на одређеним парцелама налазе стамбени објекти тада је кориштена већа вриједност, према једначини 1 [1]. Из практичних разлога како би се отколонила могућност генерисања одлагалишта унутар зоне 4, јединична вриједност унутар ове зоне је већа од осталих.

Валоризација наведених фактора која се користи у једначини 1 реализована је примјеном методе вишекритеријумског одлучивања АНР. Помоћу ове методе извршено је рангирање процијењеног утицаја претходно поменута три фактора. Коефицијенти рангирања који су добијени АНР методом су кориштени у једначини 1.

5.2.5 Оптимизација

Приказани принцип оптимизације је универзалан односно примењљив на свим општим случајевима конструкције одлагалишта. Са друге стране дефинисање свих неопходних параметара за оптимизацију који се тичу функције циља, ограничења и варијабли карактеристика су сваког појединачног случаја. У наставку текста приказан је начин на који су дефинисани улазни подаци за описану студију случаја.



5.2.5.1 Дефинисање циљане запремине одлагалишта

Димензионисање одлагалишта се реализује за читав радни вијек површинског копа Бувач. Укупна количина јаловине која треба да се откопа износи $16.500.000 \text{ m}^3$, када се узме у обзир коефицијент растреситости материјала за одлагање ове количине откопане јаловине потребно је резервисати простор од $20.000.000 \text{ m}^3$. Резултат оптимизације приказаним моделом је оптимизована завршна контура одлагалишта, без етажа и путева, у складу са тим захтевана запремина мора да има резерву одлагалишног простора због чега је циљана запремина одлагалишта у овом примјеру $22.000.000 \text{ m}^3$ растреситих m^3 .

Иако је 20×10^6 растреситих m^3 , односно 22×10^6 растреситих m^3 , циљани капацитет одлагалишта кроз ову студију случаја примјењена су оба мода функционисања модела, тако да се један дио оптимизација односио на формирање једног, интегралног одлагалишта капацитета од $22 \times 10^6 \text{ m}^3$, али и на формирање више мањих чија укупна запремина износи $22 \times 10^6 \text{ m}^3$. Приликом другог начина оптимизације (са више мањих одлагалишта) коришћене су различите вриједности циљане запремине. Тако да се вриједност циљане запремине у овим варијантама кретала од око 30%-100% укупне количине материјала. У складу са тим опсег ограничења тражене запремине која је приказано у једначини 6 има следећи облик:

$$6 \times 10^6 \text{ m}^3 \leq V \leq 22 \times 10^6 \text{ m}^3 \quad (10)$$

5.2.5.2 Дефинисање ограничења висине одлагалишта

Правних норми којима се ограничава висина одлагалишта на предметној локацији нема. Постојеће старо одлагалиште површинског копа Језеро, као и пројектована одлагалишта према важећем Главном рударском пројекту експлоатације жељезне руде лежишта Омарска – локалитет Бувач, РГФ, 2023.год [109] имају вршну етажу на нивелети 200 m. Приликом разраде модела, установљена је сличност као са опсегом циљане запремине. У колико се дефинише нешто шири оквир ограничења, скуп рјешења је већи. У складу са тим усвојено је ограничење висине одлагалишта до нивелете 250 m како би се формирала одлагалишта циљане запремине, док је минимална висина одлагалишта ограничена на нивелету 175 m. Тако да је једначина 7 има следећи облик:

$$175 \text{ m} < Z \leq 250 \text{ m} \quad (11)$$

5.2.5.3 Дефинисање ограничења горње површине одлагалишта

Поред варирања висине одлагалишта, за функционисање модела неопходно је дефинисати и опсег у коме се врши варирање оса које дефинишу горњу површ одлагалишта. Приликом различитих оптимизација, односно различитих циљаних запремина дефинисане су и различити опсези дужина оса горње површине одлагалишта. У складу са тим вриједност почетног правца k преко кога се генеришу остале осе ограничена је на опсег од минималних 80 m до максималних 350 m.



$$80 \text{ m} \leq k \leq 350 \text{ m} \quad (12)$$

5.2.5.4 Цијена транспорта

Коначна вриједност функције циља зависи и од трошкова транспорта. У складу са статистичком подацима добијеним са површинског копа цијена транспорта 1 m^3 на 1 km процењена је на 0.8 € за хоризонталну компоненту и 1.2 € за вертикалну компоненту транспорта [1].

5.2.6 Резултати оптимизације

Спровођење једне оптимизације са великим бројем тачака потенцијалних рјешења за посљедицу је имало енормно временско трајање процеса и због тога отежано проналажења оптималног рјешења. Током тестирања функционалности модела утврђено је да у циљу смањења времена обраде практичније извршити већи број оптимизација са мањим бројем насумично генерисаних тачака, него обрнуто [1]. Такође више оптимизација са мањим бројем тачака потенцијалних рјешења (мањим бројем чланова почетне популације рјешења) постиже се боља просторна расподела рјешења. Из тог разлога, у описаној студији случаја извршено је 15 оптимизација са циљем генерисања скупа могућих рјешења [1]. У табели 5.2.2. приказани су основни параметри за свих 15 оптимизација.

Табела 5.2.2 Основни параметри оптимизација

Број оптимизација	Опсег циљане запремине ($\times 10^6 \text{ m}^3$)	Вриједност вектора „k“ (m)	Број насумично генерисаних тачака по понављању	Број понављања	Број генерација
1	6-18	40-250	45	2	5
2	6-18	40-350	50	3	5
3	6-10	40-250	50	3	5
4	6-16	100-180	50	3	5
5	10-18	100-130	50	3	5
6	6-22	40-70	50	3	5
7	10-22	30-60	50	3	5
8	6-12	30-50	60	3	5
9	10-22	30-60	50	3	5
10	7-9	40-50	50	3	5
11	6-8	40-50	60	3	5
12	6-10	50-80	50	3	5
13	8-14	100-180	50	3	5
14	10-22	100-150	50	3	5
15	9-15	50-80	50	3	3

Укупан број насумично генерисаних тачака почетне популације потенцијалних рјешења за реализованих 15 оптимизација износи 2250. Свака од 15 реализованих оптимизација



генерисала је одређени број оптимизованих контура одлагалишта, а резултати су приказани у графичком и нумеричком облику. Рангирање оптимизованих контура вршено је у складу са вриједностима функције циља, по принципу мања вриједност већи ранг, односно на основу колико је један m^3 јаловине оптерећен трошковима генерисане контуре одлагалишта.

5.2.7 Хеуристичка обрада резултата рада хибридног модела

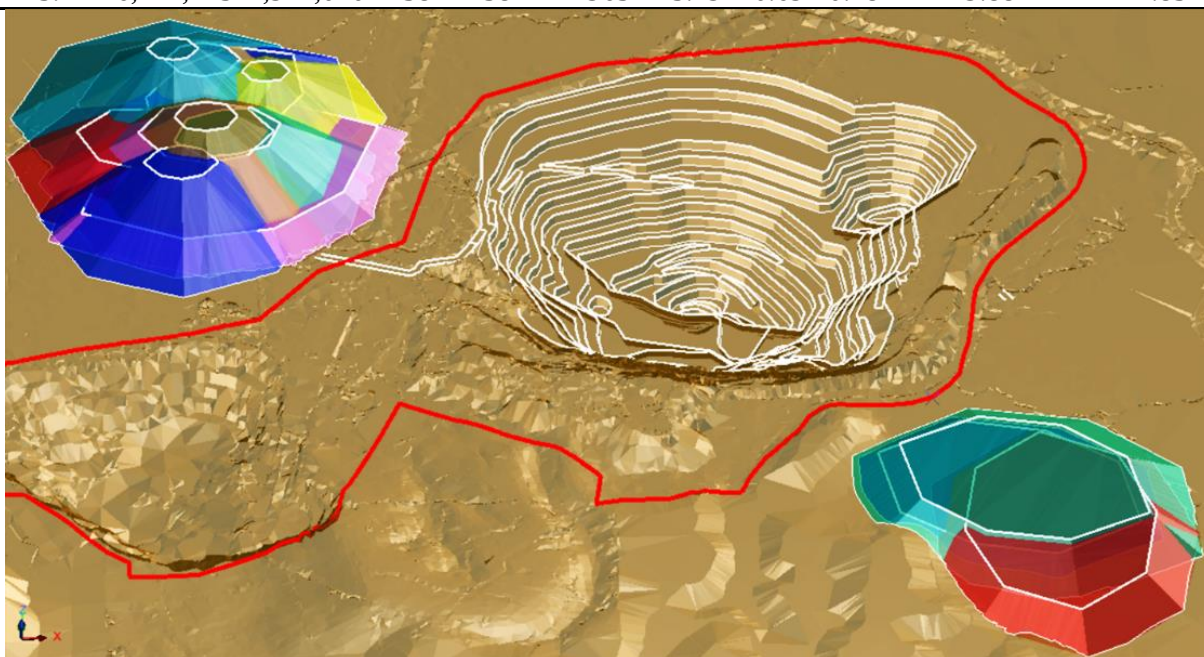
Анализа рјешења добијених оптимизациом реализована је и на аналитичком и графичком приказу резултата. Први корак је подразумјевао рангирање резултата унутар једне оптимизације независно једне од других и издвајање најбоља три рјешења. У колико је просторни распоред издвојених одлагалишта задовољавајући, резултат најбоља три рјешења се пребацују у заједничку табелу. Пошто је генерисање рјешења реализовано насумично могуће је да се у прва три рјешења налазе контуре одлагалишта које су идентичне или им се контуре преклапају у већем проценту. У том случају се контура која има већу вриједност функције циља избацује из ранга, а њено мјесто попуњава прва наредна рангирана контура одлагалишта. На овај начин је формиран нови скуп од укупно 45 рјешења.

Иста процедура је понављена на новоформираном скупу и изабрано је 15 најбољих рјешења, која су издвојена у једну заједничку табелу. Ову процедуру пратило је и анализирање просторног распореда оптимизованих контура одлагалишта. Пошто нема потребе узимати у разматрање одлагалишта која се преклапају у тим ситуацијама неповољнија контура одлагалиште је избачена из скупа, а на њено мјесто је уведена прва наредна контура одлагалиште са повољним карактеристикама.

Резултати анализе су приказани у табели 5.2.3, рјешења су рангирана од најбољег (најмања вриједност функција циља) до најгорег. Просторни распоред свих 15 рјешења приказан је на слици 5.2.5. У циљу јаснијег приказа просторног положаја генерисаних рјешења, граница рударског подручја које је обухваћено зоном 4 (подручја где се не могу генерисати контуре одлагалишта) је означена црвеном линијом [1].

Табела 5.2.3 Карактеристике 15 најбољих одлагалишта [1]

Ранг рјешење	Кординате тачке центра врха одлагалишта			Компонента транспорта (m)		Трошкови (милиона EUR)			Запремина одлагалишта (10 ⁶ m ³)	Функција циља (EUR /m ³)
	X	Y	Z	Хори.	Вертк.	C ₁	C ₂	C ₃		
1.	6,411,903	4,970,738	177	1288	1740	13.82	28.02	0.19	13.05	3.13
2.	6,414,142	4,969,217	179	1459	1786	10.21	18.75	0.14	8.12	3.33
3.	6,411,895	4,971,018	193	1430	2053	13.68	29.46	0.14	11.96	3.62
4.	6,412,230	4,971,409	192	1465	2048	21.05	44.15	0.20	17.97	3.64
5.	6,411,660	4,970,804	198	1537	2158	12.23	25.76	0.14	9.95	3.83
6.	6,414,185	4,969,180	200	1516	2207	24.22	52.90	0.18	20.48	3.87
7.	6,414,286	4,968,992	197	1719	2150	24.70	46.32	0.20	17.96	3.97
8.	6,411,898	4,970,760	217	1301	2537	16.43	48.06	0.15	15.79	4.09
9.	6,411,834	4,971,128	209	1543	2374	10.63	24.53	0.11	8.61	4.10
10.	6,412,016	4,971,044	216	1348	2520	9.36	26.26	0.12	8.68	4.12
11.	6,411,836	4,970,765	216	1359	2524	20.39	56.78	0.16	18.75	4.12
12.	6,411,942	4,970,816	220	1286	2598	19.81	60.04	0.16	19.26	4.15
13.	6,411,761	4,970,614	220	1378	2606	14.70	41.73	0.12	13.34	4.24
14.	6,411,836	4,970,765	236	1359	2912	21.73	69.84	0.17	19.98	4.59
15.	6,411,745	4,971,070	238	1584	2963	25.19	70.69	0.18	19.88	4.83



Слика 5.2.5 Просторни распоред генерисаних одлагалишта [1]

Након што је издвојен скуп од 15 најбољих рјешења, наредни корак је везан за избор једног или више генерисаних рјешења и конструисање финалне завршне контуре одлагалишта. Као што се може видјети у табели 5.2.3 запремине оптимизованих контура су различите, што је у складу са претходно објашњеним начином функциосања процеса оптимизације.

У складу са примјеном једног од два мода функционисања модела конструисање финалне завршне контуре одлагалишта могуће је реализовати на један од следећа два начина и то:



- ✕ Избор једне интегралне завршне контуре одлагалишта.
- ✕ Избор више мањих контура које у збиру задовољавају циљану запремину.

Као што се види из табеле 5.2.3 најбоље рангирано рјешење са потребним капацитетом ($20 \times 10^6 \text{ m}^3$) је рјешење број 6. Ово рјешење има вредност функције циља од $3,87 \text{ €/m}^3$. У ситуацији када желимо да одложимо сву жаловину на једном мјесту ово рјешење је најбоље усвојити као нацрт за даљу конструкцију финалне завршне контуре одлагалишта. Сходно томе, рјешење које је 6 по рангу је издвојено за даље разматрање (варијанта 1). [1]

Гернерално гледано у склопу цијелокупног простора интересне зоне свих 15 генерисаних рјешења је груписано у двије одвојене зоне, са источне и западне стране површинског копа. Са друге стране размотрена је могућност конструисања неколико мањих одлагалишта жаловине чија сумарана запремина одговара циљаној запремини ($20 \times 10^6 \text{ m}^3$). Када разматрамо ову могућност, треба имати на уму да ће се контуре многих генерисаних рјешења преклапати (слика 5.2.5). Као и у првом случају оне контуре одлагалишта које се у потпуности или у већој мјери преклапају не могу се узети у обзир приликом анализе ове опције. У том случају она контура која има већу вриједност функције циља се одбацује, а њено мјесто попуњава прва наредна. Прва два рјешења (ранг 1 и 2) из табеле 5.2.3 имају укупну запремину ($21,2 \times 10^6 \text{ m}^3$) нешто већу од тражене вредности. Већа вриједност од потребне је свакако корисна јер се на тај начин обезбеђује неопходна резерва у капацитета одлагалишта. Ова два рјешења имају најмање вредности функције циља, а њихове контуре се не преклапају, што их чини најбољим кандидатима за анализу могућности одлагања отпада на више локација. Комбиновањем других рјешења као што су рјешења 2 и 3 или 3 и 5 обезбеђује се потребна запремина (приближно потребна запремина) за смјештај откопаних количина жаловине, али је њихова вредност функције циља већа или им се дизајн преклапа. Из тог разлога се такође разматра комбинација рјешења 1 и 2 (варијанта 2). [1]

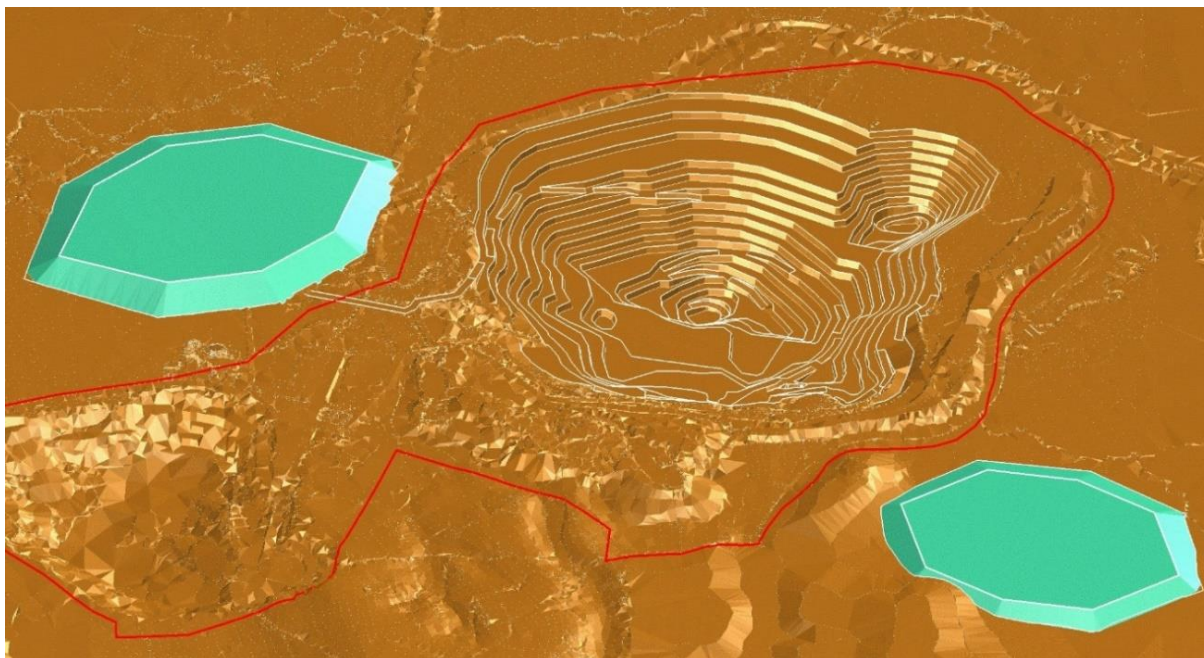
У завршној фази анализе резултата упоређен је учинак двије могуће опције (табела 5.2.4). Варијанта 1 - избор одлагалишта на једној локацији (јединствено одлагалиште са потребном запремином - рјешење број 6). Варијанта 2 - одабир одлагалишта на двије локације (комбинација рјешења 1 и 2).

Табела 5.2.4 Поређење перформанси анализираних варијанти [1]

Поређење варијанти	Варијанта 1	Варијанта 2	
Ранг рјешења	Рјешење 6	(Комбинација рјешења са рангом 1 и 2)	
		Елементи рјешења број 1	Елементи рјешења број 2
Горња површина генерисане контуре	200 m	177 m	179 m
Запремина генерисане контуре	$21,48 \times 10^6 \text{ m}^3$	13.05	8.12
		Укупна запремина = $13,41 + 8,74 = 21,2 \times 10^6 \text{ m}^3$	
Вриједност функција циља	3.87	3.13	3.33
		3.21 (средња вриједност пондерисана запремином)	

На основу приказаних резултата у табели 5.2.4 варијанта 2 има знатно бољу (мању) вриједност функције циља и из тог разлога је усвојена као приједлог рјешења за конструкцију

одлагалишта. Позиције оптимизованих контура одлагалишта, као и граница зоне рударских радова (црвена линија) приказани су на слици 5.2.6.

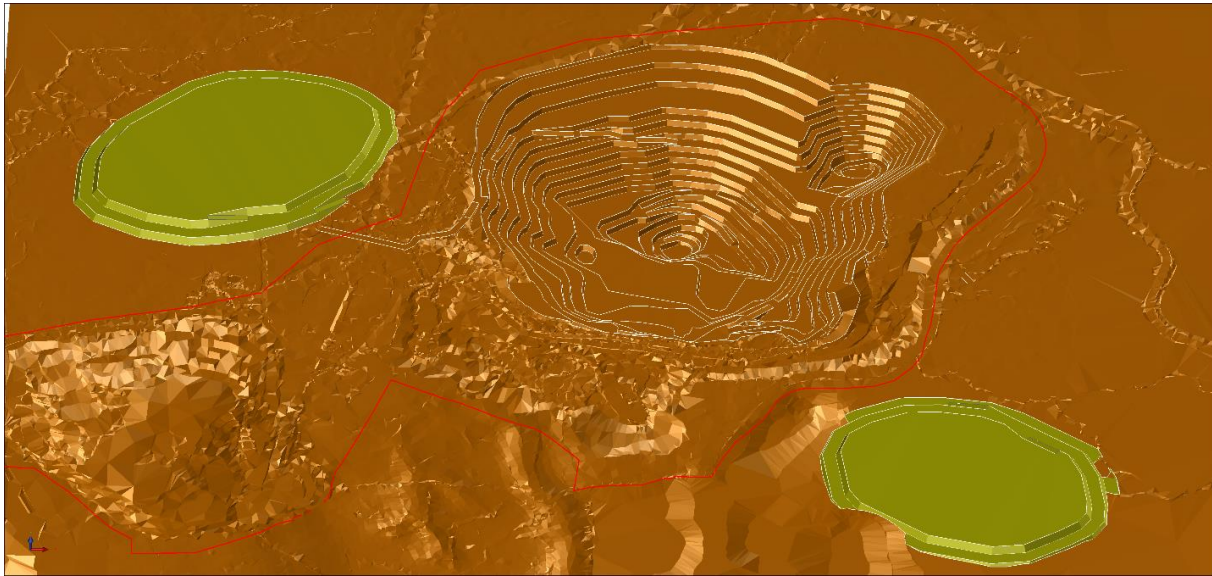


Слика 5.2.6 Просторни распоред генерисаних одлагалишта [1]

На основу усвојеног приједлога рјешења извршено је пројектовање финалних контура одлагалишта. За шта је било потребно дефиниати и додатне геометријске параметре и то:

- ⌘ Висина етаже 10 m.
- ⌘ Угао нагиба етаже 33 °.
- ⌘ Ширина берме 40 m.
- ⌘ Нагиб рампи транспортних путева 8 %.
- ⌘ Ширина рампи транспортних путева 25 m.

На слици 5.2.7 приказане су испројектоване контуре одлагалишта, чија укупна запремина износи $20.8 \times 10^6 \text{ m}^3$.



Слика 5.2.7 Изглед пројектованих завршних контура одлагалишта [1]



6 ЗАКЉУЧАК И ПРЕПОРУКЕ ЗА ДАЉИ РАД

Током друге половине XX вијека, потреба за сировинама и развој науке и технике дали су већи значај и подстакли прогресиван раст површинске експлоатације. За разлику од пређашњег периода, савремено рударство се среће са знатно већим ограничењима и неповољнијим условима. Сложеност примјене површинске експлоатације се огледа у томе да су временом повољнија лежишта или њихови дијелови већ откопани тако да се данас експлоатација одвија на већим дубинама и дијеловима лежишта нижег квалитета, на локацијама са неповољном инфраструктуром и локалном и логистичком. Не треба занемарити ни велики утицај организација за заштиту животне средине, као и промјенљиве политичке прилике и нестабилности у великом броју држава. И на крају основни услов који површинска експлоатација мора да испуни и поред свих ових потешкоћа, је тржишни, односно рударство попут осталих привредних дјелатности, мора да буде економски мотивисано и оправдано, односно да процес експлоатације буде профитабилан.

Простор за повећање профитабилности рада могуће је остварити смањењем трошкова у свим технолошким операцијама, па тако и у процесу одлагања и формирања одлагалишта. Рад са великим (милионским) количинама јаловине и откривке (које се првенствено због услова у лежишту, временом повећавају), ову технолошку операцију карактерише као један од главних, а често и главни извор трошкова. Трошкови откопавања, транспорта и одлагања имају сталан тренд раста, генерисан повећањем коефицијента откривке, транспортних дужина, дубина површинских копова и висина одлагалишта на којима се материјал депонује. Јасно је да се смањењем трошкова у овој технолошкој операцији у великој мјери може утицати на повећање профитабилности цјелокупне рударске активности и рударског пројекта. Највећи ефекти уштеда постижу се у оним технолошким процесима који генеришу највеће трошкове.

Дефинисање оптималне завршне контуре одлагалишта, њеног облика и локације у почетној фази рударског пројекта може да има значајан ефекат на цјелокупан рударски пројекат. Досадашњи приступ оптимизацији завршне контуре одлагалишта генерисао је рјешења која су најчешће заснована на једном (или пар) водећих критеријума (најчешће минимизација трошкова). Поред тога коначна одлука је доношена на основу личног искуства инжењера, ријетко уз узимање у обзир свих релевантних фактора, који у стварности дефинишу оптималну завршну контуру одлагалишта. На овакав начин могуће је генерисати више суб-оптималних рјешења, која током животног вијека рудника у значајној мјери могу да ускрате потенцијал који постоји, а због изабраног приступа у фазама планирања и пројектовања није искоришћен.

Примјена интегралног приступа, односно начина који обухвата све значајне и потенцијално значајне факторе, као и битних чинилаца пројекта, намеће се као рјешење. Нарочито ако се узме у обзир да се овакве одлуке доносе у почетној фази рударског пројекта, док је утицај и ефекат одлуке знатно дужи од животног вијека самог пројекта. Чињеница да том приликом инжењери располажу скромним скупом података повећава важност интегралном приступу оптимизације завршне контуре одлагалишта.

Реализација процеса оптимизације која обухвата све релевантне утицајне чиниоце (интегрални приступ) је комплексна и временски захтијевна, а њена реализација није могућа без примјене неког оптимизационог алгорита или методе. Са друге стране, данас постоји велики број оптимизационих метода, али услјед сопствених ограничења и недостатака ни једном од њих



самостално, није могуће обухватити све неопходне критеријуме, или постојеће методе нису применљиве на цјелом домену. У складу са тим, као и са спроведеним истраживањем, намеће се закључак да је у цјелокупан процес неопходно увести више метода. На овај начин обезбјеђује се међусобна подршка и неутралисање недостатака једне методе примјеном других.

У овој дисертацији показано је да се правилним избором и одговарајућом примјеном одабраних оптимизационих метода, може креирати хибридни модел (сачињен од више метода) способан да превазиђе неке од недостатака постојећег начина рада као што су:

- ✕ Идентификација и квантификација битних параметара при конструкцији оптималне контуре одлагалишта површинског копа.
- ✕ Генерисање оптималне (или блиске оптималној) завршне контуре одлагалишта за задати сет критеријума.
- ✕ Смањење ниво субјективних одлука, а тиме и нивоа грешака, у процесу стратешког и инвестиционог планирања површинске експлоатације.
- ✕ Смањење броја потребних инжењерских сати рада и тиме олакшање процеса пројектовања.

Главна метода, односно метода којом се реализује процес оптимизације је генетски алгоритам. Евалуацију утицајних фактора који утичу на формирање одлагалишта реализована је примјеном АНР методе вишекритеријумског одлучивања. Овом кораку претходила је опширна анализа и прикупљање података, која је саставни дио цјелокупног истраживања. За насумични избор потенцијалних рјешења и вриједности елемента одлагалишта који се оптимизују, примјењена је симулациона метода Monte Carlo. На самом крају модел не генерише оптималну контуру одлагалишта, већ ограничени скуп резултата из којих се хеуристичком обрадом бира најбоље рјешење.

Симулациони експеримент, студија случаја, који је приказан у поглављу 5. Примјер употребе развијеног хибридног модела на металичном лежишту и који представља саставни дио публикованог рада Hybrid Model for Optimisation of Waste Dump Design and Site Selection in Open Pit Mining послужио је како би се на опипљив, практичан и илустративан начин приказала примјена формираног хибридног модела. Том приликом спроведена је симулација избора завршне контуре одлагалишта за конкретан примјер и конкретне радне услове и захтјеве у циљу верификације функционалности модела и могућности његове примјене у реалним условима. Симулациони експеримент је спроведен за услове који владају на површинском копу Бувач код Приједора. Приликом разраде и формирања модела перманентно је вршена провјера његове функционалности на више тренутно активних рударских локација.

Приказани резултати симулационог експеримента указују да је примјеном формираног хибридног модела у синтези са хеуристичким одабиром оптималног рјешења могуће генерисати оптималну завршну контуру одлагалишта. Рјешења која су производ рада су реална, просторно и технички изводљива, а доприносе повећању поузданости резултата на бази истовремене евалуације више утицајних фактора. На самом крају модел не генерише једну оптималну контуру одлагалишта, већ ограничени скуп рјешења у графичком и аналитичком облику. Генерисани скуп рјешења одлагалишта су оквир за коначни дизајн и потребна је додатна инжењерска обрада да би се нацрт трансформисао у детаљно (коначно) инжењерско рјешење. Имајући ово у виду, важно је напоменути да представљени хибридни



модел није намјењен да замјени искуство инжењера. То је користан и вриједан алат који треба да допринесе и помогне инжењерима у процесу рјешавања важних питања приликом планирања и пројектовања.

У научном смислу потврђена је могућност примјене оптимизационих метода као што је генетски алгоритам за потребе ријешавања комплексних проблема из области рударства, као и могућност његовог кординисаног рада са другим методама у склопу хибридног модела.

Формирана методологија и алгоритам модела су настали као одговор на дефинисане циљеве и полазне хипотезе наведене у уводном поглављу. Овдје је битно напоменути да се приказани модел може користити на конкретним случајевима, али уз адекватну припрему улазних података. Конкретни резултати примјене модела у потпуности зависе од степена познавања и квалитета улазних параметара (топографије, хидрографске мреже, инжењерско-геолошких параметара радне средине и других улазних величина).

Током примјене и тестирања модела, дуго вријеме обраде података идентификовано је као основни недостатак његовог рада. За приказану студију случаја, вријеме обраде је било 8 h по оптимизацији, што се може сматрати дугим. Међутим, треба имати у виду да је развој и тестирање модела обављено са релативно скромним ресурсима (пре свега са хардверског аспекта, али и с обзиром на број људи укључених у истраживање и њихово расположиво вријеме). Реална је претпоставка да би се са ангажовањем више ресурса функционисање модела могло оптимизовати и смањити вријеме обраде. Узимајући у обзир да се модел користи за доношење стратешких одлука (положај и дизајн одлагалишта, што ће дугорочно утицати на укупну реализацију пројекта), дуже вријеме обраде може се сматрати оправданим.

Имајући у виду индустријску природу рударства, управљање трошковима се у презентованом истраживању, са правом користи и представља најважнији и универзално прихваћен критеријум избора оптималне варијанте и синтетичку оцјену ефикасности цјелокупне рударске активности.

Унапређење формираног модела могуће је остварити на свим нивоима, у фази припреме, развоја архитектуре модела и у завршној фази, унапређењем излазног графичког и аналитичког интерфејса. Ова унапређења је најприје могуће спровести кроз:

1. Идентификацију фактора, утврђивање минималног степена поузданости улазних параметара и степена њиховог утицаја на коначно рјешење.
2. Коришћење програмских језика и ИТ платформи прилагођених хибридном приступу рјешавања проблема.
3. Генерисање детаљније излазне форме рјешења – рјешења која су својом формом ближа конкретном техничком изгледу одлагалишта са свим елементима одлагалишта као објекта.

И док је прва ставка предмет сталне стручне и научне активности у рударској области, друге двије су специфичне за развој конкретног модела.

Надоградња постојећег модела може се фокусирати на повећање укупних перформанси. На овај начин би се могло утицати на смањење времена обраде и обезбједити стабилност рада



модела. Један од могућих видова унапређења је и примјена програмских језика који подржавају хибридни приступ ријешавања проблема.

Како је већ наведено резултати предложеног модела у потпуности зависе од квалитета улазних параметара и вођени су дефинисаним ограничењима. Данас се за потребу обраде просторних података веома често и ефикасно користи Географски информациони систем, односно алати GIS или QGIS. Ови софтвери нису коришћени за потребе овог рада, али њихова интеграција у постојећи модел свакако би побољшала функционалност и њихова употреба је у плану будућих унапређења.

Простор за побољшање рада модела постоји и у дијелу који се тиче графичке визуелизације рјешења, али и њиховог генерисања током процеса оптимизације. Даље истраживање може да се базира на раду са контуром одлагалишта чије су косине сачињене од система етажа, а не од једне генералне косине. Са друге стране досадашње искуство рада на моделу нам говори да би један овакав корак успорио цјелокупан рад модела и продужио му вријеме рада. Један од приоритета будућег рада је повећање перформанси модела.

Кроз процес израде дисертације и истраживања које је саставни дио рада на дисертацији, отворена су нова питања и теме које могу бити предмет даљих истраживања. Прије свега у погледу надоградње модела, али и процеса евалуације утицајних фактора и дефинисања њиховог значаја. Са друге стране рјешење које је приказано може се дефинисати као значајан иновативан напредак у процесу оптимизације и примјене хибридних модела. Комплексност математичких метода не иду у прилог примјени и њиховом увођењу у оперативни рад. Тежња за увођењем комплекснијих алата, у чијој су основи сложене математичке методе, ствара простор и даје правац за даља унапређења и научни рад. У том смислу, презентовани резултати истраживања, односно рада у оквиру дисертације, представљају основу за даља истраживања.



ЛИТЕРАТУРА

- [1] A. Doderović, S.-M. Doderović, S. Stepanovic, M. Banković i D. Stevanović, „Hybrid Model for Optimisation of Waste Dump Design and Site Selection in Open Pit Mining,“ *Minerals*, t. 13, p. 1041, 2023.
- [2] T. Dincer, „Application pit optimization algorithms beyond open pit limits,“ u *In Proceedings of the Seventeenth International Mining*, Ankara, Turkey,, 19–22 June 2001;.
- [3] M. Scoble, B. Klein i M. S. Dunbar, „Mining Waste: Transforming Mining Systems for Waste Management,“ *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, t. 17, br. 2, pp. 123-135, 2003.
- [4] S. Alarie i M. Gamache, „Overview of solution strategies used in truck dispatching systems for open pit mines,“ *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, t. 16, br. 1, pp. 59-76, 2002.
- [5] B. Ozdemir i M. Kumral, „A system-wide approach to minimize the operational cost of bench production in open-cast mining operations,“ *International Journal of Coal Science & Technology*, t. 6, pp. 84-94, 2019.
- [6] Y. Lizotte i E. Bonates, „Truck and shovel dispatching rules assessment using simulation,“ *Mining Science and Technology*, t. 5, br. 1, pp. 45-58, 1981.
- [7] R. F. Subtil, D. M. Silva i J. Cesar Alves, „A practical approach to truck dispatch for open pit mines,“ u *Conference: 35th APCOM Symposium 2011*, Wollongong, Australia, 24–30 September 2011.
- [8] C. B. Tabelin, J. Dallas, S. Casanova, T. Pelech, G. Bournival, S. Saydam i I. Canbulat, „Towards a low-carbon society: A review of lithium resource availability, challenges and innovations in mining, extraction and recycling, and future perspectives,“ *Minerals Engineering*, t. 163, 15 March 2021.
- [9] T. Phengsaart, P. Srichonphaisan, C. Kertbundit, N. Soonthornwiphat, S. Sinthugoot, N. Phumkokrux, O. Juntarasakul, K. Maneeintr, A. Numprasanthai, I. Park, C. B. Tabelin, N. Hiroy i M. Ito, „Conventional and recent advances in gravity separation technologies for coal cleaning: A systematic and critical review,“ *Heliyon*, t. 9, br. 2, FEBRUARY 2023.
- [10] P. Julapong, A. Numprasanthai, L. Tan, O. Juntarasakul, P. Srichonphaisarn, K. Aikawa, I. Park, M. Ito, C. B. Tabelin i T. Phengsaart, „Rare Earth Elements Recovery from Primary and Secondary Resources Using Flotation: A Systematic Review,“ *Special Issue Advances in Waste Treatment and Resource Utilization*, t. 13(14), 2023.



- [11] C. B. Tabelin, I. Park, T. Phengsaart, S. Jeon, M. V. Tabelin, D. Alonzo, K. Yoo, M. Ito i N. Hiroyoshi, „Copper and critical metals production from porphyry ores and E-wastes: A review of resource availability, processing/recycling challenges, socio-environmental aspects, and sustainability issues,“ *Resources Conservation and Recycling*, t. 170, br. 105610, July 2021.
- [12] M. Kumral i R. Dimitrakopoulos, „Selection of waste dump sites using a tabu search algorithm,“ *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, t. 108, pp. 9-13, 2008.
- [13] A. Doderović, N. Stanić, M. Gomilanović i S. Stepanović, „System for water collection that gravities into the old bed of the river Čehotina,“ *Mining and Metallurgy Engineering Bor*, 2023.
- [14] S. Stepanović, N. Stanić, A. Doderović i N. Marković, „Selection the variant technical solution of the transport and service road to the eastern external landfill and collective water collector,“ *Mining and Metallurgy Engineering Bor*, pp. 19-30, 2019.
- [15] W. Hustulid, M. Kuchta i M. Randall, *Open Pit Mine Planning and Design*, Two Volume Set & CD-ROM Pack, London: UK, 2013.
- [16] Y. Li, E. Topala i D. J. Williams, „Waste rock dumping optimisation using mixed integer programming (MIP),“ *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, t. 27, br. 6, p. 425–436, 2013.
- [17] G. M. Mudd, *The Sustainability of Mining in Australia: Key Production Trends and Environmental Implications for the Future*, Melbourne, Australia: Research Report No. RR5; Department of Civil Engineering, Monash University and Mineral Policy Institute, 2009.
- [18] S. Northey, S. H. Mohr, G. M. Mudd, Z. Weng i D. Giurco, „Modelling future copper ore grade decline based on a detailed assessment of copper resources and mining,“ *Resources, Conservation and Recycling*, t. 83, pp. 190-201, February 2014.
- [19] G. Calvo, G. M. Mudd, A. Valero i A. Valero, „Decreasing Ore Grades in Global Metallic Mining: A Theoretical Issue or a Global Reality?,“ *MDPI-Resources*, t. 5, br. 4, November 2016.
- [20] G. Calvo, J.-L. Palacios i A. Valero, „The influence of ore grade decline on energy consumption and GhG emissions: The case of gold,“ *Environmental Development*, t. 41, March 2022.
- [21] Y. Li, E. Topal i D. J. Williams, „Optimisation of waste rock placement using mixed integer programming (MIP),“ *Mining Technology*, t. 123, br. 4, pp. 220-229, 2014.
- [22] Y. Li, E. Topal i S. Ramazan, „Optimising the long-term mine waste management and truck schedule in a large-scale open pit mine,“ *Mining Technology*, t. 125, br. 1, 2016.



- [23] Z. Fu, Y. Li, E. Topal i D. J. Williams, „A New Tool for Optimisation of Mine Waste Management in Potential Acid Forming Conditions,” u *Tailings and Mine Waste Management for the 21st Century*, Sydney, Australia, 27–28 July 2015..
- [24] A. Hajarian i M. Osanloo, „A New Developed Model to Determine Waste Dump Site Selection in Open Pit Mines: An Approach to Minimize Haul Road Construction Cost,” *International Journal of Engineering*, t. 33, pp. 1413-1422, 2020.
- [25] S. Shahba , R. Arjmandi , M. Monavari i J. Ghodusi , „Application of multi-attribute decision-making methods in SWOT analysis of mine waste management (case study: Sirjan's Golgohar iron mine, Iran),“ *Resources Policy*, t. 51, pp. 67-76, 2017.
- [26] M. Osanloo i M. Ataei, „Factors Affecting the Selection of Site for Arrangement of Pit Rock-Dumps,” *Journal of Mining Science*, t. 39, pp. 148-153, 2003.
- [27] A. Hekmat, M. Osanloo i M. A. Shirazi, „New approach for selection of waste dump sites in open pit mines,” *Mining Technology*, t. 117, br. 1, pp. 24-31, 2008.
- [28] Y.-C. Abdolreza, A. Zabih, O. Kazem i B. Mohammad Houssain, „Waste Dump Site Selection by Using Fuzzy VIKOR. In Proceedings of Waste Dump Site Selection by Using Fuzzy VIKOR. In Proceedings of,” u *In Proceedings of In Proceedings of*, Eslamshahr, Iran, 7 March 2011.
- [29] S. H.A. i P. E. Baffoe, „Selecting Suitable Sites for Mine Waste Dumps Using GIS Techniques at Goldfields, Damang Mine,” *Ghana Mining Journal*, t. 17, br. 1, 2017.
- [30] L. Y.Y., B. J.J. i L. Y.J., „Discussion on the safety distance between the bottom of the inner dump and the stope,” *Surface Coal Mining Technology*, t. 2, pp. 11-13, 2003.
- [31] D. Verma, A. Kainthola,, G. S.S. i S. T.N. , „A finite element approach of stability analysis of internal dump slope in Wardha valley coal field, India,” *American Journal of Mining and Metallurgy*, t. 1, br. 1, pp. 1-6, 2013.
- [32] C. V. I. i N. V. K., „Stripping with direct dumping in Kuzbass open pit mines: The current state and prospects,” *Journal of Mining Scienc*, t. 52, pp. 725-731, 2016.
- [33] D. Stevanović, M. Banković, V. Rupar, V. Milisavljević , A. Cvjetić i D. Kržanović, „Waste Dump Design Optimization, Case Study Open Pit Drmno,” u *Mining and Environmental Protection*, 6th International Symposium, MEP 17,, Vrdnik,, 21-24 June 2017.
- [34] Y. A. Sari i M. Kumral, „A landfill based approach to surface mine design,” *Journal of Central South University*, t. 25, p. 159–168, 2018.



- [35] H. Peng i D. Zhang, „Research on Inpit Dumping Height during Tracing Mining Period between Two Adjacent Surface Coal Mines,“ *Advances in Civil Engineering*, p. <https://doi.org/10.1155/2018/3450584>, 2018.
- [36] D. Kaykov i I. Koprev, „Rationalising the location and design of the waste dump in the case of open-pit mining,“ *Sustainable Extraction and Processing of Raw Materials (SEPRM) Journal*, t. 1, 2020.
- [37] D. Williams , P. Scott, D. Johnston i G. Lee, „Rock Dump Design to Limit Potential Acid Drainage,“ u *In Proceedings of the First International Seminar on the Management of Rock Dumps, Stockpiles and Heap Leach Pads, Australian Centre for Geomechanics (ACG).*, Perth, Western Australia, 5–6 March, 2008.
- [38] C. Ozturk, S. G. Ercelebi, I. Önsel, M. Özkan, M. Zengin, D. Arslan, Y. Tuncel i Z. Baz, „Open pit mine waste dump area design based on stability principles,“ u *In Proceedings of the 24th International Mining Congress and Exhibition of Turkey, IMCET'15.*, Antalya, Turkey, 14–17 April 2015.
- [39] J. P. Ortiz, „Methodology for a dump design optimization in large-scale open pit mines,“ *Cogent Engineering*, t. 4, br. 1, 2017.
- [40] L. Dimitrov, I. Grigorova i T. Yankova, „Possibilities to Construct Combined Mine Waste Dump Facility with Better Operational Sequence,“ *The Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics*, t. 23, pp. 42-49, 2023.
- [41] R. Srbija, Zakon o rudarstvu i geološkim istraživanjima, Službeni glasnik RS, br. 101, 2021.
- [42] PLEJADES, „Izveštaj o lokaciji rudarskog otpada 183 Jablanica (ORO 5422),“ Ministarstvo rudarstva i energetike, Beograd, 2017.
- [43] A. Doderović, Artist, *Lična arhiva fotografija*. [Art]. 2023.
- [44] M. Hawley i J. Cunning, Guidelines for Mine Waste Dump and Stockpile Design, EH Leiden, The Netherlands: CRC Press/Balkema Published exclusively throughout the world (excluding Australia and New Zealand), 2017.
- [45] A. Lazić, Projektovanje površinskih kopova sa modeliranjem sistema eksploatacije, Beograd: Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, 1998.
- [46] N. Gojković, R. Obradović i V. Čebašek, Stabilnost odlagališta površinskih kopova, Beograd: Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, 2008.
- [47] J. Kun, Površinska eksploatacija lignita I knjiga, Beograd: Rudarski institut Beograd, 1981.
- [48] J. Kun, Površinska eksploatacija lignita II knjiga, Beograd: Rudarski institut, Beograd, 1982.



- [49] N. Popović, Naučne osnove projektovanja površinskih kopova, Sarajevo: NIRO "Zajednica" - NIŠRO "Oslobođenje" Sarajevo, 1984.
- [50] W. Wahler, „A perspective – mine waste disposal structures – mine dumps, and mill and plant impoundments,“ u *Proceedings of the 6th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. III*, Lima, 1979.
- [51] P. Darling, SME Mining engineering handbook, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2011.
- [52] A. Doderović, Diplomski rad "Razvoj unutrašnjeg odlagališta p.k. „Drmno“,“ Berograd: Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu, 2014.
- [53] PLEJADES, „Katastar rudarskog otpada Republike Srbije - Izveštaj za lokaciju rudarskog otpada 22 Karadak (ORO 1097/1 i 1097/2),“ Ministarstvo rudarstva i energetike Republike Srbije, Beograd, 2019.
- [54] N. Hrnjez, Artist, *Kovršinski kop Čeramide*. [Art]. TEKO-MINING. d.o.o., 2019.
- [55] D. N. Knežević, Priprema mineralnih sirovina, Beograd: Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, 2012.
- [56] L. DOO, „LDS DOO,“ LDS DOO, [Na mreži]. Available: <https://lds.rs/niskogradnja/>. [Poslednji pristup 05 03 2024].
- [57] G. Vostok, „Suek. Siberian Coal Energy Company,“ Gelio Vostok photography agency and a publishing company, [Na mreži]. Available: https://gelio.livejournal.com/212139.html?thread=14969515&fbclid=IwAR1R8R37ttpdF5BpKcfEnEvvfUkGlf_-E8DzkOet8G2c1gt60oPUvEXTEU. [Poslednji pristup 05 03 2024].
- [58] G. Welters, „The New York Times,“ 10 Oktobar 2018. [Na mreži]. Available: <https://www.nytimes.com/2018/10/10/world/europe/germany-coal-climate.html?rref=collection%2Fissuecollection%2Ftoday-s-new-york-times>. [Poslednji pristup 05 03 2024].
- [59] S. Stepanov, „Самый крупный угольный разрез в России,“ Gelio, [Na mreži]. Available: <https://gelio.livejournal.com/212641.html>. [Poslednji pristup 05 03 2024].
- [60] I. E. Zevgolis, „Geotechnical characterization of mining rock waste dumps in central Evia, Greece,“ *Environmental Earth Sciences*, t. 77, br. 16, 2018.
- [61] A. Nu'man, „Forvajder M&U,“ [Na mreži]. Available: <https://lh5.googleusercontent.com/p/AF1QipNzMK2cOiCNk-o8AFhxigsqYUNZysY3a71rxHd=h1440>. [Poslednji pristup 05 03 2024].



- [62] R. V. Mitrović, Projektovanje tehnoloških procesa,, Beograd: Građevinska knjiga, 1983.
- [63] V. Pavlović, Sistemi površinske eksploatacije, Beograd: Rudarsko-geološki fakultet, Univerziteta u Beogradu, 1998.
- [64] R. Srbija, Pravilnik o tehničkim zahtevima za površinsku eksploataciju ležišta mineralnih sirovina, Službeni glasnik RS, br. 96, 2010.
- [65] V. Pavlović, Tehnologija površinske eksploatacije, Beograd: Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu, 1992.
- [66] V. Jovićić, Upravljanje procesom rekultivacije spoljašnjih odlagališta površinskih kopova- Magistarski rad, Beograd: Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu, 2012.
- [67] M. M. Hudej, Multivarijabilni modeli upravljanja u rudarstvu, Beograd: Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, 2013.
- [68] K. Urošević, Z. Gligorić, I. Miljanović i Č. Beljić, „Novel Methods in Multiple Criteria Decision-Making Process(MCRAT and RAPS)—Application in the Mining Industry,“ *MDPI-mathematics*, t. 9, br. 16, 2021.
- [69] A. Bascetin, „A decision support system using analytical hierarchy process (AHP) for the optimal environmental reclamation of an open-pit mine,“ *Environmental Geology volume*, t. 52, pp. 663-672, 2007.
- [70] S. D. Bošković, Doktorska disertacija "Optimizacija parametara reza rotornog bagera pri otkopavanju materijala sa povećanom čvrstoćom", Beograd: Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, 2016.
- [71] B. S. Dimitrijević, Doktorska disertacija "Optimizacija upravljanja procesima rekultivacije površinskih kopova uglja", Beograd: Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, 2014.
- [72] S. P. Đenadić, P. D. Jovančić, D. M. Ignjatović, F. Miletić i I. Janković, „Analiza primene višekriterijumskih metoda u optimizaciji izbora hidruličnih bagera na površinskim kopovima uglja,“ *Tehnika*, t. 74, pp. 369-377, 2019.
- [73] A. Nasirinezhad, D. Stevanović, D. Ignjatović i M. Rahmanpour, Primary crusher site selection in open pit mines - case study in Sungun copper mine, Beograd: Underground mining engineering, University of Belgrade - Faculty of mining and geology, 2021.
- [74] P. Marković, D. Stevanović, Pešić Georgiadis i M. Banković, Application of MCDA in the determination of optimal block size for open-pit modelling and mine planning, Beograd: Underground mining engineering, University of Belgrade - Faculty of mining and geology, 2021.



- [75] F. Deng, J. Pu, Y. Huang i Q. Han, „3D geological suitability evaluation for underground space based on the AHP-cloud model,“ *Underground Space*, t. 8, p. 109–122, 2023.
- [76] E. J. Sobczyk, D. Galica, M. Kopacz i W. Sobczyk, „Selecting the optimal exploitation option using a digital deposit model and the AHP,“ *Resources Policy*, t. 78, 2022.
- [77] M. Lakićević, B. Srđević, J. Ninić-Todorović и L. Bajić, Primena AHP metoda u višekriterijumskom vrednovanju parkova Novog Sada, 2017: Poljoprivredni fakultet Univerziteta u Novom Sadu LETOPIS NAUČNIH RADOVA / ANNALS OF AGRONOMY, Novi sad.
- [78] L. Zengkang, Y. Chenglong , L. Huanan , Z. Jiquan , Z. Yichen , J. Wang и C. Yanan , „Application of AHP-ICM and AHP-EWM in Collapse Disaster Risk Mapping in Huinan County,“ *International Journal of Geo-Information*, т. 12, p. 395, 2023.
- [79] P. Grošelj, M. Zandebasiri и Š. Pezdevšek Malovrh, „Evaluation of the European experts on the application of the AHP method in sustainable forest management,“ *Environment Development and Sustainability*, 2023.
- [80] T. Saaty, „The analytic hierarchy process-what it is and how it is used,“ *Mathl Modelling*, Vol. 9, No. 3-5,, pp. 161-176, 1987.
- [81] T. L. Saaty, „Decision-making with the AHP: Why is the principal eigenvector necessary,“ *European Journal of Operational Research*, т. 145, бр. 1, p. 85–91, 2003.
- [82] N. Metropolis и S. Ulam, „The Monte Carlo Method,“ *Journal of the American Statistical Association (American Statistical Association)*, т. 44, бр. 247, p. 335–341, 1949.
- [83] M. Sauvageau i M. Kumral, „Cash flow at risk valuation of mining project using Monte Carlo simulations with stochastic processes calibrated on historical data,“ *The Engineering Economist, A Journal Devoted to the Problems of Capital Investment*, t. 63, br. 3, pp. 171-187, 2018.
- [84] M. Kopacz, D. Kryzia i K. Kryzia, „Assessment of sustainable development of hard coal mining industry in Poland with use of bootstrap sampling and copula-based Monte Carlo simulation,“ *Journal of Cleaner Production*, t. 159, br. 15, pp. 359-373, 2017.
- [85] L. Jianglan, W. Jiang i Z. Jian, „Mining Investment Risk Analysis Based on Monte Carlo Simulation,“ u *International Conference on Management of e-Commerce and e-Government*, 2011.
- [86] M. N. Negovanović, Doktorska disertacija: Model predviđanja potresa od miniranja na površinskim kopovima primenom simulacione metode Monte Karlo i fazi logike, Beograd: Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu, 2015.



- [87] W. Yu , C. Zijun i A. Siu-Kui , „Practical reliability analysis of slope stability by advanced Monte Carlo simulations in a spreadsheet,“ *Canadian Geotechnical Journal*, t. 48, p. 162–172, 2011.
- [88] H. L. Anderson, „Metropolis, Monte Carlo and the MANIAC,“ *Los Alamos Science*, pp. 96-108, 1986.
- [89] M. Đurić, Monte Karlo metode i primene u bioinformatički-Master rad, Beograd: Univerzitet u Beogradu, Matematički fakultet, 2017.
- [90] S. Raychaudhuri, „Introduction to Monte Carlo simulation,“ *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference*, pp. 91-100, 2008.
- [91] D. R. Stevanović, Doktorska disertacija "Optimizacija i planiranje površinskih kopova stohastičkim modelima", Beograd: Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu, 2015.
- [92] K. Rezaie, M. S. Amalnick, A. Gereie, B. Ostadi i M. Shakhshi-Niaei, „Using extended Monte Carlo simulation method for the improvement of risk management: Consideration of relationships between uncertainties,“ *Applied Mathematics and Computation*, t. 190, pp. 1492-1501, 2007.
- [93] Ö. ERIÇOK, Uncertainty assessment in reserve estimation of a naturally fractured reservoir, Ankara: Middle East Technical University Ankara, 2004.
- [94] P. Sheehy, „Minitab,“ Minitab Ltd., 5 March 2024. [Na mreži]. Available: <https://blog.minitab.com/en/the-4-simple-steps-for-creating-a-monte-carlo-simulation-with-engage-or-workspace>. [Poslednji pristup 23 April 2020].
- [95] Н. Костић, Докторска дисертација "Развој и примена метода хеуристичке оптимизације машинских конструкција", Крагујевац: Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу, 2017.
- [96] S. Katoch, S. S. Chauhan и V. Kumar, „A review on genetic algorithm: past, present, and future,“ *Multimedia Tools and Applications*, т. 80, бр. 1573-7721, p. 8091–8126, 2020.
- [97] J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, The University of Michigan Press, 1975.
- [98] P. Janićić и M. Nikolić, *Veštačka inteligencija*, Beograd: Matematički fakultet Univerziteta u Beogradu, 2022.
- [99] B. Borak, *Genetski algoritam za rešavanje lokacijskog problema snabdevača ograničenog kapaciteta u više nivoa*-Master rad, Beograd: Univerzitet u Beogradu-Matematički fakultet, 2009.



- [100] D. K. Duc Truong Pham, *Intelligent Optimisation Techniques-Genetic Algorithms, Tabu Search, Simulated Annealing and Neural Networks*, London: Springer-Verlag London, 2000.
- [101] M. V. Banković, D. R. Stevanović, M. D. Pešić, A. Đ. Tomašević и L. R. Kolonja, „Improving efficiency of thermal power plants through mine coal quality planning and control,“ *Thermal Science*, т. 22 1B, pp. 721-733, 2018.
- [102] M. R. Dušan Petković, „Primena genetskog algoritma za optimizaciju obradnih procesa na primeru struganja,“ *IMK-14 Istraživanje i razvoj Godina XVII, Broj (40) 3/2011*, pp. 11-16, 2011.
- [103] P.-C. Chang, W.-H. Huang и C.-J. Ting, „Dynamic diversity control in genetic algorithm for mining unsearched solution space in TSP problems,“ *Expert Systems with Applications*, т. 37, p. 1863–1878, 2010.
- [104] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, 1989.
- [105] A. Alipour, A. A. Khodaiari, A. Jafari и R. Tavakkoli-Moghaddam, „Production scheduling of open-pit mines using genetic algorithm: a case study,“ *International Journal of Management Science and Engineering Management*, т. 15, бр. 3, pp. 176-183, 2019.
- [106] Y. Li, E. Topal и D. J. Williams, „Optimisation of waste rock placement using mixed integer programming (MIP),“ *Mining Technology*, т. 123, pp. 220-229, 2014.
- [107] „Google Earth Pro,“ Google. [Na mreži].
- [108] A. M. d. Prijedor, „Galerija,“ Arcelor Mittal d.o.o. Prijedor, [Na mreži]. Available: <https://prijedor.arcelormittal.com/novosti/galerija/>. [Poslednji pristup 05 03 2024].
- [109] С. Дејан, Главни рударски пројекат експлоатације жељезне руде лежишта Омарска – локалитет Бувач, Београд: Рударско-геолошки факултет, 2023.
- [110] Matlab. [Na mreži]. Available: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>.
- [111] Excel. [Na mreži]. Available: <https://www.microsoft.com/en-us/microsoft-365/excel>.
- [112] G. Surpac. [Na mreži]. Available: <https://www.3ds.com/products-services/geovia/products/surpac/>.
- [113] M. V. Banković, Doktorska disertacija "Optimizacija utovarno-transportnih sistema u funkciji planiranja površinskog kopa", Beograd: UNIVERZITET U BEOGRADU RUDARSKO-GEOLOŠKI FAKULTET, 2018.



БИОГРАФИЈА

Александар Додеровић је рођен 3. октобра 1991. године у Требињу. Основну школу завршио је 2006. године после чега уписује средњу стручну школу смјер рударски техничар у Гацку. Након завршене средње школе 2010. године уписује Рударско – геолошки факултет, Универзитета у Београду, смјер Рударско инжењерство, модул Површинска експлоатација лежишта минералних сировина.

Основне академске студије је завршио 2014. године одбраном завршног рада на тему „Развој унутрашњег одлагаишта ПК Дрмно“. Просјечна оцјена основних студијама је 8.98. Исте године је уписао мастер академске студије на Рударско – геолошки факултет, Универзитета у Београду, на смјеру Рударско инжењерство, модул Површинска експлоатација лежишта минералних сировина. Одбраном мастер рада на тему „Верификација комбинованог транспортног система на ПК Бувач“ завршио је мастер студије 2015. године са просјечном оцјеном 10.0. За успјех на мастер студијама добио је награду за најбољег студента у генерацији 2014/2015.

Од 2015. године запослен у Институту за рударство и металургију Бор у одјељењу Угаљ инжењеринг. У том периоду учествовао је у изради више студијских рјешења и рударских пројеката као сарадник и био ангажован на примјени савремених софтверских пакета из области рударства и геологије.

У школској 2015/2016 кандидат је уписао докторске студије на Рударско – геолошком факултет, Универзитета у Београду. Досад је положио све испите са просјечном оцјеном 10.0.

Александар Додеровић у звању истраживача приправника од 2016. године и звању истраживача сарадника од 2020. године учествује у реализацији научно истраживачког пројекта *Развој напредних материјала и технологија за мултифункционалну примену заснованих на еколошком знању (Пројекат ТР 34005)* који се финансира од стране Министарство за науку и технолошки развој Републике Србије, у оквиру програма истраживања у области технолошког развоја.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора: Александар Додеровић

Број индекса: P702/15

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Развој хибридног модела за оптимизацију завршне контуре одлагалишта у површинској експлоатацији лежишта минералних сировина

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

Потпис аутора

У Београду, _____

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора: Александар Додеровић

Број индекса: P702/15

Студијски програм: Рударско инжењерство

Наслов рада: **Развој хибридног модела за оптимизацију завршне контуре одлагалишта у површинској експлоатацији лежишта минералних сировина**

Ментор др Дејан Стевановић, ванредни професор,

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

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

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

Потпис аутора

У Београду, _____

Изјава о коришћењу

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

Развој хибридног модела за оптимизацију завршне контуре одлагалишта у површинској експлоатацији лежишта минералних сировина

која је моје ауторско дело.

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

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

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
- ③ Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

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

Потпис аутора

У Београду, _____

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

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

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

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

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

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