

UNIVERZITET U BEOGRADU
RUDARSKO-GEOLOŠKI FAKULTET

Mirjana V. Banković

**OPTIMIZACIJA UTOVARNO-
TRANSPORTNIH SISTEMA U FUNKCIJI
PLANIRANJA POVRŠINSKOG KOPA**

doktorska disertacija

Beograd, 2018

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MINING AND GEOLOGY

Mirjana V. Banković

**OPTIMIZATION OF EXCAVATION-
TRANSPORTATION SYSTEMS IN THE
SURFACE MINE PLANNING FUNCTION**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2018

Mentor:

Prof. dr Božo Kolonja, redovni profesor,
Uža naučna oblast: Projektovanje i planiranje površinskih kopova
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

Članovi komisije:

Dr Dinko Knežević, redovni profesor,
Uža naučna oblast: Zaštita na radu i zaštita životne sredine
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

Dr Ranka Stanković, vanredni profesor,
Uža naučna oblast: Matematika i informatika
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

Dr Dejan Stevanović, docent,
Uža naučna oblast: Projektovanje i planiranje površinskih kopova
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

Dr Živko Sekulić, naučni savetnik,
Uža naučna oblast: Priprema mineralnih sirovina
Institut za Tehnologiju Nuklearnih i drugih Mineralnih Sirovina

Datum odbrane: _____

OPTIMIZACIJA UTOVARNO-TRANSPORTNIH SISTEMA U FUNKCIJI PLANIRANJA POVRŠINSKOG KOPA

SAŽETAK

Profitabilna eksploatacija sve složenijih ležišta je težak zadatak koji zavisi od temeljnog procesa analize, planiranja i projektovanja rudnika. Izvodljiv strateški plan mora da zadovoljava društvena, regulatorna, tehnološka, geometrijska i ekonomska ograničenja. Kako bi se postigao osnovni cilj, odnosno profitabilnost i održivost rudarskog projekta na duži period, neophodno je unapređenje matematičkih modela i informatičke podrške procesima planiranja i optimizacije koji će omogućiti efikasnu realizaciju ovih ciljeva.

Optimizacija planiranja rudnika podrazumeva složenu analizu i naučni pristup, tako do skora korišćene klasične metode ne daju globalno optimalno rešenje naročito u složenim tehnološkim procesima kakvi su sistemi eksploatacije na površinskim kopovima. Integralni pristup optimizaciji planiranja i analizi sistema eksploatacije je veoma važan pristup evaluaciji rudarskih projekata, i u značajnoj meri utiče na ekonomsku efikasnost rudarskih preduzeća na duži rok.

U disertaciji je razvijen integralni pristup i model optimizacije metoda planiranja, sa posebnim akcentom na optimizaciju otkopno-transportnih sistema eksploatacije imajući u vidu da ovi sistemi na površinskim kopovima generišu preko 50% ukupnih troškova eksploatacije.

Rezultati istraživanja kroz studiju slučaja su pokazali da se razvijena metodologija i integralni model uz informatičku podršku mogu efikasno primeniti u cilju postizanja maksimalnih ekonomskih efekata, prevenstveno pri površinskoj eksploataciji niskokvalitetnih ležišta uglja.

Ključne reči: tehnološki model, integralni model, planiranje, optimizacija, utovarno-transportni sistem, neto sadašnja vrednost projekta.

Naučna oblast:

Rudarsko inženjerstvo

Uža naučna oblast:

Projektovanje i planiranje površinskih kopova

UDC:

622.015:519.8(043.3)

622.063.8:519.8(043.3)

OPTIMIZATION OF EXCAVATION-TRANSPORTATION SYSTEMS IN THE SURFACE MINE PLANNING FUNCTION

ABSTRACT

Profitable mining of increasingly complex deposits is a difficult task that depends on the efficient analysis, planning and design of the open pit mine. A viable strategic mine plan must satisfy social, regulatory, technological, geometric and economic constraints. In order to achieve the basic goal, that is, the profitability and sustainability of the mining project in the long run, it is necessary to improve the mathematical models and IT support to the processes of planning and optimization that will enable efficient realization of these goals.

Optimization of mine planning process implies a complex analysis and a scientific approach, so the classical methods used do not give a global optimal solution especially in complex mining processes such as exploitation systems on surface mines. An integral approach to optimizing planning and analyzing the exploitation system is a very important approach in the evaluation of mining projects, and significantly affects the economic efficiency of mining companies in the long run.

The dissertation developed an integral approach and optimization model of planning process with special emphasis on the optimization of the mining excavation and transport systems, bearing in mind that these systems on the surface mines generate over 50% of the total cost of exploitation.

The results of the research through the case study showed that the developed methodology and integral model with software support can be efficiently applied in order to achieve maximum economic effects, especially in exploitation of low quality coal deposits.

Key words: technological model, integral model, planning, optimization, loading and transport system, net present value of the project.

Scientific field:

Mining Engineering

Scientific subfield:

Open Pit Planning and Design

UDC:

622.015:519.8(043.3)

622.063.8:519.8(043.3)

„Život nam vraća samo ono što mi drugima dajemo.“

Ivo Andrić

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Značaj i cilj istraživanja.....	2
1.2. Metodologija istraživanja.....	4
1.3. Struktura disertacije sa kratkim pregledom poglavlja	4
2. PREGLED LITERATURE	7
2.1. Optimizacija i planiranje na površinskim kopovima	9
2.2. Utovarno-transportni sistemi.....	12
2.3. Osvrt na stepen razvoja integralnog pristupa	16
3. UTOVARNO-TRANSPORTNI SISTEMI NA POVRŠINSKIM KOPOVIMA	19
3.1. Podela utovarno-transportnih sistema.....	22
3.2. Diskontinualni utovarno-transportni sistemi	23
3.2.1. Osnovne preporuke za definisanje diskontinualnih utovarno-transportnih sistema.....	24
3.2.2. Sistem utovarna mašina- kamion.....	32
3.2.3. Definisanje veličine opreme u sistemu utovarna mašina – kamion.....	42
3.3. Kontinualni utovarno-transportni sistemi	44
3.3.1. Definisanje i dimenzionisanje sistema	49
3.3.2. Kontinualna otkopno-utovarna oprema.....	52
3.3.2.1. Rotorni bager.....	53
3.3.2.2. Bager vedričar	66
3.3.2.3. Kombajni	72
3.3.3. Transportna oprema kontinualnog dejstva.....	75
4. SISTEMSKA ANALIZA I MODELIRANJE OPTIMIZACIJE SISTEMA TRANSPORTA U FUNKCIJI PLANIRANJA POVRŠINSKOG KOPA.....	81
4.1. Značaj strateškog planiranja u rudarstvu	81
4.2. Sistemska analiza i modeliranje planiranja površinskog kopa.....	85
4.2.1. Strateško - dugoročno rudarsko planiranje	89
4.2.2. Srednjeročno planiranje	98
4.2.3. Kratkoročno i operativno rudarsko planiranje.....	101

4.3. Razvoj modela za integralnu optimizaciju planiranja površinskih kopova	104
4.3.1. Model geološke baze i ležišta.....	106
4.3.2. Model kratkoročnog planiranja	108
4.3.3. Model operativnog planiranja	109
4.3.4. Model tehnološkog rada bagera u bloku.....	110
4.3.5. Model simulacija transportnog sistema	111
4.3.6. Model planiranja deponije uglja	113
4.3.7. Model simulacija utovara vozova.....	114
4.3.8. Model za integralnu optimizaciju planiranja sistema.....	114
5. RAZVOJ INFORMATIČKE PODRŠKE INTEGRALNOM PLANIRANJU I OPTIMIZACIJI SISTEMA EKSPLOATACIJE UGLJA.....	117
5.1. Model baze podataka	118
5.1.1. Proizvodni sistemi.....	118
5.1.2. Konstruktivni i tehnološki parametri opreme	120
5.1.2.1. Tehnološki model bagera	120
5.1.2.2. Proračun kapaciteta bagera u bloku.....	122
5.1.2.3. Zastoji opreme	124
5.1.2.4. Godišnji plan	124
5.1.2.5. Mesečni plan	125
5.1.2.6. Nedeljni/dnevni plan	126
5.2. Informatička implementacija razvijenog modela	128
5.2.1. Kreiranje geološkog i etažnog modela.....	128
5.2.2. Optimizacija tehnološkog bloka	132
5.2.2.1. Matematički model za kreiranje tehnoloških blokova	132
5.2.2.2. Softversko rešenje	136
5.2.3. Optimizacija planiranja	138
5.2.4. Optimizacija kapaciteta bagera.....	140
5.2.5. Optimizacija plana deponije	143
5.2.5.1. Matematički model deponije	144
5.2.5.2. Softversko rešenje	147
5.2.5.3. Simulacija plana deponije	148

5.2.6. Model za izbor transportnih ruta.....	149
5.3. Integralni model optimizacije plana eksploatacije.....	154
5.3.1. Matematički model.....	154
5.3.2. Softversko rešenje	156
6. PRIMENA RAZVIJENOG MODELA – STUDIJA SLUČAJA	160
6.1. Opis postupka izvođenja analize	160
6.2. Opis sistema eksploatacije na kopu Tamnava Zapadno polje.....	162
6.2.1. Opšti prikaz modela ležišta	163
6.2.2. Izrada tehnološkog blok modela	165
6.2.3. Transportni model i model deponije.....	169
6.2.4. Definisanje optimalnih operativnih planova proizvodnje	170
6.2.5. Realizacija operativnog plana proizvodnje	178
7. ZAKLJUČAK I PREPORUKE ZA DALJI RAD	187
LITERATURA	192
BIOGRAFIJA	
Prilog 1. Izjava o autorstvu	
Prilog 2. Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada	
Prilog 3. Izjava o korišćenju	

SPISAK SLIKA

Slika 1.1 Struktura i tok izrade disertacije	6
Slika 2.1 Prosečan sadržaj ležišta bakra u periodu od 1770 do 2007 godine (Cross, 2005)	8
Slika 2.2 Upporedni prikaz vremena optimizacije - Xiaoyu (2017)	11
Slika 3.1 Struktura ukupnih troškova na površinskim kopovima (Buhl, 2002)	21
Slika 3.2 Podela sistema na površinskim kopovima	22
Slika 3.3 Klasifikacija i osnovni tehnološki elementi utovarno - transportnih sistema	23
Slika 3.4 Odabir utovarno-transportne opreme na osnovu dužine transporta	28
Slika 3.5 Uticajni faktori i posledice odabira veličine opreme	44
Slika 3.6 Podsystemi površinske eksploatacije	46
Slika 3.7 Šematski prikaz kontinualnog sistema	47
Slika 3.8 Rad rotornog bagera u kombinaciji sa samohodnim transporterom	48
Slika 3.9 Zavisnost razblaženja od visine etaže	51
Slika 3.10 Algoritam za izbor kontinualnih sistema	51
Slika 3.11 Osnovne konstruktivne celine rotornog bagera (Jovančić, 2004)	54
Slika 3.12 Tipovi bagera	57
Slika 3.13 Različiti načini rada rotornog bagera	58
Slika 3.14 Vertikalni i horizontalni rez	59
Slika 3.15 Određivanje širine bloka rotornog bagera	62
Slika 3.16 Kontinualni sistem Baracuda (Thyssenkrupp, 2017)	66
Slika 3.17 Bager vedričar (izvor: www.rbkolubara.rs)	67
Slika 3.18 Konstrukcija bagera vedričara	68
Slika 3.19 Selektivno otkopavanje vedričarima	70
Slika 3.20 Selektivni rad kombajna	73
Slika 3.21 Wirtgen kombajn (izvor: www.wirtgen.de)	74
Slika 3.22 Konstrukcija WSM (izvor: www.slideshare.net)	74
Slika 3.23 Kombinovani sistem (izvor: www.wirtgen.de)	75
Slika 3.24 Rast cene transporta sa povećanjem rastojanja (Thompson, 2005)	77
Slika 3.25 Konstrukcija transportera sa trakom, (CKIT, 2017)	78

Slika 3.26 Površina poprečnog preseka materijala na traci	79
Slika 4.1 Životni ciklus rudarskog projekta	82
Slika 4.2 Integralni model optimizacije planiranja.....	88
Slika 4.3 Model strateškog-dugoročnog planiranja površinskog kopa.....	90
Slika 4.4 Dijagram aktivnosti analize površinskog kopa	91
Slika 4.5 Dijagram aktivnosti definisanja faznog razvoja kopa.....	92
Slika 4.6 Dijagram aktivnosti izbora faza razvoja kopa.....	92
Slika 4.7 Dijagram aktivnosti određivanja kapaciteta kopa	93
Slika 4.8 Dijagram aktivnosti određivanja graničnog sadržaja.....	94
Slika 4.9 Dijagram aktivnosti definisanja dinamike i sekvenci eksploatacije.....	95
Slika 4.10 Dijagram aktivnosti definisanja koncepta rekultivacije	96
Slika 4.11 Dijagram aktivnosti u okviru srednjeročnog planiranja.....	100
Slika 4.12 Model kratkoročnog i operativnog planiranja	102
Slika 4.13 Struktura planskih aktivnosti u integralnom planskom modelu	103
Slika 4.14 Integralni pristup planiranja površinskog kopa uglja	105
Slika 4.15 Upravljanje geološkim podacima i modeliranje u Minex-u	106
Slika 4.16 UC Geološko istraživanje i ažuriranje baze	107
Slika 4.17 Modeliranje u Minex-u.....	108
Slika 4.18 UC Kratkoročno planiranje	109
Slika 4.19 UC Operativno planiranje.....	110
Slika 4.20 UC Tehnološko modeliranje rada bagera u bloku	111
Slika 4.21 UC Simulacija transportnog modela	112
Slika 4.22 UC Modeliranje deponije	113
Slika 4.23 UC Simulacija utovara vozova	114
Slika 5.1 Integralni pristup optimizacije procesa planiranja	118
Slika 5.2 Proizvodni sistemi, pozicije opreme i dokumentacija.....	119
Slika 5.3 Konstruktivni i tehnološki parametri.....	120
Slika 5.4 Definisane tehnološkog modela.....	122
Slika 5.5 Proračun kapaciteta bagera u bloku	123
Slika 5.6 Zastoji opreme u sistemu.....	124
Slika 5.7 Godišnji plan	125
Slika 5.8 Mesečni plan	126

Slika 5.9 Nedeljni plan.....	127
Slika 5.10 Minex prikaz dela modela ležišta.....	129
Slika 5.11 Interfejs za upravljanje geološkim modelom	130
Slika 5.12 Interfejs za upravljanje etažnim modelom	130
Slika 5.13 Prikaz geološkog modela i izbor blokova za prikaz u profilu.....	131
Slika 5.14 Prikaz blokova iz modela sa relevantnim parametrima	132
Slika 5.15 Šematski prikaz ponderisanja u okviru tehnološkog bloka	133
Slika 5.16 Genetski algoritma za optimizaciju tehnološkog bloka	138
Slika 5.17 Kreiranje tehnološkog bloka sa više podela na podetaža	139
Slika 5.18 Tabelarni prikaz parametara tehnoloških blokova	140
Slika 5.19 Šema podele i otkopavanja podetaža tehnološkog bloka.....	141
Slika 5.20 Izbor konkretnog tehnološkog bloka za dimenzionisanje.....	141
Slika 5.21 Relevantni tehnološki parametri bagera.....	142
Slika 5.22 Planiranje kapaciteta bagera	143
Slika 5.23 Promena parametra kvaliteta posle homogenizacije (a) ponašanje funkcija ulaza y i izlaza x u vremenu i standardna devijacija; (b) ACF ulaza i izlaza – Gerstel (1979)	145
Slika 5.24 Šematski prikaz modela deponovanja i uzimanja na strata deponiji.....	146
Slika 5.25 Strata model pražnjenja deponije.....	148
Slika 5.26 Pogled odozgo i poprečni presek kroz deponiju.....	149
Slika 5.27 Primer Tamnava Zapadno polje-moguće transportne rute od izvora do destinacije uglja.....	150
Slika 5.28 Šematski prikaz karakterističnih transportnih ruta iz grupe 1.....	152
Slika 5.29 Šematski prikaz karakterističnih transportnih ruta iz grupe 2.....	153
Slika 5.30 Ograničenja u modelu optimizacije plana proizvodnje.....	157
Slika 5.31 Planski izveštaj isporučenog uglja.....	159
Slika 6.1 Metodologija izvođenja analize	161
Slika 6.2 Šematski prikaz sistema eksploatacije na kopu Tamnava Zapadno polje.....	163
Slika 6.3 Interpretacija gridova u Minex eksperimentalnog dela ležišta	164
Slika 6.4 Interpretacija parametara kvaliteta uglja u blok modelu	165
Slika 6.5 Opšti podaci o modelima.....	166

Slika 6.6 Prikaz tehnoloških blokova po etažama i pripadajućim bagerima.....	166
Slika 6.7 Algoritam za definisanje selektivnosti rada bagera	167
Slika 6.8 Definisanje podetaža sa ponderisanjem proslojaka i proračunom kapaciteta.....	169
Slika 6.9 Panel za definisanje godišnjeg plana.....	171
Slika 6.10 Godišnji plan za bagere	171
Slika 6.11 Panel za definisanje mesečnog plana	172
Slika 6.12 Ulazni parametri za generisanje nedeljnog plana	174
Slika 6.13 Nedeljni plan.....	174
Slika 6.14 Dnevni operativni plan za sve bagere.....	175
Slika 6.15 Dijagrami za bagere - kapacitet.....	176
Slika 6.16 Plan rada otkopno-transportnog sistema	177
Slika 6.17 Transportni modul sa uključenom deponijom	177
Slika 6.18 Kvalitet isporučenog uglja u tromesečnom periodu	179
Slika 6.19 Histogram kvaliteta uglja po isporučenim vozovima.....	181
Slika 6.20 Planirane vrednosti DTE po otkopnim pozicijama	182
Slika 6.21 Predviđene vrednosti kvaliteta uglja za posmatrani tromesečni period	183
Slika 6.22 Vrednosti kvaliteta uglja po gomilama na deponiji	185

SPISAK TABELA

Tabela 3.1 Pregled broja aktivnih jedinica rudarske opreme.....	30
Tabela 3.2 Pregled aktivnih jedinica i trend promene u dvogodišnjem periodu	33
Tabela 3.3 Komparacija karakteristika užetnog i hidrauličnog bagera i utovarača	41
Tabela 3.4 Upotreba kontinualnih utovarno-transportnih sistema	46
Tabela 3.5 Istorijski pregled razvoja rotornih bagera (Pavlović, Ignjatović, 2012)	55
Tabela 3.6 Karakteristike bagera po klasama.....	56
Tabela 3.7 Rezovi pri otkopavanju.....	60
Tabela 3.8 Osnovni tehnološki parametri vedričara	71
Tabela 6.1 Parametri kvaliteta ugljenih slojeva u okviru opitnog blok modela	165
Tabela 6.2 Smanjenje varijabilnosti kvaliteta uglja.....	185

1. UVOD

Ubrzano unapređenje i korišćenje rudarskih tehnologija u drugoj polovini 20 veka podstaklo je intezivan rast površinske eksploatacije, tako da se savremeno rudarstvo suočava sa stalnim pogoršanjem uslova poslovanja. Složenost eksploatacije proističe iz činjenica da su mineralna ležišta sve veće dubine, složenije strukture, nižeg mineralnog sadržaja ili neodgovarajućih svojstava, a vrlo često na lokacijama sa veoma nepovoljnom infrastrukturom ili u državama i regionima sa izraženom političkom nestabilnošću. Profitabilna eksploatacija ovakvih ležišta je složen i težak zadatak koji prvenstveno zavisi od sveobuhvatnog procesa analize, planiranja i projektovanja rudnika.

Cilj svakog rudarskog projekta je da napravi izvodljiv strateški plan koji daje maksimalnu neto sadašnju vrednost projekta. Izvodljiv rudarski plan znači da plan zadovoljava sva ograničenja u procesu realizacije. Ovo podrazumeva društvena i regulatorna ograničenja (u zavisnosti od nadležnosti), tehnološka ograničenja (oprema i procesi), geometrijska ograničenja (prostorna definicija ležišta i minimalne dimenzije radnih zona) i ekonomska ograničenja u formi dostupnog kapitala i tržišta.

Uspešna realizacija rudarskog projekta u uslovima ograničenih resursa je nemoguća bez analize svih tehničko-ekonomskih parametara i održivih scenarija poslovanja na duži rok. U tom smislu je neophodan stalan razvoj efikasnih matematičkih modela sposobnih da omoguće uspešan razvoj rudarskih projekata u složenim uslovima savremenog rudarstva. Postizanje ovog cilja kroz optimizaciju procesa planiranja predmet je značajnih istraživanja i razvoja u poslednjih trideset godina, a novi trend razvoja istraživanja se nastavlja u praksi.

Optimizacioni algoritmi, procedure i softver, koji su razvijani poslednjih četrdeset i više godina, omogućili su inženjerima rudarske struke da izrađuju kvalitetne i u realnim uslovima primenljive rudarske projekte, kojima se obezbeđuje postizanje najboljih ekonomskih efekata. Uprkos ovim prednostima dostupnih alata uloga čoveka kao planera je i dalje neprikosnovena pri planiranju i evaluaciji površinskih

kopova. Posebno je važno da planer (rudarski inženjer) ima sveobuhvatno razumevanje procesa rudarskog planiranja i projektovanja jer su različite planske aktivnosti međusobno veoma povezane. Odluka u bilo kojoj fazi aktivnosti nema uticaj samo na budući rad, nego može da zahteva revidiranje ranijih rešenja.

Dugoročni plan površinskog kopa je jedan od veoma važnih investicionih, tehničkih i ekonomskih elemenata koji utiču na ekonomsku efikasnost i održivost projekta na duži rok poštujući propisane kriterijume zaštite životne sredine i socijalne sigurnosti. Prema tome, optimizacija planiranja rudnika podrazumeva složenu analizu i naučni pristup, koji je tesno povezan sa ekonomskim principima poslovanja, primenom matematičkih modela i znanjem savremenih pristupa i softverskih alata.

1.1. Značaj i cilj istraživanja

Pored značajnog broja optimizacionih modela, jedan od glavnih izazova vezanih za optimizaciju rudarskog proizvodnog kompleksa je povezan sa eksploatacijom i iskorišćenjem siromašnih ležišta, odnosno sa procesom homogenizacije, nelinearnim geometalurškim interakcijama u procesu prerade kod metala (pošto se ruda transformiše iz rovnog materijala u rafinisane proizvode) ili interakcijama u procesima pripreme i sagorevanja uglja u termoblokovima.

Klasične metode optimizacije, koje su donedavno korišćene, ne daju globalno optimalno rešenje u većini slučajeva, a pogotovu u složenim tehnološkim procesima kakvi su sistemi eksploatacije na površinskim kopovima. Koncept optimizacije utovarno-transportnih sistema, u okviru celog sistema eksploatacije, je dosta kompleksan postupak imajući u vidu činjenicu da se radi o različitim strukturama podsistema koji kontinualno utiču jedan na drugi tokom dugoročnog planiranja razvoja površinskog kopa. Tradicionalno, ove komponente sistema su optimizovane nezavisno, što dovodi do suboptimalnih rešenja za rudarski kompleks u celini (Gershon, 1983).

Integralni pristup optimizaciji planiranja i analizi sistema eksploatacije jedan je od veoma važnih pristupa evaluaciji rudarskih projekata, i u značajnoj meri utiče na ekonomsku efikasnost rudarskih preduzeća na duži rok. Holistički pristup je takođe osnova za tehnoekonomsku evaluaciju ležišta, izradu studije izvodljivosti, planiranje i projektovanje kopa, i na kraju osnova za donošenje odluka o investicijama. Pri tome, optimizacija planiranja sistema eksploatacije jedan je od osnovnih i ključnih faktora upravljanja i donošenja poslovnih odluka u procesu definisanja strategije dugoročnog razvoja površinskih kopova.

Polazna naučna hipoteza koja je postavljena u ovoj disertaciji je da se integralni pristup optimizacije planiranja i systemske analize procesa otkopavanja i transporta može integrisati u strateške ciljeve jednog rudarskog projekta. Konkretno to znači da se primenom holističkog modela optimizacije rudarskih planova značajno mogu poboljšati ekonomski efekti, odnosno maksimizirati neto sadašnja vrednost poslovnog sistema.

Cilj disertacije "Optimizacija utovarno-transportnih sistema u funkciji planiranja površinskog kopa" je razvoj integralnog pristupa optimizacije metoda planiranja projekata u površinskoj eksploataciji, sa posebnim akcentom na optimizaciju otkopno-transportnih sistema imajući u vidu da ovi procesi generišu oko 50% ukupnih troškova proizvodnje. Kao rezultat istraživanja treba da bude predlog novog sistema za planiranje kako bi se podržala ekonomska optimizacija procesa i omogućila površinska eksploatacija niskokvalitetnih ležišta uglja u okviru zahtevanih ograničenja od strane termoelektrana i ekoloških propisa. Shodno tome zadaci istraživanja su da se:

- analiziraju konvencionalni pristupi planiranja eksploatacije na površinskim kopovima uglja, i na bazi zaključaka naprave kriterijumi i preporuke za razvoj novog integralnog pristupa optimizaciji planiranja u cilju ispunjenja strateških ciljeva na duži rok;
- indentifikuju ključni parametri i faktori koji imaju najznačajni efekat na proces planiranja površinskih kopova uglja i da se identifikuje njihov uzajamni odnos u okviru integralnog modela; i

- razvije formalni sistem modela i planiranih aktivnosti za holistički pristup.

Kroz ovako definisani cilj i zadatke teza daje opis savremenog pristupa planiranja tehnoloških procesa u okviru sistema eksploatacije na površinskim kopovima uglja, kojeg trenutno nema u literaturi, i koji indentifikuje i dokumentuje pristupe planiranju gde tradicionalno korišćeni algoritmi i teorije nisu direktno primenljivi. Ovo treba da omogući značajan doprinos rešavanju problema površinske eksploatacije niskokvalitetnih ležišta uglja.

1.2. Metodologija istraživanja

Ovo istraživanje formalno modelira integralni pristup optimizacije planiranja rudarskih projekata i kreira strateški održive planove eksploatacije na površinskim kopovima uglja, prateći nekonvencionalne metodologije planiranja koje se koriste u radovima vezano za površinske kopove uglja. Modeli su kreirani primenom jedinstvenog jezika za modeliranje (UML eng. Unified Modeling Language).

UML (Rumbaugh et al., 2004) je široko primenjen grafički jezik modeliranja koji omogućava standardizovanu osnovu za kreiranje i slikovito prikazivanje složenih sistema, kao što su softveri koji se zasnivaju na objektima. Korišćenjem UML-a omogućava se grafički prikaz integralnog sistema koristeći standardizovano obeležavanje.

Procesi su analizirani i modelirani na osnovu pregleda literature i iskustva autora i sugestija iskusnih istraživača.

1.3. Struktura disertacije sa kratkim pregledom poglavlja

Organizacija izrade disertacije je prilagođena postavljenim ciljevima i primenjenoj metodologiji, te shodno tome sastoji se iz 7 poglavlja.

Prvo poglavlje predstavlja uvod u problematiku sa kratkim osvrtom na osnovne ciljeve, polaznu hipotezu i metodologiju istraživanja koje su korišćene u disertaciji.

Drugo poglavlje daje kratak pregled aktuelnih istraživanja i korišćene literature na polju konvencionalnih metoda optimizacije utovarno-transportnih sistema i metoda planiranja i projektovanja površinskih kopova.

Treće poglavlje daje opis problematike vezane za osnovne tehnološke karakteristike utovarno-transportnih sistema, definisanje kriterijuma za dimenzionisanje opreme u kontinualnim i diskontinualnim transportnim sistemima. Poglavlje ima za cilj da definiše i pruži uvid u sve probleme oko optimizacije ovih sistema u funkciji faze planiranja.

Četvrto poglavlje daje pregled razvijenih matematičkih modela, koji se koriste pri integralnoj optimizaciji planiranja sistema eksploatacije, a sve u funkciji realizacije strateških ciljeva projekta. Ovim poglavljem obrađen je sistemski pristup modeliranja procesa, i definisani modeli za dugoročno, srednjeročno, kratkoročno i operativno planiranje sa opisom procedura za postizanje strateških ciljeva poslovanja. I na kraju je prezentiran integralni model za optimizaciju planiranja sistema eksploatacije.

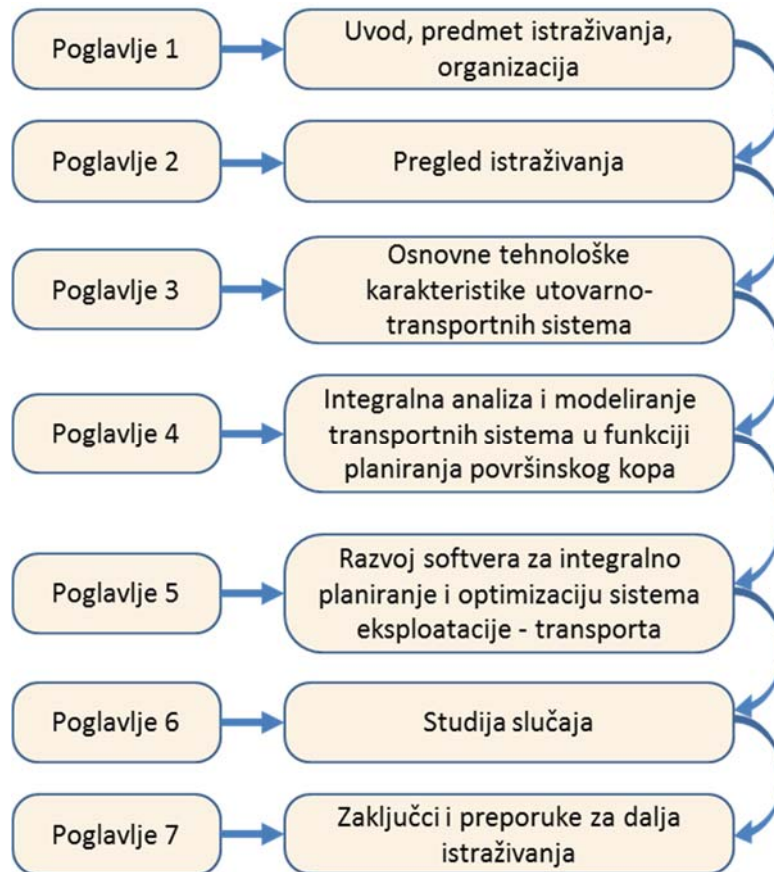
Peto poglavlje daje detaljan opis razvoja informatičke podrške integralnom planiranju i optimizaciji sistema eksploatacije uglja, sa posebnim osvrtom na optimizaciju utovarno-transportnog sistema. Primarni cilj softverskog rešenja za optimizaciju operativnog planiranja kontinualnih sistema eksploatacije lignita na površinskim kopovima je da pomogne rudarskom inženjeru - planeru da pravovremeno izvede efikasan operativni plan tako da se dugoročno realizuju strateški ciljevi projekta.

Šesto poglavlje daje studiju slučaja u kojoj je analiziran problem optimizacije sistema eksploatacije na površinskom kopu Tamnava Zapadno polje. Poglavlje sadrži opis problema koji se tretira integralnim modelom, rezultate analize i zaključke u vezi sa efektima primene predloženog integralnog pristupa i korišćenja razvijenog softvera za planiranje.

Sedmo poglavlje daje stručne zaključke i naglašava naučni i praktični doprinos primenjene metodologije i razvijenih modela za integralnu optimizaciju planiranja

sistema eksploatacije na površinskim kopovima uglja. Takođe u ovom poglavlju su date i preporuke za budući naučno-istraživački rad, u pravcu daljeg unapređenja ovog pristupa i modela.

Na slici 1.1 je dat prikaz opisane strukture ove disertacije.



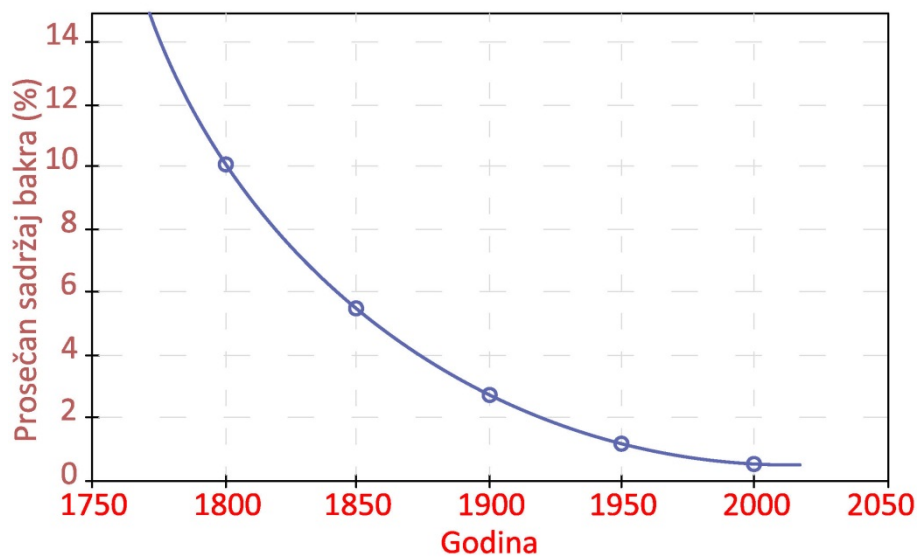
Slika 1.1 Struktura i tok izrade disertacije

2. PREGLED LITERATURE

Rudarstvo predstavlja esencijalnu delatnost, čiji efekti u značajnoj meri prevazilaze čisto ekonomski uticaj. Kroz veći deo istorije razvoj rudarstva u značajnoj meri korespondira sa razvojem ljudskog društva. Ovakva situacija svedoči o dubokom uticaju rudarstva na tehnološki, socijalni, ekonomski pa i kulturni razvoj društva. Navedeni trend iz prošlosti, karakterističan je i za savremene okvire, o čemu svedoče brojni radovi i izveštaji specijalizovanih institucija (De Ferranti et al., 2002, Wright, Czelusta, 2003, Dorin et al., 2014, Weber-Fahr, 2002).

I pored generalnog konsenzusa o značaju rudarstva, kao i njegovog uticaja na gotovo sve tipove industrije i konsekvantno društva, izvesnost ostvarenja pozitivnih poslovnih rezultata u savremenom rudarstvu značajno je otežana (Martinez, 2003, Ravenscroft, 1992). Ovo potvrđuje i Davidson (2015) i ocenjuje da je sadašnjost i budućnost rudarstva suočena sa značajnim izazovima i neizvesnostima. Ovakav trend generisan je velikim brojem složenih faktora. Činjenica da mnogi faktori nisu međusobno povezani i da se prema svojoj prirodi značajno razlikuju, svojevrsan je kuriozitet.

Stevanović (2015), kao vodeći faktor za pogoršanje uslova u eksploataciji korisnih mineralnih sirovina prepoznaje pogoršanje kvaliteta ležišta. Autor navodi da su niži sadržaji korisne komponente, veća dubina, složena struktura, prisustvo štetnih komponenti, nepovoljna lokacija ležišta, česte karakteristike savremenih ležišta. I pored činjenice da se autor u radu bavio problematikom eksploatacije uglja, generalni zaključci ostaju primenljivi i na ležišta ostalih tipova. O ovome najbolje svedoči dijagram na slici 2.1 koji pokazuje prosečne sadržaje u ležišta bakra za period od 1770 do 2007. godine (Cross, 2005). Ovakva realnost posledica je ograničenih geoloških resursa i duge rudarske istorije i razumljivog principa da se prvo eksploatišu kvalitetnija ležišta. Moon (2006) napominje da se današnja ležišta karakterišu niskim sadržajem, zbog čega se otkopavaju velike zapremine materijala (nizak granični sadržaj) što sve ukupno generiše negativne ekonomske uslove kao i veliki štetan uticaj na okolinu.



Slika 2.1 Prosečan sadržaj ležišta bakra u periodu od 1770 do 2007 godine (Cross, 2005)

Na poslovne rezultate savremenog rudarstva, pored geoloških značajan uticaj imaju i faktori finansijske prirode jer predstavljaju izvore neizvesnosi po pitanju cena i kursnih razlika (Sabour, Wood, 2009, Sabour, Dimitrakopoulos, 2011, Kolonja et al., 2015).

Zadnjih dvadesetak godina, posebno kritičan i negativan stav prema rudarstvu, inspirisan je rastućom ekološkom svešću. Salomons (1995) navodi da i pored toga što je rudarska aktivnost skoncentrisana na maloj površini, njegov uticaj na ekologiju, često prevazilazi lokalne okvire. Ovakvi stavovi trenutno dobijaju na momentumu, čineći rudarstvo neatraktivnom delatnošću kako za investitore tako i za pripadnike lokalne zajednice. Potencijal rudarstva da naruši ekološke resurse i zdravlje populacije prepoznat je od strane mnogih autora (Lashof et al., 2007, Bell, Donnelly, 2006, Bian et al., 2009).

Stevanović (2015) podvlači značaj razvoja matematičkog aparata tj. matematičkih modela, kojima bi se obuhvatio i prevazišao set postojećih problema, karakterističan za opisano složeno okruženje.

2.1. Optimizacija i planiranje na površinskim kopovima

Rastući negativan uticaj na poslovno okruženje u kome se nalazi rudarstvo, delom je amortizovan permanentnim razvojem korišćene tehnologije i tehnoloških mogućnosti. Dodatni motiv za ovakav razvoj vezan je i za prirodnu potrebu unapređenja poslovanja. Pored tehnološkog razvoja, savremeno, složeno, poslovno okruženje, rezultovalo je dinamičnom produkcijom naučnih radova i matematičkih algoritama koji se odnose na optimizaciju i planiranje razvoja rudarskih radova na površinskim kopovima.

Ova dva pitanja međusobno su povezana. Whittle (1989) napominje da su optimalne granice kopa neophodne za plan razvoja rudarskih radova, dok se u isto vreme različitim scenarijima razvoja, menja potencijalna vrednost kopa, koja je i osnova optimalnosti granica konture. Mnogi autori (Osanloo et al., 2008, Darwen, 2001, Ramazan, 2001) napominju da se složenost oba problema generiše velikim brojem blokova u geološkim modelima, što posledično rezultuje ogromnim brojem međusobnih kombinacija odnosno potencijalnih rešenja.

Kada je optimizacija granica površinskog kopa u pitanju, posebno značajan uticaj na rudarsku praksu imali su razvoji algoritama za Metodu konusa i Lerch-Grossmann 3D algoritam.

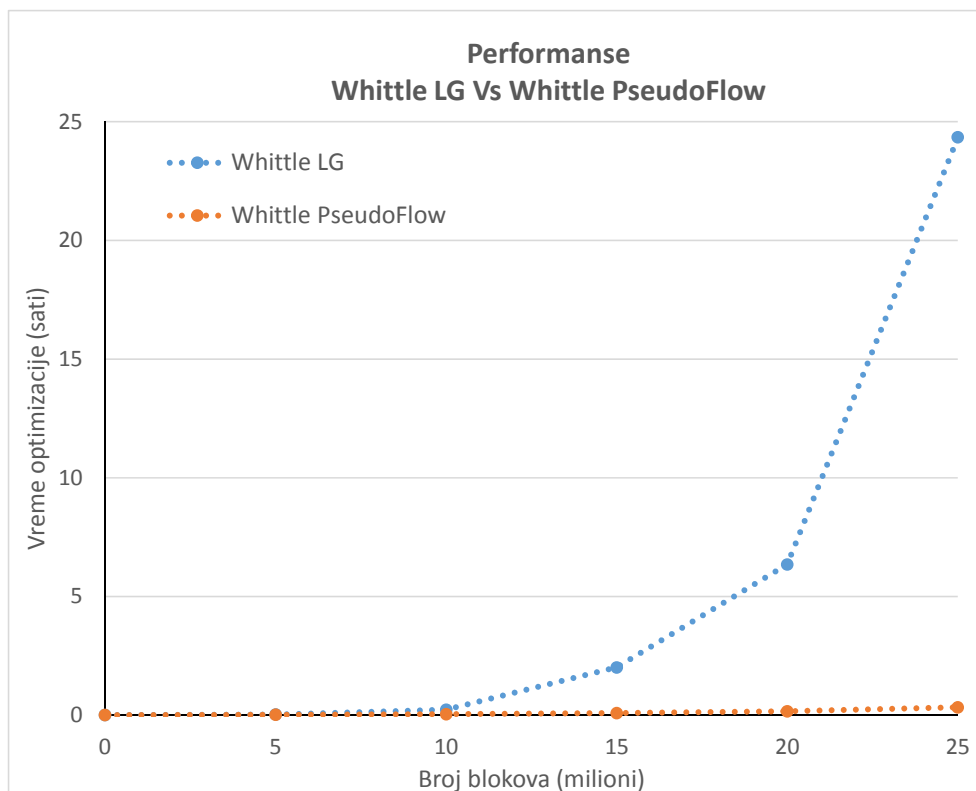
Metoda konusa pripada grupi heurističkih metoda (Dagdelen, 1985). Metoda je u velikoj meri zasnovana na ranije postojećim ručnim metodama, što je čini lako razumljivom i često primenljivoj u rudarskoj praksi. Prema ovoj metodi, površinski kop se predstavlja kao obrnuti konus, čija geometrija reprodukuje uglove nagiba kosina. Optimizacija granica kopa zasnovana je na pomeranju konusa duž blok modela, sa ciljem uvećavanja ekonomske vrednosti konture. Razvojem metode bavilo se više autora, u različitim periodima (Pana, Carlson, 1966, Lemieux, 1979, Phillips, 1972, Korobov, 1974). U opštem slučaju metoda konusa daje tačne i dovoljno upotrebljive rezultate (Barnes, 1982) međutim ne može da u svim slučajevima garantuje optimalnost (generiše suboptimalna rešenja). I pored toga

što je njen razvoj praktično napušten, metoda se još uvek često javlja u praksi ili kao deo složenijih algoritama za optimizaciju.

Lerch-Grossmann 3D algoritam (LG 3D algoritam, (Lerchs, Grossmann, 1965)) svakako predstavlja u praksi najšire korišćenu i u programske pakete najčešće implementiranu metodu. Metoda se zasniva na graf teoriji i za njeno rešenje potreban je definisan ekonomski blok model i lukovi koji definišu međusobnu zavisnost blokova u modelu. I pored toga što garantuje optimalnost rešenja spomenuti algoritam je kompleksan i za složenije slučajeve (veliki broj blokova u modelu) zahteva značajne vremenske i informatičke resurse.

Imajući u vidu uticaj spomenutog algoritma kao i njegovu vremensku neefikasnost i informatičku zahtevnost, ne čudi pojava stalne težnje za njegovu poboljšanje. Pored ubrzavanja procesa optimizacije, koji su razvili Zhao i Kim (1992) najveći uspeh su imali autori koji su za problem optimizacije granica površinskih kopova, primenili metodu maksimalnog toka (Picard, 1976, Goldberg, Tarjan, 1988). Oslanjajući se na rad spomenutih autora, Hochbaum (2008), razvio je pseudoflow algoritam, sa izvesnim prednostima u odnosu na ostale algoritme maksimalnog toka (Chandran, Hochbaum, 2009). Pseudoflow algoritam takođe se zasniva na graf teoriji (uključuje sistem blokova i lukova) i omogućava dramatično smanjenje vremena pretrage za optimalnom konturom (grafik na slici 2.2 - (Xiaoyu et al., 2017)).

Kako Xiaoyu et al. (2017) navode, i pored značajnog ubrzanja (čija vrednost korespondira sa veličinom blok modela, slika 2.2) Pseudoflow algoritam ne generiše uvek ista (optimalna rešenja) kao LG 3D algoritam. Razlog za ovo leži u činjenici da se u cilju primene Pseudoflow algoritma, vrednosti svakog bloka moraju iskazati kao celobrojne vrednosti (što nije slučaj sa LG 3D algoritmom). Ipak autori napominju da i pored činjenice da se strogo matematički gledano Pseudoflow algoritmom ne garantuju potpuno optimalna rešenja, u praktičnom smislu razlike između generisanih i stvarno optimalnih rešenja (kontura) su zanemarljive.



Slika 2.2 Uporedni prikaz vremena optimizacije - Xiaoyu (2017)

Kako je već napomenuto problem planiranja razvoja rudarskih radova na površinskim kopovima, predmet je interesovanja mnogih autora. Algoritmi koji se odnose na optimizaciju ovoga problema stalno su aktuelni još od druge polovine prošlog veka. Najznačajniji pomaci u izučavanju ove problematike ostvareni su korišćenjem sledećih matematičkih metoda:

- Linearno programiranje (Johnson, 1968),
- Mešovito ili celobrojno programiranje (Gershon, 1983, Dagdelen, 1986, Caccetta, Hill, 2003, Ramazan, 2001, Ramazan et al., 2005),
- Dinamičko programiranje (Roman, 1974),
- Heurističke metode (Lerchs, Grossmann, 1965),
- Stohastičke metode - simulirano kaljenje, stohastičko programiranje (Godoy, Dimitrakopoulos, 2004, Ramazan, Dimitrakopoulos, 2007).

Svakako najveći uticaj na rudarsku praksu ima metoda parametrizacije razvijena od strane Lerchs i Grossmanna, 1965. godine. Metoda predstavlja logičnu

posledicu razvijenog LG 3D algoritma za optimizaciju granica kopa i zasniva se na analizi senzitivnosti promene granica kopa na promenu faktora prihoda (eng. Revenue Factor), odnosno cene korisne komponente (ili komponenti). Promenom faktora prihoda, menja se praktično i osnovni parametar optimizacije a sa njim i generisana rešenja (optimalne konture). Smanjenjem faktora prihoda ispod osnovne vrednosti (u više navrata i prema određenom koraku) posledično se generiše skup optimalnih kontura, čime se zapravo diskretizuje prostor unutar osnovne optimalne konture (konture dobijene za osnovnu vrednost faktora prihoda). Ova diskretizacija nije nasumična već odgovara pravilu da su najvredniji blokovi u modelu obuhvaćeni geometrijski najmanjim optimalnim konturama koje su generisane za najmanje faktore prihoda. Dakle, progresivnim smanjenjem faktora prihoda generišu se sve manje i manje optimalne konture, koje diskretizuju prostor kopa, prema vrednosti blokova. Navedena zakonitost može se povezati sa pravilima diskontovanog novčanog toka prema kojoj se najbolji ekonomski efekti postižu kada se redosled eksploatacije blokava u modelu, vrši prema njihovoj vrednosti (što je vredniji blok ranije se otkopava). U slučaju poznatog kapaciteta, formiran redosled otkopavanja predstavlja zapravo plan razvoja rudarskih radova. Takođe na dijagramu eksploatacionih i ekonomskih performansi generisanih optimalnih kontura (poznat kao dijagram faktora prihoda, eng. Nested Pit) konture čije ekonomske performanse pokazuju značajno odstupanje od lokalnog trenda predstavljaju favorite za faze razvoja kopa (eng. PushBack). Ove zakonitosti metode parametrizacije iskorišćene su od strane mnogih proizvođača komercijalnih programskih paketa za planiranje razvoja površinskih kopova, zbog čega metoda predstavlja standard u trenutnoj rudarskoj praksi.

2.2. Utovarno-transportni sistemi

Kako je napomenuto, prirodna reakcija na rastući negativan uticaj na poslovno okruženje, predstavlja permanentni razvoj korišćene tehnologije i tehnoloških mogućnosti. Pored toga što je u određenim sektorima ostvaren značajan tehnološki napredak, kada su u pitanju postojeći utovarno-transportni sistemi suštinski napredak je izostao. Postojeći tipovi opreme uključene u utovarno-transportne

sisteme, prisutni su u eksploataciji više decenija. Činjenica je da su se sa svakom novom iteracijom, tehničke i eksploatacione karakteristike opreme menjale (niži operativni troškovi, veća produktivnost, lakše i sigurnije rukovanje) dok su tehnologija tj. tehnološke šeme rada sistema, suštinski ostale iste. Baucom (2011) navodi da je tokom protekle decenije, od mnogih tehnoloških promena u rudarstvu, najznačajniji uticaj zapravo vezan za promene (povećanje) gabarita, odnosno kapaciteta postojećih tipova opreme. Autor navodi da je generalni koncept "Veće je bolje (eng. Bigger is better)" opšte prihvaćen i primenjen anksiom, kod velikog broja najznačajnijih rudarskih kompanija. Ovo potvrđuje i Morton (2017), međutim iznosi i mišljenja relevantnih stručnjaka Josepha T. (Alberta univerzitet) i Ebrahimi A. (SRK Vankuver) koji misle da se prostor za uticanje na, produktivnost i smanjenje troškova kroz povećanje kapacitativnosti opreme, sve više sužava. Razlog za ovo leži u činjenici da je sve manje dovoljno velikih kopova koji infrastrukturno mogu da podrže kapacitativniju opremu.

Razvoj same mahanizacije, uporedo prati i značajno naučno interesovanje za utovarno-transportne sisteme. Kada su diskontinualni sistemi u pitanju, naučna pažnju najčešće je usmerena na razvoj novih optimizacionih algoritama, za rešavanje ranije već prepoznatih problema. Najčešće obrađivane teme naučnih radova su za:

- Odabir metode eksploatacije,
- Odabir opreme i veličina opreme,
- Automatizacija sistema (eng. Dispatching),

Najveći broj radova sa temom diskontinualnih utovarno-transportnih sistema, vezan je za sistem bager-kamion, dok su ostale utovarno-transportne varijante znatno manje zastupljene. U značajnijoj meri javljaju se samo radovi koji se bave tehnologijom rada bagera dreglajna (Aspinall et al., 1993, Gianazza, 2010, Fox, 2011, Westcott et al., 2009) što je u skladu sa velikom zastupljenošću dreglajna u procesima otkopavanja otkrivke.

I pored svojih osobnosti, navedene teme se u velikoj meri međusobno preklapaju. Burt (2008) Burt, Caccetta (2013) navode da se u okviru problema odabira metode eksploatacije u isto vreme vrši i odabir tipa opreme. I pored toga što se u ovakvim slučajevima određuje samo tip i osnovna kapacitativnost (ne i detalji izbora opreme) odabirom metode eksploatacije već se postavljaju relativno uske granice odnosno smanjuje potencijalni skup rešenja pogotovo kod utovarno-transportnih sistema. Prilikom definisanja metode eksploatacije, odabir tipa opreme vrši se na osnovu uslova koji karakterišu radno okruženje. Bazzazi, Osanloo, Karimi (2011), Bascetin, Kesimal (1999), Bascetin (2004) koriste fazi logiku u procesu definisanja opreme u konkretnom radnom okruženju. Prednost ovakvog pristupa omogućava obuhvatanje velikog broja uticajnih faktora i neizvesnosti koja je duboko utkana u mnoge parametre, ali i podrazumeva veliko iskustvo u procesu.

Posebno značajan uticaj na naučna razmatranja ali i na samu praksu imalo je uvođenje stepena usklađenosti otkopne sa transportnom opremom u okviru posmatranog sistema (eng. Match factor). Koristeći heuristički pristup Douglas (1964) prvi uvodi stepen usklađenosti. Koristeći osnove postavljenog heurističkog pristupa Morgan i Peterson (1968) su uprostiti formulaciju. Upravo ova uprošćena formulacija znatno je više korišćena u praksi. Osnovni problem navedenih formulacija je da podrazumevaju homogenu flotu (isti tip opreme i na utovaru i transportu) što često nije slučaj. Burt (2008) proširuju formulaciju stepena usklađenosti na slučajeve heterogenog sastava posebno transportnog i utovarnog dela sistema, a onda i na slučaj kada su obe komponente (i utovarna i transportna) heterogene.

Značajan napredak napravili su Burt (2008), Burt et al. (2011) i Burt et al. (2013) uvođenjem modela za odabir opreme u uslovima višestrukih utovarnih i istovarnih mesta, za slučaj više razmatranih perioda. Uspeh autora ogleda se u činjenici da su korišćenjem mešovitog celobrojnog programiranja, kreirali model koji u značajnoj meri odgovara realnosti, odnosno ne uvodi uprošćavanja (jedan sistem, jedno utovarno i jedno istovarno mesto).

Kada su kontinualni utovarno-transportni sistemi u pitanju, naučno interesovanje i posledično broj naučnih radova znatno su manji. Ovakva situacija delom je određena suženom mogućnošću primene kontinualnih sistema. Takođe Stevanović et al. (2017) napominje da smanjena fleksibilnost i stroga struktura kontinualnih sistema u značajnoj meri redukuje skup potencijalnih rešenja a time i prostor za eventualna unapređenja i optimizacije.

Takođe, skoro u potpunosti, kontinualni utovarno-transportni sistemi, su funkcionalno vezani za otkopavanje lignitskih ugljeva. Imajući ovo u vidu, ne iznenađuje da je naučno interesovanje i pažnja autora, pre svega usmerena na optimizaciju rada kontinualnih utovarno-transportnih sistema, u uslovima otkopavanja uglja.

Stevanović (2014, 2015) navodi da je najveći deo otkopanog uglja namenjen proizvodnji električne energije u termoelektranama, zbog čega su ciljevi površinskog kopa i termoelektrane snažno povezani. Iz tog razloga opšte obeležje naučnih radova vezanih za kontinualne sisteme, je simulacija celokupnog procesa proizvodnje od otkopavanja do deponije termoelektrane. Ovakav pristup podrazumeva razvoj robusnih i kompleksnih simulacionih algoritama za praćenje toka i karakteristika materijala (po pravilu uglja) od otkopnog mesta, preko transportnog sistema, do drobilica, deponija ili utovara u vozove za termoelektranu (Naworyta et al., 2015, Benndorf, 2011, 2013, Stevanović et al., 2014, Banković et al., 2017).

U cilju sagledavanja celokupnih efekata tj. performansi sistema, mnogi autori posvetili su posebnu pažnju deponijama za homogenizaciju otkopanog materijala (Schofield, 1980, Pavloudakis, Agioutantis, 2001). Ferreira et al. (1992) potencira značaj deponija, navodeći da je to jedan od najefikasnijih i najčešće korišćenih načina za smanjenje standardne devijacije, posmatranog parametra, u eksploataciji materijalu.

Tokom zadnje dekade, u značajnijoj meri se javljaju radovi koji sagledavaju performanse eksploatacije i homogenizacije ali uz uvođenje pojma geološke

neizvesnosti (Beretta et al., 2010, Abichequer et al., 2011, Marques, Costa, 2013, Benndorf, 2011). Algoritmi u ovim radovima, generišu više podjednako mogućih, geoloških modela ležišta, težeći da aproksimiraju geološku neizvesnost i promenljivost u ležištu (koja po pravilu ostaje van dometa standardnih metoda interpolacije), kao i efekte koje ovakvo okruženje ima na posmatrane parametre prilikom deponovanja i uzimanja materijala sa deponije. Sam značaj geološke neizvesnosti, u rudarstvu, prepoznat je znatno ranije (Ravenscroft, 1992, Goovaerts, 1997, Dimitrakopoulos, 1998, 2002).

Dodatni opis osnovnih tehnoloških postavki, kao i naučne literature na temu diskontinualnih i kontinualnih utovarno-transportnih sistema dat je u trećem poglavlju.

2.3. Osvrt na stepen razvoja integralnog pristupa

Razvoj naučnih i praktičnih metoda, posebno podržan od strane razvoja informacionih tehnologija, stavlja u prvi plan mogućnost integralnog sagledavanja celokupnog procesa eksploatacije korisnih mineralnih sirovina. Potrebu za integralnim rešenjima promovišu mnogi autori, a razlozi za ovakvo shvatanje proizilaze iz same prirode rudarske aktivnosti, odnosno uzajamne zavisnosti praktično svih faza u razvoju projekta.

Naime, u procesu planiranja površinskih kopova definisanje sistema eksploatacije predstavlja nezaobilazan i suštinski važan korak. Kako bi se stekli uslovi za definisanje sistema eksploatacije neophodno je predhodno izvršiti optimizaciju granica površinskog kopa, konstruisati završnu konturu kopa i definisati rezerve rude i jalovine, obezbediti lokaciju i prostor za odlagalište kao i detaljno razviti plan razvoja rudarskih radova. Tek nakon svih nabrojanih koraka, konačno se raspolaže sa dovoljno podataka za precizno definisanje svih tehnoloških sistema, kao i karakteristika i tipa svakog pojedinačnog elementa sistema. I pored toga što je naveden raspored koraka koji predhodi definisanju sistema široko prihvaćen i u krajnjem slučaju predstavlja logičan razvoj u definisanju nepoznatih elemenata u projektu, bitno je napomenuti da nije jednosmeran. To znači da usvojeni sistemi

eksploatacije, tj odabrana mehanizacija ima uticaja i na početne korake u planiranju projekta. Ovo je poznata uzajamna zavisnost koju napominju mnogi autori (Basçetin, 2003, Aykul et al., 2007, Bozorgebrahimi, 2004, Bazzazi et al., 2011). Praktično na samom početku procesa planiranja, već u procesu optimizacije površinskih kopova, neophodno je znati troškove otkopavanja rude i jalovine, kao i iskorišćenje ležišta. Ovi podaci poznati su samo ako se ima ideja o planiranim tehnološkim sistemima, odnosno o tipu mehanizacije koja će biti korišćena. Ovakav pristup je potvrđuje i Bozorgebrahimi (2003) koji navodi iznesen zaključak da unapređen odabir opreme, rezultuje smanjenjem troškova u eksploataciji što implicira i moguću promenu granica optimalne konture kopa. Takođe, proces konstrukcije kopa kao i odlagališta, odnosno odabir geometrijskih elemenata istih, u značajnoj meri je uslovljen i opremom koja će biti korišćena. Ovo se pre svega odnosi na visine i uglove nagiba etaža, kao na širinu transportnih puteva i izvoznih rampi.

Kada su diskontinualni utovarno-transportni sistemi u pitanju Burt i Caccetta (2013), napominju da se uočeni problemi izučavaju dominantno kao jedinstvene celine bez međusobnog uticaja. Autori napominju da je potreba za holističkim (integralnim) pristupom jasna i proističe iz poznavanja rudarske prakse i daju ocenu da se savremeni algoritmi uz razvoj informatičke podrške, kreću upravo u pravcu razvoja holističkog (integralnog) posmatranja sistema.

Kada je kontinualna oprema u pitanju, uočljiv je razumljiv trend da se zbog kontinualnosti toka materijala, sistem najčešće posmatra kao celina. Kako je već navedeno, kroz naučne radove, razvijeni su efikasni algoritmi koji simuliraju pojedinačne procese (interpretaciju geologije, otkopavanje, transport, deponovanje) i povezuju ih u integralne simulacione modele. I pored generalnog teoretskog ali i praktičnog uspeha ovakvog pristupa, postoji još prostora za poboljšanje. Analizom literature, uočljivo je da je jako malo pažnje posvećeno operativnom planiranju rada kontinualnih otkopnih mašina (rotornim i bagerima vedričarima). U dosadašnjoj literaturi, simulacija otkopavanja uglja, svedena je na predefinisani raspored otkopavanja blokova sa određenim sadržajem. Optimizacija operativnog rada bagera u proizvodnom ciklusu, je po pravilu izostavljena. Na

značaj i benefite operativnog planiranja rada bagera ukazao je Stevanović (2015). Takođe isti autor razvio je algoritam za operativni plan rada bagera, koji se svodi na optimizaciju kvaliteta otkopanog uglja u funkciji promene kapaciteta pojedinačnih bagera. Optimizacija se u ovom slučaju svodila na predefinisane bagerske blokove bez podele na podetaže. Međutim, razvoj algoritma operativnog rada rotornih bagera po podetažama (što predstavlja osnovnu tehnološku šemu rada opreme) kao i njene reperkusije na performanse proizvodnje, ostala su nedovoljno razmatrane. Jasno je da bez detaljne razrade komponente operativnog planiranja otkopne mehanizacije, nijedan simulacioni integralni model, ne pruža potpunu sliku funkcionisanja sistema eksploatacije ugljeva. Iz tog razloga, kroz ovu disertaciju, i publikovan naučni rad (Banković et al., 2017), a korišćenjem metoda genetskog algoritma i linearnog programiranja, razvijen je algoritam za optimizaciju operativnog planiranja otkopavanja po podetažama. Detaljno o algoritmu dato je u poglavljima 5 i 6. Na ovaj način dodatno se stvaraju uslovi za kvalitetnije integralno (holističko) posmatranje eksploatacionog sistema.

3. UTOVARNO-TRANSPORTNI SISTEMI NA POVRŠINSKIM KOPOVIMA

Uspešnost proizvodnje, površinske eksploatacije, zavisi od velikog broja manje ili više uticajnih faktora. Potpuna optimizacija po svim ovim faktorima nije moguća, već se rešenje, nalazi u vidu *optimalnog kompromisa*. U tom smislu od izuzetnog značaja je odabir pristupa kojim se određuje važnost svakog faktora. Uspostavljanje ovakvog pristupa je složen proces, koji je i pored zajedničkih generalnih postavki, svojstven i autentičan za svaki poseban rudarski projekat.

Mnogi autori trudili su se da navedu sve uticajne faktore koji definišu problematiku odabira tehnologije i definisanje sistema eksploatacije. U generalnom smislu uticajni faktori se u velikom delu podudaraju kod većine autora, ali se njihov značaj menja najviše zavisno od od izučavanog tipa korisne mineralne sirovine. Jedan od najobobuhvatnijih pregleda uticajnih faktora na izbor mehanizacije dali su autori Samanta, Sarkar i Mukherjee (2002).

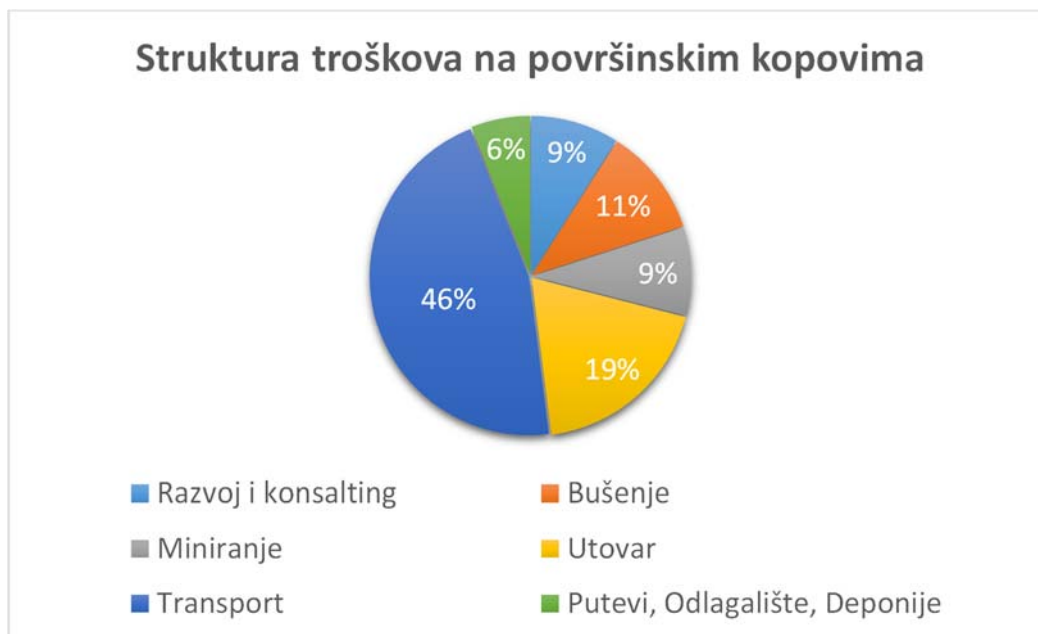
Izbor opreme za određene rudarske procese u okviru sistema i dimenzionisanje tako komponovanih sistema je dosta složen proces imajući u vidu uticaj značajnog broja faktora na izvršavanje same metodologije dimenzionisanja. Prema autorima na izbor opreme i sistema eksploatacije, uticaj imaju sledeći faktori:

- Karakteristike ležišta (geološke, geomehaničke, geografske, itd),
- Organizacioni faktori,
- Potrebna fleksibilnost opreme
- Tehničke karakteristike opreme,
- Planirani proizvodni ciljevi,
- Iskustvo u radu sa određenim tipom opreme,
- Životni vek opreme,
- Kapitalni i operativni troškovi,
- Renome proizvođača i istorijat pouzdanosti konkretnog tipa opreme,
- Mogućnost i rok nabavke, kao i garancija proizvođača,
- Tip pogona (pogonskog goriva),

- Potrebni nivo održavanja,
- Potreba za angažovanjem dodatne pomoćne opreme,
- Stepen automatizacije,
- Nivo sigurnosti i udobnosti prilikom rukovanja opremom.

Osnovni princip, u slučaju definisanja sistema eksploatacije, je utvrđivanje hijerarhije značaja određenih uticajnih faktora. Praktično je nemoguće definisati sistem i opremu unutar njega, koja će u potpunosti odgovarati svim zadatim faktorima. Usvojen sistem eksploatacije mora da predstavlja optimalno rešenje po pitanju vodećih faktora, dok u slučaju ostalih faktora, oprema obično ne može u potpunosti zadovoljiti sve uslove, odnosno prihvata se kao suboptimalno rešenje.

Opšta postavka je da se prilikom planiranja u rudarskom projektu, mora krenuti od prirodnih faktora koji definišu geološke, geomehaničke kao i geografske osobenosti konkretnog ležišta. Primenjena metoda i tehnologije eksploatacije u značajnoj meri će se razlikovati zavisno od prirode korisne mineralne sirovine (metali, nemetali, ugalj), strukture ležišta, od tvrdoće i nosivosti stena u ležištu, morfologije terena, od nivoa potrebne selektivnosti, stepena razvijenosti potrebne infrastrukture, itd. Većina autora (Lizotte, 1988, Sharma, 1999, Bozorgebrahimi et al., 2005, Aykul et al., 2007), pod pojmom optimalna oprema na površinskom kopu zapravo podrazumeva, tehnološki sistem, koji u ograničenjima radne sredine ispunjava proizvodne ciljeve, uz obezbeđenje minimalnih troškova. Ukupni troškovi (kapitalni i operativni) su sa pravom u fokusu naučne i stručne javnosti, jer se praktično na istom ležištu najčešće mogu primeniti više različitih tipova eksploatacionih sistema sa izuzetno komparativnim uslovima primene i proizvodnim karakteristikama. U takvim slučajevima optimizacija odabira opreme se najčešće svodi na proces minimizacije troškova. Značaj ovakvog pristupa posebno je karakterističan kada su u pitanju utovarno-transportni sistemi, čiji operativni troškovi po pravilu prelaze 60% ukupnih troškova na površinskom kopu (Ercelebi, Bascetin, 2009, Hartman, 1998, Buhl, 2002). Takođe, troškovi transporta kao pojedinačne tehnološke operacije, imaju dominantnu ulogu u strukturi ostalih troškova na površinskom kopu. Ovakav odnos potvrđen je od strane Buhl-a (2002) i plastično prikazan na dijagramu na slici 3.1.



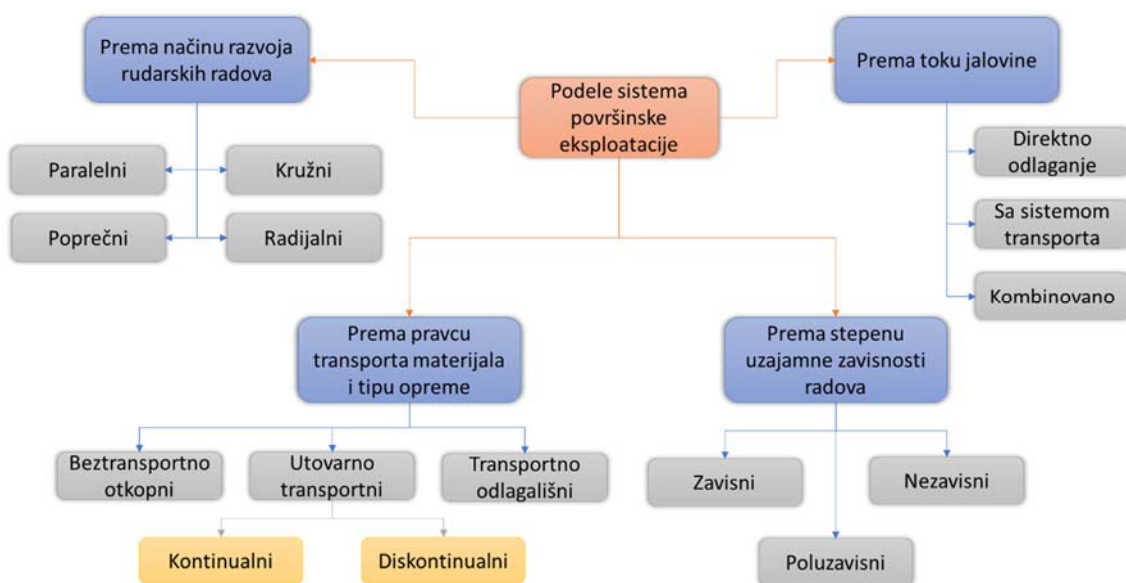
Slika 3.1 Struktura ukupnih troškova na površinskim kopovima (Buhl, 2002)

Razvoj različitih metoda eksploatacije, a u okviru njih i različitih tehnoloških sistema eksploatacije, javlja se kao prirodna reakcija, na složene uslove poslovanja površinske eksploatacije i u tom smislu predstavlja neophodnost. I pored toga što su generalni ciljevi određenih sistema eksploatacije identični (obezbeđenje projektovanih količina i kvaliteta uz minimalne troškove) njihova funkcionalnost se u značajnoj meri razlikuje, što je u skladu sa potrebom prilagođavanja i specijalizacije konkretnim uslovima u kojima se eksploatacija vrši.

Burt i Caccetta (2013) navode da se u stručnoj literaturi i naučnim radovima, problem odabira skupa optimalne opreme na površinskom kopu, najčešće poistovećuje ili rešava u okviru problema odabira metode eksploatacije. Kako odabir metode eksploatacije predstavlja jednu od fundamentalnih osnova u razvoju svakog rudarskog projekta, jasan je i potencijalni uticaj odabira rudarske opreme na sve ostale faze planiranja. Ovakva međusobna zavisnost osnovnih elemenata, predstavlja čestu pojavu u procesima planiranja površinskih kopova. U rudarskoj praksi se problem međusobne zavisnosti, rešava uvođenjem iterativnog postupka pri planiranju pojedinačnih elemenata projekta sa ciljem optimizovanja celokupnog procesa eksploatacije (Dagdelen, 1985).

3.1. Podela utovarno-transportnih sistema

U literaturi se mogu sresti različite podele sistema površinske eksploatacije, koje su uglavnom rađene prema potrebama određenog istraživanja. Jedna od klasifikacija sistema koja se može uvažiti je data na dijagramu na slici 3.2. U okviru prikazane podele (Ignjatović, 2012) pod razvojem rudarskih radova se podrazumeva napredovanje u odnosu na konture kopa i geometriju samog razvoja. Stepem uzajamne zavisnosti radova posmatra jačinu veze između izvođenja pripremnih radova, radova na otkopavanju otkrivke i korisne mineralne sirovine. Najvažnija podela sa aspekta ovog istraživanja je podela prema toku materijala i tipu angažovane opreme, gde se kao najzastupljenija vrsta sistema pojavljuju utovarno-transportni sistemi površinske eksploatacije.



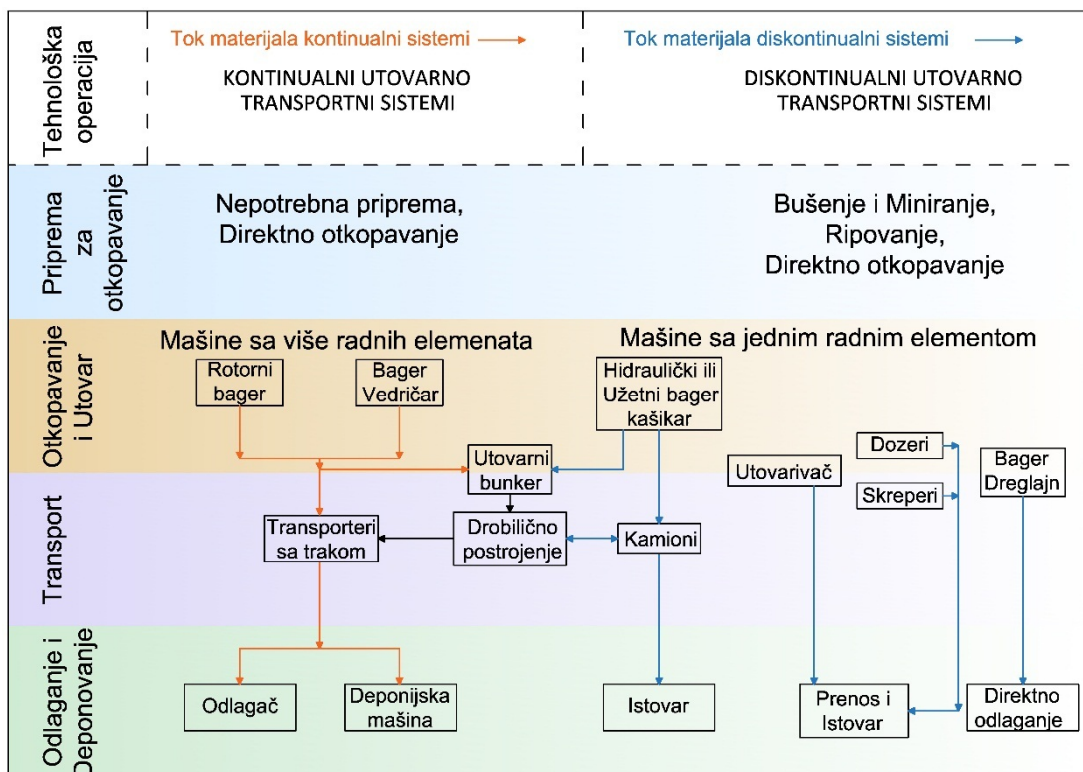
Slika 3.2 Podela sistema na površinskim kopovima

Najčešća podela utovarno-transportnih sistema vrši se prema toku materijala.

Prema ovoj podeli razlikujemo:

- Kontinualne utovarno-transportne sisteme,
- Diskontinualne utovarno-transportne sisteme i
- Kombinovane utovarno-transportne sisteme.

U tehnološkom smislu, jasno se ističu razlike između kontinualnih i diskontinualnih utovarno-transportnih sistema, dok kombinovani sistemi, shodno svom imenu, predstavljaju kombinaciju elemenata sistema prethodne dve grupe, sa ciljem korišćenja potencijalnih prednosti obe tehnološke grupe. U dijagramu na slici 3.3 data je osnovna klasifikacija utovarno-transportnih sistema sa naznačenim varijantama tehnološkog procesa i osnovnim tehnološkim elementima.



Slika 3.3 Klasifikacija i osnovni tehnološki elementi utovarno-transportnih sistema

3.2. Diskontinualni utovarno-transportni sistemi

Diskontinualni utovarno-transportni sistemi predstavljaju najzastupljeniji tip u površinskoj eksploataciji mineralnih sirovina. Specifične karakteristike ovih sistema omogućile su im široku upotrebu u najrazličitijim uslovima eksploatacije. Mnogobrojni i različiti primeri iz svetske prakse govore u prilog činjenice da se diskontinualni utovarno-transportni sistemi mogu koristiti za gotovo sve tipove mineralnih sirovina koje se eksploatišu na površinskim kopovima. Posebno značajna i karakteristična implementacija ovoga tipa sistema, vezana je za

metalična ležišta mineralnih sirovina. Ne sme se ni zanemariti upotreba diskontinualnih utovarno-transportnih sistema pri eksploataciji ležišta uglja, pogotovo kada su kvalitetniji tipovi uglja i određene geografske lokacije u pitanju (Severna Amerika, Australija, Kanada, Južnoafrička Republika itd.).

3.2.1. Osnovne preporuke za definisanje diskontinualnih utovarno-transportnih sistema

Apostrofirana široka zastupljenost i univerzalnost nije samo osobina diskontinualnih utovarno-transportnih sistema, kao globalnog tipa, već je karakteristika i pojedinačnih elemenata sistema tj. pojedinačnih tipova mašina. U praksi je jako česta pojava da se bez obzira na uslove radne sredine, više različitih tipova diskontinualnih mašina može angažovati, u tehnološkom procesu eksploatacije mineralnih sirovina. Tako na primer u okviru diskontinualnih sistema, na konkretnom površinskom kopu, više različitih tipova mašina može sa uporednim uspehom biti angažovano na otkopavanju i utovaru materijala (hidraulični bager kašikar, užetni bager kašikar, bager dreglajn, utovarivač itd). Ovakva pojava čini optimizaciju odabira elemenata diskontinualnog sistema, izuzetno kompleksnim problemom za čije rešenje je neophodno sprovesti višekriterijumsku analizu. Kako je u uvodnom delu ovoga poglavlja napomenuto, imajući u vidu izraženu univerzalnost opreme diskontinualnih sistema, u inženjerskom smislu, proces odabira opreme (a posledično i definisanje sistema) svodi se na definisanje kriterijuma i hijerarhije kriterijuma koji odgovaraju konkretnom procesu proizvodnje. Postoji značajna količina dokumentacije i radova koji u celosti ili delimično, obrađuje ovu tematiku. Zbog velike raznolikosti uslova eksploatacije, autori svoje zaključke na temu odabira opreme, po pravilu definišu kao opšte deskriptivne preporuke, sa širim rasponima vrednosti, a znatno ređe kao jednoznačne zakonitosti. Takođe, zaključci često jesu proizvod analize i matematičkih algoritama, ali se i u velikoj meri oslanjaju na iskustva iz prakse sa postojećih objekata površinske eksploatacije.

Sveobuhvatne preporuke o odabiru tipa mašina, za definisanje diskontinualnih utovarno-transportnih sistema, date su u Priručniku za površinsku eksploataciju (objedinio Thompson (2005)). U ovom priručniku pri odabiru mašina akcentat se posebno stavlja na:

- Tip materijala,
- Dužinu transporta i
- Potreban kapacitet sistema.

Koristeći samo ova tri kriterijuma autori priručnika daju preporuke o prednostima i manama odabira pojedinog tipa opreme.

Kako je kapacitet proizvodnje, po pravilu, određen pre odabira opreme, a zbog univerzalnosti diskontinualne opreme radna sredina podržava upotrebu više različitih tipova mašina, praktičan pristup bio bi da se na osnovu transportnih dužina krene sa preliminarnim usvajanjem opreme.

Ako je transportna dužina kraća od 100 m, preporuka je da se razmatra upotreba dozera (guseničnih ili na točkovima) ili eventualno skrepera. Konstrukcija noža kod dozera prilagođena je otkopavanju i transportu isključivo rastresitog materijala duž malih rastojanja. Slična funkcionalnost i mogućnost upotrebe, javlja se i kod grejdera, koji se najčešće koristi za pomoćne i "završne" radove, i omogućava transport manjih količina materijala ali duž nešto dužih relacija. Većina velikih dozera na gusenicama je opremljena mehanizmom za ripovanje materijala, dok je kod grejdera mogućnost ripovanja materijala jako mala ili nepostojeća. Bitna karakteristika obe mašine je nemogućnost podizanja materijala, odnosno izostanak utovarne funkcionalnosti. Za obe mašine, kapacitet rada je u direktnoj zavisnosti od veličine radnog organa (noža) i karakteristika materijala. Rastresit, nekonsolidovan materijal je idealan, a produktivnost rapidno opada što je materijal teži za otkopavanje. Čvrst i stenski materijal ne može se tretirati ovim mašinama, bez predhodnog ripovanja ili miniranja.

U određenim slučajevima, otkopavanje i transport materijala može se vršiti dreglajnom. Ovaj tip mašine, u tehnološkom smislu, predstavlja posebnu klasu, jer

samostalno obezbeđuje operacije otkopavanja i transporta. Ovakve mogućnosti obezbeđuju veoma niske operativne troškove rada dreglajna. Transport materijala dreglajnama, zavisi od veličine i konstrukcije karakterističnog tipa i generalno se smatra opravdanim do dužina od 100 m. Za veće dužine (do 300 m), neophodno je uvesti tehnološku operaciju ponovnog zahvatanja materijala, čime se značajno povećavaju operativni troškovi i smanjuje kapacitet. Ovakva primena ograničena je samo na slučajeve kada druge tehnološke šeme nisu moguće. Generalno primena bagera dreglajna nije uslovljena osobinama materijala, s obzirom da se stenske mase velike tvrdoće, mogu predhodno tretirati miniranjem na odbacivanje ili češće na rastresanje. Ipak, najčešća primena bagera dreglajna vezana je za otkopavanje ležišta ugljeva, gde se koristi u operacijama otkrivanja (čišćenja) neposredne krovine uglja sa direktnim odlaganjem jalovine. Na ovakvim površinskim kopovima dreglajni se pored obavljanja funkcija osnovne otkopne mehanizacije, u značajnoj meri sreću i kao mašine angažovane na poslovima pomoćne mehanizacije. Široke funkcionalne mogućnosti dreglajna posledica su njegovih tehnoloških karakteristika, ali i postojanja značajnih konstruktivnih varijacija, sa različitim kapacitetima odnosno veličinom kašike. Na pomoćnim radovima angažovani su dreglajni čija se veličina kašike kreće obično od 5 -20 m³. Dreglajni angažovani na funkcijama osnovne otkopne mehanizacije, karakterišu se širokim dijapazonom zapremina kašike (od 20 do preko 100 m³). U pogledu osobina radnog prostora upotreba dreglajna je generalno ograničena veličinom površinskog kopa i zaleganjem ležišta. Optimalne performanse u radu (u smislu ostvarenih kapaciteta i niskih operativnih troškova) moguće su samo na objektima sa dovoljno prostora (dovoljna širina otkopnog fronta) gde je moguće primeniti optimalne parametre rada. Takođe, velika težina bagera dreglajna (u odnosu na ostalu otkopnu opremu) čini ga relativno skupim, zbog čega je njegova nabavka opravdana samo na objektima sa dužim radnim vekom. U opštem slučaju upotreba dreglajna je ograničena na horizontalna ili ležišta sa blagim nagibom. Osnovni razlog za ovo je stabilnost otkopanog materijala koji dreglajn odlaže u svom dohvatnom prostoru. Upotreba dreglajna, kao osnovne otkopne opreme, posebno je pogodna za plitka ležišta (maksimalne dubine 50-80m) usled ograničenja u dubini kopanja i daljini i visini odlaganja materijala (Westcott et al., 2009). Za

ležišta veće dubine, karakteristična je upotreba dreglajna u kombinaciji sa bager – kamion sistemom. U ovakvoj situaciji viši jalovinski slojevi eksploatišu se sistemom bager-kamion, dok se neposredno otkrivanje uglja vrši dreglajnom.

Sa porastom transportnih relacija na preko 200-300 m, postaje preporučljivo razmatrati opremu sa funkcionalnošću dizanja materijala, odnosno opremu sposobnu za utovar i transport.

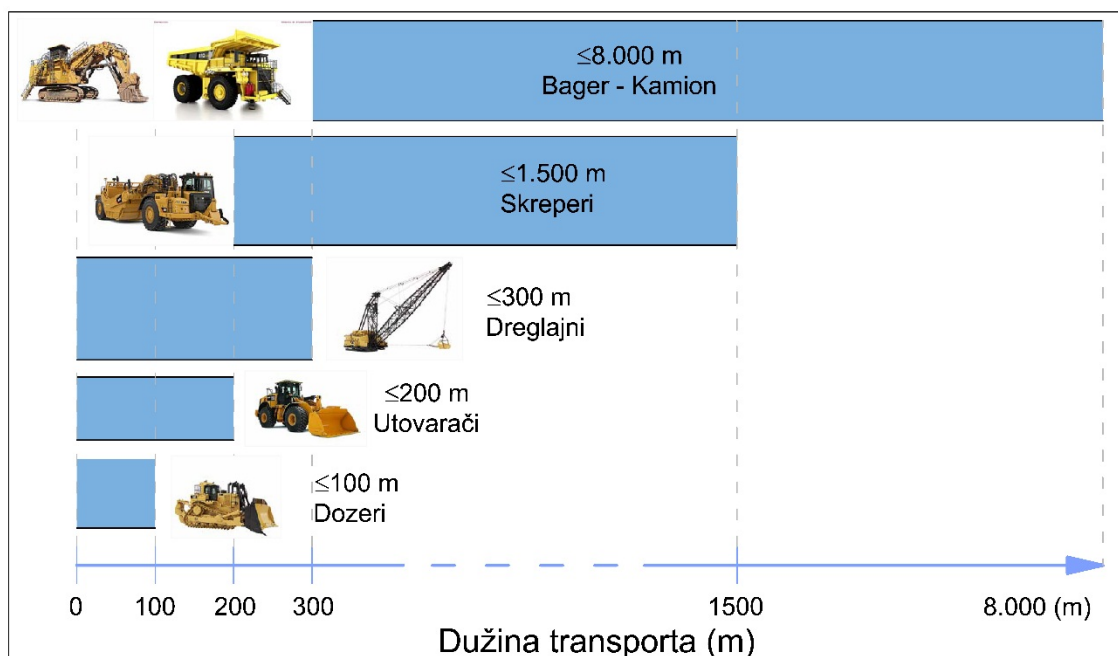
Za transportne daljine do 200 m, ali u slučaju materijala nešto veće granulacije, čije prostiranje je koncentrisano na manjoj površini (odminiran blok na etaži) relevantno je razmatrati utovarače na pneumaticima, kao samostalnu utovarno-transportnu mašinu. Na manjim površinskim kopovima česte su tehnološke šeme u kojima se utovaračima komadast materijal utovara i transportuje do pozicije određene deponije, ili sa pozicije deponije do bunkera drobilnog postrojenja.

U slučajevima kada zapremina materijala koji se transportuje nije previše velika, moguća je upotreba skrepera. Prema Ignjatoviću (2012) upotreba skrepera je ograničena na transportne daljine od 1.000 – 1.500m. Uslov za upotrebu skrepera je da je materijal koji se tretira izuzetno male tvrdoće ili da je u rastresitom stanju. U tehnološkim šemama koje uključuju upotrebu skrepera, gotovo se po pravilu koriste i dozeri, kao ispomoć na utovaru i pripremi materijala. Česta upotreba kombinacije ove dve mašine, vezana je za uklanjanja površinskog mekog ili rastresitog sloja.

Iz do sada navedenog, može se zaključiti da je za potrebe samostalnog otkopavanja, utovara i transporta materijala, upotreba dozera, grejdera, skrepera kao i utovarača krajnje ograničena. Ignjatović (2012) napominje da se skreperi, dozeri i utovarači, kao osnovne mašine na otkopavanju, mogu se koristiti na malim površinskim kopovima (pre svega građevinskih materijala) i to za otkopavanje mekih ili prethodno riperima rastrešenih polučvrstih materijala pri malim transportnim daljinama (100–150 m za dozere i 1000 – 1500 m za skrepere na pneumaticima). Na kopovima srednjih i velikih kapaciteta ove mašine se uglavnom koriste za izvođenje određenih pomoćnih radova.

U slučaju da transportne relacije prelaze 200 – 300 m, pored navedenih alternativa, neophodno je u razmatranje uzeti sistem koji čine otkopno-utovarna i transportna mašina. U slučaju diskontinualnih sistema kao otkopno-utovarna mašina mogu se razmatrati užetni i hidraulični bageri kašikari kao i utovarači, dok se transportni deo sistema neizostavno svodi na neki tip kamiona. Kombinacija ovih mašina veoma je rasprostranjena u površinskoj eksploataciji i kod kopova sa diskontinualnom mehanizacijom i velikim kapacitetima, predstavlja tehnološko pravilo. Czapliski (1992) i Ta et al. (2005) potvrđuju ovu konstataciju i napominju da i pored toga što postoje razne alternative za otkopavanje, utovar i transport materijala, na površinskim kopovima (posebno onima sa velikim kapacitetom) upotreba sistema sa utovarnom mašinom (bager kašikar ili utovarač) i kamionom predstavlja osnovnu i najčešće primenjivanu metodu rada.

Na slici 3.4 dat je šematski prikaz rekapitulacije navedenih osnovnih tehnoloških tipova diskontinualne utovarno-transportne opreme kao i kriterijuma za odabir na osnovu dužine transporta.



Slika 3.4 Odabir utovarno-transportne opreme na osnovu dužine transporta





Takođe u tabeli 3.1. dat je trenutni prikaz aktivnog broja jedinica rudarske opreme za otkopavanje, utovar i transport. Ukupan broj trenutno aktivnih jedinica određenog tipa diskontinualne opreme, govori u prilog aktuelnih trendova u odabiru opreme, kada je savremeno rudarstvo u pitanju. Izvor podataka u tabeli je The Parker Bay Company¹, specijalizovana za istraživanje tržišta i analizu trendova u površinskoj eksploataciji i proizvodnji rudarske mehanizacije.

Prikazani rezultati se odnose na globalni svetski nivo, a kategorizacija rudarskih mašina, kao i odabir vrednosti kriterijuma koji određenu mašinu kvalifikuje kao rudarsku (npr. težina materijala u kašici, nosivost kamiona, instalisana snaga) preuzeta je u originalnom obliku od spomenutog izvora.

Imajući u vidu veliki tehnološki značaj utovarno-transportnog sistema koji čine bageri kašikari i utovarači (kao otkopna i utovarna komponenta) i kamioni (kao transportna komponenta) za proizvodnju u savremenoj površinskoj eksploataciji, u daljem tekstu posvećena je posebna pažnja kriterijumima i uslovima odabira svake pojedinačne komponente (mašine) u ovakvim sistemima. Ovakav pristup je i u skladu sa naslovom predmetne disertacije.




¹ <http://parkerbaymining.com/mining-equipment/earthmoving-equipment.htm>, pristupljeno: 4/12/17

Tabela 3.1 Pregled broja aktivnih jedinica rudarske opreme

Tip opreme	Broj aktivnih jedinica	Osnovna klasifikacija	Najveći proizvođači
 <p>Hidraulični bager</p>	4,400	<p>Težina materijala u kašici (t)</p> <p>Klasa-20-25 t Klasa-30-35 t Klasa-40-50 t Klasa-63 t Klasa-77+ t</p>	<p>BEML CATERPILLAR (Bucyrus, O&K) HITACHI JOY GLOBAL / P&H KOMATSU (including Demag) LIEBHERR</p>
 <p>Užetni bager</p>	1.850	<p>Težina materijala u kašici (t)</p> <p>Klasa-20-25 t Klasa-30-35 t Klasa-40-50 t Klasa-63 t Klasa-77 t Klasa-90+ t</p>	<p>CATERPILLAR (Bucyrus, Marion), JOY GLOBAL / P&H, OMZ, TAIYUAN</p>
 <p>Bager Dreglajn</p>	500+	<p>Težina materijala u kašici (t)</p> <p>Klasa -20-30 t Klasa -40-55 t Klasa -70-90 t Klasa -100-120 t Klasa - 140 t Klasa-> 150 t</p>	<p>CATERPILLAR (Bucyrus, Marion and Ransomes), HEC, JOY GLOBAL / P&H (including Page), MANITOWOC, OMZ (Uralmash-Izhora)</p>
 <p>Utovarači</p>	3.700	<p>Težina materijala u kašici (t)</p> <p>Klasa-20-25 t Klasa-30-35 t Klasa-40-50 t Klasa-63 t</p>	<p>CATERPILLAR, JOY GLOBAL/P&H (Letourneau), KOMATSU, TEREX</p>

* izvor -The Parker Bay Company, 2017

Nastavak Tabele 3.1. Pregled broja aktivnih jedinica rudarske opreme

Tip opreme	Broj aktivnih jedinica	Osnovna klasifikacija	Najveći proizvođači
 <p>Dozeri</p>	12.500	<p>Snaga (kW)</p> <p>Klasa-350-450kW Klasa-550-650kW Klasa-750+ kW</p>	CATERPILLAR, FIAT-ALLIS, KOMATSU JOY GLOBAL/P&H (Letourneau)
 <p>Grejderi</p>	2.700	<p>Snaga (kW)</p> <p>Klasa-160 kW Klasa-200 kW Klasa-350+ kW</p>	CATERPILLAR, KOMATSU
 <p>Kamioni</p>	42.000	<p>Težina materijala u sanduku (t)</p> <p>Klasa-90-110 t Klasa-127-150 t Klasa-154-190 t Klasa-218-255 t Klasa-290 t Klasa-308-365 t Klasa-> 365 t</p>	BELAZ, BEML, BRYAN, CATERPILLAR (Bucyrus-Unit Rig), HITACHI (Euclid-Hitachi), KOMATSU, KRESS, LETOURNEAU, LIEBHERR, MCC (Xiangtan) NORINCO, PERLINI, RIMPULL, SANY, TEREX (O&K and Dart) XEMC (Hunan XD)

* izvor - The Parker Bay Company, 2017

3.2.2. Sistem utovarna mašina- kamion

Sistem koji se sastoji od utovarne mašine i kamiona je najšire korišćen utovarno-transportni sistem u površinskoj eksploataciji (Thompson, 2005, Czaplicki, 1992, Hays, 1990). Ovo je pre svega posledica značajne fleksibilnosti ovakvog sistema, odnosno velike univerzalnosti primene.

Na velikim površinskim kopovima, sa značajnim kapacitetima, odnosno zapreminama materijala, užetni bageri kašikari dugo su predstavljali osnovnu utovarnu mašinu. Ovakva pozicija užetnih bagera, direktna je posledica njihovih pozitivnih karakteristika, od kojih se pre svega izdvaja robusnost konstrukcije i izrade koja omogućava rad u različitim uslovima, velike kapacitete i dug radni vek mašine. Takođe u odnosu na druge utovarne mašine (hidraulični bager, utovarač) užetni bageri kašikari imaju značajno niže troškove rada.

U poslednjih par decenija, dominantna pozicija užetnog bagera kao osnovne otkopne i utovarne mašine, u značajnoj meri je kompromitovana od strane hidrauličnih bagera kašikara kao i utovarača (analiza promene trenda aktivnih jedinica užetnih i hidrauličnih bagera i utovarača, Parker Bay Company za dvogodišnji period, dato u tabeli 3.2). Ovakav trend posebno je karakterističan za površinske kopove gde je radni prostor relativno skučen, a mobilnost opreme i selektivnost pri otkopavanju u fokusu primenjene tehnologije eksploatacije. Navedeni razvoj događaja generisan je pre svega sve slabijim kvalitetom ležišta koja se eksploatišu, zbog čega tehnološki proces postaje kompleksniji, odnosno tehnološki zahtevniji (Stevanović et al., 2014).

Iz već navedenog, kao i iz rezultata datih u tabeli 3.1. jasno je da su na površinskim kopovima, najčešće korišćene diskontinualne mašine za otkopavanje i utovar u kamione:

- Užetni bager kašikar,
- Hidraulični bager kašikar i
- Utovarač na pneumaticima

Tabela 3.2 Pregled aktivnih jedinica i trend promene u dvogodišnjem periodu

Trend prema tipu utovarne mašine					
Utovarna Mašina	Broj aktivnih jedinica	Totalni kapacitet (m ³)	Procenat totalnog kapaciteta (%)	Promena broja jedinica (%)	Promena totalnog kapaciteta (%)
Užetni bager	1.199	26.679	44	- 10	- 4
Hidraulični bager	1.045	16.340	26	+ 9	+ 9
Utovarač	1.243	18.257	30	+ 20	+ 20
Trend prema zapremini kašike					
Zapremina Kašike	Broj aktivnih jedinica	Totalni kapacitet (m ³)	Procenat totalnog kapaciteta (%)	Promena broja jedinica (%)	Promena totalnog kapaciteta (%)
< 15 m ³	1.910	22.821	37	+ 13	+ 12
15 - 25	1.045	19.961	32	- 12	- 12
> 25 m ³	552	18.794	31	+ 16	+ 22

S obzirom na značaj koji ove otkopno utovarne mašine imaju u daljem tekstu obrađeni su faktori koje utiču na odabir ovih mašina na površinskim kopovima.

Uslove primene sistema utovarna mašina-kamion, kao i faktore pri kojima je ovaj tip sistema u prednosti u odnosu na ostale tehnološke varijante izučavali su mnogi autori (Westcott, 2004, Thompson, 2005, Westcott et al., 2009, Fox, 2011, Rudrajit, Serkan, 2012). Najčešće navođeni faktori, koji bitno favorizuju upotrebu sistema utovarna mašina- kamion, od strane nabrojanih autora su:

1. Geološki i geomehanički faktori,
2. Ekonomski faktori,
3. Složenost proizvodnje i radni uslovi,
4. Kapacitet proizvodnje, odnosno vek kopa,
5. Vrednost korisne mineralne sirovine,
6. Rizik poslovanja.

Geološki, geotehnički i geografski uslovi Postoji konsenzus među autorima da su geološki i geomehanički faktori i geografski kriterijumi, vodeći za odabir i uspešno organizovanje sistema utovarna mašina-kamion.

Konfiguracija terena iznad ležišta, kao i postojeća infrastruktura, u velikoj meri može opredeliti upotrebu određenog tipa mehanizacije. U brdskim i planinskim područjima, odnosno generalno u područjima sa kompleksnom topografijom, upotrebu diskontinualne tehnologije odnosno sistema bager (utovarivač) – kamion, treba uzeti u najuži izbor kod definisanja utovarno-transportnog sistema. U ovakvim područjima, infrastruktura oko potencijalnog površinskog kopa, je po pravilu problem (pristupni putevi, dovod struje i vode, dovoljno kvalifikovane radne snage). Opisani uslovi u značajnoj meri kompromituju mogućnost upotrebe neke druge tehnologije (kontinualne sisteme, direktno otkopavanje i odlaganje bagerom dreglajnom itd.) i promovišu sistem bager-kamion kao tehnološki najbolje i ekonomski jedino opravdano rešenje u procesu upravljanjem tokom materijala (rude i jalovine). Manevarske sposobnosti i autonomija u radu sistema bager-kamion, u ovakvom okruženju, dolaze do punog izražaja. Relativno mali prostor i često menjanje lokacije otkopavanja, a neretko i istovara i odlaganja jalovine, pogoduju bagerima kašikarima i kamionima. Mala prednost u ovakvim slučajevima se može dati hidrauličnim u odnosu na užetne bagere, s obzirom da kao pogonsko gorivo mogu koristiti dizel (užetni bageri su isključivo pogonjeni električnom energijom) čime u uslovima slabe infrastrukture mogu ostvariti veću autonomiju.

Nosivost tla kao i litoloških komponenti od kojih je ležište sačinjeno, bitno mogu uticati na odabir utovarno-transportnog sistema. Diskontinualni sistemi su po ovom pitanju u nepovoljnijem položaju od kontinualnih sistema. Ovo se posebno odnosi na opremu na pneumaticima odnosno pre svega na kamione i utovarače. U određenim slučajevima, kao što je otkopavanje a posebno odlaganje jalovine, male nosivosti čije su osobine takve da obezbeđuju direktno otkopavanje, sa često velikim sadržajem nevezane vlage (loši efekti odvodnjavanja, na kopu i odlagalištu ili česte padavine) u potpunosti mogu diskvalifikovati upotrebu kamiona a time i celokupnog sistema. U ovakvim slučajevima eventualna upotreba kombinovanih sistema, nameće se kao značajna alternativa. Ipak i u uslovima smanjenje nosivosti, eventualna upotrebljivost sistema utovarna mašina – kamion, u mnogome se može

ponovo aktuelizovati planiranjem upotrebe opreme manjih gabarita, odnosno manjeg kapaciteta.

Zaleganje i struktura ležišta takođe bitno mogu uticati na odabir i implementaciju tipa utovarno-transportne opreme. Geološki kompleksna ležišta, sa krajnje nepravilnim oblikom orudnjenja, ili značajnim brojem proslojaka, rezultuju nepravilnim oblikom površinskih kopova i generalno složenom proizvodnjom. Eksploatacija u ovakvim uslovima, najčešće je organizovana duž više lokacija na površinskom kopu. Za ovakve uslove karakteristična je velika organizaciona složenost proizvodnje u smislu postizanja projektovanih kapaciteta i željenog kvaliteta. Manevarske sposobnosti kao i velika fleksibilnost sistema utovarna mašina-kamion, u ovakvim uslovima ponovo dolaze do izražaja. Relativno lako premeštanje otkopne opreme i upravljanje kapacitetima više proizvodnih sistema, kroz optimizovanu distribuciju kamiona, povećava neophodnu fleksibilnost i osigurava postizanje proizvodnjih ciljeva.

Karakteristika mnogih ležišta (pre svega metaličnih) je strmo zaleganje. Površinski kopovi oko ovakvih ležišta karakterišu se generalno malom površinom u planu u odnosu na svoju veliku dubinu (visinska razlika između otkopne i izvozne tačke na površinskom kopu). Uglovi nagiba završne kosine, kod ovakvih kopova proizvod su geomehaničkih karakteristika, i pored toga što variraju od kopa do kopa, generalno su strmi sa uglovima preko 30° . Kombinacija ova dva faktora velike dubine (često i preko 200 m) kao i značajnog nagiba završne kosine, čine tehnološku operaciju izvoza materijala složenom i ekonomski zahtevnom. Na ovakvim površinskim kopovima, upotreba kamionskog transporta otkopanog materijala sa dna na površinu, je praktično neophodnost. Alternativna rešenja čak i ako postoje podrazumevaju tehnološki složene specijalne izvedbe, koje najčešće nisu ekonomski opravdane.

Složenost proizvodnje i radni uslovi najčešće su indirektna posledica karakteristika ležišta, ali i složenosti eksploatacije konkretne mineralne sirovine, kao i organizacionih uslova na kopu. Površinski kopovi se često karakterišu postojanjem više transportnih relacija (od svakog otkopnog mesta do drobiličnog

postrojenja, potencijalno više deponija, do unutrašnjeg i više spoljašnjih odlagališta), potrebom generisanja više različitih granulacija materijala i više klasa kvaliteta, eksploatacijom duž različitih visina etaža i zona sa različitim geomehaničkim karakteristikama, eksploatacijom više različitih mineralnih sirovina, složenim proizvodnim ciklusom koji podrazumeva optimizaciju utovara i transporta sa ostalim tehnološkim elementima proizvodnje (sa eksproprijacijom zemljišta, bušenjem i miniranjem, odvodnjavanjem, sa kapacitetima u preradi itd.). U ovako složenim radnim uslovima, fleksibilnost sistema utovarna mašina-kamion, omogućava lakšu organizaciju i planiranje, odnosno dostizanje proizvodnih ciljeva.

Sa opadanjem kvaliteta ležišta, posebno aktuelan postaje problem upravljanja kvalitetom mineralne sirovine u samom kopu tokom tehnološke faze otkopavanja. Na ovaj način se smanjuju troškovi prerade i povećava iskorišćenje korisne mineralne sirovine, ali u isto vreme i povećava složenost proizvodnje. Postizanje zadovoljavajućeg kvaliteta, često podrazumeva otkopavanje na više lokacija ali i selektivnu eksploataciju duž pojedinačnih etaža. Kod materijala koji se predhodno mora minirati, proces upravljanja kvalitetom često je čvrsto vezan za optimizaciju visine etaže. Značajem visine etaže bavili su se mnogi autori (Li, 1995, Hustrulid, Kuchta, 1998, Kose et al., 2005, Soltanmohammadi et al., 2010). Veća visina etaža omogućavaju veću produktivnost, podrazumeva kapacitativniju opremu a time smanjuje broj potrebnih jedinica opreme kao i kompleksnost organizacije rada. Thompson je pri razmatranju visine etaže i produktivnosti dao tabelarni prikaz najčešćeg odnosa zapremine kašike prema visini etaža. Imajući u vidu sve nabrojeno, može se zaključiti da kroz povećanje produktivnost, veća visina etaže, povoljno utiče i na smanjenje ukupnih troškova otkopavanja. Negativni efekti povećanja visine etaža su opadanje mogućnosti selektivne eksploatacije, povećavanje razblaženja rude, podrazumeva kapacitativniju opremu a time i više radnog prostora, negativno utiče na geomehaničku sigurnost. U skladu sa napred navedenim ne iznenađuje činjenica da se duž istog površinskog kopa mogu javiti etaže različite visine, kao i etaže promenljive visine (etaže sa kojih se otkopava i ruda i jalovina, na promenljivim segmentima). Fleksibilnost sistema utovarna mašina-kamion i ovde ima veliki značaj i preporučuje ovakav tip sistema, ispred

nekim drugim tehnološkim varijanti, kao što je otkopavanje bagerom dreglajnom ili kontinualnom opremom.

Sem promene visine etaže, menadžment kvaliteta u kopu može se vršiti i selektivnom eksploatacijom slojeva duž iste etaže (često u eksploataciji ugljeva). Ovakva tehnologija podrazumeva direktno otkopavanje (bez predhodnog miniranja). I pored toga što se određen nivo selektivnosti može postići i kontinualnom mehanizacijom (rotorni bager, bager vedričar, kombajn) znatno precizniji nivo a time i povoljnije rezultate obezbeđuje upotreba diskontinualnog sistema hidraulični bager – kamion. Upotreba hidrauličnog bagera je često i jedina solucija za slučajeve kada vrsta materijala i geometrija kopa isključuje upotrebu kontinualnih sistema.

Organizacija i radni uslovi takođe mogu značajno definisati odluke o upotrebi određenog tipa opreme na kopu. Zavisno od projektovane geometrije kopa, radne etaže i platoi mogu biti pod nagibom. Shodno većoj kompaktnosti i autonomnosti, ovakvi radni uslovi generalno pogoduju diskontinualnom tipu opreme. Maksimalni nagib u radu, kod kontinualnih utovarno-transportnih sistema jednak je zapravo maksimalnom nagibu kritičnog elementa sistema (obično između 3% i 5%). Od diskontinualnih tipova utovarne opreme, najmanju osetljivost na nagib u radu imaju utovarači, što je direktna posledica kretanja na točkovima.

Nivo angažovanja pomoćne mehanizacije na pripremnim radovima, održavanju transportnih komunikacija, nivo izvršenja operacija koje predhode otkopavanju, utovaru i transportu su takođe faktori koji definišu uslove rada utovarno-transportnih sistema. Ako je podloga duž koje se kreće utovarna mehanizacija u lošem stanju, sa pojavom razbacanih komada stenskog materijala različite granulacije i vodenim površinama koje sprečavaju vidljivost same podloge po kojoj se oprema kreće, mogućnost primene utovarača na točkovima je u značajnoj meri otežana. Opisani uslovi radne sredine, u značajnoj meri dovode do oštećenja točkova na utovaračima, što se kroz zastoje i povećanu amortizaciju pneumatika negativno odražava na produktivnost i performanse poslovanja.

Ekonomski faktori Imajući u vidu značajan udeo u kapitalnim troškovima, koji je generisan nabavkom rudarske opreme, kao i različit radni vek pojedinih tipova opreme, jasan je značaj optimizacije tehnoloških elemenata sistema eksploatacije. Sistemi koji se zasnivaju na primeni utovarne mašine i kamiona, po pravilu iziskuju manja kapitalna ulaganja nego kada su u pitanju kontinualni sistemi ili direktno prebacivanje otkopanih masa bagerom dreglajnom. Ovo u velikoj meri dolazi do izražaja kod površinskih kopova koji nemaju dug vek eksploatacije, odnosno kada je rok povraćaja kapitalnih investicija mali. Takođe, prilikom odabira opreme, treba u obzir uzeti i odnos amortizacionog perioda opreme sa vekom eksploatacije. Pri ovome ne smeju se iz vida izostaviti operativni troškovi rada, troškovi radne snage i održavanja koji su često znatno veći kod sistema utovarna mašina-kamion, nego kod drugih tipova utovarno-transportnih sistema.

Vrednost korisne mineralne sirovine U velikom broju tehnoloških šema rada, primenjenih na postojećim površinskim kopovima, utovarno-transportni sistemi bager (utovarač) – kamion, angažovani su samo na utovaru i transportu rude, dok se procesi otkopavanja i transportovanja jalovine, vrše kontinualnim sistemima ili bagerom dreglajnom. Kako je već napomenuto sistem utovarna mašina-kamion, ima velike operativne troškove, u poređenju sa drugim sistemima. Iz ovoga razloga veoma je bitno da korisna mineralna sirovina ima značajnu vrednost, kako bi mogla da opravda veće operativne troškove rada sistema utovarna mašina-kamion. Na ovaj način, zahvaljujući fleksibilnosti i dobrim manevarskim karakteristikama sistema bager – kamion, osigurava se stabilna proizvodnja rude. Treba imati u vidu, da po pravilu, količine rude (pogotovo kada je vrednost korisne mineralne sirovine značajna) predstavljaju samo manji deo ukupno otkopanih masa, tako da i povećani operativni troškovi ne utiču značajno na ukupne troškove.

Rizik poslovanja Thomson (2005) kao i Fox (2011) napominju da se upotrebom sistema bager (utovarač) - kamion, značajno smanjuje rizik eventualnog nepostizanja projektovanih, proizvodnih ciljeva. Ovakva situacija proizvod je izuzetno velike fleksibilnosti koju sistem bager (utovarač) - kamion, ima u odnosu na druge sisteme. Thompson napominje da nije previše teško stvoriti uslove za funkcionisanje ovoga sistema, i da čak i u uslovima kada sistem bager (utovarač) -

kamion, ne predstavlja optimalno rešenje, njegove pozitivne karakteristike ostavljaju najviše prostora za ispravku grešaka generisanih u procesu planiranja.

Sa odabirom tipa sistema utovarna mašina - kamion, dileme vezane za definisanje svih elementa utovarno-transportnog sistema su samo delimično rešene. U opštem slučaju odabir utovarne mašine svodi se na tri alternative i to užetni i hidraulični bager ili utovarač. Sva tri tipa mašina imaju svoje prednosti i nedostatke, što ih i kandiduje kao optimalne za određene slučajeve eksploatacije.

Užetni bageri kašikari imaju dugu tradiciju primene na površinskim kopovima. Proverena i relativno prosta konstrukcija ovih mašina, čini ih veoma pouzdanim. Tokom velikog dela radnog veka, uz primenu pravilnog održavanja, moguće je držati raspoloživost užetnog bagera na preko 90%. Robusna konstrukcija, znači i veliku težinu mašine, kao i velike kapitalne troškove, ali u isto vreme utiče i na dug radni vek, koji iznosi i preko 20 godina. Zbog svoje veličine, ali i značajnih kapitalnih troškova, pogodni su za angažovanje na srednjim i većim površinskim kopovima. Na malim kopovima, kratkog veka i malih projektovanih kapaciteta, obično ne predstavljaju optimalno rešenje. U odnosu na hidraulične bagere i utovarače, imaju znatno veće kapacitete, bolju preglednost ali im je mobilnost delom ograničena zbog isključivog pogona na električnu energiju. Mogu raditi u širokom opsegu radnih uslova. Rade isključivo u rastresitom materijalu i nisu sposobni za selektivno otkopavanje.




Hidraulični bageri karakterišu se izuzetno dinamičnim razvojem proteklih par decenija. U značajnoj meri konkurišu užetnim bagerima po mogućem kapacitetu rada. Značajno su složenije konstrukcije, kompaktnijih gabarita, manje težine i specifičnog pritiska na tlo u odnosu na užetne bagere. Kapitalni troškovi pri nabavci hidrauličnih bagera su mnogo povoljniji nego kod užetnih bagera, ali im je amortizacioni vek, neuporedivo kraći. Zavisno od uslova rada, nivoa održavanja i godišnjeg fonda rada, amortizacioni period im se kreće oko 50.000 radnih sati (5-7 godina rada). U početnim godinama rada i uz dobro održavanje, raspoloživost im se može održavati u rasponu od 80-90%. Nažalost sa približavanjem kraju amortizacionog perioda, raspoloživost im značajno opada i uobičajno je da tokom

zadnje godine rada raspoloživost kreće na samo oko 60%. Operativni troškovi rada osetno su veći nego kod užetnih bagera. Zbog mogućnosti korišćenja dizela kao pogonskog goriva, imaju potencijalno veću autonomiju od užetnih bagera, a zbog manjih gabarita i manevarske sposobnosti su im bolje. Takođe, u velikom broju izvedbi za pogon se koristi električna energija, čime se značajno smanjuju operativni troškovi rada. Za razliku od užetnog bagera i utovarača, imaju mogućnost direktnog otkopavanja i jedini uspešno mogu da izvode selektivnu eksploataciju otkopavanjem pojedinačnih slojeva sa čela etaže.

Utovarači na točkovima uz spomenute hidraulične bagere, prolaze takođe kroz dinamičan razvoj, posebno inteziviran u proteklih 20-tak godina. I pored toga što je opseg moguće primene utovarača, znatno uži nego kod užetnih i hidrauličnih bagera, često su angažovani na površinskim kopovima, ali retko kao glavna utovarna mašina. Osnovna komparativna prednost ovoga tipa opreme leži u njihovoj mobilnosti, zbog čega mogu da se koriste i kao samostalno utovarno ali i transportno sredstvo. Ovakva tehnologija opravdana je samo do dužina od 200 m. Najbolje karakteristike postižu sa radom u rastresitom, predhodno miniranom materijalu. Kako se kreću na točkovima, osetljivi su na radne uslove i nosivost tla. Kapacitativno jako zaostaju za hidrauličnim a posebno užetnim bagerima kašikarima (zbog manje zapremine, a većeg ciklusa kašike). Operativni troškovi rada utovarača su veliki i u mnogome određeni tehnološkom šemom rada, a pouzdanost i amortizacioni vek su im uporedivi sa hidrauličnim bagerima.

Rekapitulacija i uporedni pregled navedenih karakteristika, prednosti i nedostataka za užetni i hidraulični bager kao i za utovarač data je u tabeli 3.3.

Tabela 3.3 Komparacija karakteristika užetnog i hidrauličnog bagera i utovarača

Kriterijum	 Užetni bager	 Hidraulični bager	 Utovarač
Tip materijala	Rasteresit, predhodno miniran	Kompaktan i rastresit materijal.	Rasteresit, predhodno miniran
Specifičan pritisak na tlo	200 - 400 kPa	100 - 240 kPa	400 - 550 kPa
Radni uslovi i temperatura lokacije	Nivelisano tlo, moguće prisustvo komada i vodenih površina	Nivelisano tlo, moguće prisustvo komada i vodenih površina	Relativno nivelisano tlo, bez prisustva komada i vodenih površina, dobra nosivost tla
Visina etaže	Visoka (20+m)	Visoka (20+m)	30% manja
Selektivnost	Slaba – otkopavanje od nožice ka vrhu etaže	Dobra – otkopavanje selektivnih slojeva na etaži.	Slaba – otkopavanje od nožice ka vrhu etaže
Brzina kretanja	Niska – oko 3 - 4 km/h	Niska - oko 3 - 4 km/h	Visoka - do 35 km/h
Preglednost	Veoma dobra	Dobra	Ograničena
Dubinski rad	Ograničena, izrada rampe	Da, sa obrnutom kašikom	Ne
Radni vek	Oko 20. godina Preko 100.000 h	Od 7 – 9 godina Do 50.000 h	Od 7 – 9 godina Do 50.000 h
Vreme ciklusa utovara	30-45 sekundi	30-40 sekundi	40-60 sekundi
Pogonsko gorivo, autonomija	Električna energija, Ogrenačena autonomija	Dizel, Električna energija, Dobra / Ogrenačena autonomija	Dizel, Dobra autonomija
Zapremina kašike	Maksimalno $V = 70,3 \text{ m}^3$ (Joy P&H 4800XPC)	Maksimalno $V = 45 \text{ m}^3$ (Bucyrus RH400)	Maksimalno $V = 40,5 \text{ m}^3$ (LeTourneau L-2350)
Održavanje i raspoloživost	Prostija, proverena konstrukcija-manje kvarova, Preko 90% veoma dugo.	Složenija konstrukcija – više kvarova, Rapoloživost opada sa svakom godinom rada Od 90 - 60%	Složenija konstrukcija- više kvarova,, Rapoloživost opada sa svakom godinom rada Od 90 - 60%

Kada je izbor kamiona u pitanju, čak i pored postojanja više tipova, problem se obično svodi na definisanje veličine kamiona. Sama veličina kamiona je u snažnoj zavisnosti od veličine utovarne mašine, što broj mogućih rešenja značajno smanjuje i olakšava rešavanje problema.

3.2.3. Definisanje veličine opreme u sistemu utovarna mašina – kamion

Odabirom sistema utovarna mašina-kamion, i definisanja konkretnog tipa utovarne mašine, samo delom je rešen problem potpunog definisanja diskontinualnog utovarno-transportnog sistema. Dalje definisanje utovarno-transportne opreme svodi se na određivanje kapacitativne klase, odnosno veličine pojedinačnih elemenata sistema.

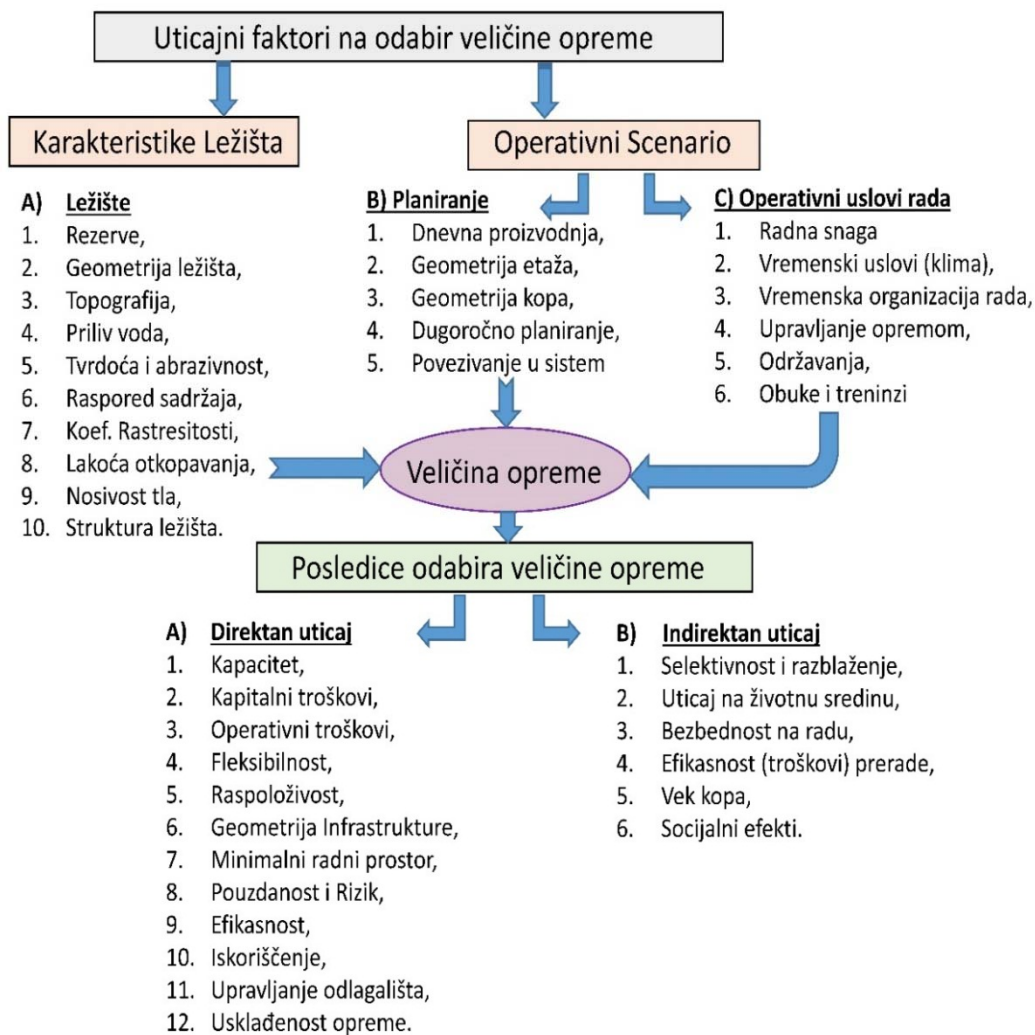
Sa naučnog, ali i praktičnog aspekta, pitanje optimizacije veličine opreme jedno je od najčešćih i najviše obrađivanih pitanja, vezanih za diskontinualni sistem utovarna mašina-kamion. Trend porasta interesovanja za pitanje optimalne veličine opreme, posebno je prisutan u zadnjih 20-tak godina o čemu govore i radovi mnogih autora (Baumann, 1999, Krause, 2001, Gilewicz, 2001, Gilewicz, 2002, Bozorgebrahimi et al., 2003, Bozorgebrahimi, 2004, Morton, 2017).

Uslovi poslovanja u rudarskoj industriji, a posebno u površinskoj eksploataciji, značajno su se promenili u poslednjih par decenija. Tržišta mnogih korisnih mineralnih sirovina, izgubila su svoj lokalni karakter i postala deo globalnog interesovanja i trgovine. Proizvodi rudarske industrije postali su osetljivi na globalni odnos ponude i tražnje, ali i na špekulacije karakteristične za ovaj oblik poslovanja. Takođe, otkopavanje mineralnih sirovina, vezano je za različite lokacije, zbog čega, na ukupan prihod poslovanja utiču i kursne razlike (Stevanović, 2015). Generalno uslovi poslovanja na globalnom tržištu generišu značajnu dozu neizvesnosti vezanu za cenu mineralne sirovine (Sabour, Wood, 2009, Sabour, Dimitrakopoulos, 2011, Kolonja et al., 2015) i time otežavaju i povećavaju rizik poslovanja.

Pored ovoga faktora, prisutan je i generalni trend opadanja kvaliteta ležišta. Današnja ležišta karakterišu se složenom strukturom, velikom dubinom eksploatacije i malim sadržajima korisne komponente. Ovakva situacija u značajnoj meri kompromituje mogućnost postizanja profita, a u isto vreme utiče na značajno povećanje troškova.

Kao odgovor na, navedene pogoršane uslove poslovanja, rudarske kompanije su pokušale da smanje troškove poslovanja, uvođenjem tehnoloških inovacija. Povećanje veličine opreme, jedan je od osnovni trendova u prilagođavanju rudarske industrije savremenim uslovima. Osnovna ideja je da se sa većim (kapacitativnijim) elementima proizvodnog sistema, može značajno promeniti produktivnost, a sa njom i jedinični troškovi po toni materijala. Princip "Veća oprema je uvek bolja" godinama je široko prihvaćen u rudarskoj praksi (Bozorgebrahimi, 2004, Morton, 2017). Ovo je posebno vidljivo na primeru diskontinualnog sistema utovarna mašina-kamion i karakteristično za dug period od zadnjih 50 godina. Krause (2001) napominje da se na svakih 10 godina (tokom poslednjih 50 god) nosivost kamiona duplirala.

Ipak mnogi autori (Bozorgebrahimi et al., 2003, Morton, 2017) sugerišu da klasa najvećih mašina, predstavlja rešenje samo na uskom broju površinskih kopova i da uvođenje veće opreme u mnogim slučajevima neće dovesti do pada troškova. Autori se slažu da značajan broj faktora, utiče na odluku o veličini opreme, i da kapacitativnija oprema ne garantuje veći uspeh poslovanja. Bozorgebrahimi (2004) navodi osnovne faktore koje je neophodno analizirati kako bi se sakupilo dovoljno informacija o veličini opreme. Autor je takođe i naveo parametre proizvodnje na koje veličina opreme ima indirektno i direktno posledice. Definisane uslove i posledice Bozorgebrahimi je prikazao u vidu dijagrama (slika 3.5).



Slika 3.5 Uticajni faktori i posledice odabira veličine opreme

3.3. Kontinualni utovarno-transportni sistemi

Uslovi pod kojima se površinska eksploatacija vrši su sve složeniji, naročito na površinskim kopovima uglja. Oni su posledica, između ostalog, povećanja koeficijenta otkrivke, veće promenljivosti kvaliteta uglja i njegove raslojenosti. Pod tim uslovima površinska eksploatacija je vremenom napredovala ka sve većim dubinama, a da bi bila isplativa bilo je potrebno ukloniti veće količine otkrivke sa nižim jediničnim troškovima. Kako su jedini troškovi koji se sa povećanjem dubine kopa značajno povećavaju troškovi transporta, logično je da se njihovim smanjenjem umanjuju i troškovi eksploatacije jalovine (Thompson, 2005). Možda

najbolji način za kontrolu, čak i smanjenje stope porasta troškova sa povećanjem dubine je upotreba kontinualnih sistema eksploatacije.

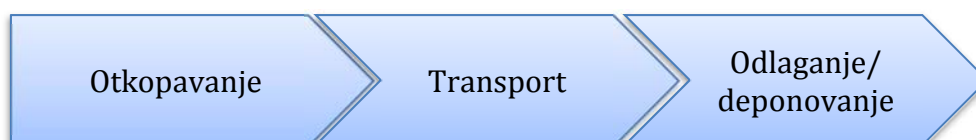
Kontinualni sistemi površinske eksploatacije su sistemi kod kojih je tok materijala neprekidan. Karakteriše ih otkopavanje tokom celog ciklusa rada za razliku od diskontinualnih gde na otkopavanje odlazi samo deo vremena jednog ciklusa. Ovu osobinu im obezbeđuje mogućnost kontinualnih otkopnih mašina da otkopavanje i istovar otkopanog materijala vrše neprekidno, umesto u ciklusima. Mehanizacija koja se primenjuje je vrlo kompleksna i najčešće izrađena po specijalnim zahtevima, jer se kontinualni sistemi moraju prilagođavati specifičnim uslovima rada (DeLilla, 1995). Oni nude priliku za velike proizvodne kapacitete pri niskim operativnim troškovima, ali se mora imati u vidu da se za njihovu uspešnu primenu moraju ispuniti određeni uslovi.

Na slici 3.3 se vidi da je za upotrebu kontinualnih sistema preduslov da materijal koji se otkopava bude takvih karakteristika da za otkopavanje nije potrebna predhodna priprema u vidu bušenja i miniranja. Prvenstveno se može koristiti za otkopavanje nekonsolidovanih, ne previše tvrdih zemljišnih formacija (pesak, glina, lignit). Kontinualni sistemi sa velikim proizvodnim kapacitetima predstavljaju najznačajnije tehnološke sisteme eksploatacije na površinskim kopovima uglja u Srbiji, sa čime se slažu Ignjatović i dr. (2007). Značajno je napomenuti njihovu ulogu na površinskim kopovima na kojima se vrši homogenizacija uglja (Benndorf, 2011, Benndorf et al., 2015). Za materijale koji su čvršći uvodi se mogućnost kombinovanja kontinualnog transporta sa cikličnim otkopavanjem, kakav je primer dao Stevanović i dr. (2012). Upotreba kontinualnih utovarno-transportnih sistema površinske eksploatacije mogla bi ugrubo biti sistematizovana kao u tabeli 3.4 (Niemann-Delius, 2006).

Tabela 3.4 Upotreba kontinualnih utovarno-transportnih sistema

Materijal	Nekonsolidovani (jalovina, lignit, glina, pesak, šljunak)		Konsolidovani (jalovina, krečnjak, ugalj)	Aluvijonska ležišta (podvodna eksploatacija)
	Rotorni bager, vedričar	Rotorni bager, vedričar		
Otkopavanje	Rotorni bager, vedričar	Rotorni bager, vedričar	Kombajn (WSM)	Bager za podvodno otkopavanje
Transport	Transporter sa trakom	Transportni most	Transporter sa trakom	Transporter sa trakom ili cevovod
Odlaganje	Odlagač/ Deponijska mašina	Sa ili bez odlagača	Odlagač/ Deponijska mašina	Odlagač

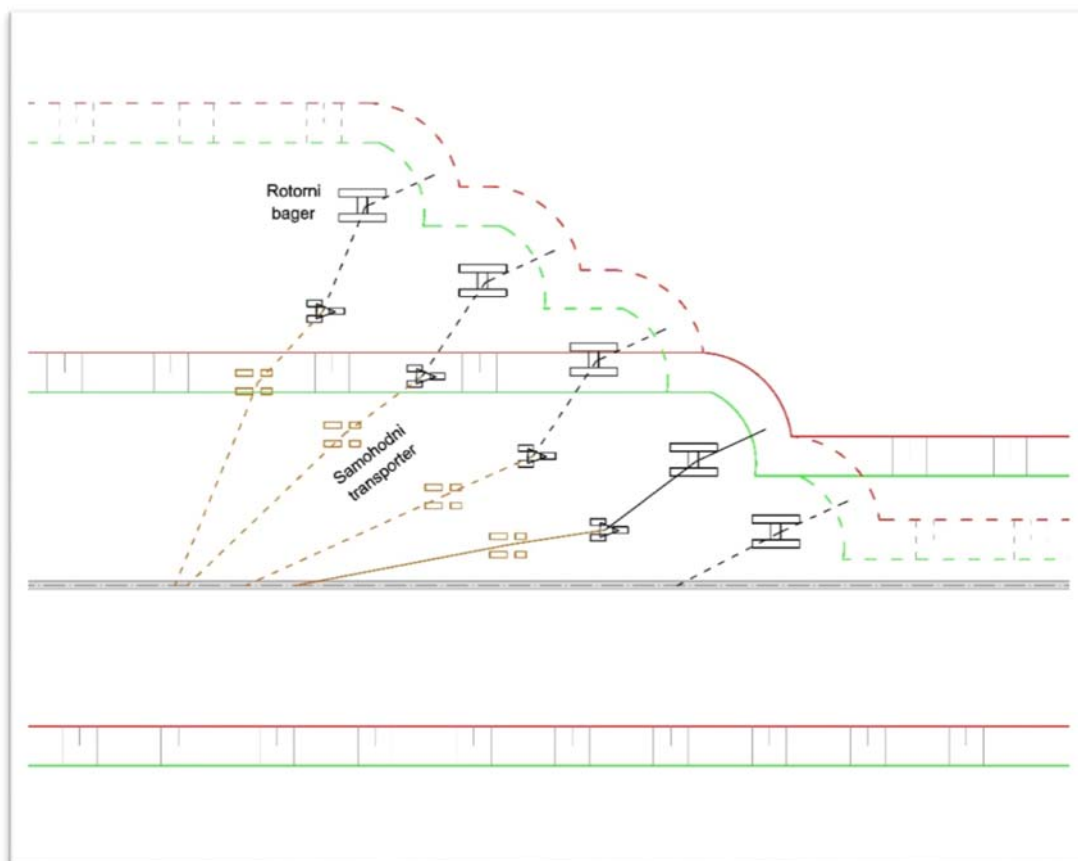
Kontinualni sistemi površinske eksploatacije se najčešće sastoje od rotornog bagera ili bagera vedričara, transporter sa trakom i odlagača, u slučaju jalovinskih sistema, ili deponijske mašine, u slučaju ugljeva. Zapravo to je skup tri podsistema (slika 3.6) koji rade u "serijskoj" vezi (seriji, nizu) i formiraju neprekidan protok otkopavanog materijala. Mogu sadržati i više bagera u sebi, proizvoditi više proizvoda ili rovnih materijala, vrlo su kompleksni i odražavaju jaku međusobnu zavisnost između činilaca (Shishvan, Benndorf, 2014). Tokom dugog niza godina posvećenog razvoju površinskih kopova lignita dokazano je da su kontinualni sistemi sa rotornim bagerima i transporterima sa trakom najefikasniji utovarno-transportni sistem za ove potrebe (Kawalec, 2004). Naročito značajnu ulogu imaju na površinskim kopovima lignita na kojima se vrši homogenizacija, gde im je glavni cilj da ostvare postavljene zahteve sa minimalnim troškovima i uticajem na životnu sredinu, mešanjem više slojeva sa više etaža i različitom raspodelom kvaliteta u optimalnom odnosu (Benndorf, 2013).



Slika 3.6 Podsistemi površinske eksploatacije

Zbog svoje robusnosti, ovi sistemi su najefikasniji u radu u dugim otkopnim frontovima. U zavisnosti od prirode ležišta i konstrukcije kopa, otkopavanje se ostvaruje paralelnim ili radijalnim operacijama. Ove dve metode otkopavanja često se mogu i kombinovati.

Paralelno otkopavanje podrazumeva paralelno pomeranje etažnih transportera, pri čemu se bager kreće duž transportne linije i otkopava blok konstantne širine. Pri svakom pomeranju etažnih transportera potrebno je produžiti ili skratiti vezni transporter, u zavisnosti od pravca napredovanja otkopavanja u odnosu na poziciju odlagališta/deponije. Kako bi se broj pomeranja etažnih transportera smanjio, bager može da radi u kombinaciji sa samohodnim transporterom, koji pravi vezu između bagera i transportnog sistema (slika 3.8)



Slika 3.8 Rad rotornog bagera u kombinaciji sa samohodnim transporterom

Radijalno otkopavanje se koristi u slučaju da zbog prostiranja ležišta ili nekih nesavladivih prepreka na terenu (objekti od istorijskog ili javnog značaja) nije moguće ostvariti pravilnu paralelnu formu. Pri radijalnom načinu rada vezne transportere nije potrebno često menjati, jer se etažni transporteri pomeraju kružno oko pretovarnog mesta ka veznim transporterima. Međutim kod ovog načina rada se ne mogu ostvariti maksimalni kapaciteti sistema, jer bager ne otkopava uvek istu širinu bloka, već se ta širina prema pretovarnom mestu smanjuje.

3.3.1. Definisanje i dimenzionisanje sistema

Kontinualni utovarno-transportni sistemi površinske eksploatacije su vrlo kompleksni sistemi i njihovo definisanje, kao i njihovih parametara, predstavlja složen zadatak. On mora obuhvatiti nekoliko analiza (Pavlović, Ignjatović, 2012):

- uslova radne sredine sa aspekta raznih karakteristika ležišta (geoloških, inženjersko-geoloških, hidrogeoloških, kvalitativnih i drugih) na širem prostoru,
- primene savremenih sredstava i tehnologija eksploatacije u konkretnim uslovima radne sredine i u realnom vremenu,
- vremenske slike stanja sistema eksploatacije,
- ekonomskih parametara sistema.

Nosilac proizvodnje kontinualnih utovarno-transportnih sistema je bager kontinualnog dejstva. Samim tim je logično dimenzionisanje sistema i odabir opreme krenuti od te pozicije. Pravilan izbor bagera predstavlja maksimalnu prilagođenost bagera uslovima radne sredine i rudarsko-tehnološkim zahtevima (Jovančić, 2004). Suštinski se dimenzionisanje celog sistema svodi na odabir bagera, jer su svi prateći elementi kontinualnog utovarno-transportnog sistema, na određen način zavisni od performansi odabranog bagera. Kako je tok materijala kod ovih sistema neprekidan, transportni deo sistema, što je najčešće sistem transportera sa trakom (jedan ili više njih), mora biti u mogućnosti da neprekidno prihvata otkopani materijal sa bagera i da ga, na svom drugom kraju, preda

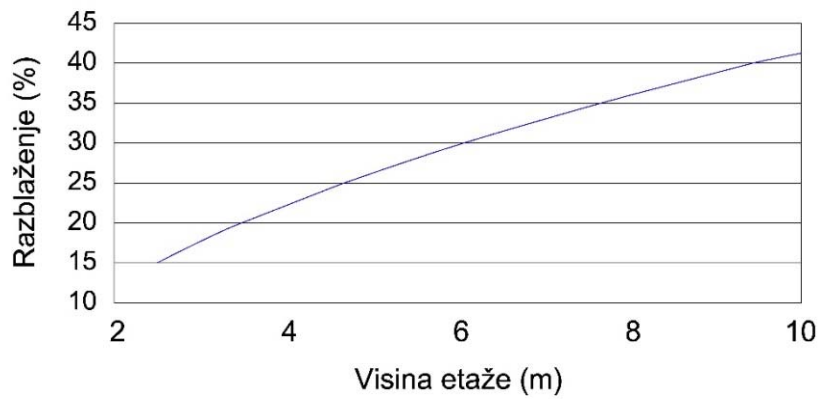
odlagališnoj ili deponijskoj mašini, zavisno od toga na kom je materijalu sistem primenjen. Iz navednog se zaključuje da je od pravilnog izbora bagera zavisi kapacitet i ekonomičnost rada celog sistema.

Faktori koji mogu uticati na proces odabira opreme kontinualnih sistema su: parametri radne sredine kao što su: lakoća otkopavanja materijala, postojanje mogućnosti selektivnog otkopavanja određenog stepena (u smislu koja je min debljina proslojka koji se može selektivno otkopati), zaleganje ležišta, visine etaža, raslojenost sloja, nosivost tla; zatim potreban kapacitet proizvodnje i zahtevi po pitanju produktivnosti, kao i kapitalni i operativni troškovi.

Kada je reč o kapacitetu proizvodnje kao o jednom od glavnih faktora pri izboru otkopne mehanizacije, on najčešće zavisi od potražnje potrošača. U velikim kopovima uglja to su obično termoelektrane – njihovi zahtevi određuju potreban eksploatacioni kapacitet kopa, koji se u zavisnosti od složenosti sistema eksploatacije raspoređuje na jedinične sisteme.

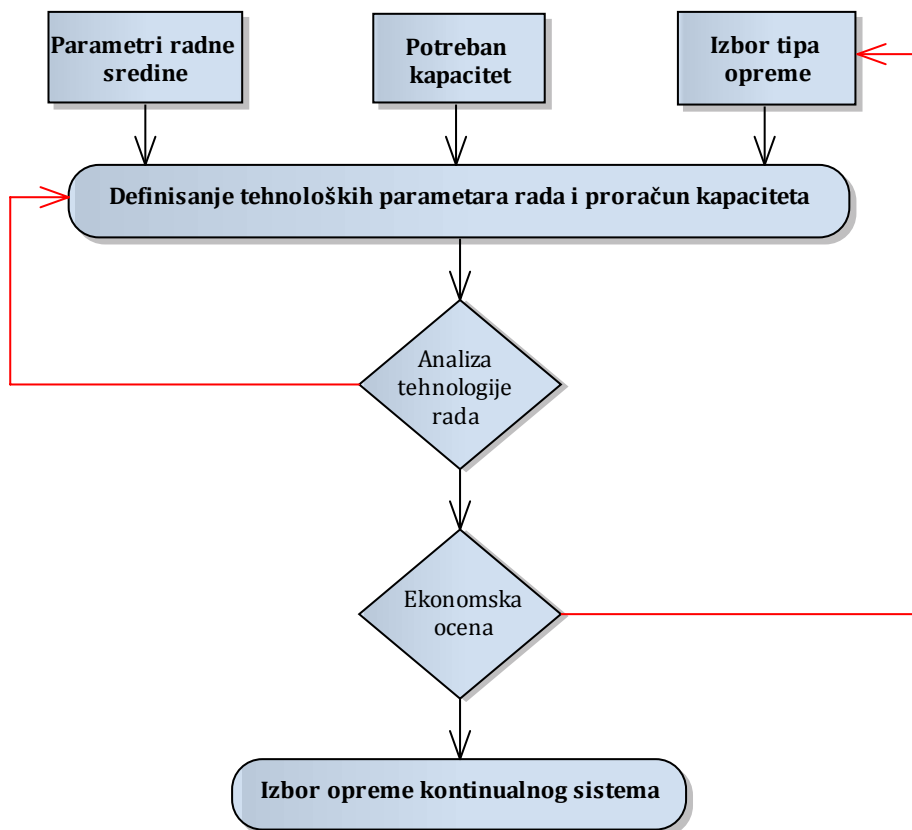
Uz kapacitet proizvodnje, veliku ulogu u izboru opreme ima lakoća otkopavanja materijala, jer su kontinualne otkopane mašine (osim kombajna) prilično ograničene po pitanju čvrstoće materijala. Kao što je napomenuto ranije, materijali u kojima su primenljivi ovi sistemi su pesak, glina, lignit i slično.

Mogućnost selektivnog otkopavanja je jedna od prednosti površinskog otkopavanja. Primenom velike opreme, kao što su rotorni bageri u kontinualnim sistemima, forsira se primena velikih otkopnih blokova, što rezultira mešanjem rude i jalovine, odnosno razblaženjem rude. Na dijagramu (slika 3.9) je data zavisnost između visine etaže i procenta razblaženosti (Bozorgebrahimi et al., 2003). Selektivno otkopavanje ublažava nivo razblaženosti i povećava iskorišćenje ležišta, jer je moguće otkopati više rude. U tom smislu je poželjno da otkopna oprema ima dovoljno malu vrednost za minimalnu debljinu selektivno otkopanog proslojka.



Slika 3.9 Zavisnost razblaženja od visine etaže

Na slici 3.10 dat je uprošćeni algoritam kojim je moguće vršiti izbor kontinualnih sistema sa selektivnim radom, gde su uključeni svi pobrojani uticajni faktori.



Slika 3.10 Algoritam za izbor kontinualnih sistema

Ulazne podatke čine strukturne i fizičko-mehaničke osobine radne sredine, kapacitet koji je potrebno ostvariti i podaci vezani za izbor opreme koji obuhvataju kinematsko-konstruktivne karakteristike bagera (Pavlović, Ignjatović, 2012). Analiza tehnologije selektivnog rada ispituje uslove rada sa gubicima i razblaženjem. Na kraju pozitivna ekonomska ocena vodi do konačnog izbora opreme kontinualnog sistema.

Kada je izabrana oprema koja će vršiti otkopavanje, dalje se prema uslovu kapaciteta (3.1) vrši dimenzionisanje kontinualnog transportnog sistema, tako da svaki naredni uređaj koji prihvata materijal sa transportera se dimenzioniše u odnosu na kapacitet prema sledećoj relaciji:

$$Q_{\text{bagera}} < Q_{\text{transportera}} < Q_{\text{odlagača}} \quad (3.1)$$

3.3.2. Kontinualna otkopno-utovarna oprema

Otkopavanje materijala kontinualnim dejstvom se obavlja mašinama koje su po konstrukciji takve da nemaju potrebu za prekidanjem ciklusa otkopavanja da bi izvršile utovar u transportno sredstvo, već se otkopavanje obavlja tokom celog radnog ciklusa. Ova konstruktivna karakteristika, između ostalog, čini kontinualne sisteme visoko produktivnim.

Osnovne prednosti ovih mašina su veliki jedinični kapacitet, manja specifična masa, manja specifična potrošnja energije, visoka produktivnost i jeftinije otkopavanje materijala u odnosu na diskontinualne bagere (Simonović, 1967). Klasifikacija otkopno-utovarne opreme može se vršiti prema više kriterijuma (Ignjatović, 2012): konstrukcije radnog organa, tipu uređaja za transport, načinu pogona, načinu kopanja i drugim. Prema osnovnom kriterijumu konstrukcije radnog organa, nosioci otkopavanja pri kontinualnoj tehnologiji površinske eksploatacije su:

1. - rotorni bageri
2. - bageri vedričari
3. - kombajni (eng. Surface miner)

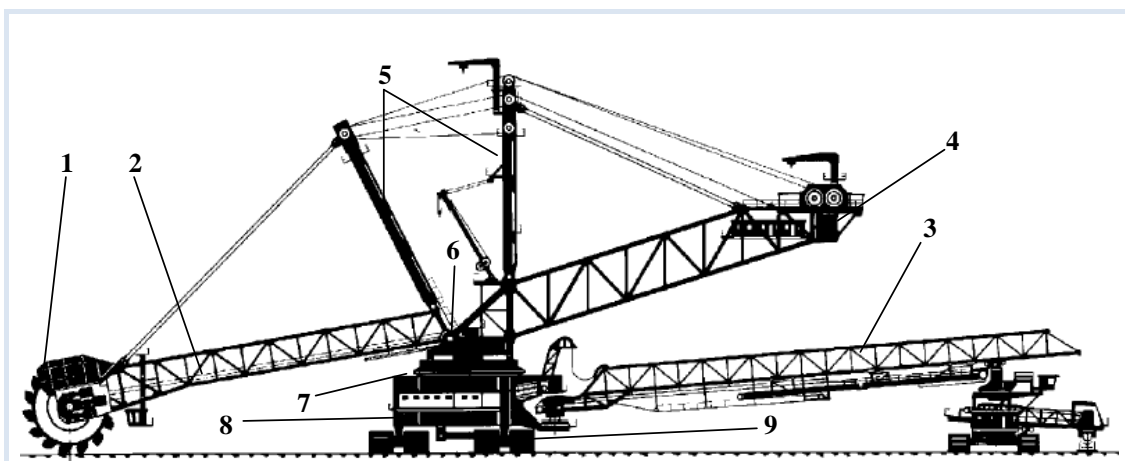
Rotorni bageri i bageri vedričari mogu otkopavati visinski i dubinski u odnosu na nivo stajanja, dok su kombajni takve konstrukcije da mogu kopati samo dubinski i to relativno male dubine. U daljem tekstu dat je prikaz osnovnih karakteristika ove opreme.

3.3.2.1. Rotorni bager

U jednom od prvih sveobuhvatnih izdanja o rotornom bageru (Rasper, 1975), autor ove bagere naziva odgovarajućim spojem konstruktivne, mehaničke, električne i elektronske tehnologije, čija je napredna faza razvoja bazirana je na saradnji najboljih inženjera u svakoj od ovih oblasti inženjeringa. Rotorni bager je samohodna otkopno-utovarna mašina za površinsku eksploataciju meke jalovine i korisne mineralne sirovine kontinualnih dejstvom. Zavisno od primenjene tehnologije rada, on može da otkopava i u isto vreme transportuje materijal na određeno rastojanje, direktnim prebacivanjem u odkopan prostor, mada je mnogo učestalija tehnologija istovremenog otkopavanja, transporta i utovara odkopanog materijal u transportna sredstva.

Otkopavanje se vrši neprekidno ravnomerno raspoređenim vedricama, pričvršćenim po obodu rotora. Vedrice otkopavaju materijal u odrescima pri obrtanju rotora u vertikalnoj ravni i istovremenim okretanjem strele rotora u horizontalnoj ravni. Uporedo, u istovarnom delu, materijal se prazni iz punih vedrica na prijemni transporter sa trakom na streli rotora do poslednjeg istovarnog transportera. Broj transportera na samom rotornom bageru zavisi od veličine i tipa bagera (slika 3.11).

Mehanizam za kretanje rotornog bagera je najčešće gusenični, dok se broj gusenica u zavisnosti od gabarita bagera, osobina tla i načina rada, kreće od 2 do 16. Gusenični uređaj za transport ima pre svega dobre manevarske sposobnosti, pritom može da savlada relativno velike uspone i ne traži strogo isplaniranu trasu. Nasuprot tome, složenost konstrukcije, velika masa uređaja, gubici energije na transport i značajno habanje elemenata guseničnog uređaja su najveći nedostaci ovog tipa transportnog uređaja.



- | | |
|---|--|
| <p>1. rotorni točak s vedricama, koji se nalazi na rotornoj streli zajedno sa pogonom;</p> <p>2. strela rotornog točka (katarka), koja se svojim krajem oslanja na okretnu platformu (gornju gradnju);</p> <p>3. istovarna strela ili istovarni most;</p> <p>4. konzola protivtega i protivteg za uravnoteženje konstrukcije rotornog bagera u odnosu na okretnu platformu i transportni mehanizam;</p> | <p>5. nadgradnja rotornog bagera, koja služi kao oslonac za vešanje rotorne strele, konzole protivtega, istovarne strele;</p> <p>6. okretna platforma, na kojoj se nalazi oprema rotornog bagera (uređaji, oprema, postrojenja, instalacija);</p> <p>7. oslonno-okretni mehanizam na kome se nalazi okretna platforma;</p> <p>8. donje postolje (donja gradnja);</p> <p>9. transportni mehanizam</p> |
|---|--|

Slika 3.11 Osnovne konstruktivne celine rotornog bagera (Jovančić, 2004)

Razvoj i primena rotornih bagera

Konstrukcija rotornog bagera je proistekla iz ideje da se objedini mobilnost i relativno malo habanje radnog organa kod diskontinualnih bagera (sa jednim radnim elementom) i kontinualnost rada i veliki kapaciteti bagera vedičara. Od patentiranja prvog radnog točka sa vedricama (Švander, 1913, Francuska) koji je iskopani materijal u procesu obrtanja predavao transporteru sa trakom na streli rotora i prvog rotornog bagera na šinama (Humbolt, 2016, Nemačka) angažovanog na površinskom kopu Bergwitz, prošlo je više od jednog veka. Tokom tog perioda rotorni bageri su prošli nekoliko faza razvoja, čiji je kratak istorijski pregled dat u tabeli 3.5.

Tabela 3.5 Istorijski pregled razvoja rotornih bagera (Pavlović, Ignjatović, 2012)

Godina	Tehnologija
1933	Izgrađen bager $Q=760\text{m}^3/\text{h}$, visine kopanja 13m
1934	Primena troguseničnog mehanizma za kretanje
1939	Primena devetoguseničnog mehanizma za kretanje
1943	Početak proizvodnje rotornih bagera u SAD i porizvodnja bagera sa produženom strelom rotora
1951	Primena rotora polučelijskog tipa
1955	Masovnija proizvodnja, bageri za dubinski i visinski rad
1960	Rast kapaciteta, veće rezne sile

Prostor za primenu rotornih bagera je postajao veći pa su se i bageri prilagođavali raznim rudarsko-geološkim uslovima na površinskim kopovima. Neke od promena koje su obećavale bolje tehnološke mogućnosti i veće kapacitativno iskorišćenje, zbog svojih, najčešće konstruktivnih, nedostataka nisu nalazile širu primenu u rudarstvu. Primer za to su rotorni bageri sa promenljivom dužinom strele (Rasper, 1975). Takođe su u cilju poboljšanja transporta bagera konstruisani koračajući, kao i kombinovani šinsko-gusenični uređaji za transport, ali ni oni nisu našli širu primenu.

Vremenom se širila i oblast primene bagera u pogledu čvrstoće materijala koji se može direktno otkopavati. Do sada se raspon čvrstoće materijala u kojima su primenljivi rotorni bageri kretao u granicama od VI do X grupe materijala po Protođakonovu (Jovančić, 2004), što podrazumeva pesak, šljunak, glinu, lignit i ostale materijale sa čvrstoćom do 20 MPa. Svakako da i dalje postoji tendencija povećanja domena upotrebe rotornih bagera i u materijalima veće čvrstoće.

Sve veća rasprostranjenost kontinualnog rada na površinskim kopovima povlačila je za sobom i proizvodnju produktivnijih rotornih bagera, tako da je vremenom rotorni bager postao verovatno najbolja i najviše korišćena otkopno-utovarna mašina kontinualnog dejstva. U prilog ovome govore i mnogobrojne kompanije koje su se bavile ili se još uvek bave njihovom proizvodnjom ili proizvodnjom njihovih delova i celina.

Klasifikacija rotornih bagera

Klasifikacija rotornih bagera može se izvršiti prema raznim karakteristikama. U literaturi postoji dosta različitih klasifikacija: prema nameni, teoretskom kapacitetu, specifičnoj sili kopanja, mogućnostima rada bagera, položaju bagera u odnosu na planum u radu, tipu mehanizma za dizanje i spuštanje strele i drugi.

Iako nije čvrsto definisana, jedna od široko prihvaćenih podela rotornih bagera prema konstruktivnim karakteristikama je na klase (slika 3.12):

- A – kompaktni (hidraulični) rotorni bager,
- B – rotorni bageri sa C ramom,
- C – veliki rotorni bageri

Prikaz parametara po klasama dat je u tabeli 3.6 (Ignjatović, 2012). Veličina, oblik i konstrukcija rotornih bagera zavise od nekoliko parametara, a posebno od zahtevanog kapaciteta, načina utovara materijala, nagib kosina, čvrstoća otkopavanog materijala, kao i specifični pritisak na podlogu.

Tabela 3.6 Karakteristike bagera po klasama

Tip bagera	A	B	C
Kapacitet (m ³ /h)	420-6000	3600-7500	7300-22700
Pogonska masa (t)	55-1200	1200-3500	6000-14000
Prečnik rotora (m)	4,2-12	8,4-12,5	17,3-21,6
Snaga motora na rotoru (kW)	75-1000	750-1500	1500-5040
Moment na rotoru (kNm)	75-2200	2000-7000	4500-12000



izvor: www.mining.sandvik.com

Tip A



izvor: www.directindustry.com²

Tip B



Tip C

Slika 3.12 Tipovi bagera

Pri otkopavanju rotorni bageri materijal uglavnom predaju etažnim transporterima. Međutim, oni mogu raditi u kombinaciji sa različitom opremom (slika 3.13). Pored standarnog načina, mogu utovarati materijal u samohodni transporter (bandvagen), transportni most, a mogu i vršiti direktno prebacivanje u otkopan prostor, mada je ovaj način rada vrlo retko zastupljen. Direktni utovar u kamione nije preporučljiv, jer su oni ciklični i nisu kompatibilni sa kontinualnim načinom otkopavanja, mada je moguć primenom specijalnih uređaja. Samohodni transporter omogućava rotornom bageru da vrši otkopavanje na nivoima različitim od nivoa postavljanja utovarnog mesta na transporteru sa trakom. Na taj način je moguće otkopavati dva do tri puta veće visine bez promene nivoa položaja

² www.mining.sandvik.com i www.directindustry.com pristupljeno 10/02/2018

transportera. Za uspešno korišćenje rotornih bagera u površinskoj eksploataciji bitno je da prateća transportna oprema može da prihvati maksimalan kapacitet bagera. Iskustvo je pokazalo da se pouzdanost sistema povećava ako transporter koji preuzimaju materijal imaju malo veći kapacitet od bagera (Durst, Vogt, 1988).



Slika 3.13 Različiti načini rada rotornog bagera

Tehnologija rada

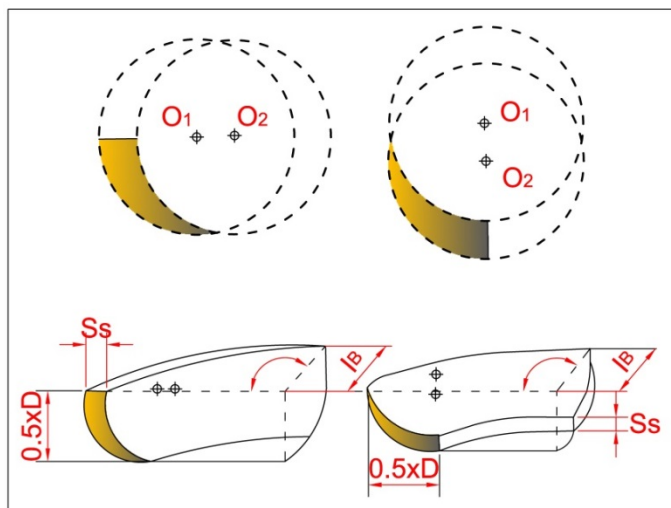
Tehnologija rada rotornog bagera je ista za sve tipove i veličine bagera sa nepromenljivom dužinom strele rotora. Elementi koji imaju uticaj na tehnologiju rada rotornog bagera su: visina otkopavanja, ugao nagiba radne kosine, širina bloka, debljina reza i prečnik rotornog točka. Rotorni bageri mogu raditi sledećim metodama: visinsko otkopavanje u bloku, frontu i boku (polubloku) i dubinsko

³ www.shutterstock.com, www.directindustry.com, www.takraf.tenova.com, www.liebherr.com, pristupljeno 20/02/18

otkopavanje u bloku. Najčešće korišćena metoda, čak se može reći i konstruktivno predodređena, je otkopavanje visinski u bloku.

Otkopavanje visinskim radom u bloku se vrši dvostranim obrtanjem nosača rotora u odnosu na osu kretanja, pri cikličnom pomeranju bagera napred-nazad, čime je ukupna visina otkopavanja podeljena na podetaže. Rad u boku izmešta osu kretanja bagera van širine otkopnog bloka i otkopavanje se vrši jednostranim obrtanjem nosača rotora u odnosu na osu kretanja, takođe iz više podetaža. Rad u frontu se izvodi tako što se rotorni bager kreće duž fronta radova i otkopava visinsku etažu stalnim kretanjem iz jednog prolaza. Ovaj način rada se retko koristi i to pre svega kod šinskih bagera.

Svaka od navedenih metoda može se izvesti otkopavanjem u horizontalnim ili vertikalnim rezovima, kao i njihovom kombinacijom (tabela 3.7). Rez se otkopava nizom odrezaka, zahvata materijala vedricom rotora u okviru ugla rezanja. Kod vertikalnog reza debljina odreska raste sa kretanjem kašike od nule do maksimalne debljine, dok kod horizontalnog debljina odreska sa maksimalne vrednosti opada do nule (slika 3.14).



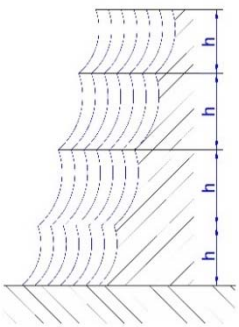
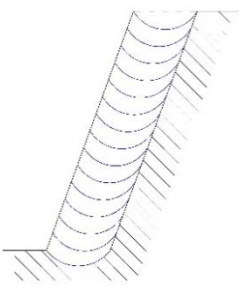
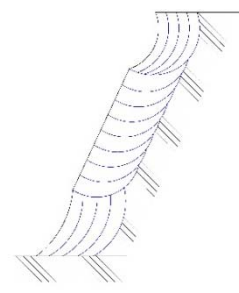
Slika 3.14 Vertikalni i horizontalni rez

Tehnološki parametri odreska su:

- h – visina odreska koja odgovara visini reza (m)
- s_s – debljina odreska (m)
- b – širina odreska (m)

Prednosti i mane vertikalnih, horizontalnih i kombinovanih rezova date su u tabeli 3.7 (Rakonjac et al.).

Tabela 3.7 Rezovi pri otkopavanju

Vrsta reza	Prednosti	Mane
<p>Vertikalni</p> 	<ul style="list-style-type: none"> -maksimalna visina kopanja -povoljni uslovi za automatizaciju tehnološkog procesa -minimalni dinamički udari na rotoru -minimalni otpor materijala na kopanje -ravan planum nakon otkopavanja donjeg reza 	<ul style="list-style-type: none"> -maksimalni broj pomeranja bagera u toku jednog tehnološkog ciklusa -veći specifični pritisak na tlo nego pri radu sa horizontalnim rezovima -nepovoljniji odnos vremena čistog rada prema vremenu pomoćnih operacija
<p>Horizontalni</p> 	<ul style="list-style-type: none"> -manji broj pomeranja bagera -povoljniji odnos vremena čistog rada prema vremenu pomoćnih operacija -manji specifični pritisak na tlo 	<ul style="list-style-type: none"> -manja visina otkopavanja pri istom nagibu strele -otežano uvođenje automatskog upravljanja -maksimalni dinamički udari na rotoru -povećani obim pomoćnih radova zbog neravnog planuma
<p>Kombinovani</p> 	<ul style="list-style-type: none"> -maksimalna visina kopanja -manji broj pomeranja nego pri radu sa vertikalnim rezovima -ravan planum nakon otkopavanja 	<ul style="list-style-type: none"> -velika složenost programiranja rada -veliki dinamički udari na rotor -maksimalni otpori na kopanje

Dubinsko otkopavanje je ograničeno maksimalnim nagibom trake transportera na streli rotora. Ograničenja u izboru parametara dubinskog bloka su u zavisnosti od dodira konstrukcije strele sa gornjom ivicom etaže ili pojedinih rezova, odnosno, od ugla nagiba strele bagera i maksimalnog prilaza begra ivici etaže. Rotorni bager može raditi dubinski i horizontalnim i vertikalnim rezovima, uz suprotno obrtanje rotora i položaja vedrica u odnosu na visinski rad. Osnovni način rada u dubinskom bloku je vertikalnim rezovima.

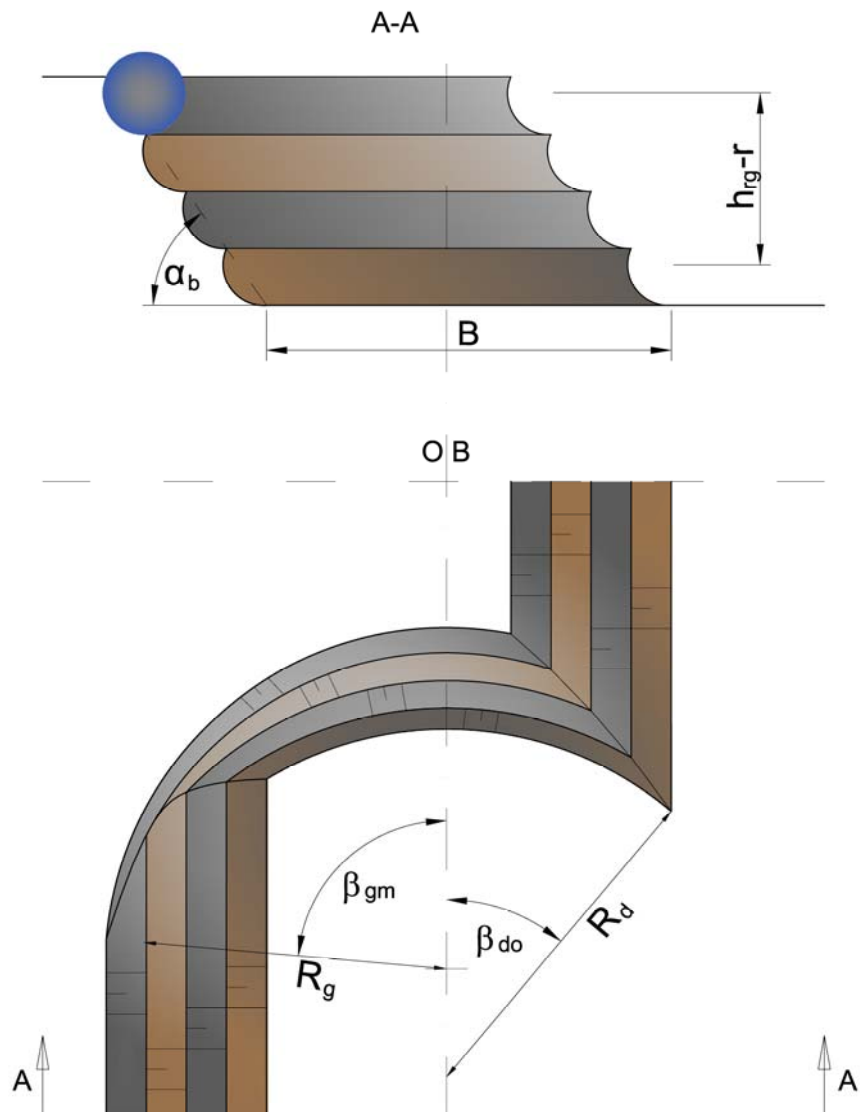
Rotorni bageri su efikasni u selektivnom radu. Tehnologija otkopavanja pri tome zavisi od ugla pada slojeva u odnosu na etažu, broja i debljine slojeva, tipa rotornog bagera. Primenjuje se otkopavanje u bloku ili boku sa vertikalnim i horizontalnim rezovima. Gubici i razblaženja zavise od tehnoloških mogućnosti bagera, s tim da su gubici pri horizontalnim slojevima do 1,5 puta manji nego pri nagnutim (Pavlović, Ignjatović, 2012)

Dominantna metoda otkopavanja je visinski u bloku (slika 3.15). Radni parametri rotornih bagera su:

- visina kopanja H_k
- maksimalni radijus kopanja R_k
- radijus kopanja na nivou stajanja R_{kh}
- dužina nosača rotora L
- radiju istresanja R_i
- maksimalna i minimalna visina istresanja H_{imax}, H_{imin}
- prečnik rotora D

Visine podetaža rotornih bagera, u smislu ispod i iznad nivoa stajanja, su ograničene dozvoljenim uglom nosača rotora. Visine rezova otkopavanja (h_i) u idealnom slučaju se kreću u rasponu $0.5D < h_i < 0.7D$. Ugao nagiba bočne kosine zavisi od radijusa otkopavanja gornjeg reza, graničnog ugla okretanja strele rotora pri otkopavanju donjeg reza i visine bloka. Ugao nagiba čeone kosine se kreće od graničnog ugla, koji zavisi od visine otkopavanja i konstruktivnih karakteristika bagera, do 90 stepeni.

Dužina otkopavanja bloka, odnosno nastup po dubini, zavisi od visine bloka i ugla nagiba čeone kosine, pri čemu treba voditi računa da ni strela rotora, ni gusenični mehanizam ne udare u čelo etaže. Ova dužina predstavlja zbir debljina pojedinačnih rezova koji formiraju pojas otkopavan u jednom nastupu bagera, posle čega se bager vraća i prelazi u sledeći pojas.



Slika 3.15 Određivanje širine bloka rotornog bagera

Širinu bloka određuju radijus kovanja gornjeg i donjeg reza, visina bloka, i uglovi nagiba bočne kosine, obrtanja strele rotora pri otkopavanju gornjeg reza prema masivu, a pri otkopavanju donjeg prema otkopanom prostoru. Maksimalna

vrednost dela bloka prema masivu se postiže pri otkopavanju prvog reza sa okretanjem strele rotora za ugao od 90° , dok je generalno optimalna veličina ovog ugla 80° . Gornja vrednost ugla obrtanja strele rotora prema otkopanom prostoru je ograničena na 50° . Ukupna širina bloka se računa po obrascu:

$$B = R_g \cdot \sin\beta_{gm} + R_d \cdot \sin\beta_{do} - (h_{rg} - r) \cdot \operatorname{ctg}\alpha_b \quad (3.2)$$

gde je:

- R_g – radijus kopanja gornjeg reza, m
- R_d – radijus kopanja donjeg reza, m
- β_{gm} – ugao obrtanja strele rotora prema masivu
- β_{do} – ugao obrtanja strele rotora prema otkopanom prostoru
- h_{rg} – visina otkopavanja merena od nivoa stajanja bagera do centra ose rotora pri otkopavanju gornjeg reza, m
- r – poluprečnik rotora, m
- α – ugao nagiba bočne kosine

Kapacitet rotornih bagera

Kapacitet kontinualnih utovarno-transportnih sistema zavisi najviše od polaznog elementa sistema, rotornog bagera. Njegov kapacitet predstavlja efekat rada izražen u m^3 ili t otkopane mase u jedinici vremena. Kapacitet se može iskazati kao teoretski, tehnički, eksploatacioni i efektivni. Na kapacitet utiče nekoliko grupa faktora: konstruktivni i kinematički parametri kopanja i transporta, fizičko-mehaničke osobine stenskog materijala, stepen usaglašenosti tehnoloških elemenata otkopavanja i parametara bagera, sistem eksploatacije i organizacija rada na površinskom kopu.

Teoretski kapacitet određuju konstruktivne i kinematičke karakteristike bagera. Dobija se kao proizvod zapremine vedrice (V) i broja istresanja u minuti (n) i izražava se u rastresitim kubnim metrima na sat:

$$Q_t = 60 \cdot V \cdot n, (rm^3/h) \quad (3.3)$$

Tehnički kapacitet dalje zavisi od faktora uticaja radne sredine i tehnologije rada bagera. On predstavlja maksimalno moguć kapacitet bagera za određeni kop, izražen u čvrstim kubnim metrima na čas. Formula za proračun je:

$$Q_{th} = Q_t \cdot k_p \cdot \frac{k_o}{k_r}, (\text{čm}^3/\text{h}) \quad (3.4)$$

gde je :
 k_p – koeficijent punjenja vedrica
 k_r – koeficijent rastresitosti materijala
 k_o – koeficijent uslova otkopavanja

Eksploatacioni kapacitet predstavlja tehnički kapacitet u koji su uključeni zastoji koji se javljaju u toku planiranog vremena rada, zbog maneverskih i pomoćnih operacija kao i neki neplanirani zastoji. Ovaj kapacitet se izražava za određeno vreme rada i računa se po formuli:

$$Q_e = Q_{th} \cdot k_v \cdot T \quad (3.5)$$

gde je:
 $k_v = (T - t_{pz} - t_{nz})/T$
 k_v – koeficijent iskorišćenja vremena
 t_{pz} – vreme planiranih zastoja, h
 t_{nz} – vreme neplaniranih zastoja, h
 T – posmatrano vreme, h

Efektivni kapacitet se računa kao odnos ukupno izmerenih otkopanih količina materijala i tačno utvrđenog efektivnog vremena rada na kraju posmatranog kalendarskog perioda.

Mogućnost primene rotornih bagera van površinskih kopova

Pored radova na otkopavanju u rudnicima za šta su rotorni bageri prvobitno dizajnirani, kroz dug niz godina njihove primene mogu se naći primeri gde su oni korišćeni za malo drugačije namene. U pitanju su radovi na premeštanju velikih količina zemlje obično pri izradi velikih saobraćajnica, koje je u svom istraživanju predstavio Rasper (1975). Takvi su primeri autoputa blizu Kortrajka u Belgiji tokom 1968, gde je za otkopavanje trase angažovan Demag-ov rotorni bager tip

430. Takođe, zbog vrlo zaglinjene podloge bilo je nemoguće transportovati mase vozilima sa pneumaticima, pa je za transport materijala izabran transporter sa trakom. Na konstrukciji zemljane brane 1969 u severnoj Holandiji, Krupov rotorni bager tip 300 je otkopavao glinoviti les paralelnim sistemom, utovarujući materijal na transporter preko bunkera. Bager je otkopavao blokove širine 14 metara sa 5 metara visine i postizao kapacitet od 300 m³/h. Rotorni bageri su na ovakvim angažovanjima radili i sa diskontinualnim transportnim sistemima. Takvi su primeri dva bagera tip 70 (O&K/LMG) na izgradnji autoputa blizu Apeldorna u Holandiji, kao i Demagovog bagera tip 430 na izgradnji autoputa Hamburg-Kil (Nemačka), koji su otkopani materijal prebacivali u kamione koji su ga dalje transportovali. Demagov bager je, u ovom slučaju, izabran kao zamena za sedam hidrauličnih bagera zapremine kašika 1,5 m³, koji bi bili potrebni za obavljanje istog posla. Treba napomenuti i angažovanje rotornih bagera na izgradnji Orovilske brane u Kaliforniji sa najvećom visinom u SAD od 235 m, zatim brane Sent Luis, Kalifornija kao i mnogih drugih primera.

Dalji razvoj rotornih bagera

Sa nominalnim kapacitetom od 240000 m³ materijala na dan, razvoj rotornih bagera u smislu veličine je stao (Niemann-Delius, 2006). Taj kapacitet ima rotorni bager SRs 8000 nemačke firme Takraf, poznat i kao Bager 293 koji je sa 14200 t težine, zvanično najveći rotorni bager proizveden do sada. Međutim nastavlja se sa poboljšanjima na polju primene, načina rada, odravanja.

U prilog tome govori i dalji razvoj tehnologije u pogledu rotornih bagera koji nagoveštava da je izvesno otkopavanje čvršćih stena kontinualnom opremom. Jedna od vodećih firmi koja se bavi proizvodnjom bagera, ušla je u poduhvat konstrukcije rotornog bagera za otkopavanje čvrstih materijala bez predhodne pripreme u vidu miniranja. Za kinesku kompaniju China Huaneng Group, Thyssenkrupp bi trebao tokom ove godine da isporuči kontinualni sistem sa rotornim bagerom pod radnim imenom Barracuda (slika 3.16) za rad na jalovinskom sistemu površinskog kopa Yimin He u unutrašnjoj Mongoliji (Thyssenkrupp, 2017).



Slika 3.16 Kontinualni sistem Baracuda (Thyssenkrupp, 2017)

3.3.2.2. Bager vedričar

Bager vedričar je samohodna kontinualna mašina za otkopavanje mekih materijala na površinskim kopovima (slika 3.17). To je jedna od najstarijih konstrukcija mašina za kopanje koja je prvobitno bila namenjena samo za kopanje ispod nivo stajanja. Njihovim razvojem kasnije su napravljeni i bageri vedričari za visinsko kopanje.

Otkopavanje materijala vedričar vrši vedricama koje su okačene na dva beskonačna lanca koja se kreću po nosaču lanca. Može da otkopava veliku visinu, odnosno dubinu, radilišta, tako što puni vedrice od donje do gornje ivice etaže, a zatim napunjene vedrice nose material do lančanika gde se vrši istovar preko transportera. Vedričari mogu raditi u bloku ili u frontu, sa paralelnim ili lepezastim rezovima.



Slika 3.17 Bager vedričar (izvor: www.rbkolubara.rs)⁴

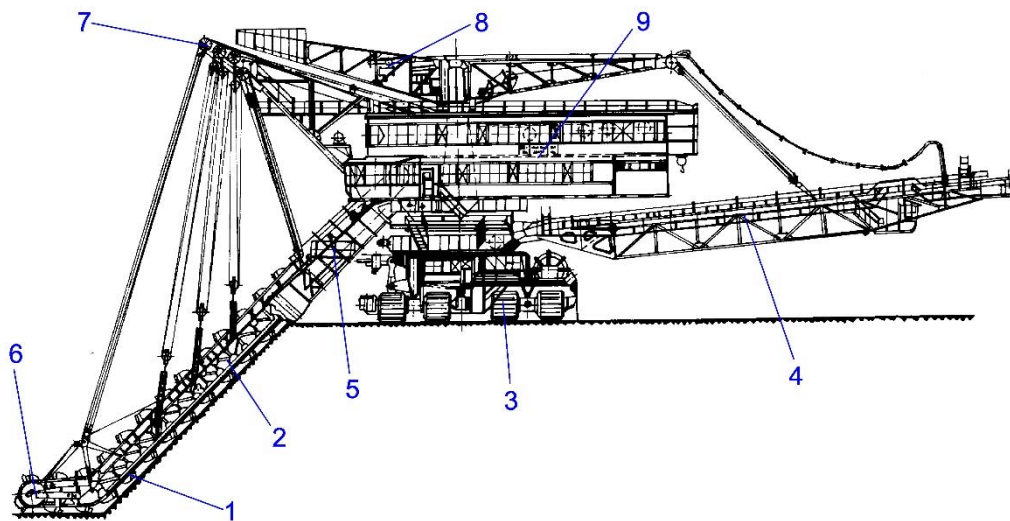
Prva konstrukcija sa vedricama na beskonačnom lancu pojavljuje se 1827 godine. Posle usavršavanja konstrukcije, prva velika primena ovih mašina bila je na prokopavanju Sueckog kanala od 1863 do 1868 godine. Posle Francuske i Holandije koje su se bavile unapređivanjem vedričara, proizvodnju prihvata i Nemačka koja je ostala vodeći proizvođač bagera vedričara. Upravo se u Nemačkoj prvi put primenjuju za otkopavanje lignite 1890 godine sa dubinom kopanja od 5.8 m, zapreminom vedrice 230 l i kapacitetom od 150-230 m³/h. elektropogon se prvi put koristi 1898, a gusenični transportni uređaj 1927 godine.

Konstrukcija bagera vedričara prikazana je na slici 3.18, na kojoj su označeni sledeći konstruktivni delovi (Ignjatović, Jovančić, 2012):

1. lanac sa vedricama
2. nosač lančanika sa vedricama
3. mehanizam za kretanje
4. strela pretovarnog transportera
5. fiksni žleb

⁴ <http://www.rbkolubara.rs/list-kolubara/?p=9017>, pristupljeno: 19/01/18

6. planirni deo lanca sa vedricama
7. noseća konzola sa koturačama
8. strela protivtega
9. obrtna platform sa mašinskom kućicom i vitlima za podizanje i spuštanje nosača lanaca sa vedricama



Slika 3.18 Konstrukcija bagera vedričara

Glavna klasifikacija bagera vedričara je prema konstrukciji i tehnologiji rada na:

- dubinske
- visinske
- obrtne
- kombinovane

Sledeća klasifikacija je prema konstrukciji transportnog uređaja, što im takođe određuje i način rada:

- gusenični za rad u bloku
- koračajući za rad u bloku
- šinski za rad u frontu

Postoje još podele prema konstrukciji nosača lančanika sa vedricama, postojanju planirnog uređaja, konstrukciji utovarnog uređaja. Dosta toga o samom vedričaru se može videti iz njegove oznake, na primer:

$$ERs710 \frac{17.5}{13.0 - 16.0}$$

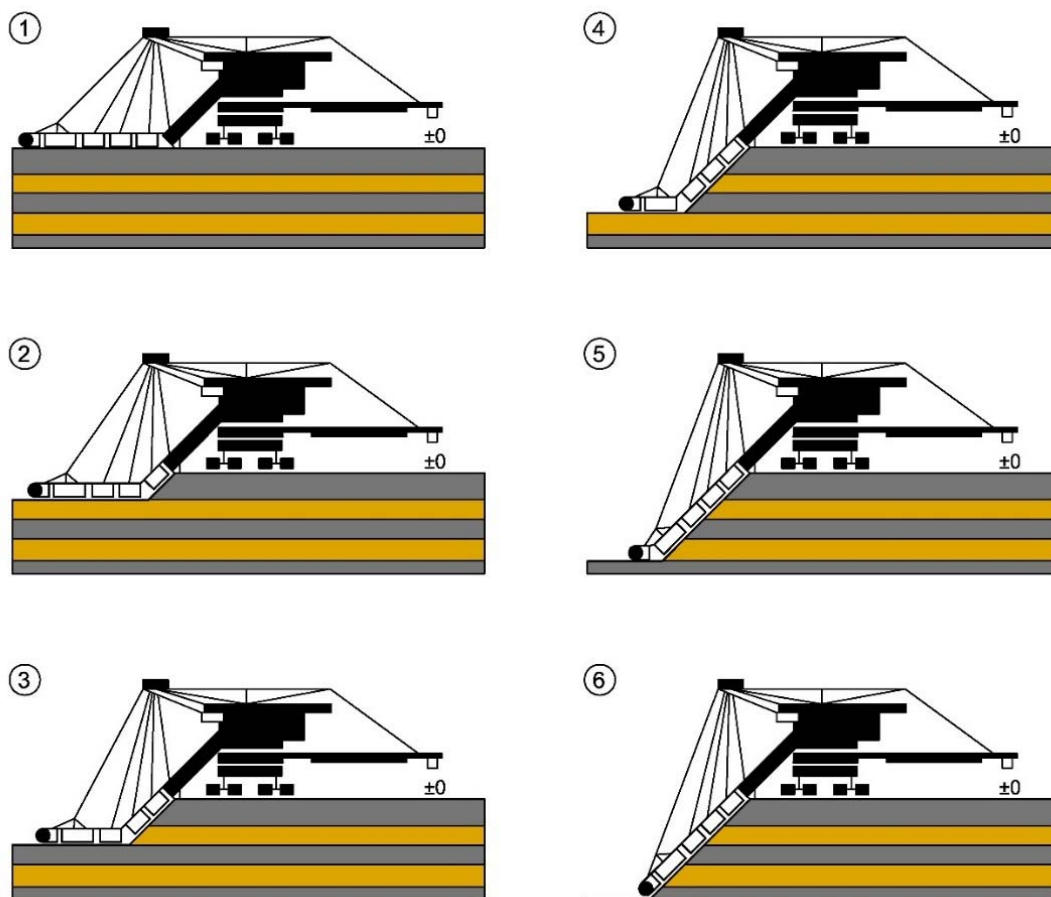
gde su: E – bager vedričar (nemački Eimerkettenbagger)
R – gusenični uređaj za kretanje (oznaka bez R predstavlja šinski uređaj)
s – obrtni bager
710 – zapremina vedrice, litara
17.5 – otkopna visina; m
13.0 – otkopna dubina; planirni deo lanca sa vedricama vodoravan, m
16.0 – otkopna dubina; planirni deo lanca sa vedricama ispružen, m

U odnosu na rotorne bagere, vedričari imaju nekoliko osnovnih prednosti: mogućnost dubinskog kopanja (do 40 m), mogućnost kopanja dve etaže znatnih visina sa jedne transportne ravni, mogućnost kopanja pod bilo kojim uglom radne kosine koliko to stabilnost materijala dozvoljava, mogućnost selektivnog kopanja, dobro čišćenje planuma bez potrebe dodatnog planiranja. Najveće mane su: izraženo habanje radnih organa, velika potrošnja energije, niske manevarske sposobnosti i ograničena sila kopanja.

Tehnologija rada

U zavisnosti od konstrukcije bagera vedričara, otkopavanje se može vršiti dubinski, visinski ili kombinovano. Mogu kopati na dva osnovna načina paralelnim i lepezastim rezovima. Paralelni rez se zasniva na krutoj vezi mehanizma za kopanje sa mehanizmom za kretanje. Ovakav način rada imaju šinski bageri. Pošto nemaju obrtnu platformu za bočno pomeranje, već se kreću po koloseku duž cele dužine radnog fronta, prilagođeni su za rad u frontu. Lepezasti rez nastaje kada nosač lanca označava kružne delove etaže. Ovaj način je tipičan za rad u bloku guseničnih vedričara.

Konstrukcija nosača lančanika sa vedricama kod obrtnih bagera vedričara, koji je izveden sa više zglobno lomljenih delova, omogućava otkopavanje različitim rezovima i selektivno otkopavanje. Postupak selektivnog otkopavanja vedričarima dat je na slici 3.19.



Slika 3.19 Selektivno otkopavanje vedričarima

Osnovni tehnološki parametri šinskih i guseničnih bagera vedričara dati su u tabeli 3.8 (Pavlović, Ignjatović, 2012)

Tabela 3.8 Osnovni tehnološki parametri vedričara

Za šinske i gusenične vedričare	Samo za šinske vedričare	Samo za gusenične vedričare
<p>L – dužina strele za otkopavanje</p> <p>L_{pd} – dužina dubinskog dela za planiranje</p> <p>L_{pv} – dužina visinskog dela za planiranje</p> <p>α_{dmax} – maksimalni ugao nagiba strele pri dubinskom otkopavanju</p> <p>α_{vmax} – maksimalni ugao podizanja strele pri visinskom otkopavanju</p>	<p>a – odstojanje od ivice kosne do ose koloseka bagera sa radne strane</p> <p>b – razmak između koloseka bagera</p> <p>D – odstojanje spoljašnje tačke konstrukcije strele protivtega od oslonca bagera</p>	<p>F – odstojanje spoljašnje tačke konstrukcije strele protivtega od ose bagera</p> <p>e – radijus kopanja na nivou stajanja bagera</p> <p>E - odstojanje spoljašnje tačke mehanizma za kretanje od ose bagera</p> <p>R_i – radijus istresanja</p> <p>ϕ_r – ugao obrtanja radnog organa</p> <p>ϕ_r – ugao obrtanja mehanizma za istovar</p>

Front rada bagera vedričara definišu visina etaže i ugao nagiba bočne kosine. Visina etaže koju je moguće otkopavati bagerom vedričarem (H) zavisi od dužine nosača lanca (L) i ugla njegovog nagiba (α) i iznosi:

$$H = L \cdot \sin \alpha, m \quad (3.6)$$

Širina bloka zavisi od dužine nosača lanca sa vedricama (L_r – dužina radnog dela rama sa vedricama), odnosno radijusa kopanja na nivou stajanja (R_{kh}) i uglova okretanja od ose bagera prema masivu (φ_m) i prema otkopanom prostoru (φ_o). Relacije po kojima se računaju širine bloka su:

$$S_v = R_{kh} \cdot \sin \varphi_m + R_{kh} \cdot \sin \varphi_o, \text{ za visinski rad} \quad (3.7)$$

$$S_d = R_{kh} \cdot \sin \varphi_o + (R_{kh} + L_r) \cdot \sin \varphi_m, \text{ za dubinski rad} \quad (3.8)$$

Proračun kapaciteta bagera vedričara je dosta sličan proračunu kod rotornih bagera. Teoretski kapacitet se računa po identičnoj formuli:

$$Q_t = 60 \cdot V \cdot n, (rm^3/h) \quad (3.9)$$

samo što je broj istresanja u minuti računa iz brzine lanca sa vedricama (v_v) i razmaka između vedrica (p):

$$n = 60 \cdot \frac{v_v}{p} = 60 \cdot \frac{v_v}{m \cdot d \cdot 0,001}, \text{ min}^{-1} \quad (3.10)$$

gde je: m – broj članaka lančanika između vedrica

d – dužina članaka lančanika, mm

Tehnički kapacitet zavisi od stepena punjenja vedrica i stepena rastresitosti otkopavanog materijala, kada se otkopavanje vrši s punim iskorišćenjem zapremina vedrica. Ovo iskorišćenje je kod visinskog rada oko 20% manje nego kod dubinskog.

Na eksploatacioni kapacitet dodatno utiču gubici u radu na kraju fronta i gubici slučajnog karaktera koji zavise od uslova radne sredine.

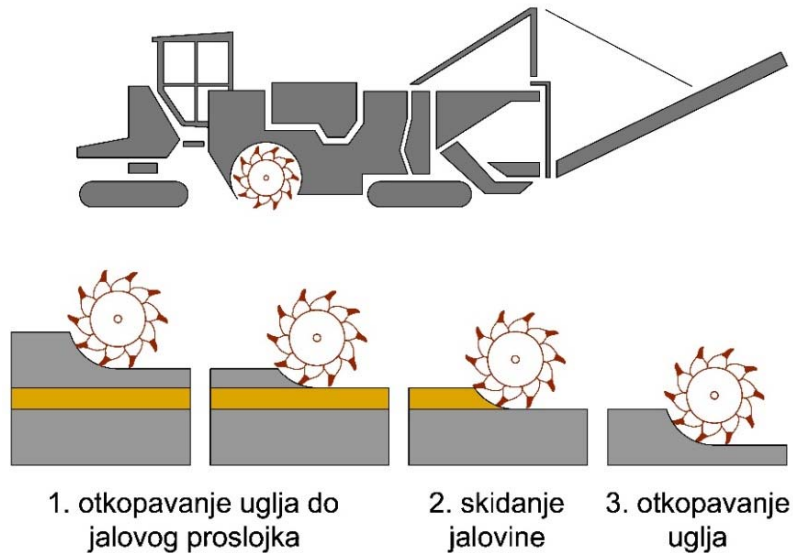
3.3.2.3. Kombajni

Površinski kombajni (eng. Surface Miner) prilikom rada vrše kopanje, primarno drobljenje i utovar materijala u transportno sredstvo. Kombajni su poslednjih decenija sve prisutniji u površinskoj eksploataciji (Schaffer, 1993, Bag, Detlev, 2000). Razlog tome je njihova mogućnost kopanja u čvršćim materijalima, kao i sposobnost selektivnog otkopavanja. Njihova primena zavisi od opštih uslova eksploatacije i od fizičko-mehaničkih osobina radne sredine.

Primena kombajna je započela u industriji krečnjaka i gipsa, čime su eliminisane pripreme radnje za otkopavanje. Takođe je njihovom primenom pojednostavljen celokupan proces, jer se odbrom granulacijom koja se postiže pri otkopavanju smanjuje ili ukida proces drobljenja (Schimm, 2006). U eksploataciji ugljeva kombajni su se na početku koristili za selektivno otkopavanje tankih slojeva, manjih od 1 m, u plitkim ležištima.

Osnovne prednosti otkopavanja kombajnama su, pored već navedenih, manji gubici i razblaženja korisne mineralne sirovine zbog velike preciznosti pri selektivnom otkopavanju (slika 3.20, (Aykul et al., 2007)) i manji pritisci i naprezanja pri utovaru u transportna sredstva. Postižu veoma visoku selektivnost kopanjem izuzetno tankih proslojaka do 0,025 m. Sa druge strane, mana im je mala dubina

kopanja u jednom prolazu (nešto preko 1 m), što ih isključuje iz konkurencije za otkopavanje moćnijih slojeva. Granulacija materijala se menja u zavisnosti od potreba, podešavanjem debljine reza. Na površinskim kopovima mogu da zamene ili dopune klasične tehnologije površinske eksploatacije.



Slika 3.20 Selektivan rad kombajna

U današnjoj praksi postoje tri tipa kombajna koji se koriste, a razlikuju se po poziciji bubnja u odnosu na celokupnu konstrukciju:

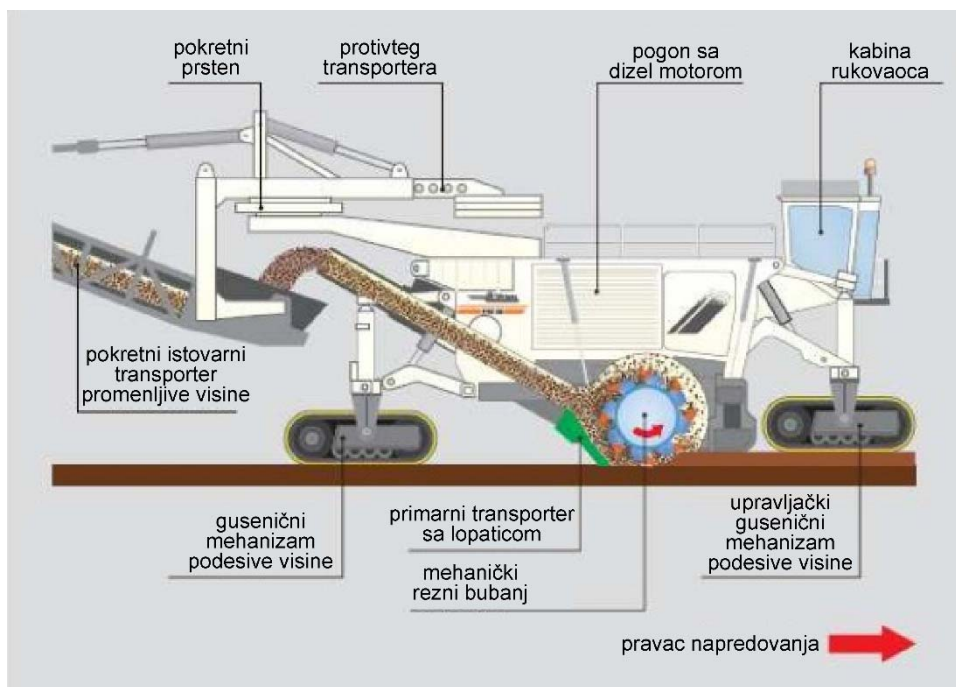
- kombajni sa bubnjem na sredini konstrukcije (Wirtgen, slika 3.21)
- kombajni sa čeonim bubnjem (Man-Takraf)
- kombajni sa zadnjim bubnjem (Krupp)

Najzastupljeniji su kombajni sa bubnjem na sredini konstrukcije, a najpoznatiji proizvođač ovog tipa, kompanija Wirtgen, je razvila šest modela sa širinom bubnja do 4200 mm.



Slika 3.21 Wirtgen kombajn (izvor: www.wirtgen.de⁵)

Osnovni princip rada kombajna sa navedenom konstrukcijom dat je na slici 3.22.



Slika 3.22 Konstrukcija WSM (izvor: www.slideshare.net⁶)

⁵ www.wirtgen.de, pristupljeno 12/02/18

⁶ www.slideshare.net, pristupljeno 02/02/18

Kombajni mogu raditi u čisto kontinualnim sistemima sa kontinualnim transportom, iako se najviše koriste u kombinovanim sistemima sa diskontinualnim transportom kamionima, slika 3.23.



Slika 3.23 Kombinovani sistem (izvor: www.wirtgen.de)

Kako je uspešna primena ovih mašina uspešna samo u ugljevima veće čvrstoće, a u ostalim materijalima neracionalna po osnovu kapaciteta i ekonomičnosti, više o njima neće biti reči, jer nisu primenljive na ležištu koje je predmet ove disertacije.

3.3.3. Transportna oprema kontinualnog dejstva

Ranije je već napomenuto da transport učestvuje u ukupnim troškovima eksploatacije sa oko 50% (Bozorgebrahimi, 2004, Nel et al., 2011). Zbog toga je važno izabrati transportnu opremu koja će se dobro tehnološki uklopiti sa otkopnom i biti ekonomski isplativa.

U rudarstvu generalno se koristi različita oprema za kontinualni transport. U literaturi se spominju sledeće vrste transporterata:

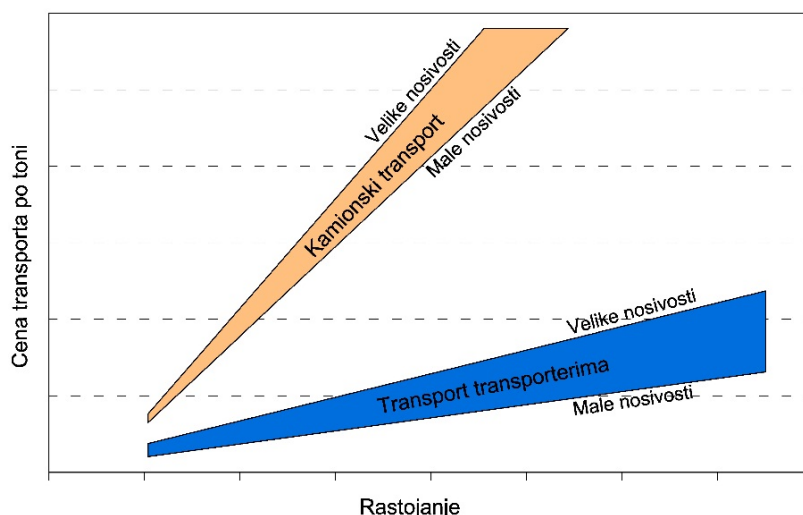
- Transporter sa trakom
- Člankasti transporter
- Grabuljasti transporter
- Spiralni transporter
- Vibracioni transporter

- Elevator (kosi i vertikalni transport)
- Pipe conveyor (specijalni cevasti transporter)

Pored navedenih transportera kontinualni način transporta je i hidraulični transport hidromešavine cevovodima, prirodnim padom ili prinudno pumpama. Najzastupljeniji vid kontinualnog transporta na površinskim kopovima je transporter sa trakom, odnosno transporter sa gumenom trakom, čija je prva primena na površinskim kopovima zabeležena 1891. godine.

Kontinualna transportna oprema je najefikasnija u kombinaciji sa kontinualnom otkopnom opremom. U slučaju kombinacije sa diskontinualnim bagerima, efikasnost se povećava ukoliko se na transporter materijal šalje preko dozirane drobilice i na taj način biva neprekidno snabdevan. U nekim slučajevima je opravdano korišćenje kontinualnog transporta sa diskontinualnom otkopnom opremom, na primer kada je zbog terena ili dužine transporta bolje koristiti transportere sa trakom. U takvim slučajevima se materijal može dopremiti u mobilnu ili polumobilnu drobilicu kamionima na kraćim trasama, odakle se iz drobilice presipa na transporter sa trakom (Stevanović et al., 2012). Dosta literature obrađuje transportere sa trakom u kombinovanim sistemima ((Bazzazi et al., 2011, Basçetin, 2003, Dzakpata et al., 2016).

Isplativost kontinualnog transporta nad kamionskim je dokazana na svim dužinama transporta (Pavlović, Ignjatović, 2012), ali se dodatno povećava sa dužinom transportovanja materijala. To potvrđuje i Thompson (2005) koji je dijagramom na slici 3.24 predstavio odnos troškova kod ove dve vrste transporta sa povećanjem dužine transporta za transportnu opremu manjih i većih nosivosti.

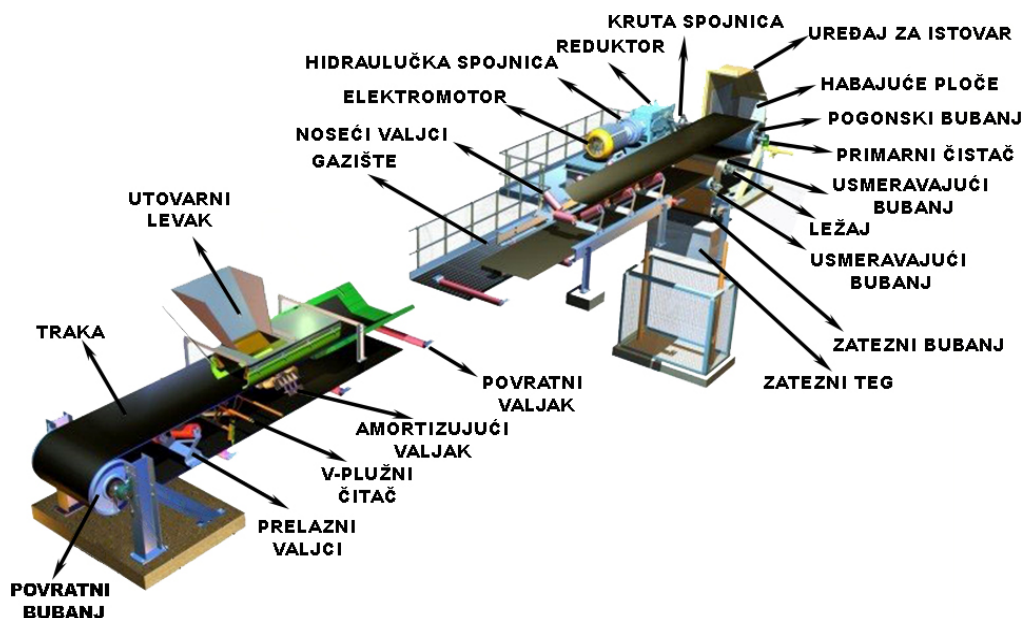


Slika 3.24 Rast cene transporta sa povećanjem rastojanja (Thompson, 2005)

Transporteri sa trakom ostvaruju tok materijala odgovarajuće granulacije koji otkopavaju otkopne mašine obično kontinualnog dejstva. One vrše utovar na etažne transportere koji materijal dalje predaju zbirnim, veznim ili magistralnim transporterima (zavisno od tehnologije rada na površinskom kopu) na odlagališne transportere gde ga prihvataju odlagači koji ga odlažu na odlagališta spoljašnjeg ili unutrašnjeg karaktera. Što se tiče mineralne sirovine na sličan način se tok materijala odvija do deponija. Etažni transporteri na površinskom kopu i odlagalištu se stalno pomeraju sa napredovanjem frontova radova, paralelno ili rđajalno, zavisno od tehnologije. Vezni transporteri su promenljive dužine na krajevima i zavisno od pravca napredovanja otkopavanja u odnosu na poziciju ciljne lokacije se produžavaju ili skraćuju.

Konstrukcija transportera sa trakom je prikazana na slici 3.25. Transporter se sastoji od beskonačne gumene trake koja je zategnuta preko pogonskog (na istovaru materijala) i povratnog (na utovaru materijala) bubanj. Gumena transportna traka se sastoji od jezgra i omotača, koji ima ulogu zaštitnika jezgra od mehaničkih, atmosferskih i bioloških oštećenja. Jezgro može biti tekstilno (pamuk, poliester, poliamid, aramid) ili sa čeličnim užadima. Gornja strana trake prenosi materijal, pri čemu joj oslonac čine noseći valjci. Oni su ravnomerno raspoređeni u slogovima duž noseće strane trake, dok se sa povratne strane nalaze slogovi

povratnih valjaka. Utovar materijala se vrši preko utovarnog levka, a istovar preko bubnja ili posebnog uređaja za istovar. Sastavni delovi transportera su i zatezni uređaj, uređaji za čišćenje trake, amortizacioni valjci...



Slika 3.25 Konstrukcija transportera sa trakom, (CKIT, 2017)

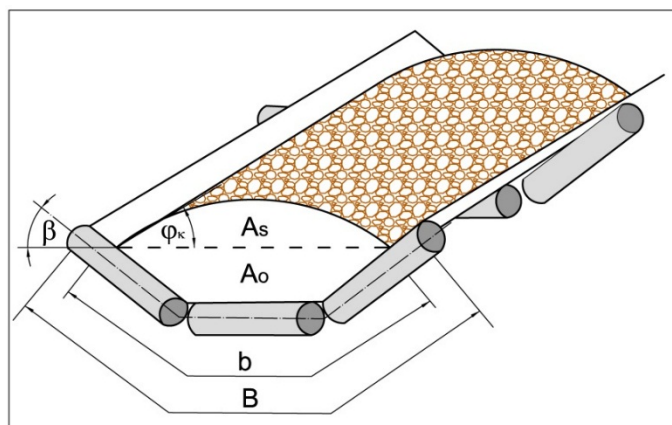
Velika rasprostranjenost transportera sa trakom bazira se na činjenici da ovaj vid transportera ima dosta prednosti u odnosu na ostala transportna sredstva. Kapacitet ovih transportera se kreće u širokom opsegu od par tona do preko 20000 tona na sat (Kolonja, Knežević, 2000). U mogućnosti su da savladaju nagibe do 18° sa glatkim omotačem, preko 22° sa reljefnim omotačem i padove do 16° , sa specijalnim konstrukcijama noseće trake i do 35° . U novije vreme su konstruisani "sendvič" transporteri koji mogu da savladaju nagibe do vertikalnog transporta (Dos Santos, 2016). Dužina transporta koju savlađuju se kreće od nekoliko desetina metara do nekoliko kilometara. Najduži transporter sa trakom prevozi materijal na rastojanje od 26,8 km i ima kapacitet od 2400 t/h. Sa maksimalnom brzinom od 6,5 m/s ovaj transporter prevozi uglj sa površinskog kopa Impumelelo u Južnoj Africi (Thompson, Jennings, 2016).

Osnovne prednosti transportera sa trakom, osim već pomenutih velikih kapaciteta i rastojanja koja savladavaju su ravnomereno snabdevanje sirovinom, fleksibilnost

u vođenju trasa, jednostavna ugradnja u malom prostoru, niski eksploatacioni troškovi, ne stvaraju mnogo buke i prašine, moguća je potpuna automatizacija procesa, brza montaža, produžavanje i skraćivanje transportera. Naravno, ovaj vid transporta ima i svoje mane: ograničen nagib kod standardnog transportera, brzo habanje kod transporta abrazivnih materijala, ograničena krupnoća komada koje traka prihvata (u zavisnosti od širine trake), velika investiciona ulaganja i relativno kratak vek trajanja trake.

Pomenuto je da je moguća potpuna automatizacija tehnološkog procesa transporta. Automatizacija rada transportera omogućava jednostavno upravljanje i pouzdanost u radu sistema. Ona se vrši opremom za kontrolu pokretanja, praćenja rada, korekciju rada i zaštitu sistema od havarija.

Parametri od kojih zavisi kapacitet transportera sa trakom su širina trake, brzina trake, oblik i veličina poprečnog preseka materijala na traci. Oblik poprečnog preseka je definisan konstrukcijom sloga nosećih valjaka. Površina poprečnog preseka je veličina promenljiva u toku rada, zbog različite popunjenosti trake za vreme transportovanja. Pravilno određivanje poprečnog preseka materijala na traci utiče na tačnost proračuna kapaciteta. Površina poprečnog preseka, slika 3.26, se sastoji iz okonturene površine u obliku trapeza A_o (sa slogom od tri noseća valjka) i slobodno formirane površine A_s .



Slika 3.26 Površina poprečnog preseka materijala na traci

Slobodno formirana površina A_s se određuje približno preko jednog od tri geometrijska oblika: trougla (nije praktično primenljiv, jer se može formirati samo dok traka miruje), paraboličnog odsečka (krupnokomadast materijal), kružnog odsečka (sitnokomadast materijal, ugalj).

Kapacitet transportera sa trakom se računa putem formule:

$$Q = 3600 \cdot A \cdot v \cdot \gamma_n \cdot k_\lambda \quad (3.11)$$

pod pretpostavkom da se materijal ravnomerno utovara na traku, gde je:

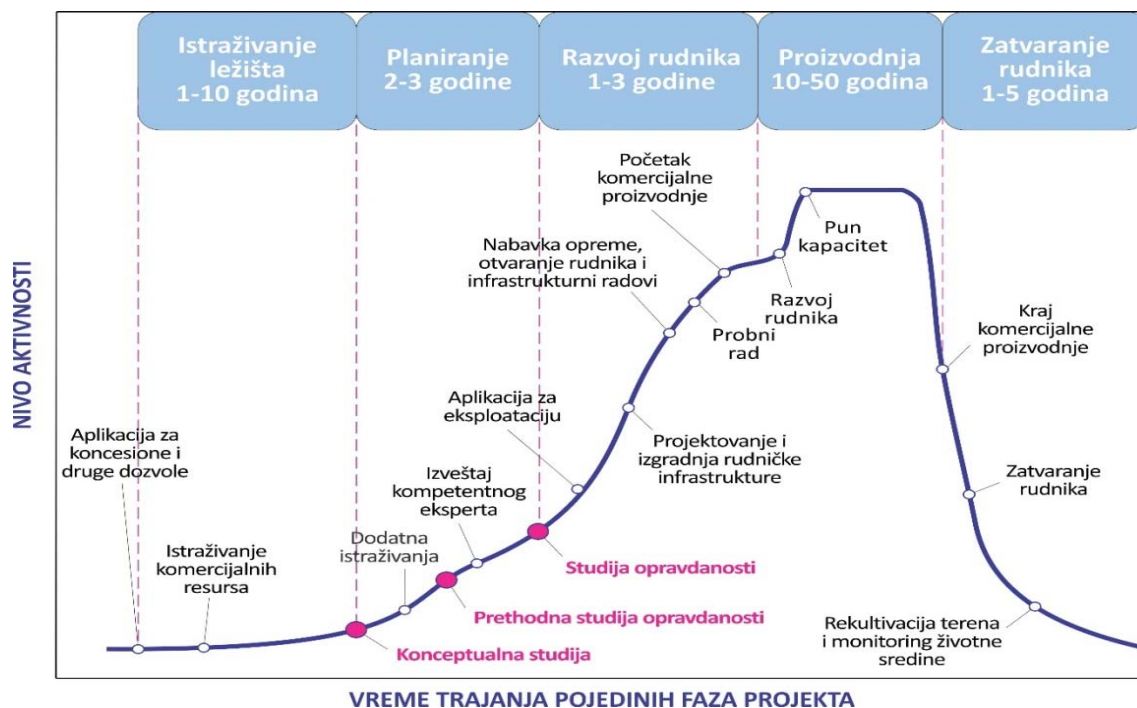
- A – ukupni poprečni presek materijala na traci (m^2)
- v – brzina trake (m/s)
- γ_n – nasipna zapreminska masa materijala (t/m^3)
- k_λ – koeficijent nagiba transportera

4. SISTEMSKA ANALIZA I MODELIRANJE OPTIMIZACIJE SISTEMA TRANSPORTA U FUNKCIJI PLANIRANJA POVRŠINSKOG KOPA

4.1. Značaj strateškog planiranja u rudarstvu

Rudarski projekat ima veoma dug životni ciklus, koji se sastoji od brojnih faza i više tehničkih evaluacija koje zahtevaju velike investicije. Ove faze i operacije (slika 4.1) se mogu podeliti na:

- Prospekciju i istraživanje ležišta, faza u kojoj se primenom osnovnih geoloških metoda definiše ležište;
- Prethodna i studija izvodljivosti imaju za cilj dokazivanje tehničke, ekonomske i ekološke održivosti budućeg rudnika;
- Planiranje i projektovanje razvoja rudarskih radova služi za uspostavljanje celokupne infrastrukture na površinskom kopu;
- Eksploatacija se odnosi na metode otkopavanja, pripreme i prerade rude; prerada mineralne sirovine se odnosi na drobljenje-mlevenje, odvajanje rudnih minerala od jalovine, preradu minerala u koncentrat, topljenje i rafinaciju - dobijanje metala iz koncentrata, i prečišćavanje metala. Marketing se odnosi na plasiranje proizvoda (ili koncentrata ako se ne radi prerada do metala) kupcu (topionici ili proizvođaču); i
- Zatvaranje rudnika; pre nego što rudnik prestane sa radom treba da postoji plan upravljanja zatvaranjem, koji sadrži u sebi troškove predloženih strategija zatvaranja, pitanja zaštite životne sredine, kao i socijalno - društvene posledice na lokalnu zajednicu.



Slika 4.1 Životni ciklus rudarskog projekta

Vrlo često može se očekivati da će proći dosta vremena između izvršenja programa geoloških istraživanja i početka eksploatacije, sa malo izuzetaka u svetu gde je vreme između ove dve faze bilo kraće (Tilton et al., 1988). Tokom ovog vremenskog perioda, uloženi kapital se ne vraća. Takođe, šanse za uspeh u istraživanju, u određenim okolnostima, mogu biti veoma niske. Uprkos tako visokom elementu rizika, razvijene zemlje značajno kapitalizuju rudarsku industriju. Uspešna rudarska industrija može obezbediti mnogo veću profitabilnost od većine drugih industrijskih grana. Praktično, postizanje ravnoteže između ovih strategija je pravi izazov za državu.

Zbog svih prikazanih neizvesnosti i izazova, optimizacija planiranja, i svih vezanih procesa, je imperativ kako bi se ostvarili održivi ekonomski benefiti rudarskog projekta. Ova glava sagledava koncepte optimizacije sa stanovišta sveobuhvatne holističke optimizacije (optimizacija celokupnog proizvodnog procesa od rudnika preko prerade do tržišta), dostignuća nauke u ovoj oblasti, kao i cilj ovog rada.

Menadžeri rudnika su pod velikim pritiskom smanjenja operativnih troškova, pošto troškovi snabdevanja i servisiranja nastavljaju trend rasta. Većina donosilaca

odluka traži funkcionalna poboljšanja kako bi se primenila tehnologija koja bi zamenila osoblje ili poboljšala donošenje odluka u donekle lokalizovanim područjima tehnoloških operacija. Istorijski gledano, rudarska proizvodnja je percipirana kroz dve različite faze: (1) rudarstvo koje je predstavljeno eksploatacijom, i (2) prerada koja rudu prevodi u korisnu mineralnu komponentu i krajnji tržišni proizvod. Međutim, rudarstvo i prerada su blisko povezani, posebno kada se uzme u obzir smanjenje visine troškova i efikasnost proizvodnje.

Bez posmatranja celokupnog sistema, optimizacija svake tehnološke faze pojedinačno često dovodi do loše ekonomske strategije. Metodologija optimizacije proizvodnog procesa od kopa preko prerade do tržišta uzima u obzir integralno sve procese u sistemu. Štaviše, jedan važan uslov da bilo koje ležište postane eksploataбилno, jeste izvođenje evaluacije projekta sa tehničkog i ekonomskog stanovišta. Stoga, ciljevi holističke optimizacije planiranja i razvoja rudarskih projekata su:

- postizanje konzistentnosti i efikasnosti u proizvodnji,
- smanjenje troškova u tehnološkim procesima,
- poboljšanje kontrole i upravljanja procesima kako bi se održala stabilnost, predvidljivost i održivost, i
- razmatranje i uključivanje svih ekoloških i socijalnih potreba lokalne zajednice.

Optimizacija celokupnog proizvodnog procesa od rudnika do finalne prerade smanjuje zastoje i skraćuje vreme ciklusa, fokusirajući se primarno podizanje efikasnosti procesa u sistemu, kako bi se maksimizirala dobit (NPV) i postigla održivost rudarskog projekta.

Integralni pristup planiranju proizvodnje predložen u ovoj disertaciji obuhvata tehnološke faze otkopavanja, transporta i pripreme rude. Ove operacije su u velikoj meri pod uticajem prethodnih procesa ili imaju određene uticaje na buduće procese. Iz navedenih razloga, biće detaljno definisani i analizirani fleksibilni

rudarski planovi, u kojima se mogu napraviti odgovarajuće modifikacije, kako bi se postigli maksimalni ekonomski efekti.

Glavni cilj je postizanje finalnog proizvoda sa maksimalno mogućim kvalitetom za predefinisani kapacitet kopa sa minimalnim proizvodnim troškovima, uz savremene koncepte zaštite životne sredine i održivosti proizvodnje na duži rok.

Predložena metodologija holističkog pristupa planiranja i optimizacije tehnoloških procesa u eksploataciji i preradi rude/uglja sastoji se od tri glavne faze:

1. Razmatranje efekata međusobno povezanih prirodnih i operativnih parametara u interakciji sa integrisanom optimizacijom eksploatacije i prerade rude. Prirodni parametri koji definišu radnu sredinu i glavni tehnološki procesi eksploatacije i prerade istražuju se u ovom poglavlju sa nekim tehničkim detaljima za karakteristične procese. Ovo će pomoći identifikaciji i odabiru najznačajnijih, fleksibilnih i efektivnih parametara koji utiču na sopstvene operacije i/ili druge proizvodno, posebno kada je homogenizacija rude u pitanju.
2. Razvoj dinamičkog modela simulacijom globalnih tehnoloških operacija u procesu eksploatacije i prerade rude, koji će predstavljati jedan koherentni sistem sa funkcionalnim vezama u matematičkim modelom. Definisani procesi i tehnološki parametri iz tačke jedan će formirati glavne ulaze kako bi se definisali kontrolni faktori i postavili kriterijumi za optimizaciju planova na duže vreme.
3. Eksperimentalni opit, kao rezultat primene realnih podataka sa površinskog kopa kroz studiju slučaja, kako bi se integralno optimizirao proizvodni proces kroz planske efekte u vremenu za različite scenarije eksploatacije i pripreme uglja. Takođe, biće određena najbolja operativna strategija, u skladu sa dugoročnim ekonomskim ciljevima i održivošću rudarskog projekta.

4.2. Sistemska analiza i modeliranje planiranja površinskog kopa

Proces modeliranja rudarskih sistema podrazumeva sistemski pristup modelu funkcionisanja poslovnih procesa. Modeli poslovnih procesa se često koriste kao podrška tehničkim procesima i identifikuju niz zadataka i njihovih sekvenci koji postižu strateški cilj. Integralna analiza sistema i unapređenje proizvodnih procesa je najkritičniji deo modeliranja poslovnih sistema (Noran, 2000).

Svrha modeliranja prikazanog u ovoj disertaciji je da se razume struktura aktivnosti holističkog sistema planiranja u rudarstvu. Integralna analiza sistema za planiranje se koristi kako bi se razvio i implementirao jedan operativni rudarski plan saglasan strateškim ciljevima rudarskog projekta. Za ove potrebe je korišćen jedinstveni jezik modeliranja (UML), i on je formalni jezik koji je razvijen da oblikuje predmetno orijentisane softverske sisteme. UML je jezik modeliranja, ne metodologija modeliranja i veoma je fleksibilan u svojoj primeni. Koristi se za kreiranje apstraktnog prikaza kompleksnih sistema preko izgrađenih dijagrama. UML dijagrami se sastoje od niza grafičkih notacija (simbola) koje imaju predefinisano značenje. Meta model određuje pravila koja upravljaju ovim procesima u sistemu.

Ubrzano unapređenje i korišćenje računarskih tehnologija u drugoj polovini 20 veka podstaklo je intezivan rast površinske eksploatacije. Korišćenje računara, kao pomoći pri analizama i projektovanju, bilo je ključno za bezbednu i profitabilnu eksploataciju sve većeg broja nisko sadržajnih i dubljih ležišta metodom površinske eksploatacije. Maksimiziranje neto sadašnje vrednosti projekta je obično bio cilj rudarskog planiranja. Postizanje ovog cilja kroz optimizaciju procesa planiranja predmet je značajnih istraživanja i razvoja u poslednjih trideset godina, a novi trend razvoja istraživanja se nastavlja u praksi.

Uprkos prednostima dostupnih algoritama, procedura i softvera za planiranje površinskih kopova, uloga čoveka kao planera je i dalje neprikosnovena. Posebno je važno da planer (rudarski inženjer) ima sveobuhvatno razumevanje procesa

rudarskog planiranja i projektovanja jer su različite planske aktivnosti veoma međusobno povezane. Odluka u bilo kojoj fazi aktivnosti neće samo da ima uticaj na budući rad, nego može da zahteva revidiranje ranijih evaluacija. Na primer, etaže u eksploataciji su obično iste visine kao i visina bloka koji se koristi u blok modelu. Visina etaže je ključno ograničenje u izboru opreme za otkopavanje, jer se izbor predviđene opreme bazira na veličini ležišta, ali istovremeno može da bude ograničenje pri izboru visine bloka. Prema tome, jedna od prvih odluka koja se donosi u procesu planiranja, je veličina etaže koja zavisi od veličine bagera, a koja je već definisana prvom odlukom o veličini bloka. Skoro svaka odluka u procesu planiranja uključuje sličnu dilemu 'šta je starije kokoška ili jaje'. Sve to zahteva da planeri imaju sveobuhvatno razumevanje potencijalnih posledica svojih odluka na kasnije faze projekta, kao i razumevanje da li njihova odluka, u bilo kojoj fazi planiranja, zahteva revidiranje prethodnih analiza (Kloppers et al., 2015).

Posledica nerazumevanja međuzavisnosti procesa u sistemu planiranja može da bude i sam operativni plan koji postiže lokalni cilj na štetu šireg plana delovanja. Rezultati optimizacije i aktivnosti koje se preduzimaju tokom planiranja su ograničene kvalitetom ulaznih podataka za optimizaciju planiranja. U rudarstvu, neizvesnost ulaznih podataka postoji zbog ograničenog geološkog uzorkovanja koje rezultuje nedovoljnim razumevanjem ležišta koje se razmatra, potrebe da se predvide buduće cene proizvoda na tržištu, kao i potrebe da se izvrše pretpostavke koje se odnose na kapitalne i operativne troškove. Često se odluke planiranja i projektovanja donose na osnovu nepouzdanih studija, pošto kod planera još uvek postoji jako oslanjanje na jednostavne pristupe i u nekim slučajevima oslanjanje na okvirna pravila u nekim kritičnim aktivnostima planiranja (Whittle, 2011, Grobler et al., 2011, King, 2011).

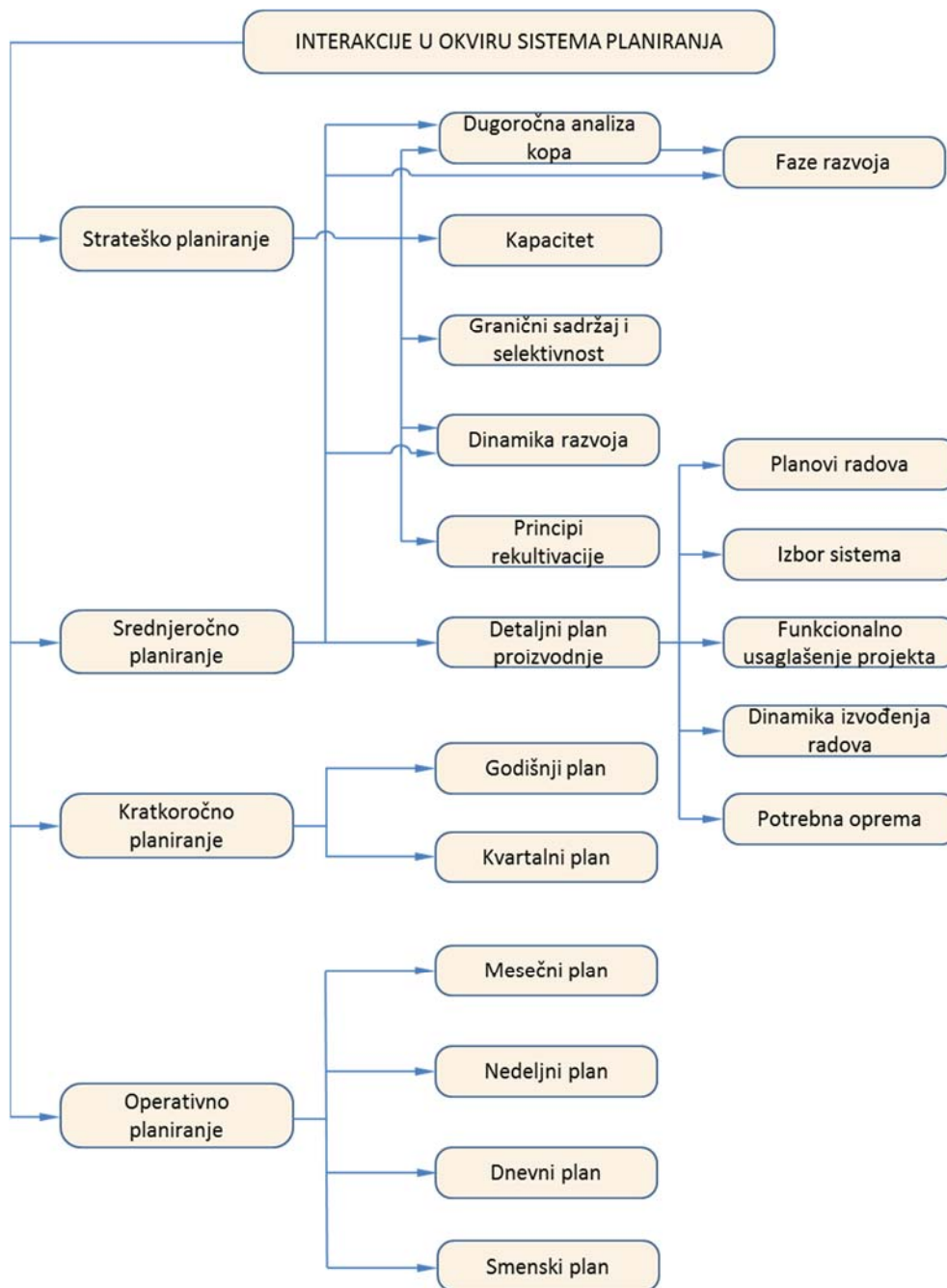
Obično je cilj rudarskog planiranja da napravi izvodljiv operativni plan koji maksimizira neto sadašnju vrednost (NPV) projekta. U nekim slučajevima cilj može da se razlikuje i može da bude maksimiziranje kratkoročnog toka novca iz aktivnosti, da maksimizira zaposlenost (npr. rudnik u vlasništvu države) ili da maksimizira iskorišćenje resursa (npr. regulatorna kontrola). Izvodljiv rudarski plan znači da plan zadovoljava sva ograničenja. U površinskoj eksploataciji,

ograničenja podrazumevaju društvena i regulatorna ograničenja (u zavisnosti od nadležnosti), tehnološka ograničenja (oprema i procesi), geometrijska ograničenja (minimalne dimenzije radnih zona) i ekonomska ograničenja u formi dostupnog kapitala i tržišta.

Ne postoji globalni optimajzer za planiranje i projektovanje površinskih kopova. Umesto toga sub-aktivnosti u okviru sistema za planiranje se optimiziraju zasebno, ili su ko-optimizovane sa jednom ili dve druge aktivnosti. 'Optimizacione' aktivnosti često uključuju potrebu heurističkih pristupa, uključujući okvirna pravila i metaheurističke metode. Ovo je delimično zbog vremena računarske obrade zbog veličine rudarskih blokova (broja varijabli, odluka i ograničenja). Ključno je da planer razume da optimizacijom niza individualnih aktivnosti neće rezultirati globalno optimalnim rešenjem. Lokalna optimizacija koja nameće ograničenja na druge aktivnosti planiranja može značajno da ošteti potencijalnu vrednost projekta. Prema tome, globalni pristup podrazumeva proces planiranja koji će uključiti sve aktivnosti u okviru predloženog modela (Osanloo et al., 2008).

Integralni proces optimizacije planiranja površinskog kopa je u suštini iterativni proces, slika 4.2. Kako planiranje napreduje i kako se donose ključne odluke, npr. kapacitet kopa ili operativna eksploataciona sekvenca, mogućnost uticanja na troškove opada.

Kako se rudarsko planiranje odvija, početne pretpostavke planiranja se unapređuju, što može da izazove ispitivanja i moguće revizije ranijih rešenja. Poboljšanja u kvalitetu i kvantitetu dostupnih podataka mogu da pomognu smanjenju neizvesnosti koja se vezuje za rudarski plan, ali je ne eliminišu u potpunosti. U svim fazama procesa od ranog koncepta i prifizibiliti studije preko studije izvodljivosti i detaljnog dugoročnog i kratkoročnog planiranja, evaluacije višestrukih scenarija planiranja, analiza osetljivosti ulaznih parametara je ključna za uspešno rudarsko planiranje. Krajnji proizvod treba da bude plan koji je dovoljno robustan da ostane ekonomski privlačan u nizu varijacija od početnih pretpostavki planiranja.



Slika 4.2 Integralni model optimizacije planiranja

Razvoj integralnog modela u ovoj disertaciji je koncipiran tako da podržava: strateško, srednjeročno, kratkoročno i operativno planiranje sa uključenim optimizacionim modelima za pojedine tehnološke celine od otkopavanja preko transporta pa do isporuke uglja termoelektranama.

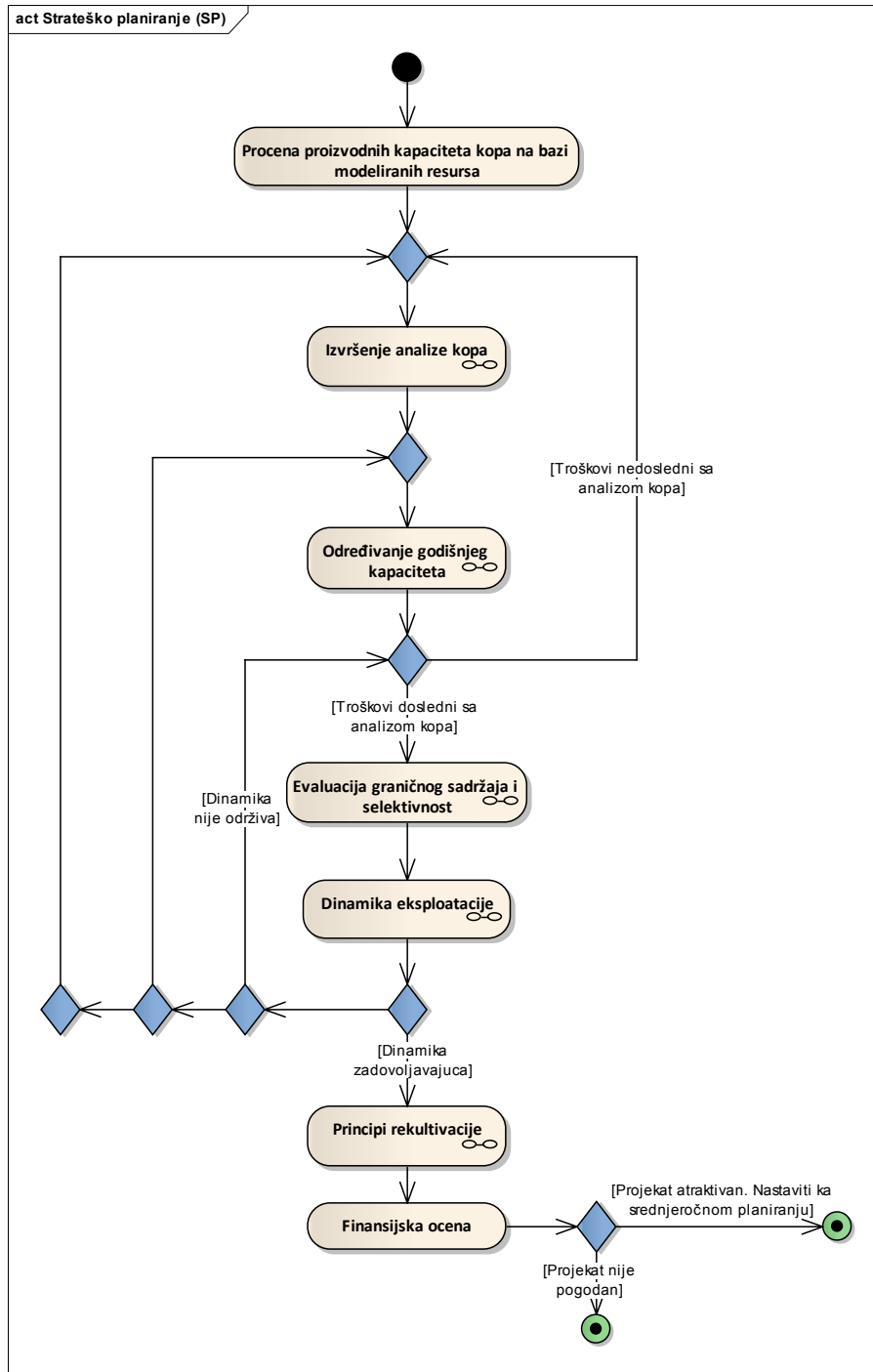
Ova glava u nastavku definiše integralni pristup optimizacije procesa operativnog planiranja, koji proističe iz strateškog planiranja površinskog kopa. Da bi se podržalo razumevanje sistema modeliranja procesa dati su i opisani UML-a dijagrami aktivnosti koji se koriste u razvoju ovog modela.

4.2.1. Strateško - dugoročno rudarsko planiranje

Strateško, odnosno dugoročno, rudarsko planiranje (DRP) traži odgovor na pitanje kako da se najbolje eksploatiše ležište mineralne sirovine da bi se podržao strateški cilj postizanja najveće neto sadašnje vrednosti projekta (NPV). Razvoj strateškog plana može da predstavlja celovitost planiranja u studiji izvodljivosti ili detaljnoj fazi rudarskog planiranja. Strateško planiranje treba da se odvija tokom celog životnog veka rudarskog projekta, od konceptualne, prethodne i studije izvodljivosti preko aktivne eksploatacije do zatvaranja rudnika.

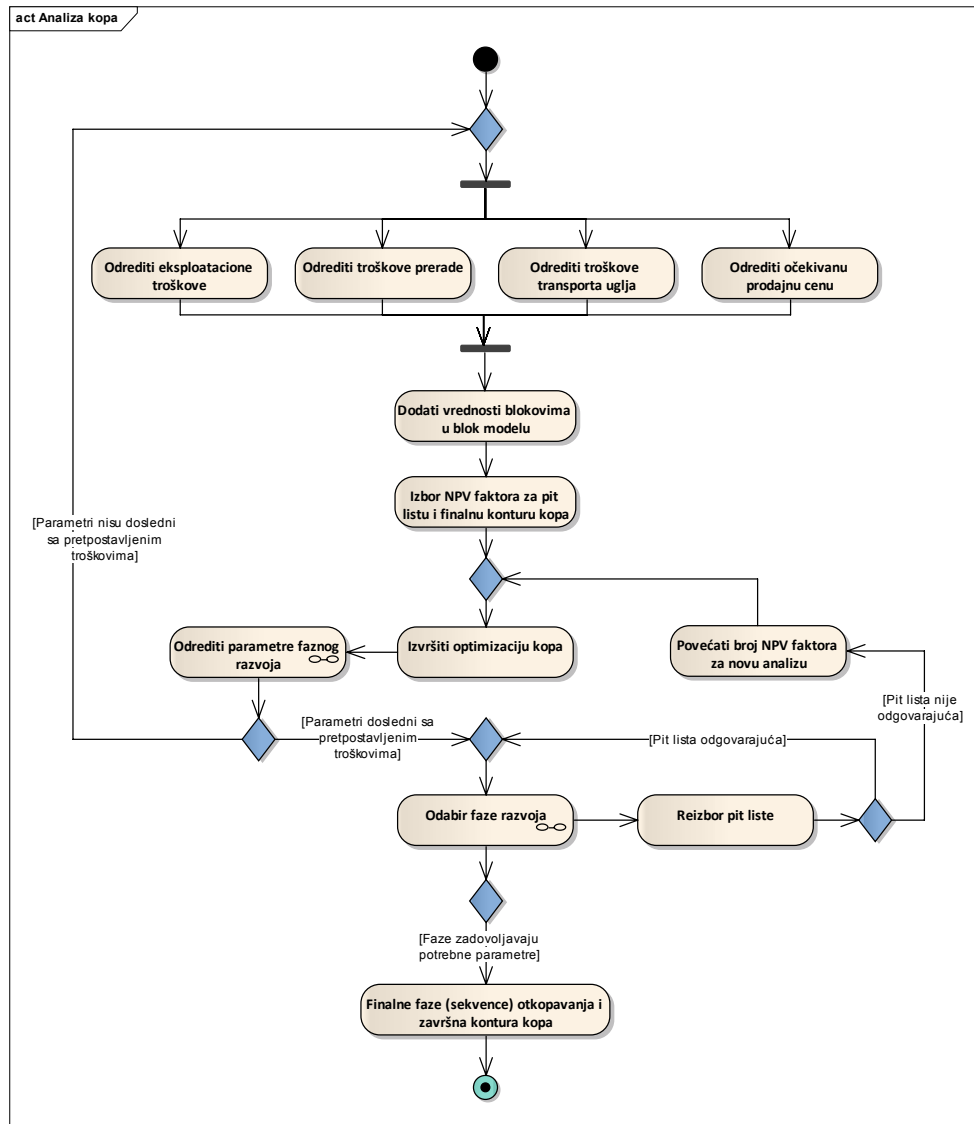
Tokom strateškog planiranja treba uzeti u obzir nestabilnost tržišta, tako da su planovi pri očekivanim promenama izmenljivi bez promene osnovnog pristupa otkopavanju. Ipak, ako se uslovi na tržištu promene u toj meri da značajno utiču na koncepciju plana, dugoročni plan je potrebno revidirati.

Na slici 4.3 prikazani su procesi u modelu za strateško-dugoročno planiranje površinskog kopa. Može se primetiti da se određeni procesi ponavljaju dok se ne nađe zadovoljavajuće rešenje, nakon čega ekonomska ocena odlučuje o podobnosti projekta.



Slika 4.3 Model strateškog-dugoročnog planiranja površinskog kopa

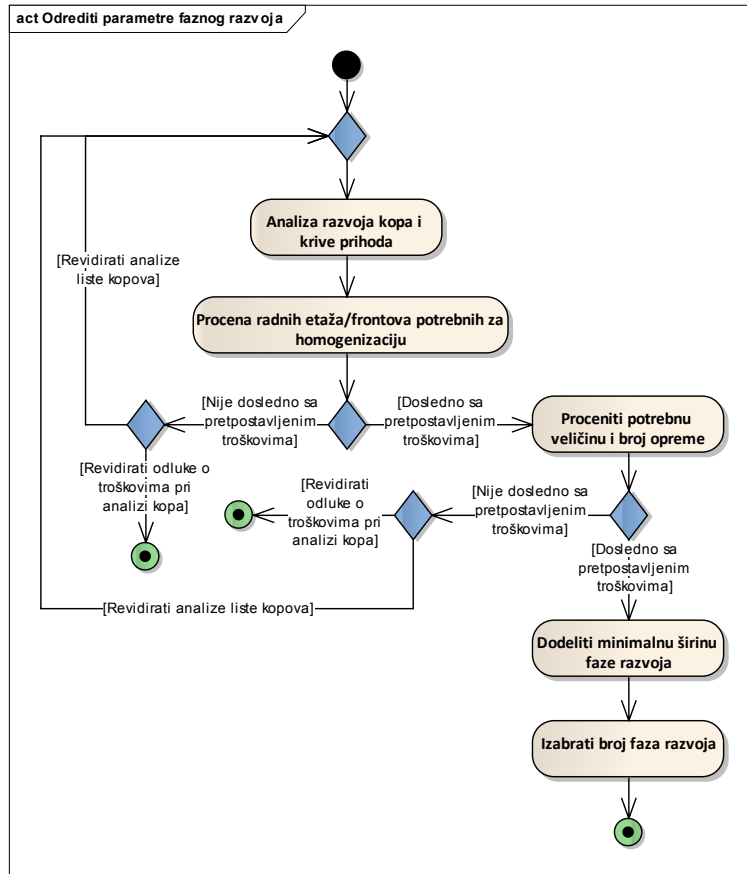
Na slikama 4.4 do 4.10 prikazani su tokovi izvršavanja pojedinih aktivnosti u okviru strateškog planiranja.



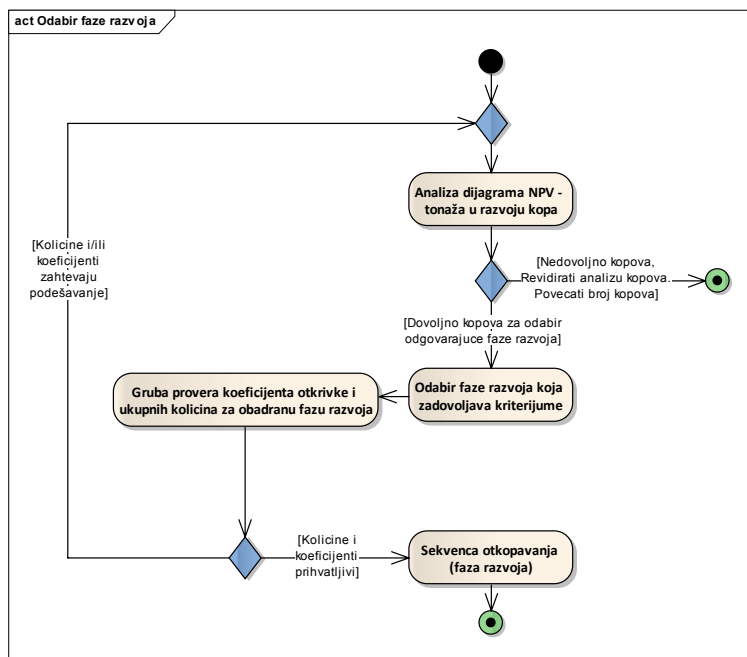
Slika 4.4 Dijagram aktivnosti analize površinskog kopa

Analiza površinskog kopa podrazumeva određivanje svih troškova, kao i prodajne cene proizvoda, kako bi se odredila ekonomska vrednost blokova u blok modelu i NPV faktor za koji se vrši optimizacija kopa. Kao rezultat analize se dobijaju faze otkopavanja i završna kontura kopa.

Posebne aktivnosti unutar analize površinskog kopa predstavljaju određivanje parametara faznog razvoja (slika 4.5) i odabir faze razvoja (slika 4.6)

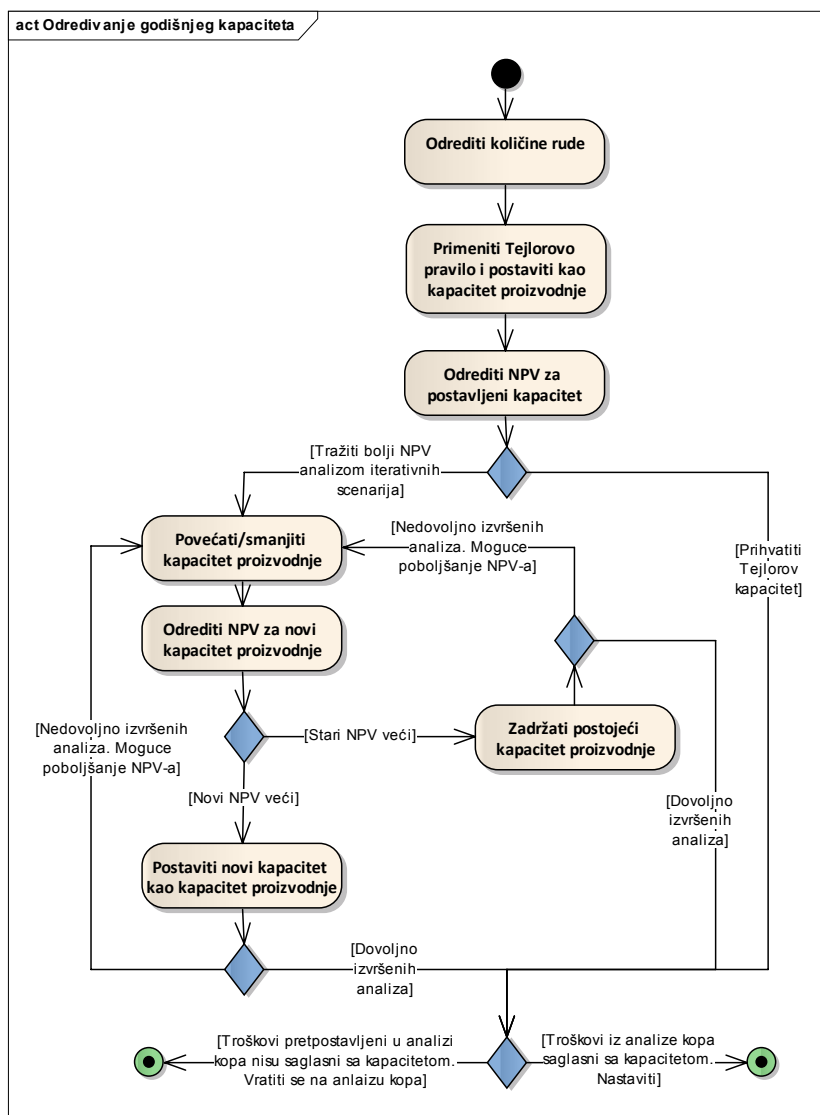


Slika 4.5 Dijagram aktivnosti definisanja faznog razvoja kopa



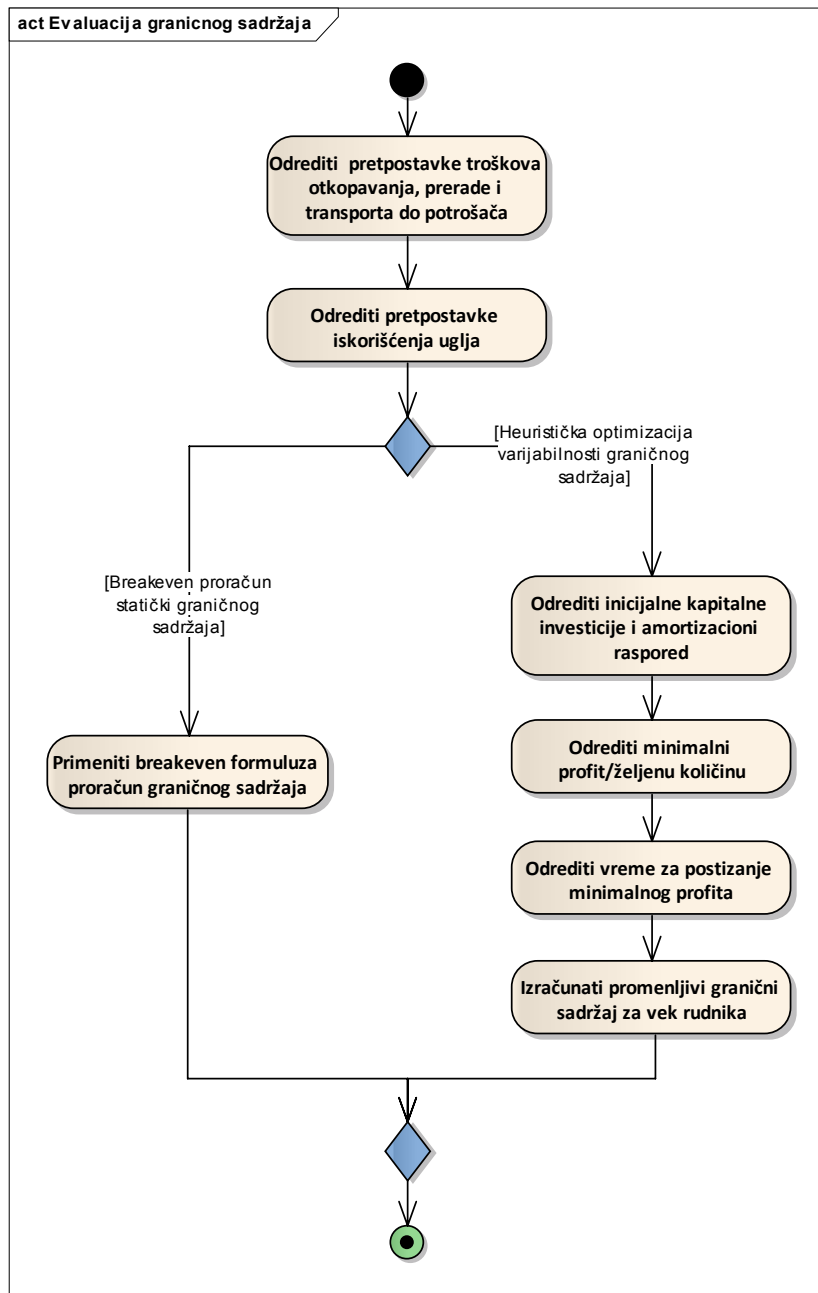
Slika 4.6 Dijagram aktivnosti izbora faza razvoja kopa

Nakon analize kopa sledi aktivnost određivanja godišnjeg kapaciteta koje započinje primenom Tejlorovog pravila, a zatim se iterativnim postupkom kroz određivanje NPV-a traži najbolje rešenje (slika 4.7).



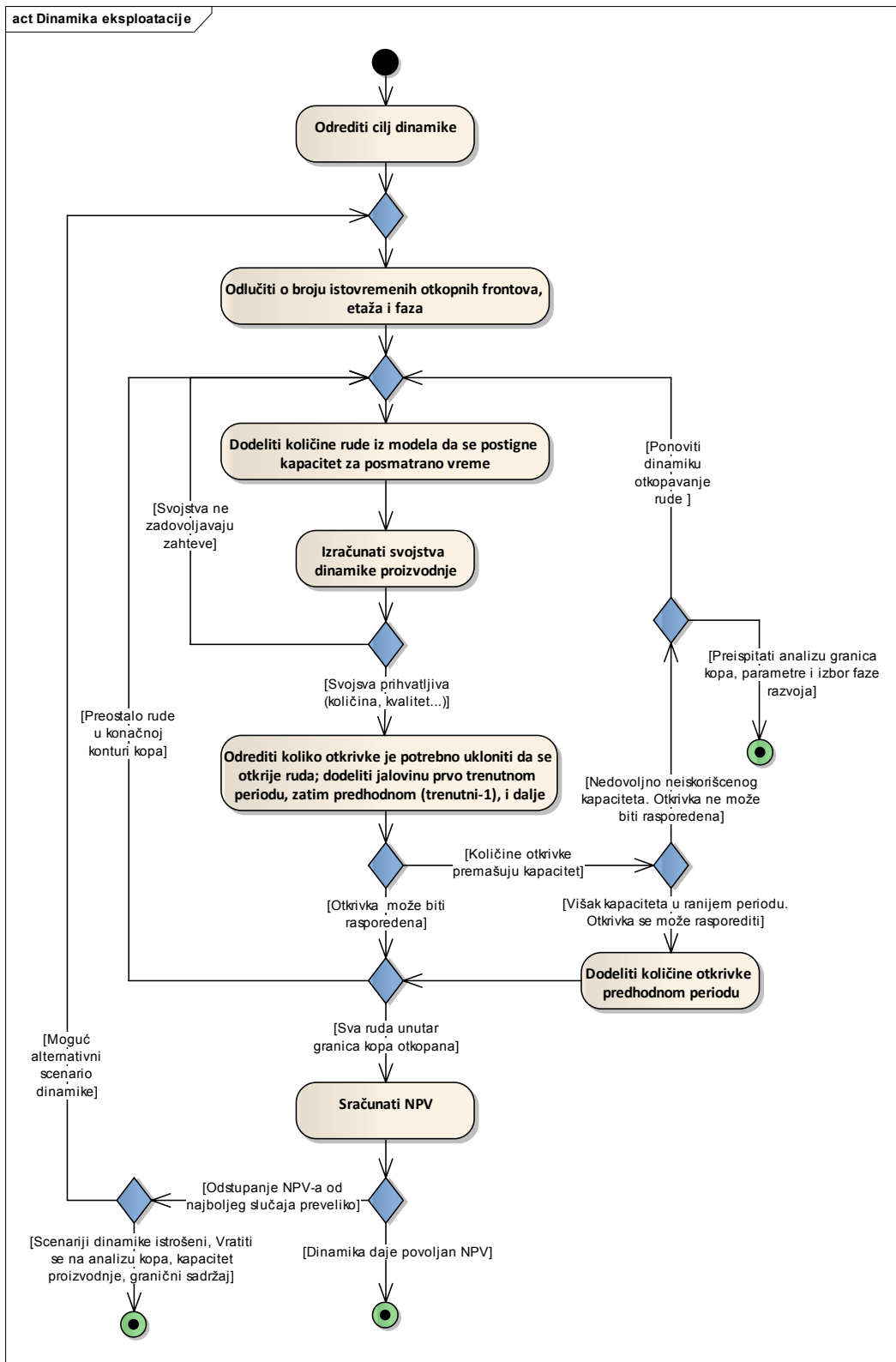
Slika 4.7 Dijagram aktivnosti određivanja kapaciteta kopa

Sledeća aktivnost je evaluacija graničnog sadržaja. Kako se sa slike 4.8 može videti, njegova vrednost se dobija na osnovu pretpostavki o troškovima otkopavanja, prerade i transporta, kao i iskorišćenju uglja, a primenom heurističke optimizacije varijabilnosti ili proračuna statičkog graničnog sadržaja.



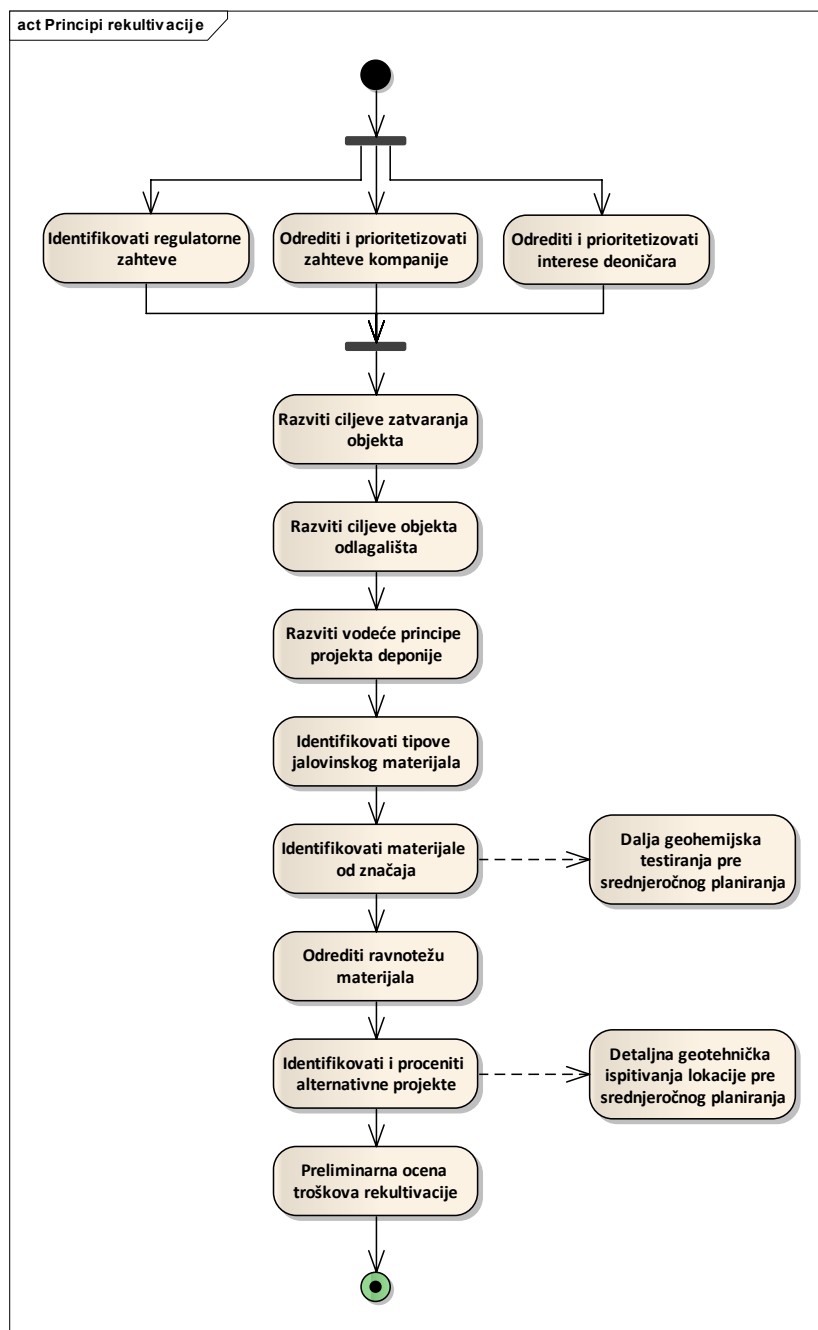
Slika 4.8 Dijagram aktivnosti određivanja granicnog sadržaja

Detaljan algoritam određivanja dinamike eksploatacije dat je na slici 4.9. Algoritam se svodi na raspoređivanje rude i otkrivke po fazama, tako da se zadovolje kapacitet i svojstva dinamike proizvodnje, a da pri tom dinamika daje povoljan NPV projekta.



Slika 4.9 Dijagram aktivnosti definisanja dinamike i sekvenci eksploatacije

Nakon što predhodne aktivnosti daju zadovoljavajuću dinamiku, potrebno je odrediti i principe rekultivacije po algoritmu na slici 4.10.



Slika 4.10 Dijagram aktivnosti definisanja koncepta rekultivacije

Kao što se može videti sa prethodnih slika strateško planiranje analizira potencijalnu vrednost rudarskog projekta na osnovu:

1. identifikacije materijala koji treba da se eksploatiše kroz proces optimizacije kopa, kako bi se mogla odrediti završna kontura površinskog kopa, odnosno raspoložive rezerve rude;
2. definisanja optimalne eksploatacione sekvence (utvrđivanje redosleda otkopavanja i dinamike);
3. definisanja odredišta za svaki eksploatacioni blok rude (identifikacija bloka da li je jalovina ili ruda i procesa u slučaju rude); i
4. utvrđivanja kapaciteta površinskog kopa i prerade sa kojim će ležište biti eksploatisano (izbor kapaciteta ili životnog veka rudnika).

Strateško planiranje takođe treba da vodi računa o uticaju na zaštitu životne sredine i na upravljanje otpadom koji je u vezi sa razvojem rudnika, da se obezbedi adekvatna polazna osnova i da se tehničke studije urade kao podrška budućem planiranju i regulatornim odobrenjima. Minimalni zahtevi strateškog planiranja su definisanje: ciljeva studije, modela ležišta koji sadrži informacije o karakteristikama svakog bloka (kvalitet, gustina, proces eksploatisanja, itd.), razumevanje geotehničkih ograničenja (mogući nagibi kosina kopa), operativnih i kapitalnih troškova eksploatacije i pripreme, kao i procenu tržišnih cena.

Strateško / dugoročno planiranje rezultuje planom životnog veka rudnika, sa ciljem da se maksimizira NPV rudarskog projekta. Praktični aspekti rudarskih ograničenja dalje počinju da se detaljnije posmatraju. Sledeće faze planiranja uključuju i unapređuju aktivnosti strateškog plana, identifikacije i evaluiraju alternativna scenarija planova do najmanjeg detalja radi razvoja rudnika. Kvantitet i kvalitet podataka koji se odnose na rudno telo i njegove karakteristike, očekivane troškove i ostali planirani ulazni podaci koji rastu sa detaljnijom studijom predproizvodnje i sa iskustvom dobijenim nakon što je projekat doveden do proizvodnje, smanjujući neizvesnosti tokom napredovanja planiranja.

Nažalost, ključne odluke koje se odnose na rudarske sekvence, kapacitet prerade i granični sadržaj, moraju da budu donete na osnovu ograničenih informacija i analiza tokom rane faze izrade konceptualne i prifizibiliti studije. Ove odluke su često prihvaćene kao robustne i dodatno se ne ispituju da li su odgovarajuće dok

planiranje napreduje i kada više informacija postane dostupno. To su ključni ulazni podaci i aktivnosti planiranja koje su vezane sa njihovom optimizacijom na koje se treba vratiti dok se plan prečisti i dok dodatne informacije o projektu postanu dostupne (Thorley, 2012).

Taktičko donošenje odluka počinje tokom dugoročnog planiranja, a odnose se na tip i veličinu rudarske opreme koja će se koristiti, broj jedinica, radnu snagu itd. Dugoročno planiranje proizvodnje se izvodi na osnovu godišnjih planova po petododišnjim periodima. Planovi na duži rok (preko 20 ili 30 godina) se kreiraju na petogodišnjem nivou.

4.2.2. Srednjeročno planiranje

Srednjeročno rudarsko planiranje (SRP), ili planiranje proizvodnje za period od 5-10 godina, detaljnije razvija i implementira posebnu taktiku ili način kako će se primeniti strateški - dugoročni plan. Srednjeročni plan je limitiran u smislu stepena uticaja koji ima na postizanje ekonomskih performansi projekta u celini i njemu je posvećeno malo pažnje u literaturi rudarskog planiranja. Ipak, taktičke odluke koje se donose tokom planiranja mogu da izazovu značajnu štetu ukupnoj vrednosti projekta ukoliko nisu u skladu sa dugoročnim planom (Hall, 2006).

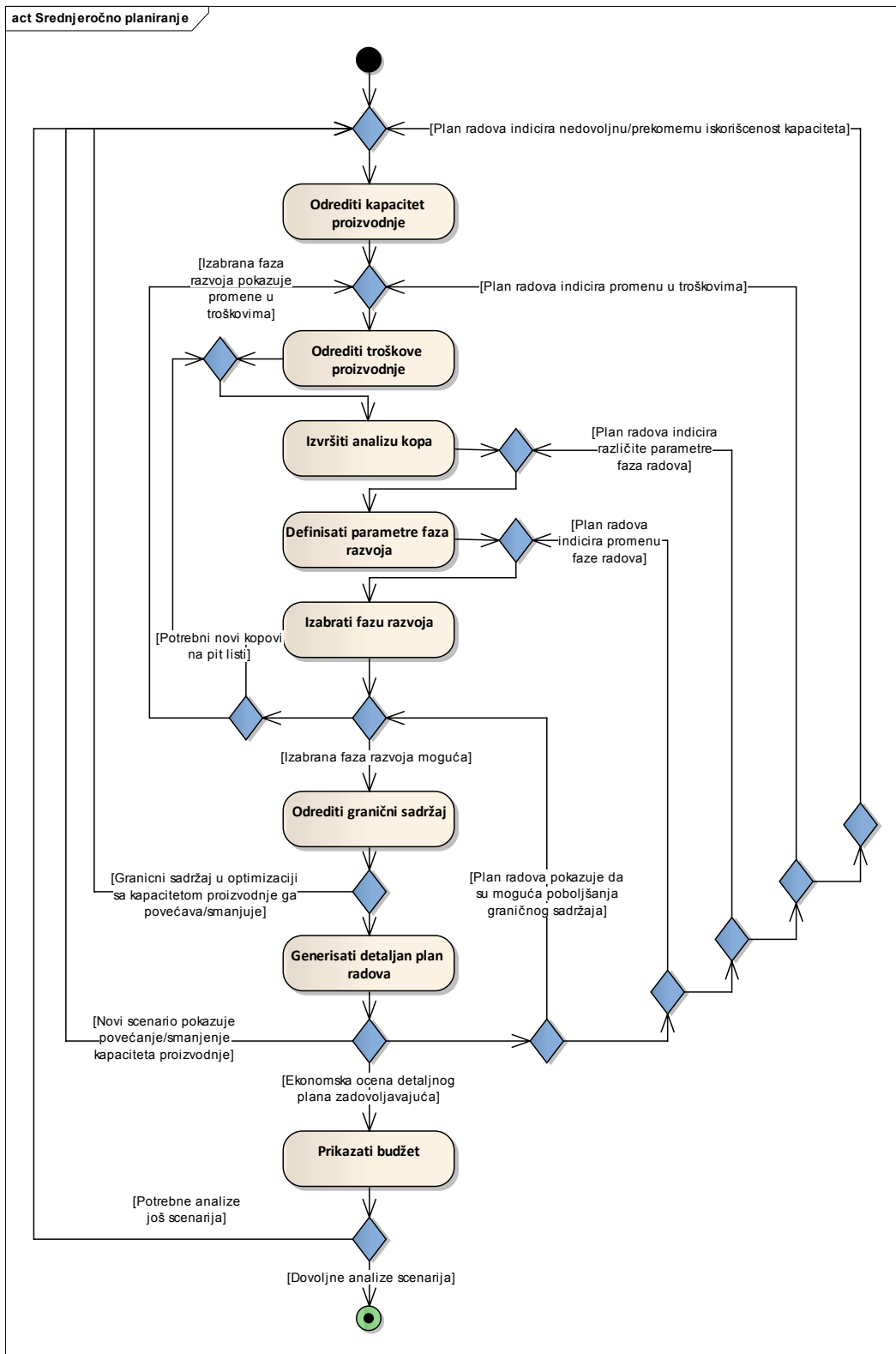
Normalno da je cilj SRP-a da ispuni zahtevani plan proizvodnje i prerade rude (tj. da proizvede planiranu tonažu sa zahtevanim svojstvima) dok se očekuje ispunjenje ciljeva iz dugoročnog plana. Planeri srednjeročnih planova moraju da se odupru potrebi da naprave pojedinačne/izolovane strateške odluke koje mogu negativno da utiču na sveobuhvatnu vrednost projekta. Nasilno postizanje proizvodnih ciljeva po cenu dugoročnog kontinuiteta proizvodnje rude, obično ide na štetu realizacije dinamike na eksploataciji jalovine, da bi se izbegle kratkoročne restrikcije u procesima prerade, su dva primera validnog taktičnog pristupa koji može da poveća profit na kratke staze, ali da budu u suprotnosti sa ciljevima strateškog planiranja.

Neadekvatno srednjeročno planiranje ima potencijal da onemogući realizaciju zacrtane vrednosti projekta. U tome smislu istraživanje i razvoj koji bi bili od koristi kreiranju efikasnijeg srednjoročnog plana treba da uključe:

- primenu najbolje prakse u planiranju;
- primenu standardizovanih metoda planiranja i alata koji su široko primenjivi danas;
- detaljan opis procesa implementacije srednjeročnog plana zasnovanog na dugoročnom i starteškom cilju, uključujući SRP u cilju podrške strateškim ciljevima; i,
- analizu ključnih indikatora učinka i drugih mera učinka za njihovu efikasnost u podržavanju ciljeva srednjeročnog i strateškog plana.

Srednjeročno planiranje podrazumeva izradu detaljnih planova eksploatacije na po godinu dana do 5 godina, a ako se izvodi i duže onda na po 5 godina. Prave se detaljni planovi radova za godišnjem nivou. Ovi planovi preciziraju proizvodne ciljeve, koja oprema treba da se koristi, dimenzioniše opremu po sistemima, očekivani kapacitet proizvodnje za svaki sistem i gde će eksploatisani materijal biti rutiran (ruda, jalovina). Ključno razmatranje podrazumeva homogenizaciju rude pre postrojenja za pripremu, dimenzionisanje i planiranje deponije unapred, vođenje računa o deponovanju otpada iz proizvodnje, kao podrške dugoročnom planu, itd.

Aktivnosti koje se realizuju u okviru srednjeročnog planiranja su prikazane na slici 4.11, a čine je aktivnosti koje se realizuju unutar strateškog planiranja, samo na detaljnijem nivou, uz generisanje detaljnog plana radova.



Slika 4.11 Dijagram aktivnosti u okviru srednjeročnog planiranja

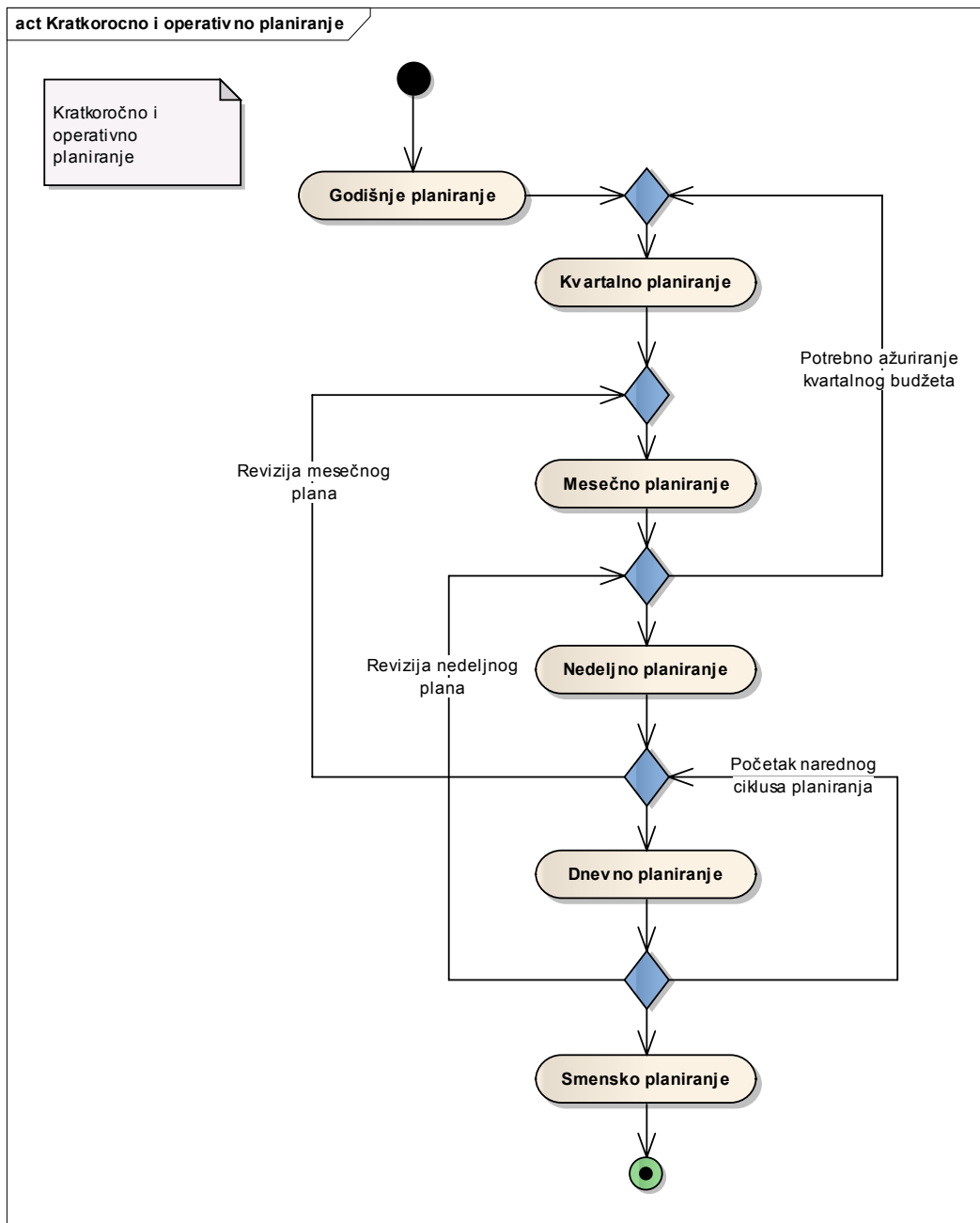
4.2.3. Kratkoročno i operativno rudarsko planiranje

Cilj kratkoročnog (KRP) i operativnog rudarskog planiranja je da se obezbedi ispunjavanje zahteva od strane termoelektrane za količinama i kvalitetom uglja na planskom nivou, dok se stremi ispunjenju ciljeva dugoročnog plana. Kao što srednjeročni plan podržava strateški plan, KRP razvija detaljne planove potrebne za implementaciju srednjeročnih planova. Loše dugoročne planove moguće je korigovati kroz SRP, ali loše izvršeni kratkoročni i operativni planovi mogu imati jako velike negativne posledice na uspeh projekta u celini. Operativno planiranje određuje izvršenje dugoročnog plana utvrđenog u godišnjem planu ili budžetu rudnika. Ova dva nivoa planiranja su manje iterativni od srednjeročnog i strateškog planiranja, posebno operativni u planovima od dnevne do mesečne rezolucije.

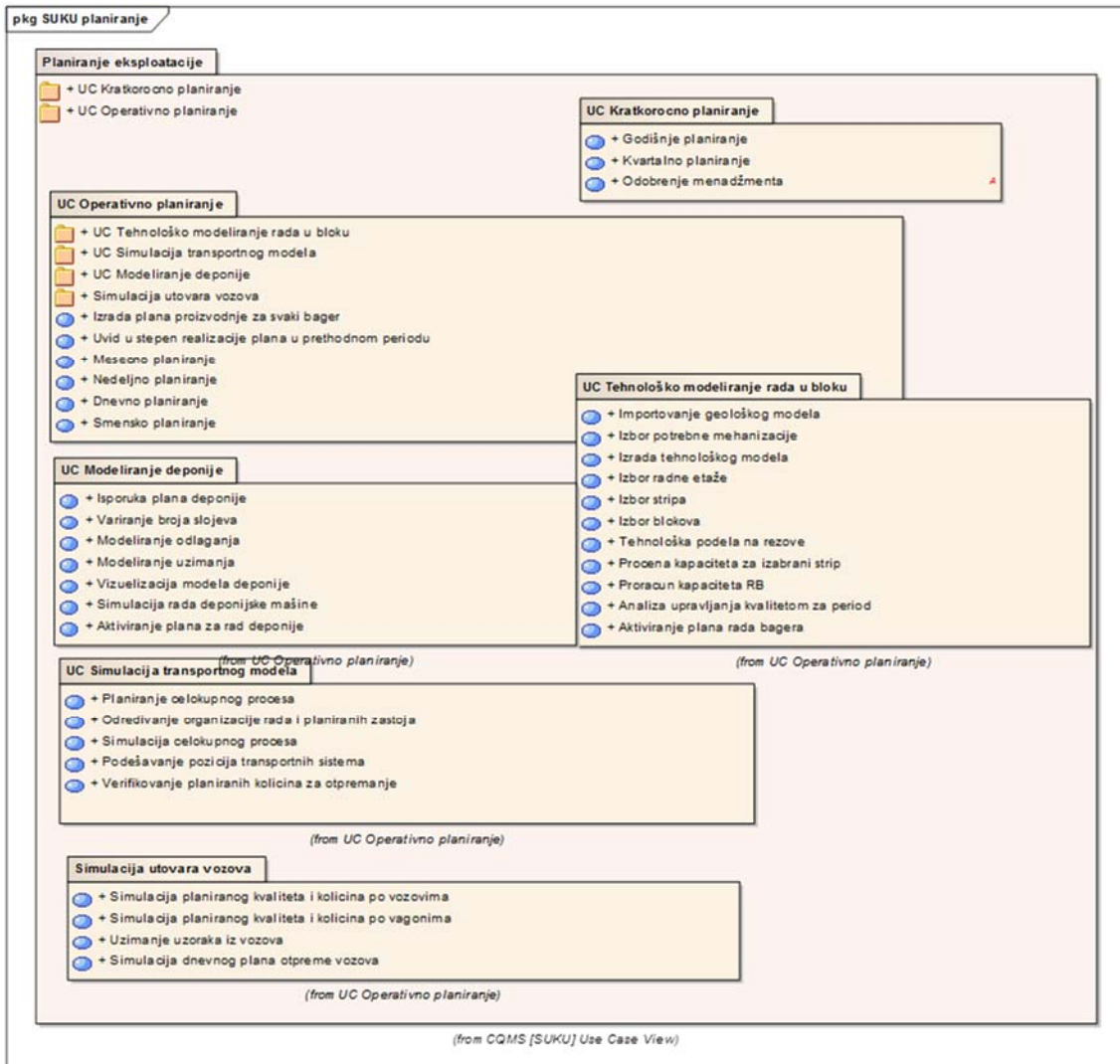
Osnovni procesi koji se sprovode u okviru operativnog planiranja su bazirani na geološkom modelu ležišta i uključuju:

- definisanje modela etaža, lokacija za svaki bager, podetaža u okviru tehnološkog bloka sa vrednostima kvaliteta (DTE – donja toplotna energija, pepeo, vlaga, sumpor, itd.);
- definisanje tehnološkog blok modela i optimizacija kapaciteta bagera u funkciji postizanja potrebnog kvaliteta uglja i potrebne dnevne proizvodnje kopa;
- operativno planiranje deponije (optimizacija procesa odlaganja i uzimanja sa deponije);
- određivanje optimalnog načina rada celog sistema eksploatacije od otkopavanja do utovara uglja u voz, uzimajući u obzir i deponiju uglja.

Na slici 4.12 je prikazan tok aktivnosti u modelu za kratkoročno i operativno planiranje, dok je na slici 4.13 prikazana struktura planskih aktivnosti u integralnom modelu za operativno planiranje.



Slika 4.12 Model kratkoročnog i operativnog planiranja



Slika 4.13 Struktura planskih aktivnosti u integralnom planskom modelu

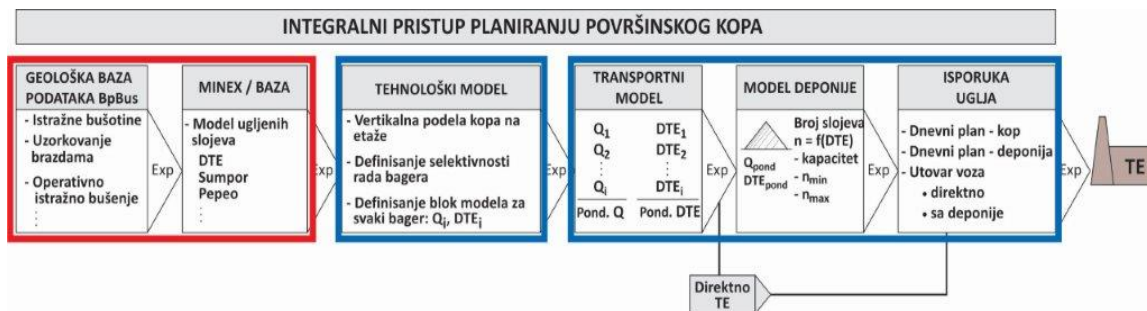
4.3. Razvoj modela za integralnu optimizaciju planiranja površinskih kopova

Eksploatacija velikih ležišta, kako metala tako i uglja, sa niskim sadržajem korisne komponente u mineralnoj sirovini je krenula početkom dvadesetog veka. Intezivan razvoj rudarskih tehnologija, prevenstveno visokokapacitivne opreme uz podršku informatičkih tehnologija, koja je doprinela efikasnijem vođenju i sistemskom planiranju procesa eksploatacije je omogućilo ekonomski isplativu eksploataciju ovih ležišta.

Maksimalizacija neto sadašnje vrednosti (NPV-a) rudarskog projekta je glavni cilj strateškog planiranja. Korišćenje savremenih informatičkih pristupa u sistemskim analizama, planiranju i projektovanju, i primena istih u tehnološkim sistemima eksploatacije (monitoring, kontrola i upravljanje) je od ključnog značaja da siromašna ležišta postanu profitabilna i značajan rudarski resurs. Postizanje ovih efekata se realizuje kroz integralnu optimizaciju procesa planiranja, zbog čega su ovi problemi bili česte teme istraživanja i razvoja u poslednje tri decenije sa tendencijom daljeg izučavanja i unapređenja pristupa i modela optimizacije. Ovo predstavlja posebno značajan istraživački pristup ako se ima u vidu složenost i glomaznost rudarskih tehnoloških sistema.

Iz prethodno navedenih razloga, a za potrebe daljeg unapređenja optimizacionih pristupa, razvoj modela optimizacije se bazira na savremenoj metodi systemske analize, odnosno razvoju integralnog modela optimizacije planiranja sistema eksploatacije u cilju postizanja maksimalnih ekonomskih efekata pri eksploataciji siromašnih ležišta mineralnih sirovina. Naravno, želja svakog rudarskog inženjera je da ima integralni model za planiranje svih tehnoloških podsistema u okviru jedinstvenog sistema eksploatacije, međutim, tako kompleksni sistemski modeli još uvek se teško realizuju.

Ovo poglavlje upravo obrađuje metodološki pristup razvoja integralnog modela optimizacije planiranja sistema eksploatacije u funkciji strateških ciljeva površinskih kopova uglja sa sledećim fazama razvoja systemske analize, slika 4.14.



Slika 4.14 Integralni pristup planiranja površinskog kopa uglja

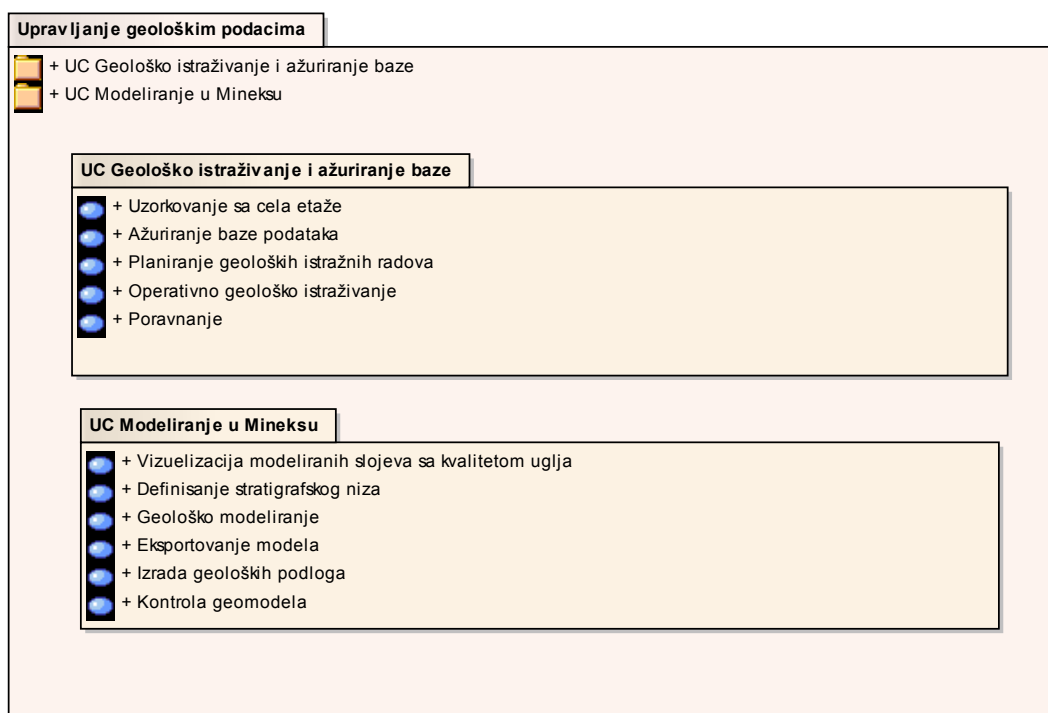
Kao što se može videti sa slike 4.14 sistemski pristup integralnom modeliranju planiranja operativnih procesa eksploatacije uglja se sastoji od pet sub-optimizacionih modela za pojedinačne tehnološke celine, koje čine jedinstveni proizvodni sistem. Integralni model i softversko rešenje za strateško planiranje uključuje dva nivoa optimizacije:

- prvo, kroz izradu blok modela ležišta stvaraju se uslovi za kreiranje tehnološkog modela rada otkopnih mašina kroz: vertikalnu podelu ugljenog sloja na etaže, definisanje selektivnosti rada i procenu eksploatacionog kapaciteta sistema. Nakon ove tehnološke faze rada, sledi optimizacija plana rada transportnih sistema u okviru tehnoloških procesa na deponiji i isporuci uglja termoelektrani.
- drugo, realizuje se optimizacija integralnog proizvodnog sistema uključujući i deponiju uglja sa ciljem maksimalnog iskorišćenja ležišta (otkopavanja niskokvalitetnih ugljeva) i stalne isporuke uglja termoelektranama odgovarajućeg kvaliteta i količina, čime postizemo maksimalne ekonomske efekte i održivost rudarskog projekta.

U nastavku teksta sledi opis razvoja modela u okviru integralnog pristupa operativnom planiranju sistema eksploatacije uglja na površinskim kopovima. Prikaz modela prate slučajevi upotrebe (eng. Use Case, UC).

4.3.1. Model geološke baze i ležišta

Jedinstveni sistemski pristup podrazumeva upravljanje procesima planiranja svih tehnoloških faza eksploatacije od informacija istražnih radova, preko modeliranja ležišta, otkopavanja uglja pa do isporuke uglja termoelektranama. Upravljanje istražnim geološkim podacima i izrada modela ležišta predstavljaju nerazdvojni deo integralnog koncepta planiranja i skup poslova koji prethode izradi operativnih planova za potrebe optimizacije sistema eksploatacije. U tu svrhu je dat detaljniji opis aktivnosti koje ovaj podsistem realizuje u okviru integralnog sistema, slika 4.15.

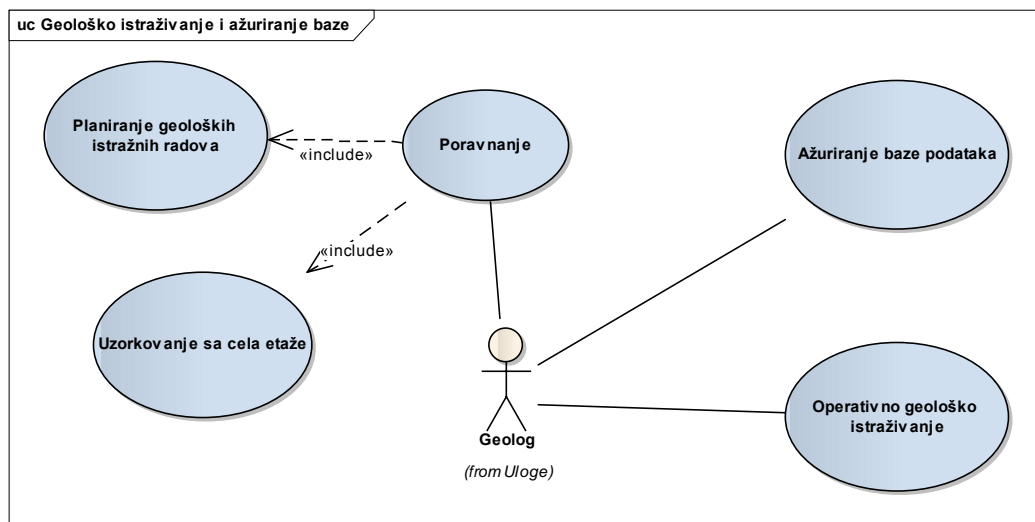


Slika 4.15 Upravljanje geološkim podacima i modeliranje u Minex-u

Geološka baza podataka skladišti podatke o svim istražnim radovima: litologija, stratigrafija, laboratorijski podaci o kvalitetu uglja (sadržaj pepela, vlage, DTE, sumpora, itd) i ostalim parametrima uglja i ostalih materijala iz bušotina. Dijagram slučaja upotrebe u okviru istraživanja i ažuriranja baze podataka je prikazan na slici 4.16, a sastoji se od sledećih aktivnosti:

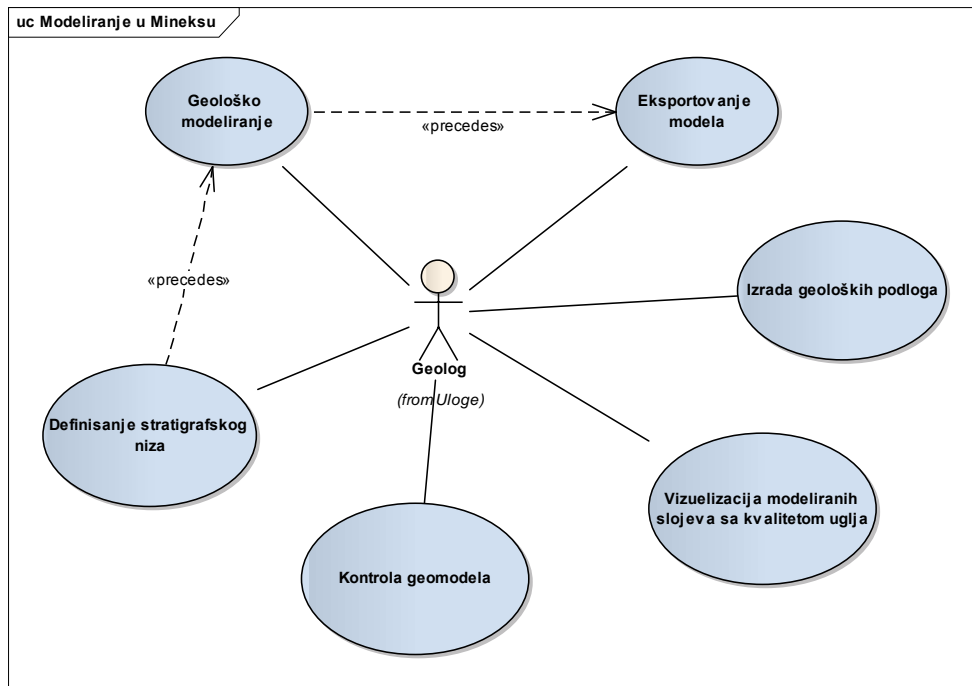
- dodatnih istražnih radova
- uzorkovanja sa čela etaže
- ažuriranja baze podataka
- planiranja geoloških istražnih radova
- operativnog geološkog istraživanja, i
- poravnanja.

Za upravljanje podacima koristi se BpUBs aplikacija; podaci se čuvaju u centralnoj SQL Server bazi podataka (Gojak et al., 2011). Za potrebe geološkog modeliranja ležišta podaci se izvoze u Minex operativnu bazu podataka za određeno ležište uglja.



Slika 4.16 UC Geološko istraživanje i ažuriranje baze

Minex modeliranje uključuje: izradu gridova (mreža) krovine i podine ugljenih slojeva, i parametara kvaliteta uglja (DTE, sumpor, pepeo, vlaga, itd), izvoz podataka iz modela u formatu prilagođenom za dalje korišćenje, kao i kontrolu geološkog modela i izradu prateće grafičke dokumentacije. Ovome predhodi definisanje stratigrafskog niza, što predstavlja određivanje sekvence po kojoj se kreiraju slojevi. Dijagram slučaja upotrebe modeliranja je prikazan na slici 4.17.



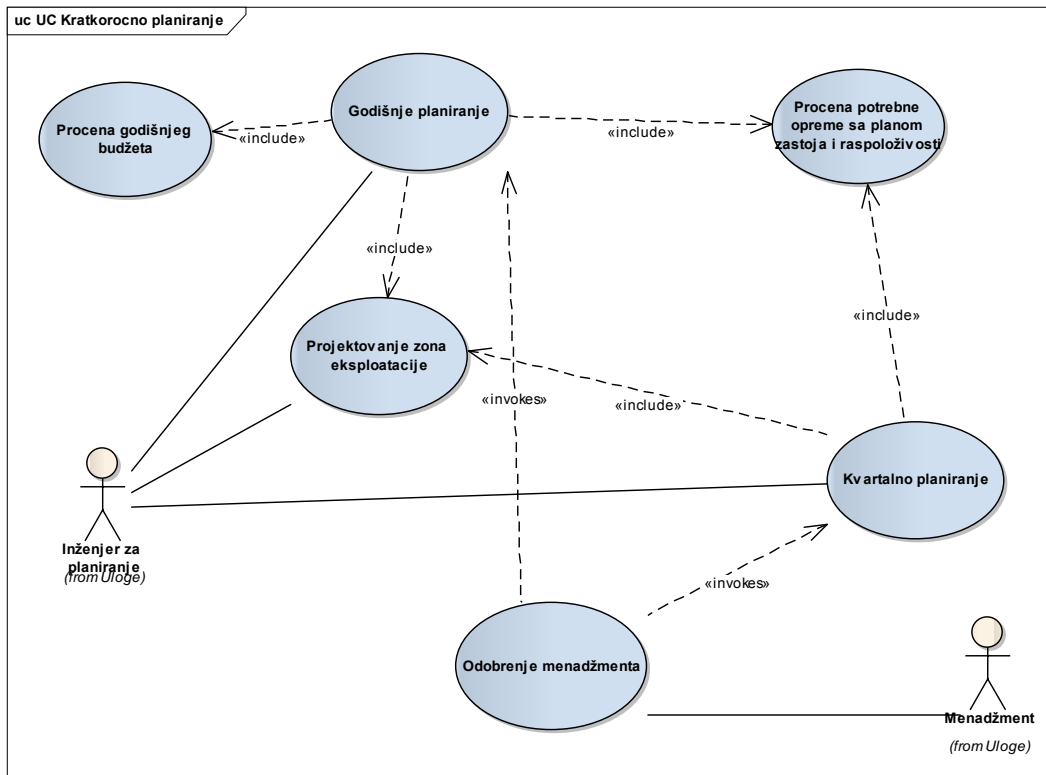
Slika 4.17 Modeliranje u Minex-u

4.3.2. Model kratkoročnog planiranja

Dva ključna slučaja korišćenja u okviru ovog modela su: godišnje planiranje i kvartalno planiranje. Oba, samo sa različitim nivoom detaljnosti, periodima i preciznosti, uključuju:

- izvesniju procenu potrebne opreme sa planom zastoja i raspoloživosti
- projektovanje zona eksploatacije
- verifikaciju plana od strane menadžmenta

Pored navedenog, u okviru godišnjeg planiranja se vrši i procena godišnjeg budžeta. Dijagram slučaja upotrebe Kratkoročno planiranje je prikazan na slici 4.18.

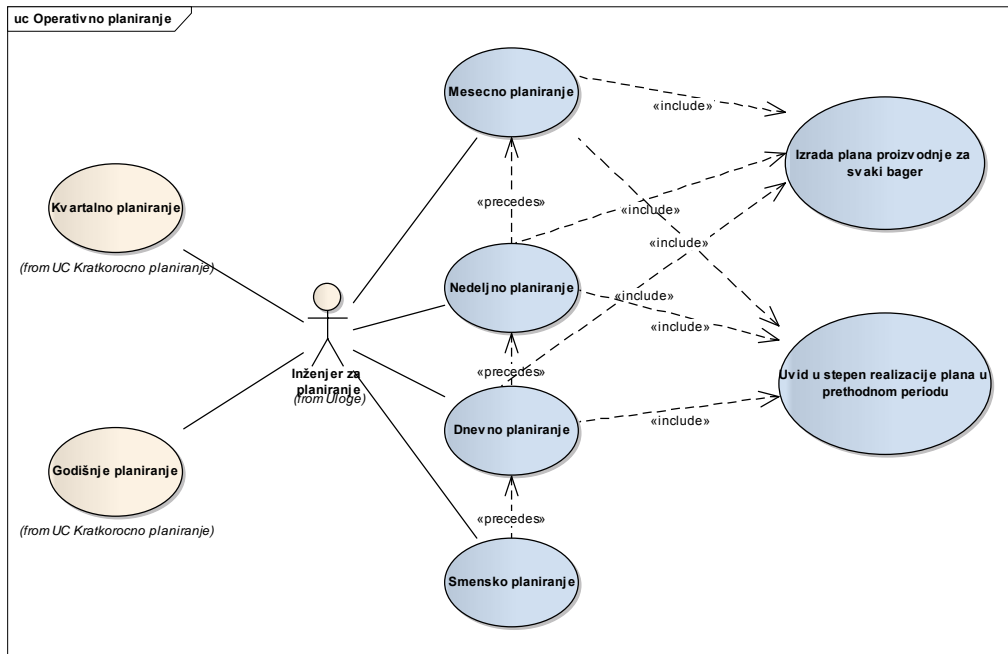


Slika 4.18 UC Kratkoročno planiranje

4.3.3. Model operativnog planiranja

Operativno planiranje uključuje: mesečno, nedeljno, dnevno i smensko planiranje. Planovi se kreiraju na osnovu godišnjeg i kvartalnog plana i modifikuju se prema aktuelnoj raspoloživosti opreme i prema stepenu realizacije planova iz prethodnog perioda.

Na slici 4.19 je prikazan dijagram slučaja upotrebe Operativno planiranje. Svaki od četiri nivoa operativnog planiranja biće detaljno opisani u poglavlju 6.2.4., a dalje u tekstu su opisani procesi koji se definišu operativnim planiranjem: tehnološko modeliranje u bloku, optimizacija transportnog sistema, planiranje deponije uglja i simulacija utovara vozova.



Slika 4.19 UC Operativno planiranje

4.3.4. Model tehnološkog rada bagera u bloku

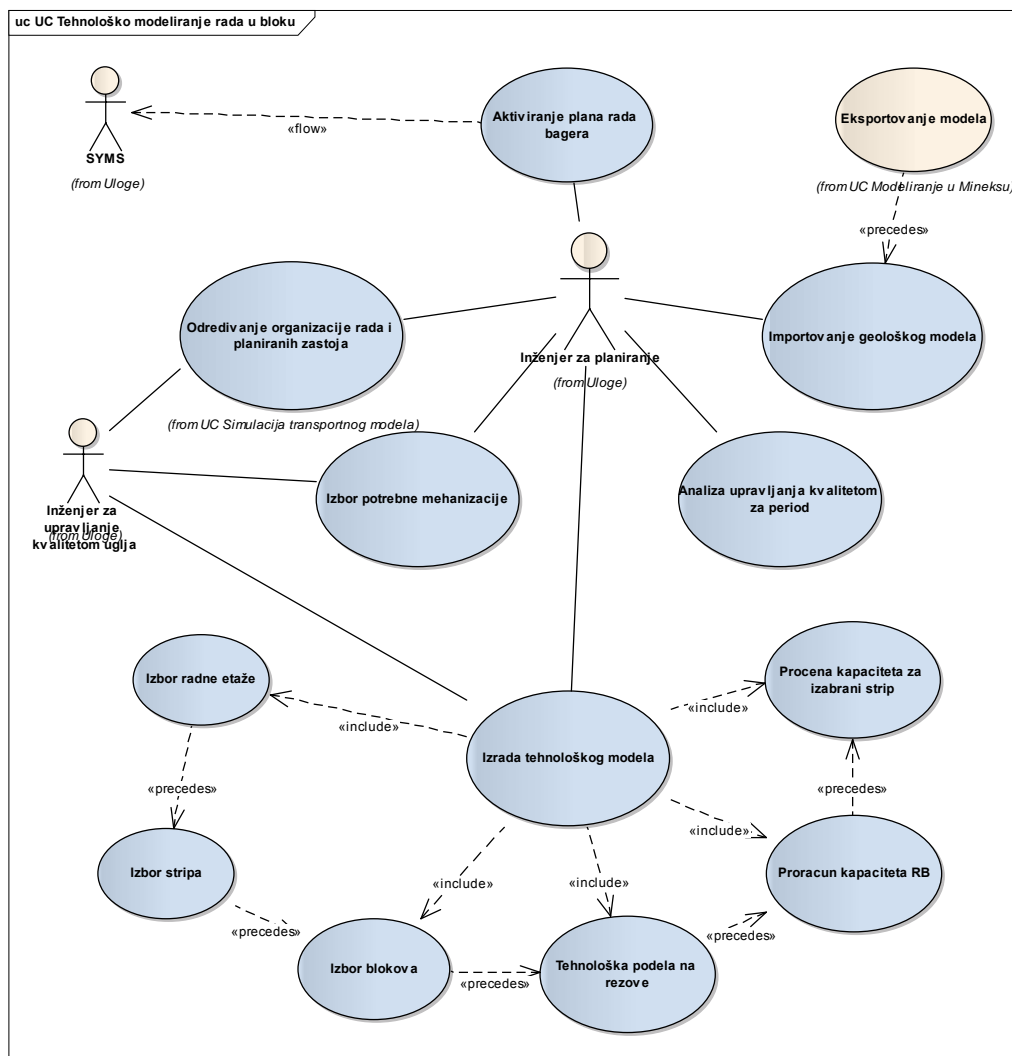
Glavni ciljevi tehnološkog modeliranja su: podela kopa na etaže, definisanje selektivnog otkopavanja, dimenzionisanje tehnoloških blokova za svaki bager, procena količina i kvaliteta uglja za etažu, svaki blok, odnosno podetažu.

Na osnovu importovanog geološkog modela, raspoloživosti opreme i njenih karakteristika planiraju se sledeće aktivnosti:

1. projektovanje operativnih nivoa etaža za svaki bager prema njegovim tehnološkim parametrima,
2. projektovanje tehnoloških otkopnih blokova prema tehnološkim parametrima odabranog bagera, i
3. projektovanje bagerskih podetaža za svaki tehnološki blok prema kvalitetu uglja.

Sistem koristi bazu podataka raspoložive rudarske opreme sa konstrukcionim karakteristikama i tehničkim parametrima za svaki tip mašine (rotorni bager,

vedričar, odlagač, reklejmer, transporteri sa trakom). Na slici 4.20 je prikazan dijagram slučaja upotrebe Tehnološko modeliranje rada bagera u bloku.



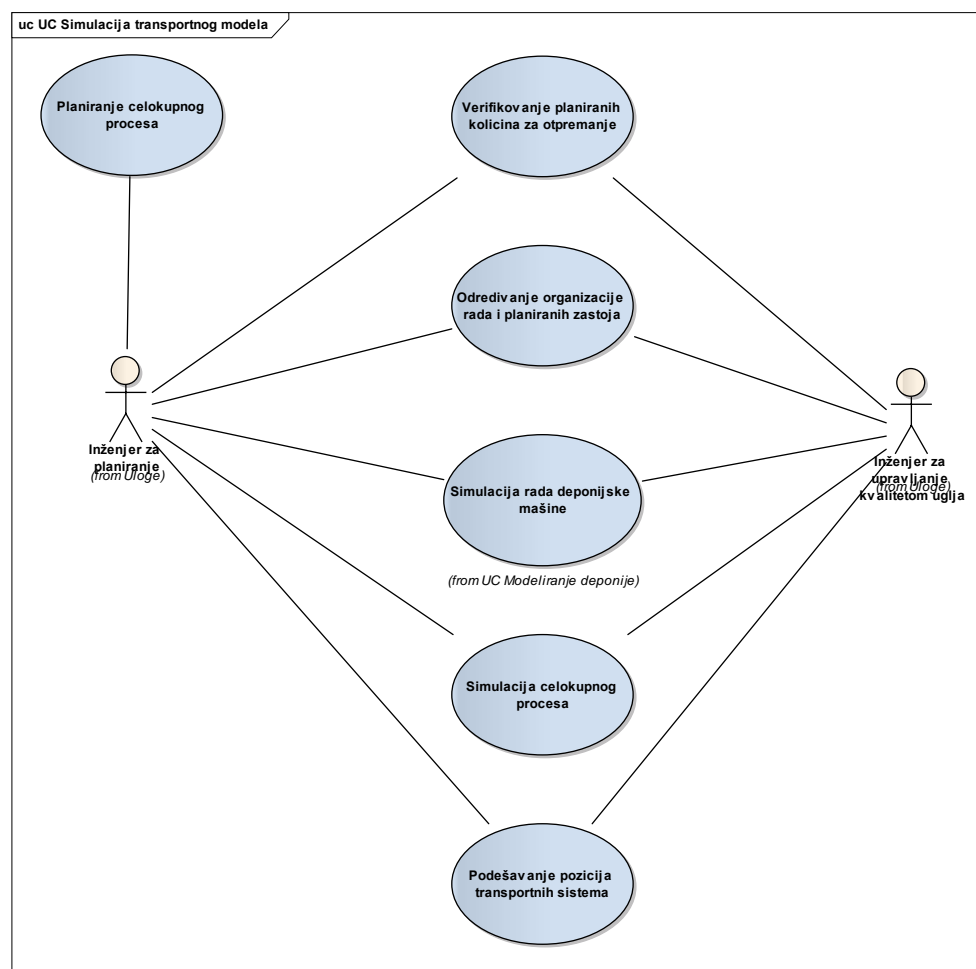
Slika 4.20 UC Tehnološko modeliranje rada bagera u bloku

4.3.5. Model simulacija transportnog sistema

Transportni model integralno optimizuje celokupan transportni sistem u funkciji eksploatacionih kapaciteta pojedinačno svakog bagera. U okviru ovog modula radi se simulacija integralnog sistema eksploatacije gde se u obzir uzima rad svih aktivnih bagera, rad deponije i utovar voza. Na osnovu rezultata simulacije generišu se optimalni proizvodni planovi za određeni operativni period, koji sadrže sledeće:

- operativni plan rada pojedinačno za svaki bager (kapacitet i kvalitet otkopanog uglja)
- operativni plan rada deponije (odlaganje na deponiju ili uzimanje uglja sa deponije)
- operativni plan utovara vozova i isporuka uglja za termoelektranu (direktan utovar ili sa deponije)

Na slici 4.21 je prikazan dijagram slučaja upotrebe Simulacija transportnog modela.



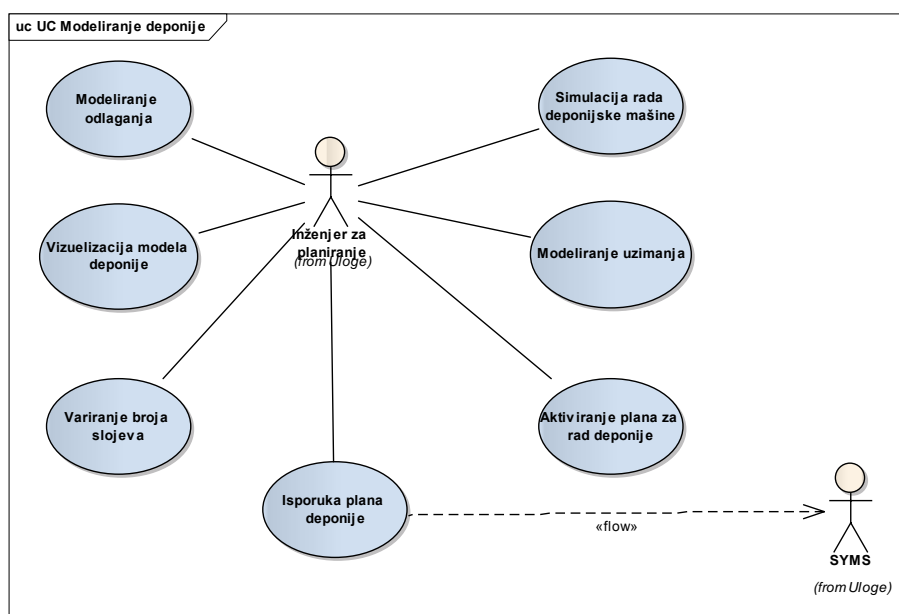
Slika 4.21 UC Simulacija transportnog modela

4.3.6. Model planiranja deponije uglja

Planiranje rada deponije za uglj je u funkciji optimizacije broja formiranih gomila uglja sa odgovarajućim brojem slojeva, tako da kriterijum optimizacije obezbeđuje da je uglj u svakoj formiranoj gomili odgovarajućeg kvaliteta, tj. u projektovanom opsegu rada termoblokova. U tu svrhu realizuju se sledeće aktivnosti:

- variranje broja slojeva. Vrší se optimizacija broja slojeva na osnovu podataka o kvalitetu uglja koji otkopava pojedinačno svaki bager, kvalitetu uglja na transportnom sistemu i na osnovu tehnoloških parametara odlagača i reklejmera.
- simulacija rada deponijske mašine na odlaganju uglja u geometriji strata modela.
- simulacija rada uzimanja uglja sa deponije saglasno tehnološkim parametrima mašine u geometriji strata modela.
- vizuelizacija modela deponije, odnosno vizuelizacija dizajniranih slojeva sa pogledom odozgo (iz ptičje perspektive) i pogledom na poprečni presek.

Na slici 4.22 je prikazan dijagram slučaja upotrebe Modeliranje deponije.

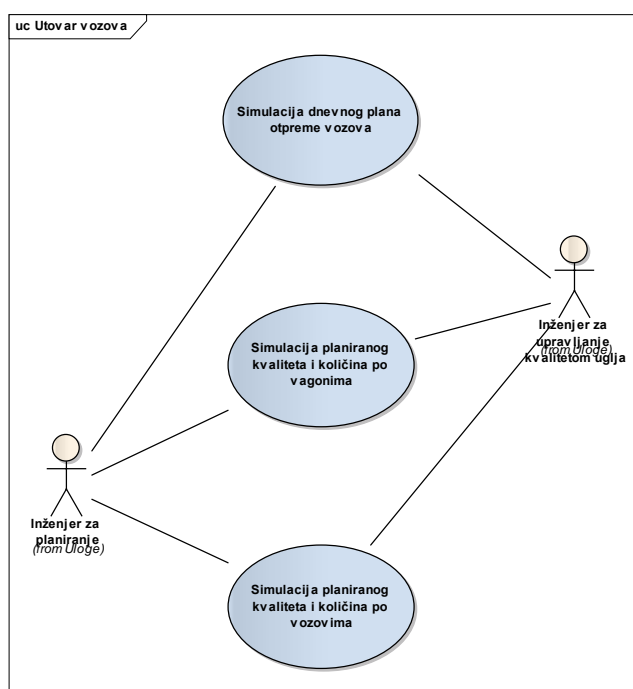


Slika 4.22 UC Modeliranje deponije

4.3.7. Model simulacija utovara vozova

Ovaj modul bavi se simulacijom i izradom plana otpremanja uglja sa kopa (direktno) i/ili sa deponije. U obzir se uzima planska količina i kvalitet uglja. Simulacija se može raditi na smenskom i dnevnom nivou, a može biti na nivou vagona ili voza.

Na slici 4.23 je prikazan dijagram slučaja upotrebe Simulacija utovara vozova.



Slika 4.23 UC Simulacija utovara vozova

4.3.8. Model za integralnu optimizaciju planiranja sistema

Ovaj model pruža podršku planeru za realizaciju integralnog kratkoročnog i operativnog planiranja. Glavni cilj planiranja je da se obezbedi proizvodnja i isporuka projektovane količine i kvaliteta uglja za termoelektranu u okvirima srednjeročnog odnosno dugoročnog plana, kako bi se obezbedili strateški ciljevi proizvodnje.

Podaci koje generišu ovi planovi, a koji se uzimaju u obzir prilikom izvođenja kratkoročnog planiranja su:

(1) Iz domena dugoročnog planiranja:

- Analiza različitih scenarija projektovanja kopa i planova proizvodnje
- Završna kontura površinskog kopa (Proračun resursa/rezervi)
- Životni vek kopa, odnosno godišnji kapacitet
- Prognoza dinamike i plana (cut-off kvaliteta uglja, i redosled otkopavanja)
- Sugerisana potrebna oprema

(2) Iz domena srednjeročnog planiranja:

- Detaljni plan otkopavanja (karte razvoja rudarskih radova)
- Detaljni plan kapaciteta otkopavanja, izbor i dimenzionisanje potrebne opreme

Na osnovu preuzetih planskih podataka iz domena dugoročnog i srednjeročnog plana, koji predstavljaju ulazne podatke za realizaciju procesa koji se sprovode u sistemu integralnog operativnog planiranja su:

- određivanje optimalnog načina rada za sve mašine na površinskim kopovima i deponiji pomoću matematičkih algoritma za optimizaciju;
- definisanje radne lokacije za svaki bager, tehnološkog bloka i podetaža, odnosno rezova sa vrednostima parametara kvaliteta uglja (DTE, pepeo, vlaga, sumpor);
- definisanje tehnološkog blok modela za svaki bager i optimalnih eksploatacionih kapaciteta u funkciji postizanja potrebnog kvaliteta uglja i potrebnog proizvodnog kapaciteta;
- operativni planovi eksploatacije uglja, skladištenja na deponiju i isporuke termoelektranama;
- planiranje zastoja opreme po sistemima;
- planiranje režima rada (direktni utovar ili odlaganje na jednu od deponija) ili korišćenje uglja sa deponija; i
- simulacija utovara vozova na smenskom i/ili dnevnom nivou.

Integralni model planiranja (SUKU) sa pojedinačnim modelima i njihovim interakcijama u okviru sistema prikazan je na slici 4.13.

Proces planiranja se razvija od srednjeročnog do godišnjeg plana, preko kvartalnog, mesečnog i nedeljnog do dnevnog i smenskog sa poštovanjem ograničenja koja obezbeđuju ostvarenje strateških ciljeva projekta. Godišnji plan se kreira jednom godišnje, kvartalne prognoze i mesečni planovi ažuriraju se i reaguju na neočekivane uslove u proizvodnji.

5. RAZVOJ INFORMATIČKE PODRŠKE INTEGRALNOM PLANIRANJU I OPTIMIZACIJI SISTEMA EKSPLOATACIJE UGLJA

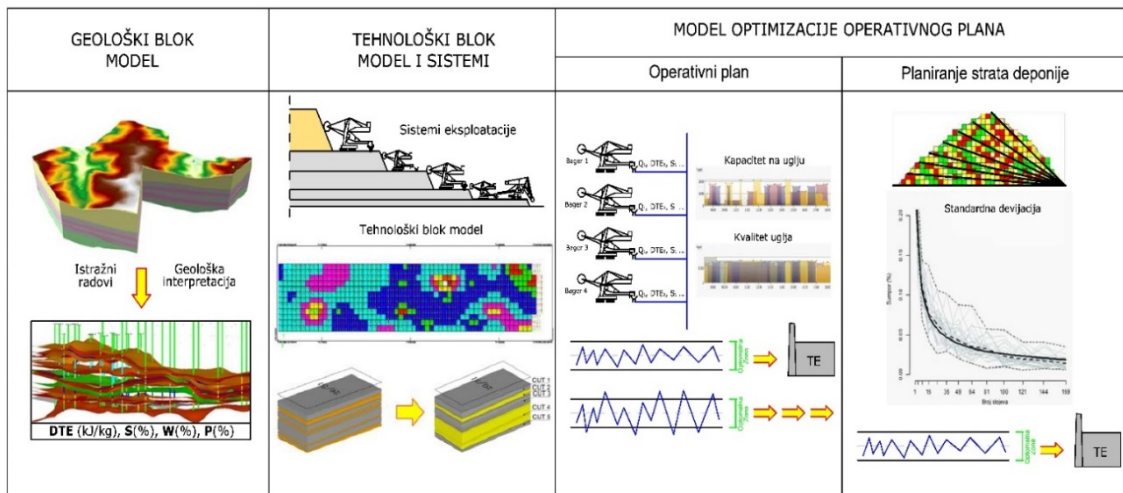
Primarni cilj softverskog rešenja za optimizaciju operativnog planiranja kontinualnih sistema eksploatacije lignita na površinskim kopovima je da pomogne rudarskom inženjeru - planeru da pravovremeno izvede efikasan operativni plan tako da se dugoročno realizuju strateški ciljevi projekta.

Kao što je već definisano u glavi 4, optimizacija operativnog plana uključuje modeliranje četiri podsistema, i to (slika 5.1.):

- tehnološko modeliranje sistema eksploatacije na osnovu modela ležišta;
- integralnu simulaciju otkopno-transportnog sistema;
- tehnološko modeliranje deponije; i
- simulacija utovara vozova i isporuke uglja termoelektrani.

Implementirani model optimizira procese proizvodnje u funkciji ostvarenja zadatih kapaciteta i kvaliteta mineralne sirovine. Kapacitet i kvalitet su određeni kao funkcija cilja za koju važi skup ograničenja koja definišu izvodljivost rešenja. Funkcija cilja i prateća ograničenja su matematičke funkcije i relacije parametara i promenljivih odlučivanja. Promenljive odlučivanja su parametri sistema koji mogu biti kontrolisani, dok tehničko-tehnološki parametri ne mogu biti kontrolisani od strane planera.

U nastavku sledi opis formiranja neophodnih baza podataka, kao podrške implementaciji implementiranih algoritama optimizacije.



Slika 5.1 Integralni pristup optimizacije procesa planiranja

5.1. Model baze podataka

Za efikasnu realizaciju operativnog plana prvo je neophodno definisati i razviti model podataka za ceo tehnološki sistem koji je predmet planiranja. Na slikama 5.2 do 5.9 prikazuju se delovi šeme baze podataka sa tabelama i njihovim relacijama koje se odnose na izradu operativnog plana rada celog tehnološkog sistema, odnosno na simulaciju rada više bagera.

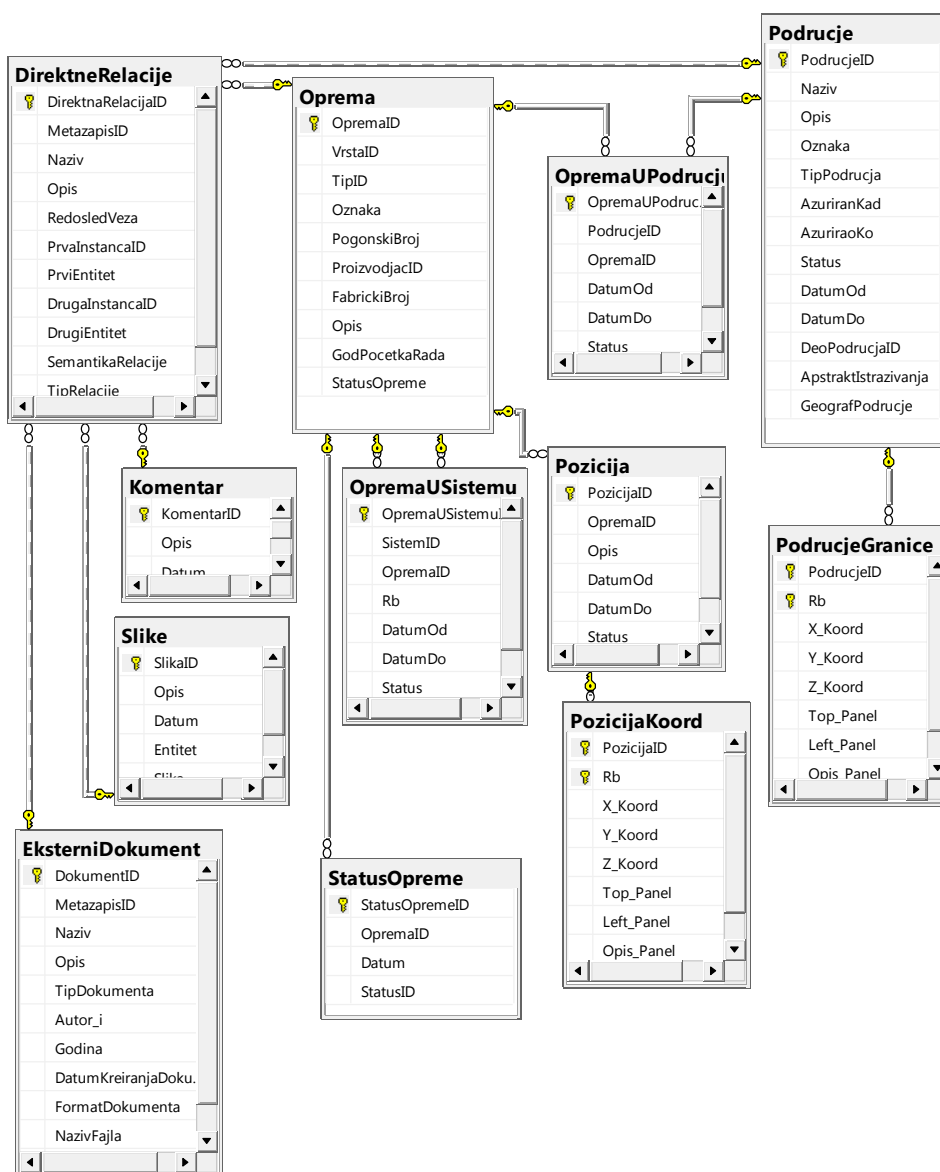
5.1.1. Proizvodni sistemi

Osnovni entitet predstavlja **Oprema** u kom se evidentiraju svi tipovi opreme: otkopno-utovarna i transportna. Tabela Oprema, osim podataka o opremi skladišti i podatke o proizvodnim sistemima, na primer BTD (bager-transporter-drobilana) sistemima. Veza sistema i opreme koja ulazi u sastav pojedinog sistema je modelirana tabelom **OpremaUSistemu**. Modelom je takođe podržan istorijat promena, što znači da se pri novom rasporedu opreme stari podaci čuvaju. Tabelom **StatusOpreme** se evidentira aktuelni status, ali i istorijat tih statusa.

U tabeli **Podrucje** se evidentiraju podaci o područjima eksploatacije, što može biti kop ili deo kopa. Evidentiranje na kom kopu, odnosno u kom području radi pojedinačna oprema je modelirano tabelom **OpremaUPodrucju**. Za svaku

pojedinačnu opremu se u tabelama **Pozicija** i **PozicijaKoord** evidentiraju prostorne lokacije pojedinačne opreme, pri čemu je omogućeno praćenje istorijata pomeranja opreme.

Evidentiranje različite dokumentacije je predviđeno tabelom **EksterniDokument**. Zapisivanje napomena, poruka i komentara se implementira tabelom **Komentar**, a u tabeli **Slike** se čuvaju različiti grafički prilozi. Ova tri vida dokumentacije se preko tabele **DirektneRelacije** povezuju sa primerkom opreme na koju se odnose, ili područjem.



Slika 5.2 Proizvodni sistemi, pozicije opreme i dokumentacija

5.1.2. Konstruktivni i tehnološki parametri opreme

Tabela **S_Koncept** implementira opšti rečnik podataka za celu aplikaciju i u njoj se nalazi opšta taksonomija, odnosno klasifikacija svih pojmova koji se koriste u CQMS sistemu, slika 5.3. Deo te taksonomije se odnosi na modeliranje kataloga različitih parametara (konstruktivnih i tehnoloških) i tipova opreme kroz opštu klasifikaciju. Povezivanje parametara sa odgovarajućim tipovima opreme se ostvaruje tabelom **ParametarZaTO**, a konkretne vrednosti definisanih parametara za primerke opreme se evidentiraju u tabeli **VrednostParametraOpreme**.



Slika 5.3 Konstruktivni i tehnološki parametri

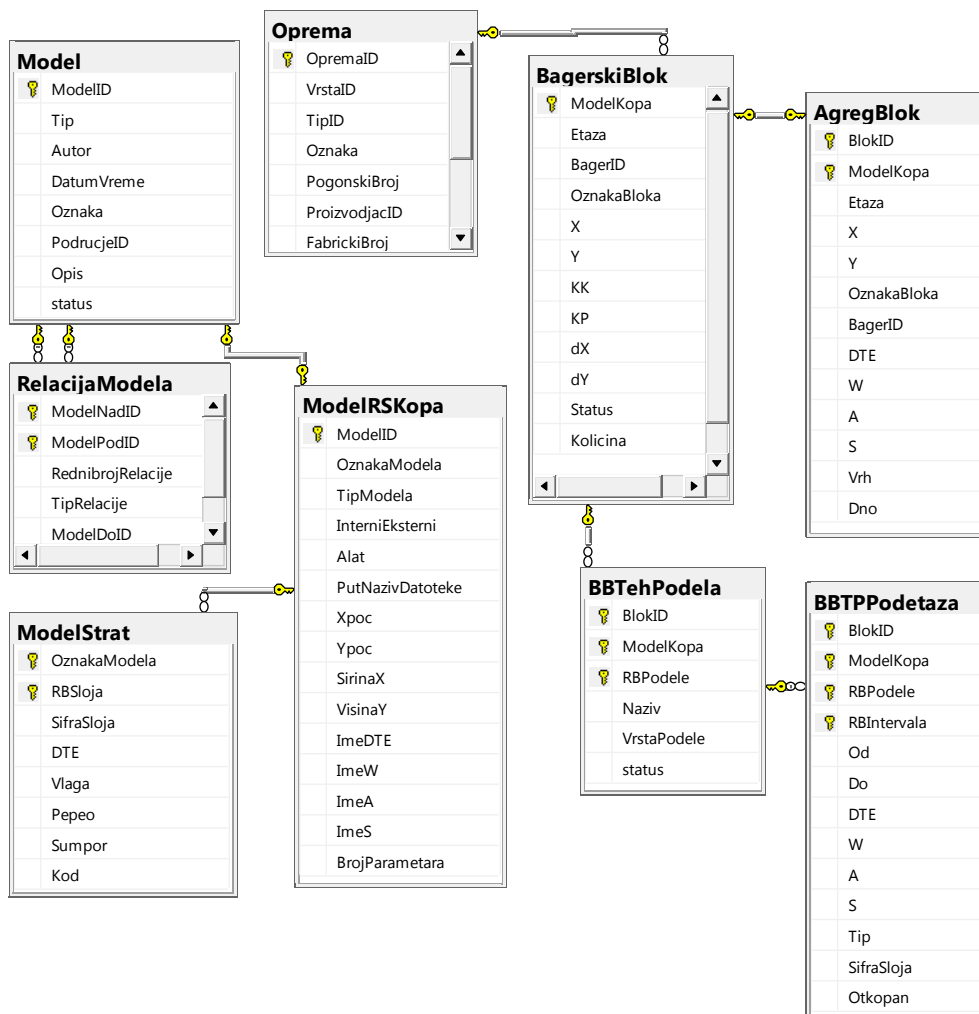
5.1.2.1. Tehnološki model bagera

Geološki model i etažne površi su u formi mreže, oba data sa istim parametrima mreže: isti prostor i veličina ćelije mreže. Na osnovu ovih podataka se kreira **BagerskiBlok** koji nosi osnovne informacije o poziciji bloka (x,y), etaži, bageru koji radi u tom bloku, opcionalno oznaci bloka, potom kote krovine (kk) i podine (kp), kao i veličinu samog bloka: dx, dy , a visina je $H=kk-kp$. Opcionalno Bagerskom bloku se

mogu dati i dodatne oznake, što može biti bitno kod izdavanja radnih naloga bageristi, a te oznake se obično vezuju za odgovarajući članak transportera i etažu. Bagerski blok takođe nosi informaciju o modelu čiji je on sastavni deo. Relacija sa tabelom **Oprema** omogućava da se svakom bloku pridruži bager koji će da ga otkopava, slika 5.4.

Tabela **Model** treba da pruži metapodatke o različitim tipovima modela, kao što su geološki, model etaža (koji ostaje kao eksterni, samo mu se pamti putanja i metapodaci), tehnološka podela bloka na rezove, proračun kapaciteta bagera, operativni plan rada tehnološkog sistema (simulacija) itd. Tabela **ModelRSKopa** skladišti dodatne podatke o modelu za njihovu pravilnu prostornu interpretaciju. Involucija nad tabelom **Model** je implementirana tabelom **RelacijaModela**, ima za cilj da omogući veze između pojedinih modela, kao na primer između modela ležišta i modela etažnih površi, kako bi se u modelu izdvojili bagerski (etažni) blokovi kao segmenti geoloških blokova. Metapodaci o stratigrafiji, odnosno o slojevima geološkog modela se nalaze u tabeli **ModelStrat**, a osim šifre sloja i koda koji govori da li je ugljeni ili jalovinski sloj u pitanju, uključuju i prosečnu ponderisanu parametara kvaliteta uglja. Ukoliko u nekom bloku ne postoje podaci o parametrima kvaliteta, tada se ovi podaci mogu iskoristiti kao podrazumevane vrednosti. Tabela **AgreBlok** se koristi za statističku analizu slojeva i u njoj se smeštaju ponderisane vrednosti kvaliteta uglja, radi brzog učitavanja prikaza. Umesto da se učitaju svi intervali blokova da bi se prikazao sloj, učitava se samo mala količina informacija koja može da se učita vrlo brzo.

Za jedan bagerski blok je moguće uraditi više tehnoloških, vertikalnih podela, od kojih jedna ili više varijanti mogu da budu snimljene u bazu. Podaci o varijanti podele pojedinog bloka se čuvaju u tabeli **BBTehPodela**. Konačno, u tabeli **BBTPPodetaza** su relevantni podaci za jednu podetažu. Treba napomenuti da se u ovoj tabeli skladište podaci o kvalitetu uglja geološkog modela, ali i podaci tehnološkog modela za koji su vrednosti parametara kvaliteta uglja dobijene ponderisanjem vrednosti iz geološkog modela. Geološki blokovi se u bazi prepoznaju tako što imaju oznaku 'GB', dok tehnološki imaju obično govoreće šifre koje nose informaciju o etaži i pozici bloka u okviru radne etaže.

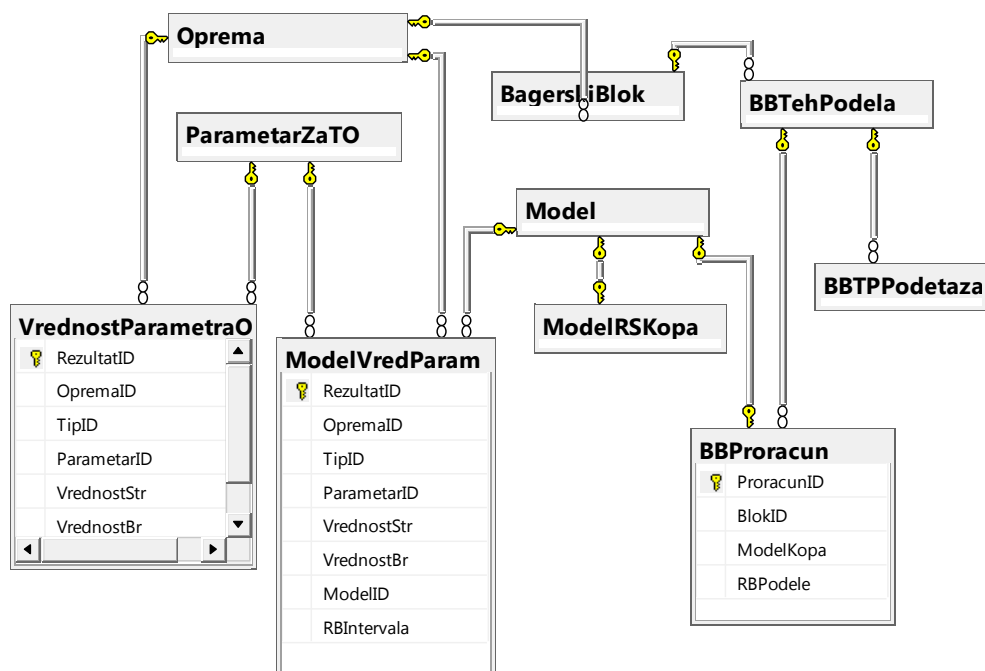


Slika 5.4 Definisane tehnološke modele

5.1.2.2. Proračun kapaciteta bagera u bloku

Moguće je uraditi jedan ili više proračuna za jedan tehnološki model bloka, odnosno podelu bagerskog bloka na podetaže (rezove), koji su skladišteni u tabelama **BagerskiBlok**, **BBTehPodela** i **BBTPPodetaza**, slika 5.5. Tabela **Model** služi za smeštanje opštih podataka o urađenim modelima, a u ovom slučaju proračunima rada bagera u bloku. Osim podataka o proračunima rada bagera u bloku, tabela Model služi i za druge namene kao na primer za evidentiranje podataka o proračunima simultanog rada svih bagera na kopu. Diferencijacija tipova proračuna se ostvaruje atributom *TipProracuna*, a u tabeli **BBProracun** se smeštaju podaci koji definišu konkretan bagerski blok i izabranu tehnološku podelu na podetaže za koju se vrši proračun.

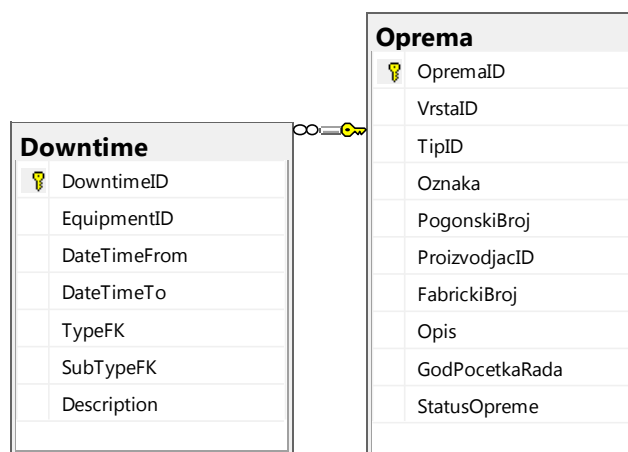
Tabela **ParametarZaTO** skladišti podatke o svim parametrima koji se evidentiraju za opremu, u ovom slučaju za bagere. Osim konstruktivnih i ulaznih tehnoloških parametri, koji mogu biti konstantni za pojedini bager, mogu da se učitavaju iz tehnološkog modela, da se unose za svaki proračun (za blok ili po podetažama) ili da se izračunavaju algoritmima ugrađenim u softver (za blok ili po podetažama). Tabela **ModelVredParam** skladišti podatke o vrednostima parametara koje su karakteristične za proračun rada bagera u bloku, bez obzira da li su karakteristične za blok kao celinu (tada je RBIntervala 0) ili za pojedinačne podetaže (RBIntervala nosi podatak o kojoj podetaži - rezu na koju se vrednost odnosi). Kada se kreira novi obračun, parametri koji su definisani kao ulazni „nasleđuju“ vrednost iz tabele **VrednostParametraOpreme** pri kreiranju novog zapisa. U bazi nije definisana direktna veza između ove dve tabele sa vrednostima parametara, jer ideja sa ovim „nasleđivanjem“ je implementirana da bi olakšala unos parametara proračuna, a ne zato što je potrebna iz perspektive integriteta podataka. Parametri koji su potrebni kasnije za izradu operativnog plana rada celog tehnološkog sistema, a koji su vezani za konkretan proračun rada bagera u podetaži se čuvaju u tabeli **ModelVredParam**.



Slika 5.5 Proračun kapaciteta bagera u bloku

5.1.2.3. Zastoji opreme

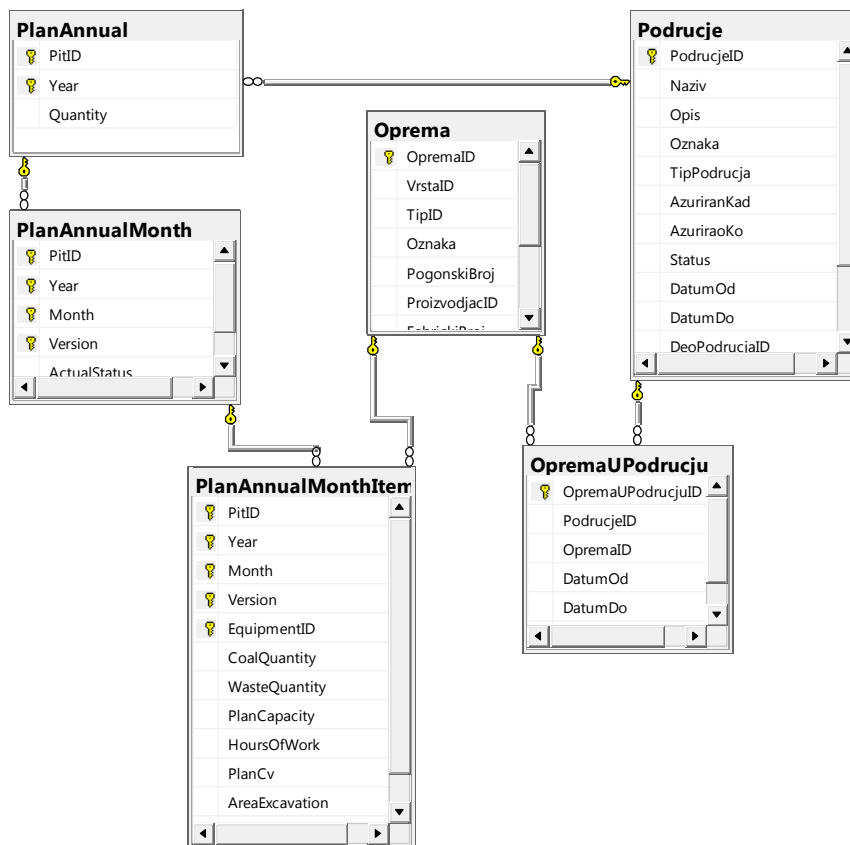
Tabela **Zastoj** modelira planirane zastoje pojedinačne opreme (bagera i deponijskih mašina) koja je vezana za planiranje. Evidentira se početak i kraj zastoja, slika 5.6. Tabela se odnosi prvenstveno na planirane zastoje, ali i one koje nastaju neplanirano, a utiču na kreiranje plana za sledeći period. Tabela se konsultuje za sve nivoe planiranja. Klasifikovanje tipova planiranih zastoja se ostvaruje atributom SubTypeID, a razdvajanje na planirane i neplanirane sa TypeID.



Slika 5.6 Zastoji opreme u sistemu

5.1.2.4. Godišnji plan

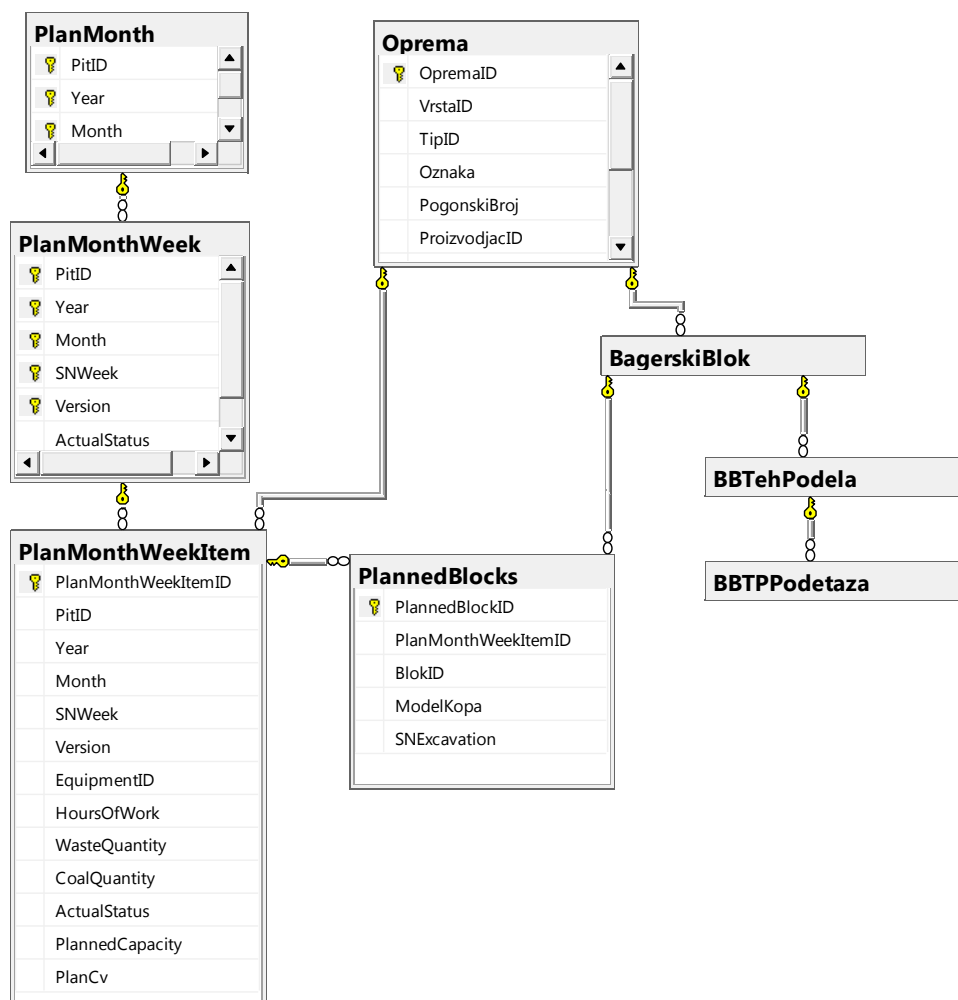
Godišnji plan se kreira za svaki površinski kop (tabela **Podrucje**) i vrh plana se smešta u tabelu **PlanAnnual**, slika 5.7. Plan se kreira po mesecima za svaki BTD sistem (tabela **Oprema**) i skladišti kroz tabele **PlanAnnualMonth** i **PlanAnnualMonthItem**. Definiše se planirana količina uglja i otkrivke, planirani kapacitet, časovi rada i zona otkopavanja. Polje *Version* obezbeđuje izradu rebalansa plana.



Slika 5.7 Godišnji plan

5.1.2.5. Mesečni plan

Tabela **PlanMonth** predstavlja vrh mesečnog plana, slika 5.8. Mesečni plan se izrađuje za svaku nedelju i te informacije se skladište u tabeli **PlanMonthWeek**. Polje *SNWeek* je redni broj nedelje u godini, a polje *Version* omogućava izrade novih nedeljnih planova, rebalansa, u okviru jednog meseca. Tabelom **PlanMonthWeekItem** za svaki BTĐ sistem se za svaku nedelju definiše planirana količina uglja i otkrivke, planirani kapacitet, časovi rada, procenjeni kvalitet. Tabela **PlannedBlocks** skladišti podatke o tehnološkim blokovima i redosledu otkopavanja. Ovakvo ulančavanje blokova definiše tehnologiju rada bagera u nizu (susednih) blokova.



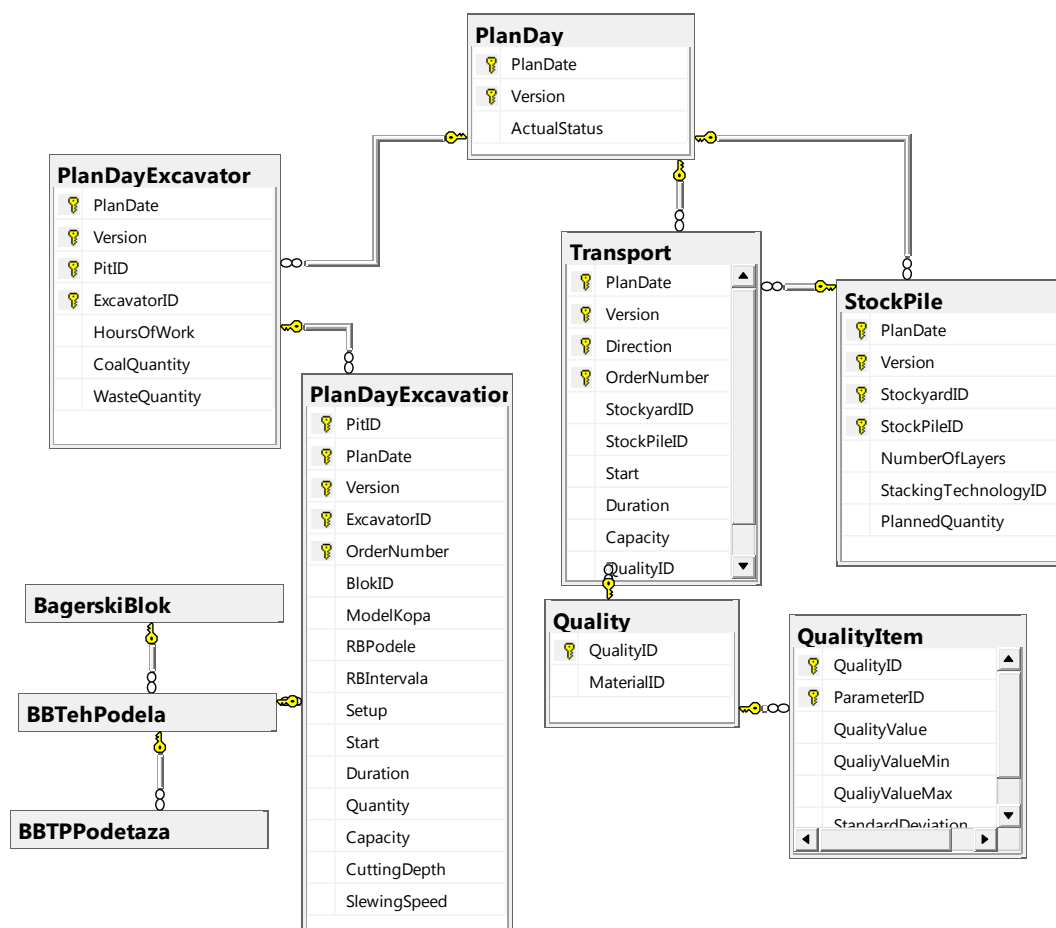
Slika 5.8 Mesečni plan

5.1.2.6. Nedeljni/dnevni plan

U okviru nedeljnog plana izrađuje se detaljan plan rada za svaki dan i smenu. Tabela **PlanDay** predstavlja vrh dnevnog plana i povezuje sve ostale elemente. Polje **Version** obezbeđuje kreiranje većeg proja planova za jedan nad (alternativni). **PlanDayExcavator** definiše planiranu dnevnu količinu za svaki bager, a predstavlja i ulazni podatak za proces simulacije plana, slika 5.9.

Podaci o radu bagera smeštaju se u tabeli **PlanDayExcavation**, to su: redosled blokova, podetaža i setapa, vreme rada, kapacitet i količina. Preko tabela **BagerskiBlok**, **BBTehPodela** i **BBTPPodetaza** generišu se podaci o kvalitetu uglja. Podaci o destinacijama (sa kopa na direktni utovar, sa kopa na deponiju i sa

deponije na utovar u vozove) se zbog iste strukture agregiraju u tabeli **Transport**. **Transport** nosi informacije o količini uglja, potrebnom vremenu za operaciju i kvalitetu. Kada je operacija vezana za deponiju sadrži i podatke o deponiji, odnosno sa koje/ ili na koju gomilu treba deponovati/uzimati uglj. Podaci o kvalitetu implementirani su tabelama **Quality** i **QualityItem**.



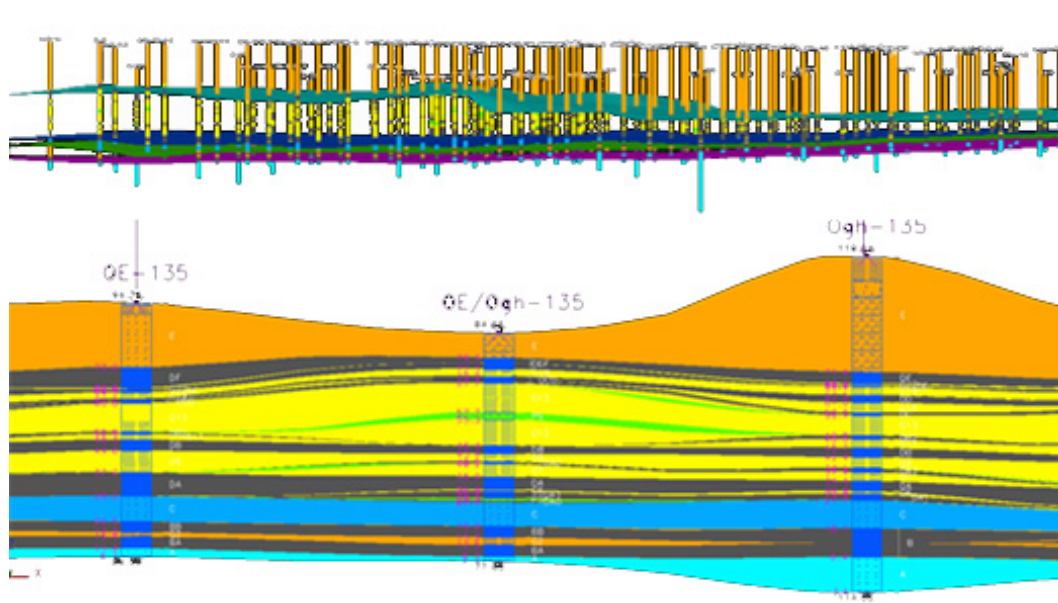
Slika 5.9 Nedeljni plan

5.2. Informatička implementacija razvijenog modela

5.2.1. Kreiranje geološkog i etažnog modela

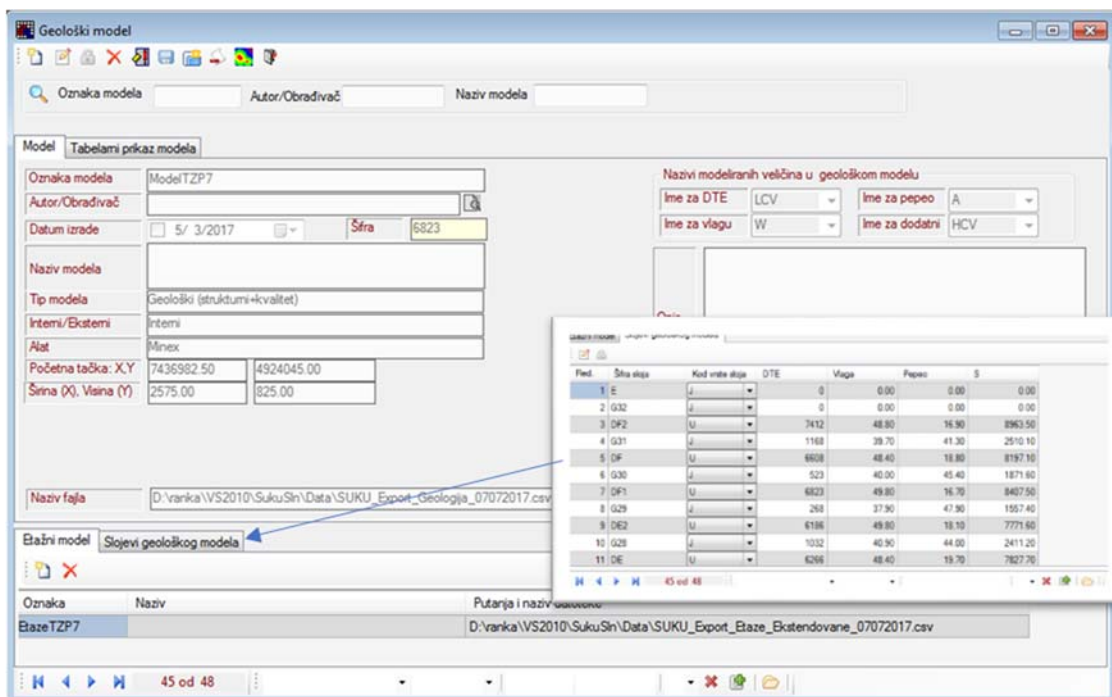
Za razvoj geološkog modela ležišta i projektovanje površinskog kopa se koristi Minex, koji na osnovu istražnih geoloških podataka prostorno interpretira ležište u obliku ugljenih slojeva sa modelom kvaliteta i litostratigrafskom podelom, oslanjajući se na kartirane litološke intervale, podatke o analizama uzoraka i podataka o stratigrafskoj sekvenci, tj. podatke o utvrđenim slojevima. Geološki model omogućava rudarskom inženjeru da efikasno planira aktivnosti tokom životnog veka rudnika. Sve rudarske aktivnosti na rudniku su zavisne od geološkog modela, i njima se omogućava planiranje i prilagođavanje rudarskih aktivnosti u svakom trenutku, u skladu sa ekonomskim i geološkim parametrima, koji mogu biti promenljiva tokom trajanja eksploatacije. Geološki model kreiran u Minex-u se uvozi u CQMS bazu podataka koja se koristi za sistemsko planiranje rudarskih radova, sa ciljem da se stvori grid model slojeva uglja (i jalovine) koje predstavljaju osnovu za analizu i dalje planiranje eksploatacije. Stratigrafska sekvenca definisana u Minex modelu se importuje u CQMS bazu podataka, kao i modeli kvaliteta uglja (DTE, vlaga, pepeo, sumpor) za svaki sloj uglja posebno. Svaka ćelija grida sadrži podatke o sloju, položaju (X, Y, krovina, podina) i parametre kvaliteta. Veličina grida za geološki model je 25x25m. Prikaz modela ležišta uglja, koji je razvijen u Minex softveru je dat na slici 5.10.

Pored geološkog modela, neophodno je kreirati i importovati model etažnih površi, koji je definisan sa istom veličinom ćelije, orijentacijom i ekstenom kao u geološkom modelu.

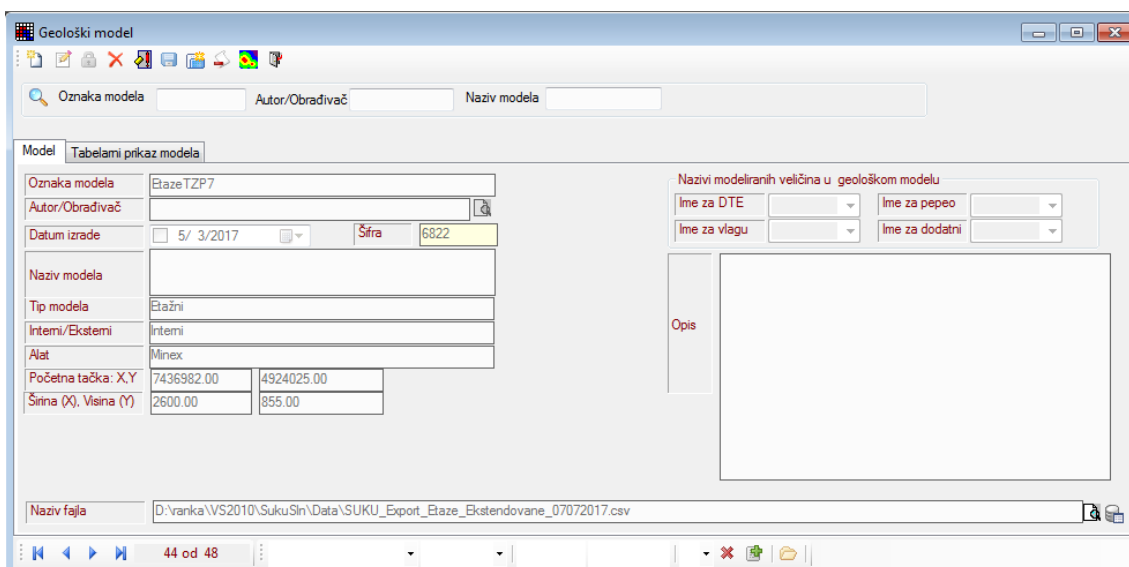


Slika 5.10 Minex prikaz dela modela ležišta

Na osnovu geološkog modela ležišta, kreiranog u Minex okruženju, prvo se kreira podela kopa na etaže, prema preuzetim etažnim površima, slika 5.11. Geološki model i etažne površi su u formi mreže, koje moraju biti poravnate, oba data sa istim parametrima mreže: isti prostor i veličina ćelije mreže. Panel za upravljanje etažnim modelom dat je na slici 5.12. Na osnovu ovih podataka se kreiraju blokovi koji nose osnovne informacije o poziciji bloka (x,y) , etaži, bageru koji radi u tom bloku, opciono oznaci bloka, potom kote krovine (kk) i podine (kp), kao i veličinu samog bloka: dx, dy , a visina je $H=kk-kp$. Svakom bagerskom bloku se dodeljuje status koji može biti, *nije otkopan*, *delimično otkopan*, *otkopan*. Bagerski blok takođe nosi informaciju o modelu čiji je on sastavni deo.



Slika 5.11 Interfejs za upravljanje geološkim modelom

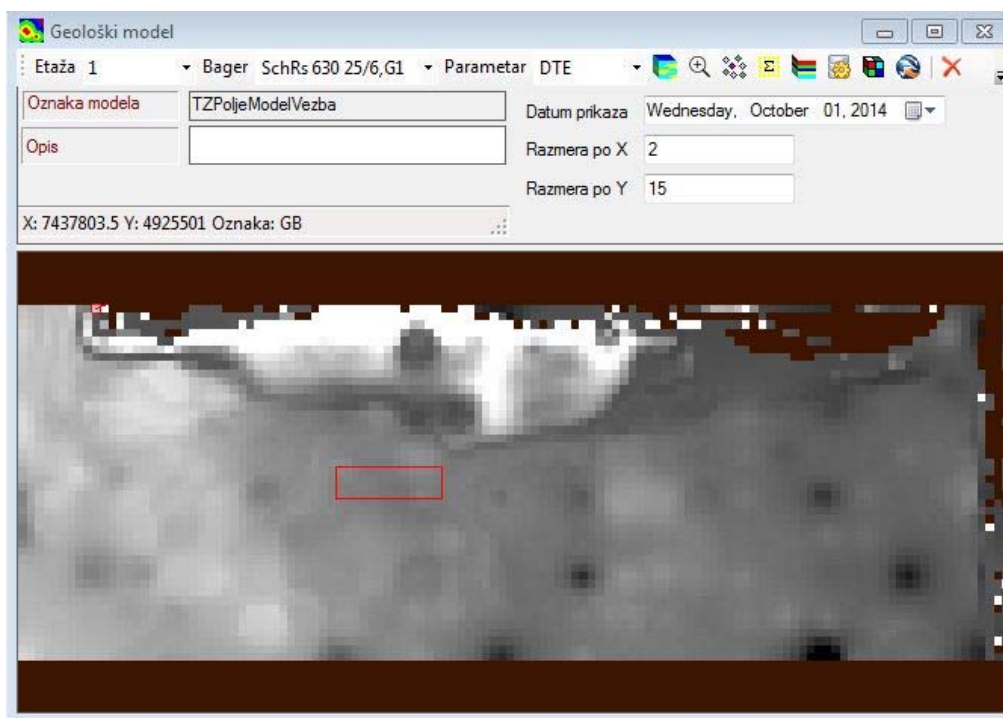


Slika 5.12 Interfejs za upravljanje etažnim modelom

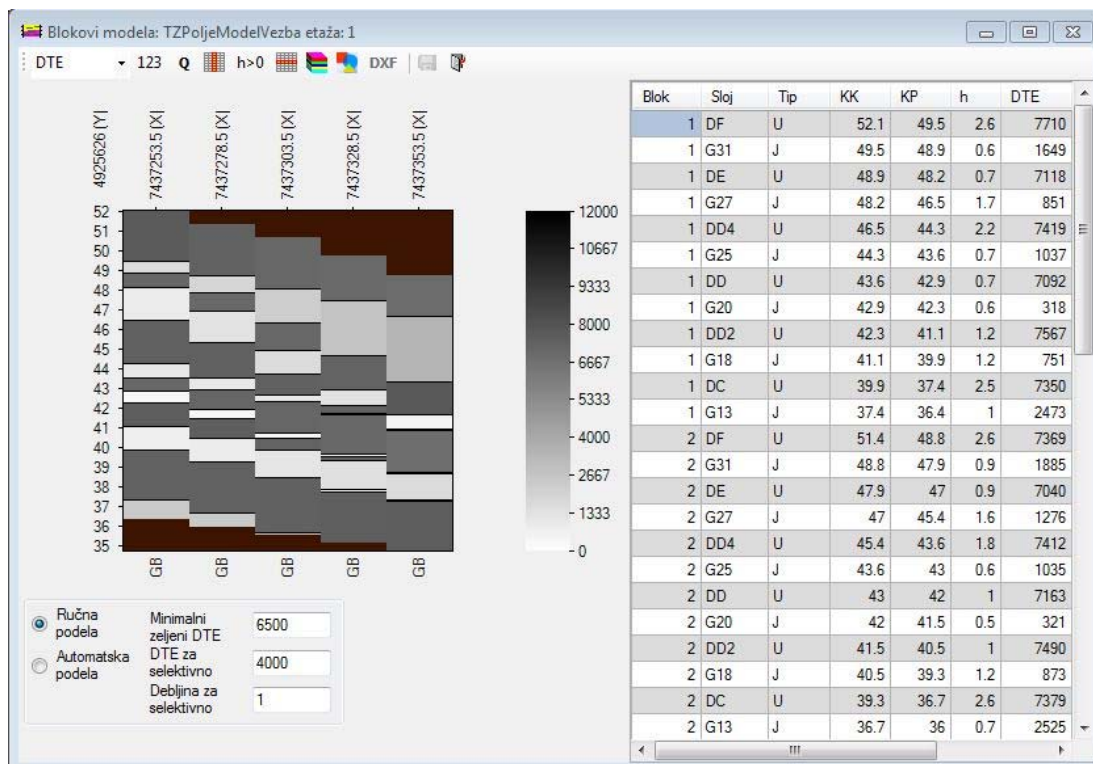
Prikaz i verifikacija blokova geološkog modela moguća je kroz panel **Geološki model** sa prikazom geološkog modela "odozgo", slika 5.13, ili u preseku slika 5.14, tako što se prvo izabere etaža, bager i potom prikazivanje modela iz baze podataka. Iz geološkog modela softver izdvaja samo delove blokova koji pripadaju konkretno

izabranoj etaži, a nijanse blokova oslikavaju ponderisane vrednosti odabranog parametra kvaliteta uglja (DTE, vlaga ili pepeo) za blok od vrha do dna etaže. Kada je model učitani može se izabrati niz blokova i prikazati. Izabrani niz blokova na panelu se označava crvenom linijom, slika 5.13.

Svojstva izabranih blokova na odgovarajućoj etaži se takođe automatski prokazuju sa u obliku tabela sa relevantnim parametrima: podaci o tipu sloja (ugalj ili jalovina), kota krovine, kota podine, debljina sloja, DTE, vlaga i pepeo, slika 5.14.



Slika 5.13 Prikaz geološkog modela i izbor blokova za prikaz u profilu



Slika 5.14 Prikaz blokova iz modela sa relevantnim parametrima

5.2.2. Optimizacija tehnološkog bloka

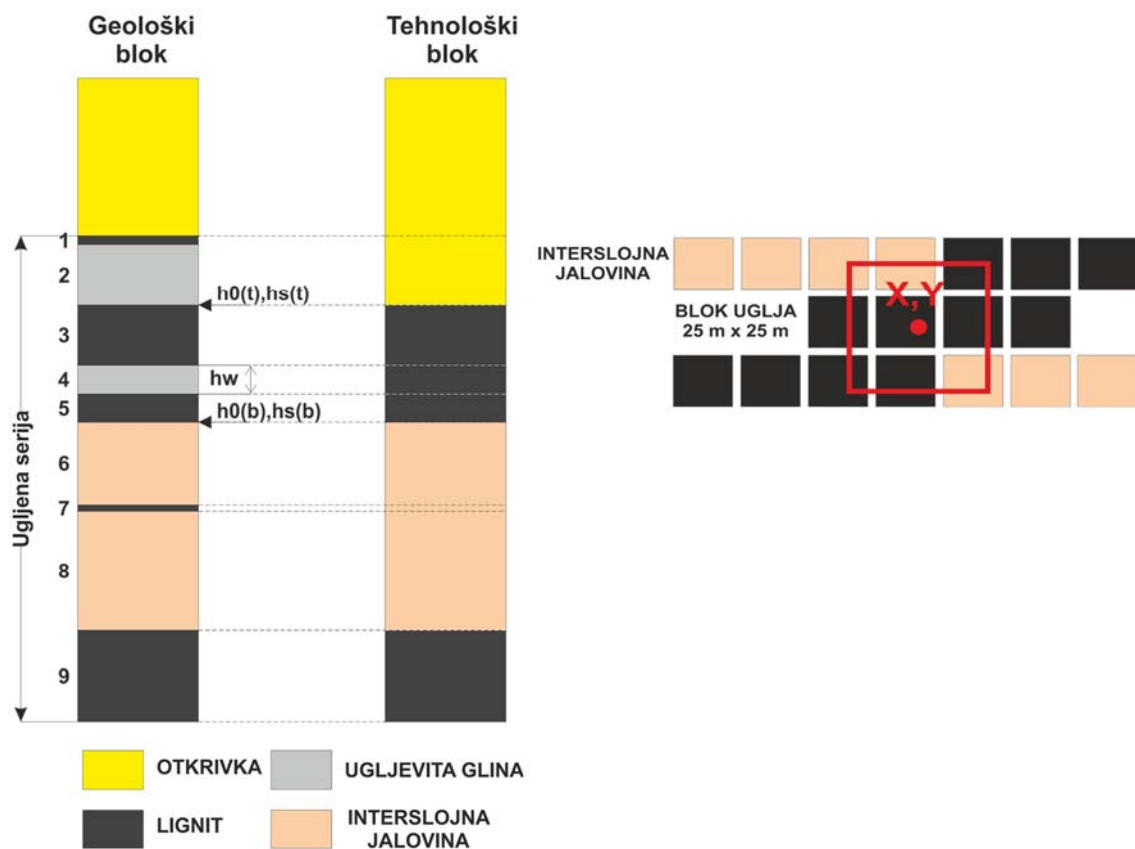
5.2.2.1. Matematički model za kreiranje tehnoloških blokova

Tehnološki blok se kreira iz dva koraka: (1) prevođenjem geološkog bloka u eksploatacioni tehnološki blok; i (2) podelom tehnološkog bloka na podetaže koje će se otkopavati konkretnim bagerom. Osnovni kriterijumi podele tehnološkog bloka na podetaže su sledeći:

- Minimalna debljina bloka i jalovih proslojaka koji mogu biti otkopani selektivnim putem. Ove vrednosti uglavnom zavise od tehničko-tehnoloških karakteristika bagera, geometrije etaže i metode kopanja;
- Granični sadržaj DTE-a koji se može pod određenim uslovima eksploatisati. Ovaj kriterijum je usko povezan sa specifikacijom uglja za potrebe sagorevanja u termoelektrani, tako da ovaj kriterijum omogućava postizanje zahtevanog kvaliteta uglja;

- Razblaženje sa jalovinom i eksploatacioni gubici koji nastaju pri otkopavanju na krovini i podini svakog bloka. Ovi parametri se moraju uzeti u obzir zato što se geometrija reza bagera ne može tačno prilagoditi geometriji gornje i donje površi blokova zbog geometrijskog položaja rudnog tela u prostoru.

Tehnološki blokovi u određenim situacijama mogu sadržavati tanke slojeve interslojne jalovine ili niskokvalitene proslojake uglja, dok blokovi jalovine mogu uključivati tanke slojeve lignita (slika 5.15). Debljina eksploatabilnog bloka (h_e) procenjena je kao zbir svih pojedinačnih slojeva uglja (n), debljine $h_{(t)i}$, i (m) slojeva jalovine debljine $h_{(w)i}$ unutar bloka (obično je $m \ll n$). Na sličan način, vrednost kvaliteta blok lignita (q_{bl}) određuje se kao ponderisani prosek svih q_i pojedinačnih slojeva/proslojaka.



Slika 5.15 Šematski prikaz ponderisanja u okviru tehnološkog bloka

Debljina (h_{bl}) i kvalitet (q_{bl}) eksploatacionog bloka se koriguju saglasno jednačinama (5.1) i (5.2) respektivno, pri čemu se u obzir uzimaju razblaženja i eksploatacioni gubici pri krovini i podini bloka uglja.

$$h_{bl} = \sum_{i=1}^n h_{(l)i} + \sum_{j=1}^m h_{(w)j} - (h_o(t) + h_o(b)) + (h_s(t) + h_s(b)) \quad (5.1)$$

$$q_{bl} = \frac{\rho_l \cdot \left(\sum_{i=1}^n h_{(l)i} \cdot q_{(l)i} - h_o \cdot (q_{(l)n} + q_{(l)1}) \right) + \rho_w \cdot \sum_{j=1}^m h_{(w)j} \cdot q_{(w)j} + 2 \cdot h_s \cdot q_s \cdot \rho_w}{\rho_l \cdot \left(\sum_{i=1}^n h_{(l)i} - 2 \cdot h_o \right) + \rho_w \cdot \left(\sum_{j=1}^m h_{(w)j} + 2 \cdot h_s \right)} \quad (5.2)$$

gde je:

$h_o(t)$, $h_o(b)$ - ekvivalentna debljina ugljenog sloja koja se gubi pri otkopavanju na krovini i podini blokova;

$h_s(t)$, $h_s(b)$ - ekvivalentna debljina jalovog proslojka koji korenspondira razblaženju pri krovini i podini ugljenih blokova;

$\rho(l)i$ - gustina sloja uglja i

$\rho(w)j$ - gustina sloja jalovine j

$\rho_s(t)$, $\rho_s(b)$ - gustina sloja jalovine pri krovini i podinim ugljenih blokova.

Iz gore opisane procedure pravljenja kompozita prilikom prevođenja geološkog u tehnološki blok sledi da treba jasno odrediti sledeće parametre:

- (1) Minimalna debljina slojeva jalovine koji se mogu selektivno otkopavati $h_{(w)min}$. Ovaj parametar uglavnom zavisi od opreme za otkopavanje i obično je veći za diskontinualnu rudarsku opremu.
- (2) Minimalna debljina slojeva uglja koji se mogu selektivno otkopati $h_{(bl)min}$. Ovaj parametar uglavnom zavisi od opreme za otkopavanje i obično je veći za diskontinualnu opremu.
- (3) Karakteristike kvaliteta jalovih slojeva $q_{(w)j}$ koji su obuhvaćeni kompozitom u okviru tehnoloških blokova. U većini slučajeva oni nisu poznati i moraju se računati.

- (4) Procenjeni kvalitet uglja po slojevima $q_{(l)i}$ u okviru tehnoloških blokova se preuzima direktno iz geološkog blok modela. Pouzdanost ove procene direktno zavisi od gustine laboratorijskih podataka i metode interpolacije.
- (5) Debljina razblaženja sa jalovinom (površinsko razblaživanje) i debljina gubitka sloja pri otkopavanju lignita na vrhu i dnu svakog bloka. Ovi parametri imaju značajan uticaj ne samo na debljinu blokova lignita (jednačina 5.1), već i na prosečne karakteristike kvaliteta uglja u svakom bloku (jednačina 5.2), tako da u određenim situacija neće moći zadovoljiti limit kvaliteta prema termoelektrani. Smanjenje razblaženja na površini bloka za posledicu će imati odgovarajući porast gubitaka otkopavnja. Određivanje ovih parametara (koji u većini slučajeva treba da budu različiti na vrhu i na dnu bloka) u odnosu na geometriju reza bagera i strukturnu geometriju ležišta, i imaju važan uticaj na procenu rezervi uglja u blokovima.
- (6) Gustina slojeva lignita ($\rho_{(l)i}$) i slojeva jalovine ($\rho(w)j$) koji su uključeni u blokove; i jalovine na vrhu ($\rho_s(t)$) i dnu ($\rho_s(b)$) blokova lignita. Ovi parametri bitno utiču na rezultate procene rezervi uglja na dva načina:
- Obračunate rezerve (tonaža) lignita iz odgovarajućih zapremina zavise od gustine lignita (tonaža faktor), i
 - Prosečne karakteristike kvaliteta blokova (jednačina 5.2) zavise od ovih parametra (faktor težine). Oni takođe mogu uticati na eksploataбилnost blokova na način da ne mogu da zadovolje odgovarajuće granice kvaliteta.

Navedene gustine na prostoru ležišta mogu se razlikovati za ugalj i jalovinu u skladu sa njihovom litologijom, poroznošću, petrografskim sastavom, kvalitetom ili drugim mineraloškim karakteristikama. Zbog toga je prostorno određivanje gustina materijala kritično za tačnost procene rezervi lignita.

- (7) Granične vrednosti kvaliteta rovnog uglja koji se eksploatiše i isporučuje teromelektranama (DTE, pepeo, sumpor, itd). Granične vrednosti ovih

parametara značajno utiču na količinu i kvalitet rezervi lignita, jer su to glavni kriterijumi, pored debljine sloja, za eksploatabilnost tehnoloških blokova. Određivanje tih granica je kritičan element postupka procene eksploatacionih rezervi i kvaliteta uglja.

5.2.2.2. Softversko rešenje

Softversko rešenje omogućava planeru da izvrši simulaciju različitih načina podele tehnoloških blokova, kako bi se odredilo optimalno rešenje. Softver na osnovu importovanog geološkog modela ležišta izvršava sledeće korake u okviru optimizacije operativnog plana:

- definiše radne etaže za svaki bager bager prema tehnološkim parametrima bagera;
- kreira tehnološke blokove za bagera prema tehnološkim parametrima odabranog bagera; i
- određuje podetaže saglasno tehnološkim parametrima bagera za svaki blok.

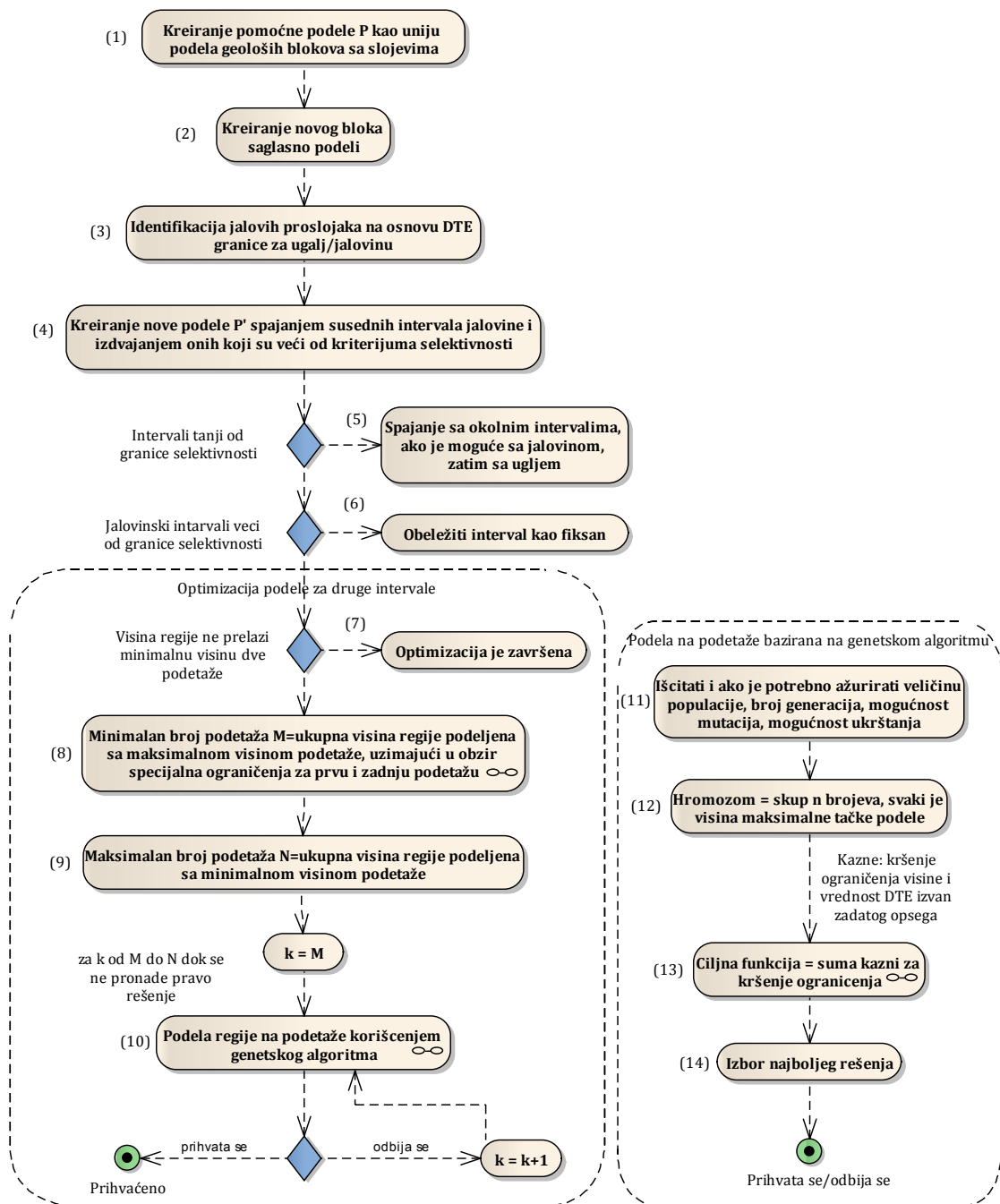
Optimizacija podele tehnoloških blokova na podetaže se vrši primenom genetskog algoritma (GA) integrisanog u deterministički algoritam, slika 5.16.

Postupak po kome se formira tehnološki blok je sledeći: (1) Formira se pomoćna podela P koja predstavlja uniju podela na slojeve svih geoloških blokova; (2) Izvrši se kreiranje pomoćnog bloka u skladu sa tom podelom; (3) U dobijenom bloku se na osnovu granice DTE-a za jalovinu (unosi se ručno ili se čita parametar DTE-u) identifikuju podintervali jalovine; (4) Susedni intervali jalovine se objedinjuju i pamte se kote podine i krovine objedinjenih intervala koji su veći od kriterijuma selektivnosti. Niz tih kota definiše novu podelu P'; (5) Svi intervali koji su tanji od praga selektivnog otkopavanja (unosi se ručno ili se čita parametar HSEL) se pripajaju nekom od susednih intervala. Ukoliko je moguće intervali jalovine se pripajaju intervalima jalovine, a intervali uglja intervalima uglja. Ukoliko takvo spajanje nije moguće, onda se spajanje vrši bez obzira na to; (6) Uočavaju se

intervali jalovine viši od praga selektivnog otkopavanja i vrši se optimizacija podele na regionima između tih intervala, dok oni ostaju fiksirani.

Procedura optimizacija u okviru jednog regiona vrši se na sledeći način: (7) Ukoliko visina regiona nije veća od dve minimalne visine podetaže (parametar MinVP), optimizacija je završena; (8) Izračunava se minimalan broj podetaža M koji se računa tako što se pretpostavi da će ukupna visina regiona biti podeljena na podetaže maksimalne visine (parametar MaxVP). Posebno, ukoliko prva podetaža bloka ili poslednja podetaža bloka pripadaju trenutnom regionu, njihova visina se dodatno ograničava maksimalnom visinom prve podetaže (parametar MaxVP1), odnosno maksimalnom visinom poslednje podetaže (parametar MaxVPP); (9) Izračunava se maksimalan broj podetaža N koji se računa tako što se pretpostavi da će ukupna visina regiona biti podeljena na podetaže minimalne visine (parametar MinVP); (10) Za vrednosti k od M do N pokreće se genetski algoritam koji pokušava da podeli region na k podetaža dok se ne nađe optimalno rešenje.

Genetski algoritam je definisan na sledeći način: (11) Učitava se i po potrebi modifikuje podrazumevana veličina populacije, broj generacija, verovatnoća mutacije, verovatnoća ukrštanja; (12) Hromozom je niz od n brojeva od kojih svaki predstavlja visinu tačke podele od vrha regiona na kojem se pravi podela; (13) Funkcija cilja je definisana kao zbir kazni za kršenje ograničenja. Kršenje ograničenja visine podetaža se kažnjava dodavanjem zadate vrednosti. Ukoliko je podetaža niža od maksimalne dozvoljene visine, to se kažnjava kvadratom te razlike. Podbacivanje DTE-a ispod minimalne vrednosti (zadaje se ručno ili se čita parametar MZDTE) se kažnjava dodavanjem zadate vrednosti; (14) Na kraju izvršavanja GA, najbolje rešenje se prihvata ukoliko mu je vrednost ispod definisane, a odbacuje u suprotnom.



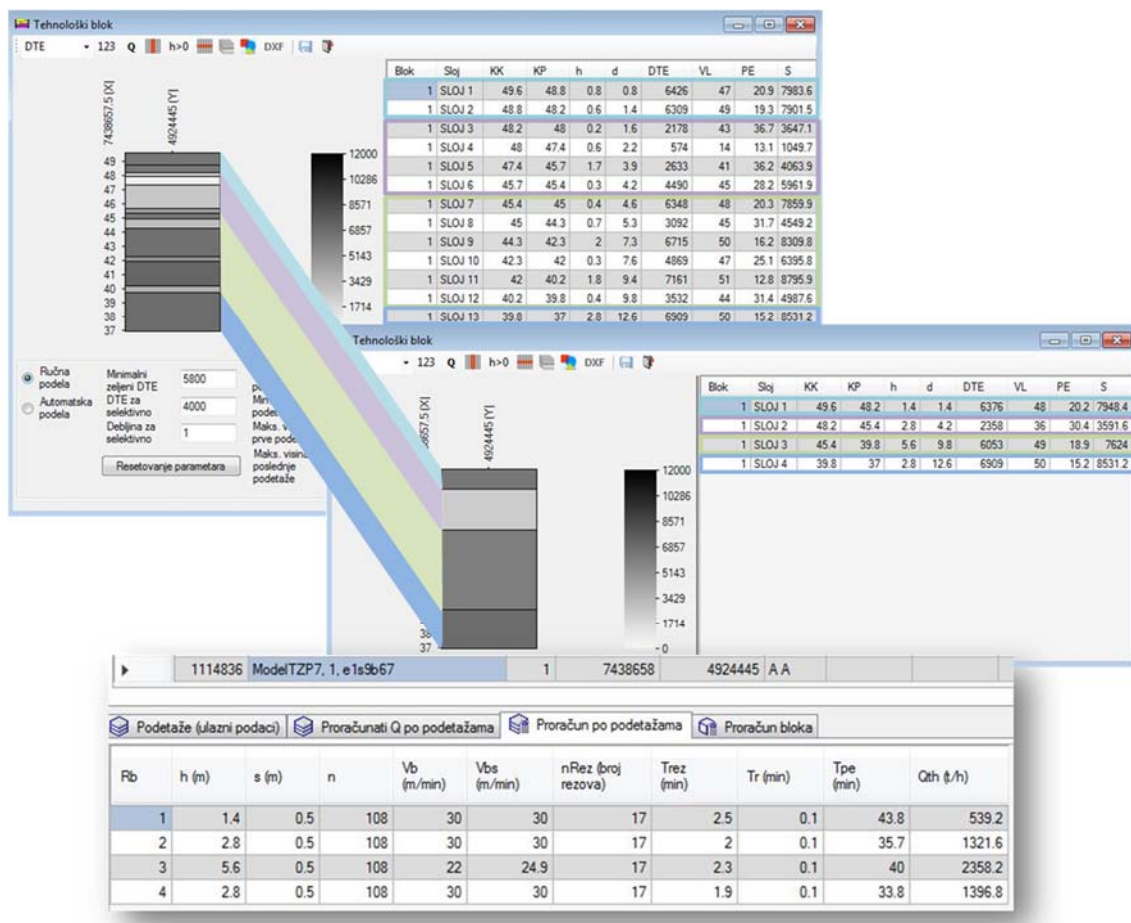
Slika 5.16 Genetski algoritma za optimizaciju tehnološkog bloka

5.2.3. Optimizacija planiranja

Planiranje otkopavanja tehnoloških blokova po etažama i bagerima se obavlja formom **Tehnološki blok**, koja omogućava prikaz plana i analizu izabranih tehnoloških blokova. Kao i u slučaju prikaza geološkog bloka moguće je na svakoj

podetaži ispisati vrednost svojstva bloka koji se planira. Ukoliko planer nije zadovoljan sa automatski generisanim tehnološkim rešenjem on ima mogućnosti da manuelno menjanja podelu etaže na podetaže, slika 5.17.

Kada planer usvoji definitivan tehnološki plan rada za odgovarajući bager moguće ga je prikazati i tabelarano, slika 5.18.



Slika 5.17 Kreiranje tehnološkog bloka sa više podela na podetaža

Verzije tehnološke podele

RB podele	Naziv	Vrsta podele	Status
1	Podela_1	Tehnološki	A

Podetaže tehnološke podele

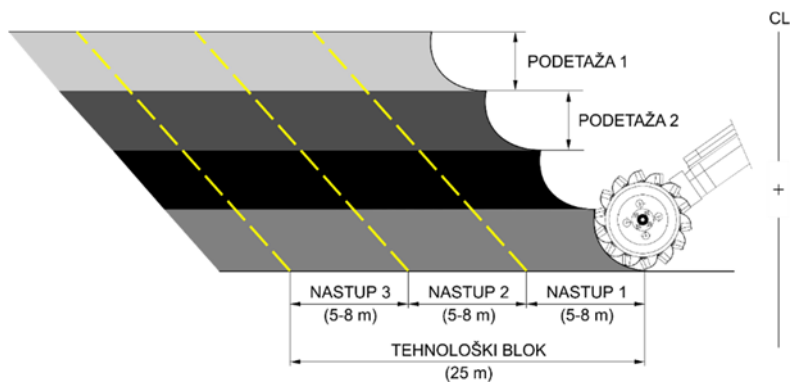
Rb	Od (m)	Do (m)	h (m)	DTE (kJ/kg)	Vlaga (%)	Pepeo (%)	Sumpor (%)	Tip	Otkopan
1	50.60	47.40	3.20	6881	50.00	16.70	0.00	ugalj	Ne
2	47.40	43.70	3.70	2622	42.00	36.10	0.00	jalovina	Ne
3	43.70	37.00	6.70	5674	48.00	21.40	0.00	ugalj	Ne
4	37.00	34.40	2.60	5095	47.00	23.30	0.00	ugalj	Ne

Slika 5.18 Tabelarni prikaz parametara tehnoloških blokova

5.2.4. Optimizacija kapaciteta bagera

Metodologija dimenzionisanja bagera je detaljno opisana u glavi 3. Korisnik prvo izabere bager iz baze podataka za koji treba da se vrši proračun, nakon čega se na drugoj kartici sa leva prikazuju vrednosti fiksnih konstruktivnih i tehnoloških parametara, na trećoj je lista urađenih proračuna za taj bager, dok su na četvrtoj kartici izdvojeni tehnološki parametri čije se vrednosti mogu menjati pri proračunu, ali sistem automatski povlači podrazumevane vrednosti, a korisnik eventualno vrši korekciju. Na toj kartici je rezultat selektovanog proračuna.

Jedan tehnološki blok se otkopava sa 3-4 pozicije, zavisno od parametra dubine kopanja, i obično iznosi 5-8 metara. Sa svake pozicije se otkopava jedna po jedna podetaža sa više odsečaka, slika 5.19.



Slika 5.19 Šema podele i otkopavanja podetaža tehnološkog bloka

Prvo se izabere model nad čijim će blokovima da se vrše proračuni kapaciteta, slika 5.20. Zatim blokovima dodeljujemo konkretan bager koji će otkopavati planirane tehnološke blokove, čime se automatski povlače njegovi tehnološki parametri relevantni za dimenzionisanje kapaciteta, slika 5.21.

Proračun rada bagera u bloku

Izbor bagera /modela/ etaže SchRs 630 25/6, G1 Model kopa TZPoljeModelVt Etaža 1

Filter: oznaka bloka 9 od 9

Bager Fiksni parametri Podaci o urađenim proračunima kapaciteta Parametri za unos Proračunati parametri rada bagera u bloku

BlokID	Blok	RB	X (m)	Y (m)	Status	Autor	Datum	Oznaka	Opis	ModelID
783141	TZPoljeModelVezba, 1. pae1s001b058	1	7437979.00	4925001.00	A					
783142	TZPoljeModelVezba, 1. pae1s001b059	1	7438004.00	4925001.00	A					
783143	TZPoljeModelVezba, 1. pae1s001b060	1	7438029.00	4925001.00	A					
783144	TZPoljeModelVezba, 1. pae1s001b061	1	7438054.00	4925001.00	A					
783145	TZPoljeModelVezba, 1. pae1s001b062	1	7438079.00	4925001.00	A					
783146	TZPoljeModelVezba, 1. pae1s001b063	1	7438104	4925001	A A					

Podetaže (ulazni podaci) Proračunati Q po podetažama Proračun po podetažama Proračun bloka

RB intervala	Od (m)	Do (m)	h (m)	DTE (kJ/kg)	Vlaga (%)	Pepeo (%)	s (m)	n	Vb0 (m/min)	Vb (m/min)	Fi (°)	Rot
1	47.60	43.40	4.20	7286	8803.00	44.40	0.5	108	30	30		
2	43.40	37.20	6.20	7146	8686.00	45.20	0.5	108	30	30		
3	37.20	35.00	2.20	7748	9294.00	45.40	0.5	108	30	30		

1 od 1

Slika 5.20 Izbor konkretnog tehnološkog bloka za dimenzionisanje

Proračun rada bagera u bloku

Izbor bagera /modela/ etaže SchRs 630 25/6, G1 Model kopa TZPoljeModelVr Etaža 1

Filter: oznaka bloka 1 od 13

Bager Fiksni parametri Podaci o urađenim proračunima kapaciteta Parametri za unos Proračunati parametri rada bagera u bloku

Rb.G	Grupa parametara	Rb.P	Parametar	Vrednost	Sifra
21	proračun tehnoloških ...	4	ugao zaokretanja strele radnog točka prema unutrašnjoj bočnoj kosini pri otkopav...	90	FiGu
21	proračun tehnoloških ...	5	ugao zaokretanja strele radnog točka prema spoljašnjoj bočnoj kosini pri otkopav...	40	FiDs
22	proračun kapaciteta r...	1	ugao zaokretanja strele radnog točka u podetaži prema unutrašnjoj bočnoj kosini:...		KsiUI
22	proračun kapaciteta r...	2	ugao zaokretanja strele radnog točka u podetaži prema spoljašnjoj bočnoj kosini: ...		KsiSI
22	proračun kapaciteta r...	3	korekcionni koeficijent koji uzima u obzir uslove otkopavanja materijala: KD	0.95	KD
22	proračun kapaciteta r...	5	koeficijent vremenskog iskonšćenja: Etat		Etat
22	proračun kapaciteta r...	6	koeficijent rastresitosti: Kr	1.3	Kr
22	proračun kapaciteta r...	6	koeficijent rastresitosti peska: Kr_pesak	1.3	Kr_pesak

Podetaže (ulazni podaci) Proračunati Q po podetažama Proračun po podetažama Proračun bloka

RB intervala	Od (m)	Do (m)	h (m)	DTE (kJ/kg)	Vlaga (%)	Pepeo (%)	s (m)	n	Vb0 (m/min)	Vb (m/min)	Fi (°)	Rot
1	47.90	43.40	4.50	7506	9055.00	45.10	0.5	108	30	30		
2	43.40	37.00	6.40	7227	8770.00	44.80	0.5	108	30	30		
3	37.00	34.60	2.40	7729	9302.00	45.40	0.5	108	30	30		

Slika 5.21 Relevantni tehnološki parametri bagera

U sledećem koraku se izvršava optimizacija plana rada konkretnog bagera za izabrani tehnološki blok i planiranu tehnološku podelu na podetaže, slika 5.22. Saglasno organizacionim potrebama operativnog plana, planer može da analizira i eventualno koriguje plan otkopavanja ili da kreira potpuno novi plan saglasno novonastaloj situaciji.

RB intervala	h (m)	DTE (t/h)	Q (t/h)
1	3.30	9221	1493.1
2	5.40	9801	2175
3	1.30	9995	760.9

Rb	h (m)	s (m)	n	Vb (m/min)	Vbs (m/min)	nRez (broj)	Trez (min)	Tr (min)	Tpe (min)	Qth (t/h)
1	3.3	0.5	108	30	30	17	2.5	0.1	43.8	1493.1
2	5.4	0.5	108	19.4	20.3	17	2.8	0.1	49.2	2175
3	1.3	0.5	108	30	30	17	1.9	0.1	33.8	760.9

Hb (m)	BetaB (°)	BetaC (°)	B	Z (m)	FiMax (°)	FiConst (°)	Tb (min)	Tprbloka (min)	Tukupno (min)	Qth (t/h)	Qth_u (t/h)	Qth_j (t/h)
10	26.2	26.2	45.2	8.5	14.1	115.9	128	1	129	1535	1535	0

Slika 5.22 Planiranje kapaciteta bagera

5.2.5. Optimizacija plana deponije

Planiranje deponija za potrebe homogenizacije mineralnih sirovina je tehnološki najkomplikovanije jer se na njima od rude promenljivog kvaliteta (na ulazu) treba “napraviti” proizvod poznatog, ujednačenog i ustaljenog kvaliteta (na izlazu). Iz navedenog razloga, planiranje deponije predstavlja dinamički proces odlaganja na deponiju i uzimanja sa deponije. Namenske deponije su, po pravilu, na kraju tehnološkog lanca planiranja i upravljanja kvalitetom mineralne sirovine te su i njihove mogućnosti ograničene i najčešće, uslovljene uspešnošću planiranja procesa u prethodnim tehnološkim fazama eksploatacije.

Veličina deponija za potrebe homogenizacije (prostorno i zapreminski) zavise od parametara kvaliteta mineralne sirovine. Što je kvalitet rude na ulazu ujednačeniji, a zahtevani kvalitet rude na izlazu sa deponije umereniji to će i deponije biti manja. Tehnologija rada na deponijama vezana je za formiranje određenog broja gomila, najčešće je to paran broj, tako da dok se jedana gomila puni, druga se prazni. Pri čemu, svaku gomilu treba do kraja potpuno napuniti i do kraja potpuno isprazniti. Shodno tome, homogenizacija se obavlja u dva procesa: pri odlaganju i pri

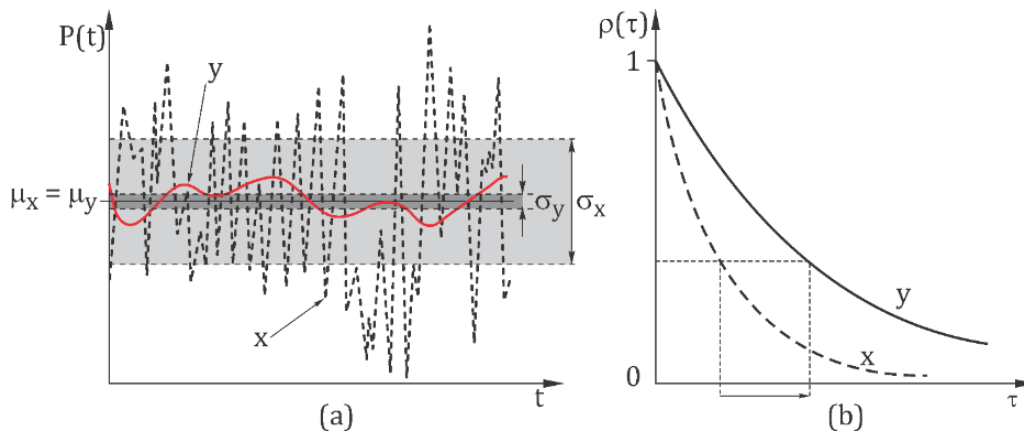
uzimanju sa deponije. Istraživanja su pokazala da su mogućnosti homogenizovanja u fazi odlaganja značajno veće nego i fazi uzimanja.

Efikasnost homogenizacije se statistički definiše odnosom standardne devijacije istog parametra kvaliteta materijala na ulazu i na izlazu sa deponije. Korišćenje ovako definisane efikasnosti homogenizacije nije praktično jer nedostaju podaci vezani za zapreminu deponije, način odlaganja, debljinu slojeva, način otkopavanja, greške uzrokovanja itd. U nastavku sledi opis razvijenog modela i softvera za efikasno planiranje homogenizacije.

5.2.5.1. Matematički model deponije

Deponovanje je početak procesa homogenizacije. Najčešće se u rudarskoj industriji deponije kreiraju u uzdužnom pravcu i odlažući sloj po sloj putem automatske kontrole putanje mašine za odlaganje. U cilju ispunjavanja specifikacija kvaliteta uglja koji zahteva termoelektrana, proces deponovanja i uzimanja uglja sa deponije treba da se odvija prema odgovarajućim modelima (strata, vindrou, konus, itd). U fazi uzimanja uglja sa deponije ciljani kvalitet se postiže kretanjem reklajmera duž deponije otkopavajući istovremeno različite kvalitete. Istovremenim otkopavanjem materijala različitih kvaliteta dolazi do homogenizacije, odnosno specificiranog kvaliteta mineralne sirovine za kupce (termoelektrane, flotacije, cementare itd). Određivanje kriterijuma za ocenu efekata procesa homogenizacije za konkretne metode planiranja deponije, je efikasnost homogenizacije, tj. smanjenje standardne devijacije (efekat homogenizacije) i poboljšanje funkcije automatske korelacije osobina materijala.

Često korišćenu teoriju za ocenu homogenizacije na uzdužnim deponijama je definisao Gerstel (1979). On je uveo dva pojma, efekat homogenizacije (E_H) i funkcija automatske korelacije (ACF_x) izlaza u poređenju sa ulazom (ACF_y), kako bi se ispitala performanse homogenizacije. To jest, materijal koji je odložen i otkopan sa deponije na ovaj način ima ujednačen kvalitet i znatno manji intenzitet fluktuacija (slika 5.23a). U tom slučaju će se ACF homogenizovanog materijala poboljšati u odnosu na ulaz (slika 5.23b).

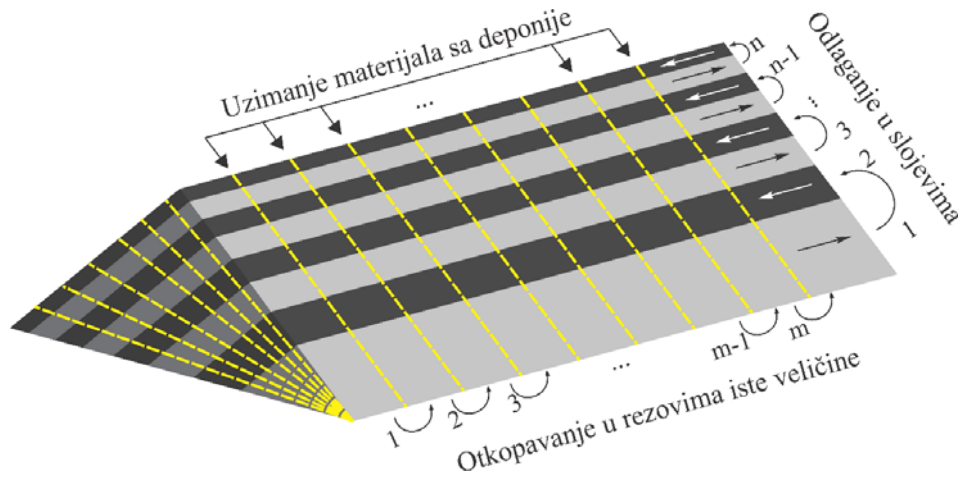


Slika 5.23 Promena parametra kvaliteta posle homogenizacije
 (a) ponašanje funkcija ulaza y i izlaza x u vremenu i standardna devijacija; (b) ACF ulaza i izlaza – Gerstel (1979)

Cilj razvoja simulacionog modela za planiranje strata deponije je da se na optimalan način definišu geometrijski parametri gomila materijala sa optimalnim brojem slojeva u gomili, koji će obezbediti zahtevani kvalitet za kupce. Razvijeni model ima sledeće pretpostavke da bi se došlo do efikasne homogenizacije:

- svaki sloj se odlaže u istom pravcu kretanja stakera
- svaki sloj sadrži istu količinu uglja po dužinom metru
- maseni protok ulaznog uglja na deponiju je konstantan
- materijal se otkopava istovremeno sa svih slojeva pri konstantnom masenom protoku

Na slici 5.24 je prikazan strata tip deponije sa procedurama odlaganja i uzimanja materijala sa deponije. Zbog prethodnih pretpostavki svaki odsečak/rez materijala pri uzimanju sadrži približno istu količinu materijala iz svih presečenih slojeva, tj. parametri reza su jednaki prosečnim parametrima kvaliteta slojeva.



Slika 5.24 Šematski prikaz modela deponovanja i uzimanja na strata deponiji

Kao što se može videti sa slike 5.24, izlazna svojstva reza su funkcija ulaznog svojstva i volumetrijskog doprinosa slojeva u rezu. Matematičko modeliranje svojstva dva odsečka (uzorka), (r) i (r') , na uzajamnom rastojanju k , je predstavio Gy (1981) sledećim izrazom:

$$y_r = \frac{\sum_{i=a}^b x'_i v_i}{\sum_{i=a}^b v_i}, \quad y_{r'} = \frac{\sum_{j=c}^d x'_j v_j}{\sum_{j=c}^d v_j} \quad (5.3)$$

- gde je:
- y_s - izlazna svojstva odsečka s , $s \in \{1, 2, \dots, m\}$
 - $y_{s'}$ - izlazna svojstva odsečka s' , $s' \in \{k + 1, \dots, m\}$
 - v_i - zapreminsko učešće sloja i u rezu s , $i \in \{1, 2, \dots, n\}$
 - v_j - zapreminsko učešće sloja j u rezu s' , $j \in \{1, 2, \dots, n\}$
 - x'_i - ulazna svojstva sloja i presečen rezom s ,
 - x'_j - ulazna svojstva sloja j presečen rezom s' ,
 - a, b - prvi i zadnji sloj presečen rezom s , $a, b \in \{1, 2, \dots, n\}$
 - c, d - prvi i zadnji sloj presečen rezom s' , $c, d \in \{1, 2, \dots, n\}$
 - $b - a + 1$ - broj slojeva u rezu s ,
 - $d - c + 1$ - broj slojeva u rezu s' ,
 - k - korak rezova, $k \in \mathbb{N}$
 - m - broj uzetih jedinica sa gomile, $m \in \mathbb{N}$
 - n - broj ulaznih slojeva u gomili, $n \in \mathbb{N}$

Osobina reza je ponderisani prosek zapremina i ulaznih parametara kvaliteta rude iz različitih slojeva. Izračunavanje ponderisanih proseka slojeva i rezova daje volumenski doprinos slojeva u rezovima (v_i i v_j) u jednačini (5.3). Efikasnost homogenizacije se zatim dobija izračunavanjem statističkih osobina izlaza (standardna devijacija i funkcija automatske korelacije) i poređenjem sa statističkim parametrima ulaza.

5.2.5.2. Softversko rešenje

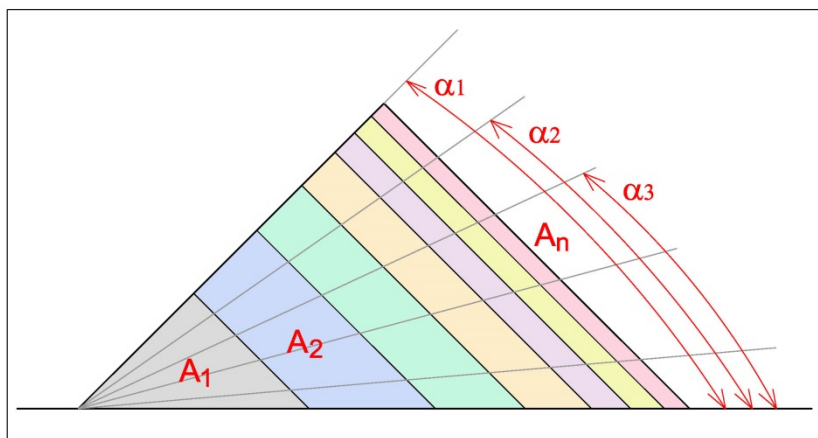
Softversko rešenje uključuje mogućnost simulacije plana različitih načina dimenzionisanja deponije i određivanje optimalnog broja slojeva od kojih se ona formira u funkciji kvaliteta materijala koji dolazi na deponiju. U ovom odeljku prikazan je matematički model i softversko rešenje koje pomaže u izboru optimalnih parametara deponije u funkciji opreme koja će raditi na deponiji. Smanjenje varijacije parametara od interesa se postiže formiranjem deponije odgovarajućih dimenzija i načina odlaganja sa potrebnim brojem slojeva. Naravno, što je broj slojeva veći, to je veći stepen homogenizacije, ali i troškovi formiranja deponije su veći.

Matematički model formiranja deponije i uzimanja uglja sa deponije zavisi od tipa mašina koje se koriste, dok je u ovoj disertaciji opisan najčešće korišćeni strata model deponovanja.

Deponija se formira kretanjem mašine duž deponije odlažući približno istu količinu materijala po jedinici dužine deponije u svakom odloženom sloju. Odloženi slojevi se zatim konstantno formiraju sa istim proporcijama, i shodno tome, površine poprečnog preseka svakog odloženog sloja su iste ($A_1 \approx A_2 \approx A_3 \dots \approx A_n$, slika 5.25).

Kod uzimanja uglja sa deponije radni element deponijske mašine se kreće duž depoa i prelazi na nižu kotu pri svakom sledećem prolazu. Odloženi slojevi se zatim konstantno homogenizuju sa istim proporcijama. Da bi se izračunao kvalitet materijala koji se uzima u jednom prolazu potrebno je odrediti površine odsečaka

slojeva i naći uglove odsecanja $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i$ koji nisu jednaki: gornji su veći, a donji su manji tako da je zahvaćena površina odnosno kapacitet isti.



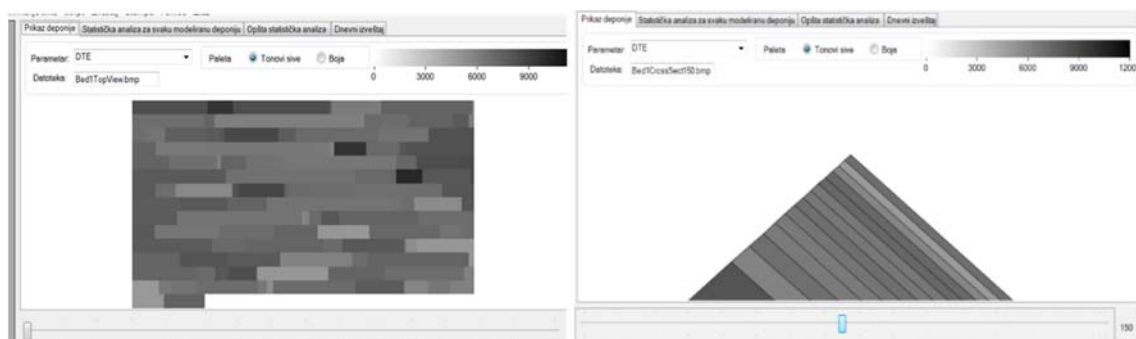
Slika 5.25 Strata model pražnjenja deponije

5.2.5.3. Simulacija plana deponije

Softver omogućava konfigurisanje parametara rada na deponiji, koji su potrebni za simulaciju odlaganja i uzimanja sa deponije. Tu se definišu: vrsta odlaganja na deponiji, maksimalna visina gomile (paketa), broj slojeva (u osnovici), nagib (kosina), gustina, i sl. Parametri se zadaju za rad svake pojedinačne mašine, pri čemu simulacija uključuje variranje broja slojeva pri odlaganju i načina uzimanja (debljine odrezaka, ugao odsecanja i segment uzimanja) kako bi se analiziralo odgovarajuće punjenje vozova.

Nakon izvršene simulacije deponovanja uglja, moguće je vizuelno pregledanje formiranih deponija, pri čemu korisnik za svaku formiranu gomilu (paket) može da vidi pogled odozgo i poprečne preseke, slika 5.26. Pogled odozgo predstavlja šematski prikaz odloženih slojeva gde su slojevi poredani jedan pored drugog (ne jedan preko drugog) kako bi se videla unutrašnja struktura formirane gomile, odnosno paketa. Korisnik može izborom segmenta (određenog levom i desnom pozicijom, obično 0-300 m) da dobije količinu i kvalitet u okviru tog segmenta. Podaci se daju zbirno za selektovani segment, ali i u simuliranim jedinicama od po

1500 t koje odgovaraju jednom vozu, kako bi se proverila uspešnost homogenizacije.



Slika 5.26 Pogled odozgo i poprečni presek kroz deponiju

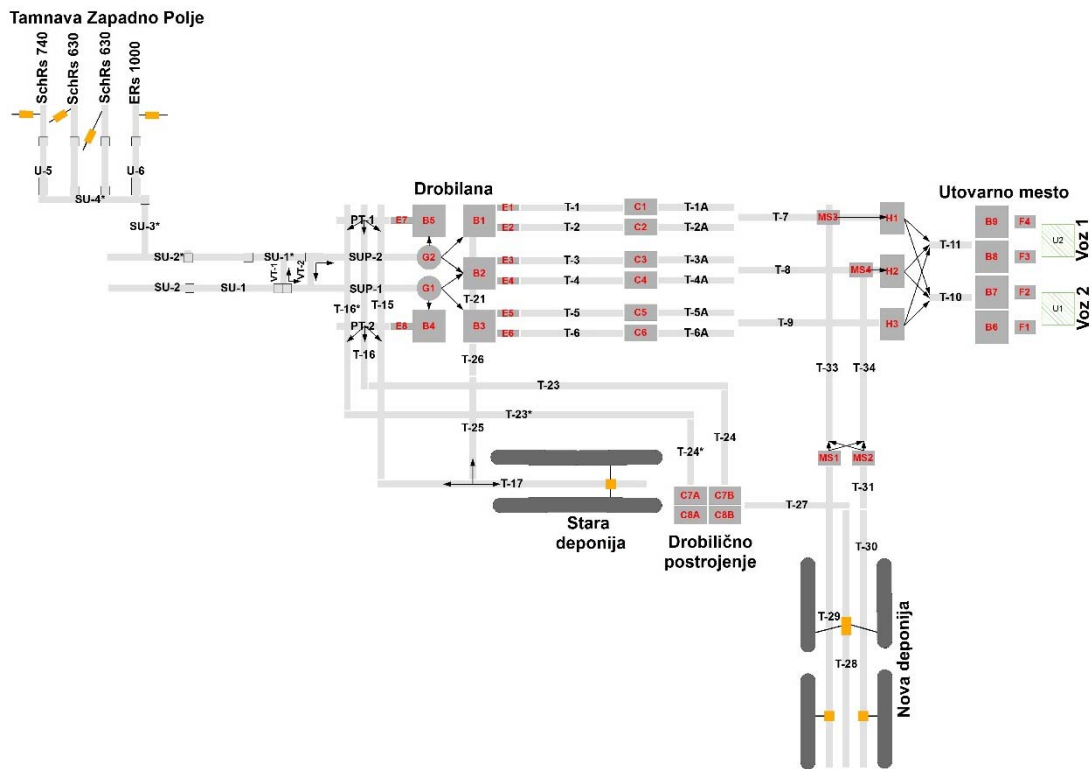
Analiza rezultata uz prikaz vrednosti, računa i standardne devijacije kao mere efikasnosti homogenizacije se automatski generiše. Sistem generiše različite izveštaje i grafike, koji daju sliku odnosa parametara kvaliteta dolaznog i homogenizovanog materijala. Takođe su implementirani grafici koji prikazuju koeficijent homogenizacije, vrednosti parametara pre i posle homogenizacije, standardne devijacije ovih vrednosti, itd.

Prikazivanje stanja deponije je dato iz različitih pogleda (aspekata), slikama sa pogledom odozgo i slikom izabranog poprečnog preseka. Mesto poprečnog preseka se bira pomeranjem klizača na dnu forme. Sve slike je moguće sačuvati ili odštampati. Prilikom vizualizacije, moguće je birati parametar čije će vrednosti biti prikazane: DTE, pepeo, sumpor, itd., kao i birati paletu kojom će vrednosti biti prikazane.

5.2.6. Model za izbor transportnih ruta

Transportne rute predstavljaju tok kretanja materijala od izvora (otkopnog bloka) do krajnje destinacije uglja, koje može biti utovarno mesto vozova ili deponija uglja za potrebe poboljšanja kvaliteta uglja. Kao što je prikazano na primeru sistema eksploatacije uglja na kopu Tamnava Zapadno polje, slika 5.27, od izvora do destinacije uglja postoji velik broj mogućih transportnih ruta. Transport uglja sa

jednom ili dve rute ima svoje predefinisane tehnološke uslove, vreme transporta i utovara voza, odnosno u krajnjoj instanci i troškove koje sistem transporta generiše.



Slika 5.27 Primer Tamnava Zapadno polje-moguće transportne rute od izvora do destinacije uglja

U cilju optimizacije izbora rute transporta saglasno prethodno navedenim uslovima, model se bazira na nekoliko ključnih kriterijuma:

- kapacitetu kopa za konkretan operativni plan,
- krajnjoj destinaciji transporta uglja, i
- tehnološkoj raspoloživosti određene rute.

Svaka transportna ruta je definisana sa logičkim tehnološkim elementima na ruti koji određuju dužinu trase, broj presipnih mesta i vreme transporta do krajnje destinacije.

Kriterijum izbora transportne rute (TR) do ciljne destinacije se određuje saglasno sledećoj funkciji:

$$TR_i = f(Q_{pln}, L_t, T_{tr}) \quad (5.4)$$

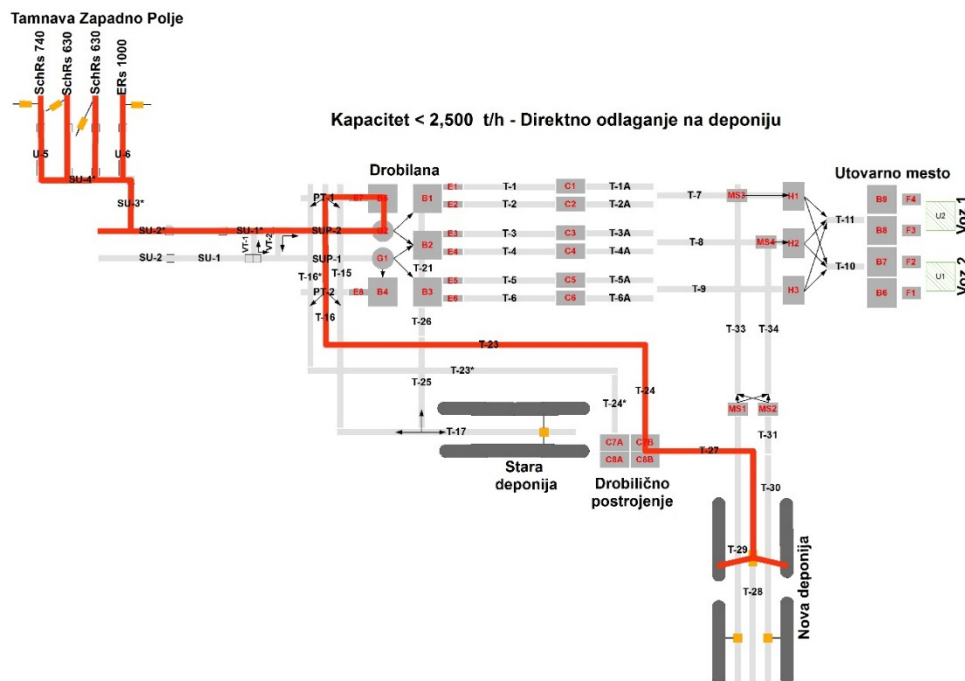
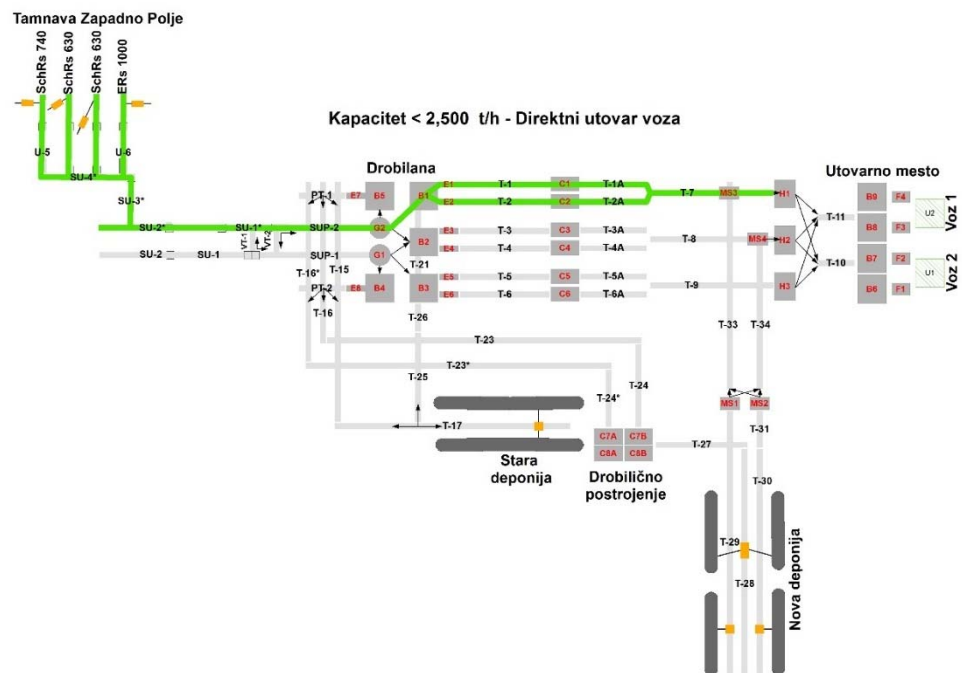
Planska proizvodnja uglja sa kopa ili više kopova (Q_{pln}) je jednaka zbiru pojedinačnih kapaciteta za svaki radni bager i aktivni površinski kop.

$$Q_{pln} = \sum_{b=1}^{nk1} Q_b + \sum_{b=1}^{nk2} Q_b \quad (5.5)$$

Zavisno od ukupne vrednosti kapaciteta kopa u planskom periodu (Q_{pln}), u tehnološkom smislu, postoje dve moguće grupe transportnih ruta, i to za sledeće kapacitete proizvodnje:

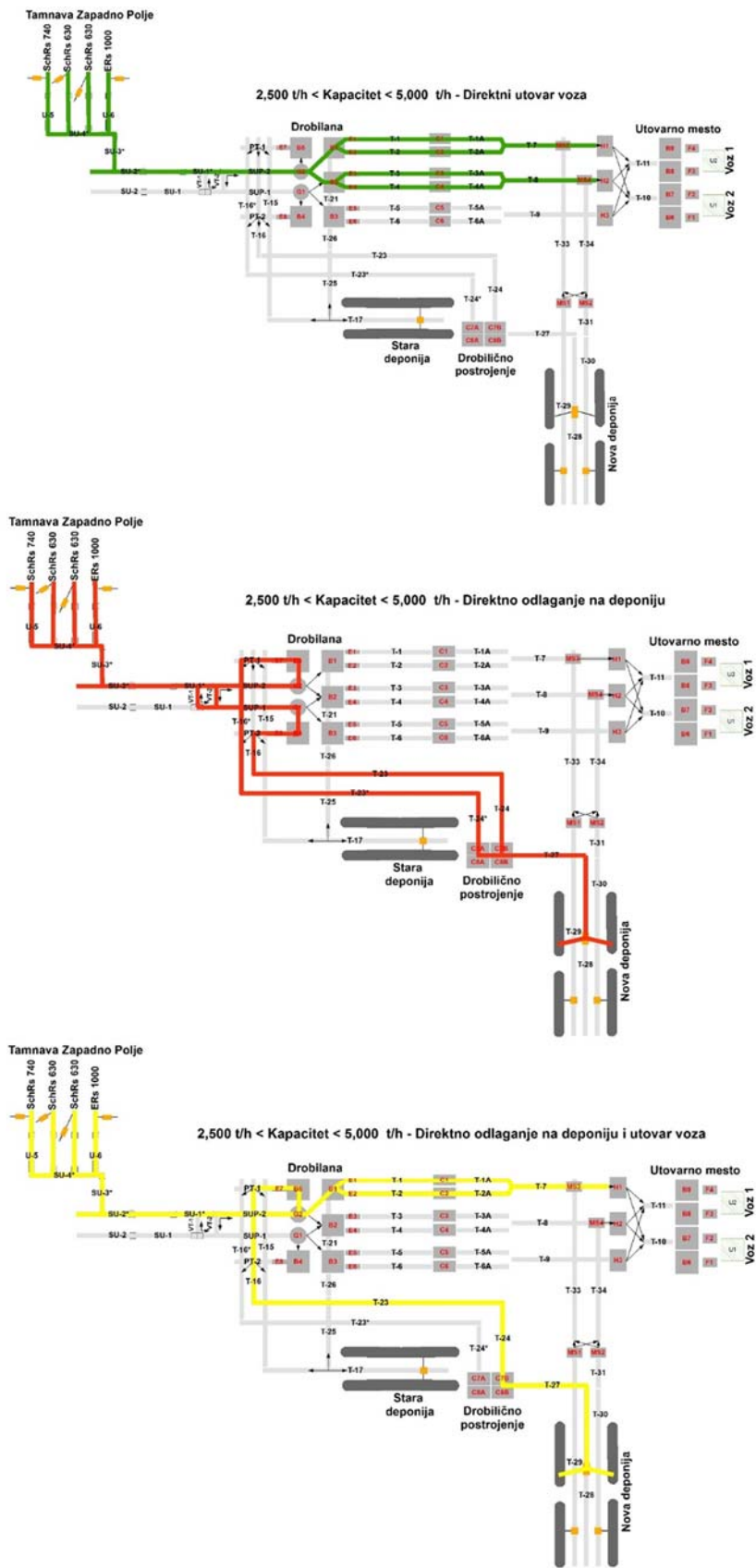
- Grupa 1: $Q_{pln} \leq 2.500$ t/h
- Grupa 2: $2.500 < Q_{pln} \leq 5.000$, t/h

U nastavku teksta, ilustracije radi i boljeg razumevanja koncepta izbora optimalnih ruta, prikazane su karakteristične rute iz svake od navedenih grupa. Na slici 5.28 prikazane su moguće transportne rute iz grupe 1. Pri kapacitetu na otkopavanju uglja manjem od 2500 t/h postoje dve moguće rute: direktan utovar uglja u vozove, ako ugalj zadovoljava kvalitetom ili odlaganje uglja na deponiju na dodatno homogenizovanje.



Slika 5.28 Šematski prikaz karakterističnih transportnih ruta iz grupe 1

Na slici 5.29 prikazane su moguće transportne rute iz grupe 2. Na slici se mogu videti tri različite transportne rute: (1) sav uglj se transportuje direktno na utovar u vozove, (2) sav uglj se transportuje na deponiju i (3) jedan deo uglja se utovara direktno u vozove, a drugi se šalje na deponiju.



Slika 5.29 Šematski prikaz karakterističnih transportnih ruta iz grupe 2

5.3. Integralni model optimizacije plana eksploatacije

5.3.1. Matematički model

Optimizacija plana eksploatacije sa gledišta holističkog pristupa predstavlja iznalaženje optimalnih planskih rešenja po tehnološkim celinama, odnosno jedinstvenog kapaciteta sa kojim treba da radi sistem eksploatacije (otkopne mašine, transporter i ostali tehnološki elementi u sistemu) na jednom ili više površinskih kopova, tako da pri procenjenim kvalitetima uglja na otkopnim tehnološkim blokovima-podetažama, i definisanim tehnološkim ograničenjima ostvari optimalan plan rudnika (potrebne količine i kvalitet) za potrošače.

Ciljevi integralnog modela planiranja eksploatacije su dvostruki.

- Prvo, treba da budu zadovoljeni zahtevi vezani za kvalitet materijala u određenom planskom periodu pri čemu važe neka fizička i geološka ograničenja i koriste se određena pravila i metode eksploatacije;
- Drugo, zahtevi vezani za količine treba da osiguraju projektovanu dinamiku proizvodnje.

Ova dva cilja imaju najviši prioritet u holističkom pristupu planiranja, jer izostanak bilo koje komponente ima nepovoljan ekonomski efekat za rudnik. Prema tome, prilikom definisanja modela posebno se vodilo računa o faktorima koji imaju najveći uticaj na ispunjenje ovih zahteva, a to su:

- Optimalan plan treba da bude u skladu sa srednjoročnim i strateškim/dugoročnim planovima. Ovo ograničenje onemogućava otkopavanje samo uglja visokog ili niskog kvaliteta i usaglašava razvoj rudarskih radova sa strateškim ekonomskim efektima rudnika.
- Plan treba da je dovoljno fleksibilan kako bi verodostojno odslikavao aktivno stanje rudarskih radova i u slučaju pojave tehnoloških problema.
- Plan treba da u svakom planskom periodu angažuje sve raspoložive otkopne mašine i posade radnika kako bi operativni troškovi bili što niži.

Model implicira da se kontinualni proizvodni sistem sastoji od n bagera sa kapacitetom Q_i , $i = 1...n$. Funkcija cilja, jednačine (5.6) ili (5.7), je definisana da optimizuje sekvence otkopavanja tehnoloških blokova i efektivni kapacitet kopanja bagera na takav način što minimizira odstupanje DTE ili S od predefinisanih vrednosti:

$$F_{\min} = |DTE_1 - DTE_{\text{opt}}| \times Q_1 + Q_2 + \dots + |DTE_n - DTE_{\text{opt}}| \times Q_n \quad 5.6$$

$$F_{\min} = |S_1 - S_{\text{opt}}| \times Q_1 + Q_2 + \dots + |S_n - S_{\text{opt}}| \times Q_n \quad 5.7$$

Ograničenja:

$$\text{kapacitet bagera: } Q_{\min} \leq Q_i \leq Q_{\max}, i=1..., n \quad 5.8$$

$$\text{kapacitet kopa: } Q_{\min} \leq Q_1 + \dots + Q_n \leq Q_{\max}, \quad 5.9$$

$$\text{kvaliteta uglja: } DTE_{\min} \leq (DTE_1 \times Q_1 + \dots + DTE_n \times Q_n) / (Q_1 + \dots + Q_n) \leq DTE_{\max} \quad 5.10$$

- opciono, pepeo ili sumpor:

$$(A_1 \times Q_1 + \dots + A_n \times Q_n) / (Q_1 + \dots + Q_n) \leq A_{\text{dozvoljeno}} \quad 5.11$$

$$(S_1 \times Q_1 + \dots + S_n \times Q_n) / (Q_1 + \dots + Q_n) \leq S_{\text{dozvoljeno}} \quad 5.12$$

Ograničenje kapaciteta bagera: omogućava da se eksploatacioni kapacitet bagera kreće u predefinisanim granicama koje će omogućiti korekcije kapaciteta u funkciji kvaliteta uglja koji se otkopava, jednačina (5.8);

Proizvodnja kopa: omogućava da ukupno otkopana količina materijala bude jednaka ili veća od planirane proizvodnje, jednačina (5.9);

Ograničenje kvaliteta uglja: Imajući u vidu da bageri rade različitim kapacitetom, računa se ponderisana vrednost, tako da ograničenje omogućava da kvalitet materijala ne prelazi predefinisnu donju i gornju granicu, jednačina (5.10); ili opciono po istom principu se mogu uzeti i drugi parametri, jednačine (5.11) ili (5.12).

5.3.2. Softversko rešenje

Softversko rešenje je rađeno fleksibilno: podrazumevano radi sa DTE, pepeo i sumpor, ali se može uključiti opciono i druge parametre ukoliko se pojavi potreba. Softversko rešenje implementira rešavanje problema optimizacije metodom optimizacije iz biblioteke Microsoft Solver Foundation koji pronalazi maksimum (ili minimum) funkcije više promenljivih pri definisanim linearnim ograničenjima.

Razvijeni model implementira rešavanje problema optimizacije koji pronalazi minimum funkcije više promenljivih pri definisanim linearnim ograničenjima. Matematički model je pretočen u skup klasa kojima se softverski implementira algoritam optimizacije i njegovo integrisanje u sistem za operativno planiranje eksploatacije, odnosno za simulaciju rada više bagera u definisanom vremenskom periodu na planiranim pozicijama.

Ulazne parametre optimizacionog modela predstavljaju, sa jedne strane kvalitet uglja na pozicijama na kojima bageri rade i tehnološka ograničenja angažovane oktopno-transportne opreme koja moraju biti zadovoljena, i sa druge strane zahtevani kvalitet uglja i kapacitet proizvodnje. Rezultat simulacije predstavljaju kapaciteti sa kojima pojedini rotorni bageri u sistemu treba da rade da bi sistem funkcionisao na zadovoljavajući način.

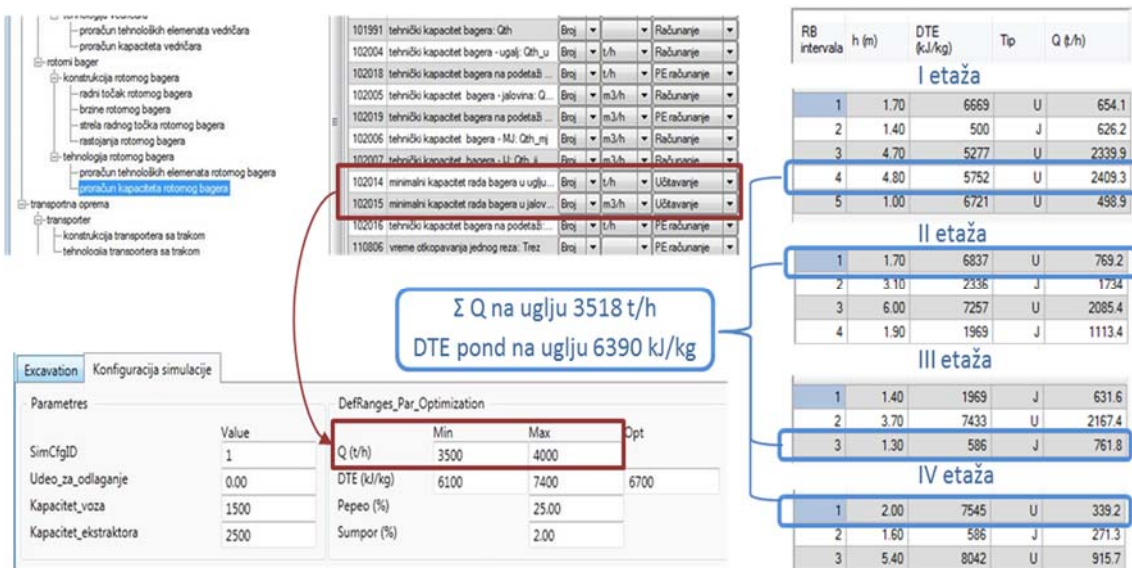
Za postavljanje uslova ograničenja optimizacionog modela je potrebno određivanje relevantnih parametara rada bagera u konkretnom tehnološkom bloku, konkretno minimalni kapacitet sa kojim može da radi i maksimalni koji može da dostigne za definisanu podetažu i rez. Minimalni kapacitet bagera se definiše kao ulazni tehnološki parametar tog bagera, dok se maksimalni kapacitet koji bager može da ostvari u konkretnoj podetaži radnog bloka očitava iz prethodno urađenog proračuna rada bagera u tom bloku. Tokom simulacije se prati horizontalno kretanje bagera kroz radnu sredinu, kao i vertikalno pomeranje, odnosno prati se rad u pojedinim podetažama.

Postavka problema i programsko rešenje je prikazano kroz panele razvijenog softvera na kojima se mogu videti svi relevantni podaci o: tehnološkim blokovima

za otkopavanje i pozicije bagera, definisanje operativnog plana (kapaciteta bagera), i parametri deponije.

Dakle, softver određuje operativni kapacitet sa kojim treba da radi svaki od raspoloživih rotornih bagera na osnovu definisanih tehničkih i tehnoloških ograničenja i na osnovu podataka o kvalitetu uglja u blokovima, odnosno podetažama koje bageri otkopavaju. Funkcija cilja u modelu je minimizacija odstupanja od optimalne vrednosti parametra kvaliteta uglja za termoelektranu, na primer: 6700 kJ/kg ($\pm 5\%$), tako da je za rešavanje konkretnog problema najpogodnija funkcija minimizacije odstupanja od projektovanog parametra sagorevanja uglja u bloku termoelektrane. Slika 5.30 desno prikazuje tehnološke blokove jednog scenarija, njihove podetaže sa vrednostima DTE, a levo su prikazana ograničenja parametara i izlazne vrednosti scenarija.

Ukoliko korisnik nije zadovoljan urađenim operativnim planom (iz određenih tehnoloških ili organizacionih razloga), može ponoviti simulaciju sa korigovanim parametrima, ponovo izvršiti animaciju i tako ponavljati proceduru sve dok se ne iznađe optimalno rešenje operativnog plana.

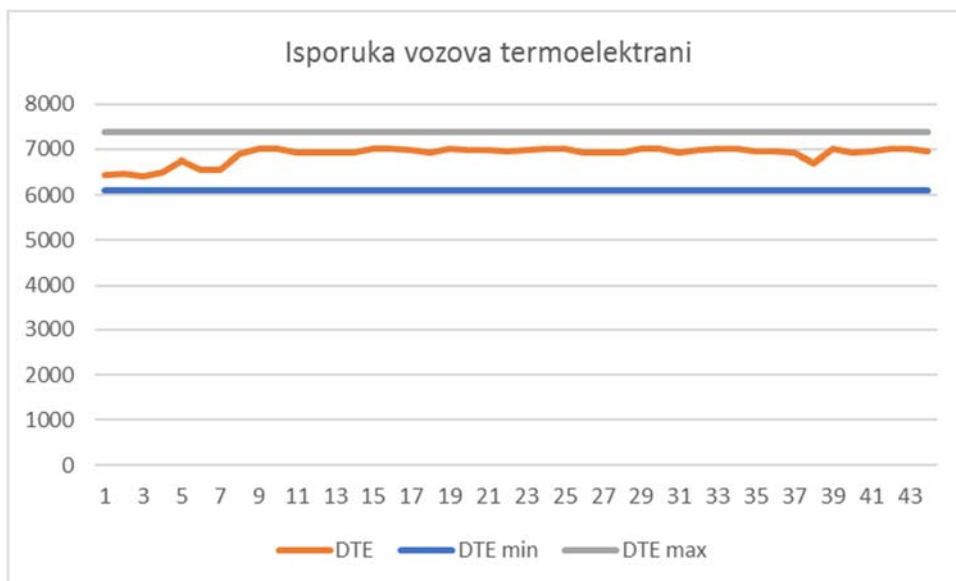


Slika 5.30 Ograničenja u modelu optimizacije plana proizvodnje

Simulaciju integralnog plana rada otkopno-transportnog sistema, odnosno kreiranje (predloga) operativnog plana je moguće vršiti za različite vremenske periode, jednu ili više smena ili dana. Na početku simulacije bageri se pozicioniraju u prostoru, odnosno za svaki bager se unose podaci o tehnološkom bloku i podetaža na kojoj se oni nalaze. Softver na osnovu pozicije iz baze podataka i ranije definisanog tehnološkog blok modela očitava kvalitet uglja koji bageri otkopavaju i ostale parametre potrebne za rešavanje optimizacionog problema.

Kao rezultat procedure optimizacije program generiše operativni kapacitet kojim svaki bager treba da radi. Sve dok su polazni parametri modela važeći, tj. dok su isti bageri raspoloživi i dok rade u istom kvalitetu uglja važe dobijeni operativni kapaciteti. Čim se neki od uslova promeni, tj. čim neki od bagera promeni podetažu ili se desi zastoј na nekom od bagera, menjaju se uslovi rada i procedura optimizacije se automatski ponovo startuje za novonastalu situaciju. Na osnovu tehnologije rada evidentirane u bazi kroz tehnološke parametre bagera i bloka prati se njihovo napredovanje u prostoru i shodno tome se uzima odgovarajući kvalitet uglja iz modela ležišta, odnosno tehnoloških blokova.

Pri svakom pozivu modela optimizacije mogu da se dese dve situacije: da problem ima rešenje ili da ne postoji rešenje ciljne funkcije pod zadatim ograničenjima. Ukoliko se nađe rešenje, ugalj (ili definisani procenat uglja) se šalje direktno u termoelektranu, a ukoliko procedura optimizacije ne može da nađe rešenja (odnosno ugalj sa predefinisanim parametrima kvaliteta), tada se sav otkopani ugalj šalje direktno na deponiju radi popravljavanja kvaliteta uglja na deponiji putem homogenizacije. Na slici 5.31 je dat primer planskog izveštaja kvaliteta isporučenog uglja termoelektrani po vozovima. Detaljan opis matematičkog modela planiranja deponije je već objašnjen u glavi 5.2.5.1.



Slika 5.31 Planski izveštaj isporučenog uglja

6. PRIMENA RAZVIJENOG MODELA – STUDIJA SLUČAJA

6.1. Opis postupka izvođenja analize

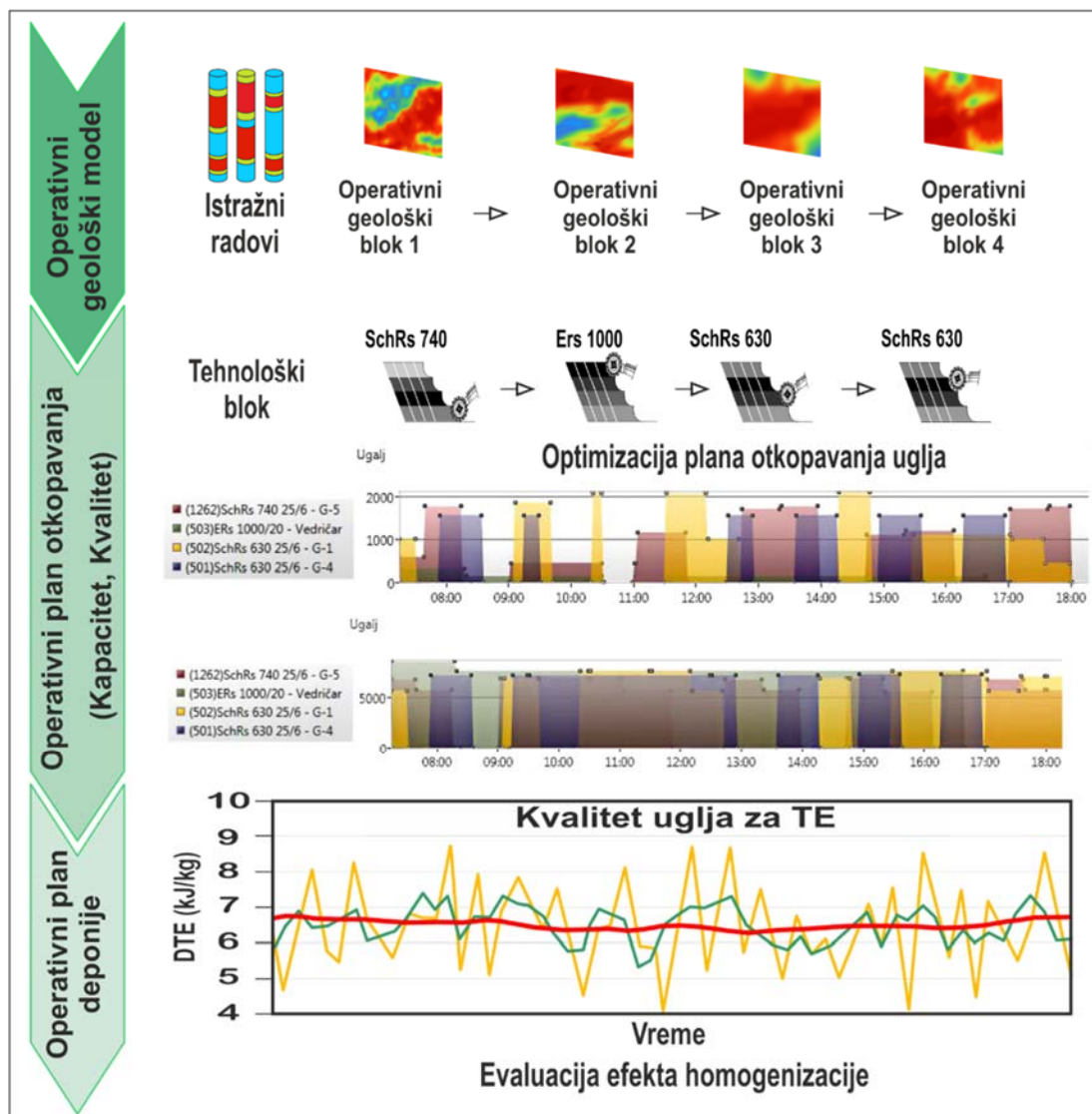
Simulacioni eksperiment u studiji slučaja ima za cilj da implementira i ilustruje efekte integralne optimizacije planiranja na performanse kompleksnih kontinualnih sistema eksploatacije. Da bi analizirali performanse predloženog pristupa, studija slučaja je primenjena u potpuno poznatom i potpuno kontrolisanom okruženju. U tom pogledu uzeti su istorijski podaci sa kopa Tamnava Zapadno polje (TZP), koji odgovaraju otkopanim i isporučenim količinama i kvalitetu uglja termoelektranama u određenom planskom periodu tokom kraja 2016. godine.

Primenjen je novi model sa integralnim pristupom optimizacije operativnog plana eksploatacije sa ciljem ocene izvodljivosti i održivosti ovako generisanog operativnog plana i dnevne proizvodnje unutar granica definisanih dugoročnim planom proizvodnje. Analiza će biti realizovana uz podršku razvijenog softverskog alata Suku (Kolonja i dr., 2011).

Kontinualni transportni sistemi koji sadrže više bagera, i koji otkopavaju više vrsta rovnog materijala (otkrivka, međuslojna jalovina, ugalj) su veoma kompleksni i pokazuju snažnu tehnološku međuzavisnost rada. Mreža transportnih traka se koristi za transport otkopanih materijala do krajnje destinacije, odlagališta, deponije uglja ili utovara u vozove.

Strateški planovi kao i kratkoročno i operativno planiranje imaju za cilj da definišu "najbolji" plan za otkopavanje uglja pod određenim uslovima nametnutim fizičkim i geološkim karakteristikama ležišta, strategijom menadžmenta i metodom eksploatacije. Termin "najbolji" se definiše ciljevima menadžmenta. Ovi ciljevi obično podrazumevaju maksimizaciju ekonomske vrednosti biznis plana uz ispunjavanje zahteva potrošača i garantujući siguran i bezbedan rad površinskog kopa na duži rok.

Procedura praktične primene razvijenog integralnog modela optimizacije planiranja sistema eksploatacije prikazana je na slici 6.1.



Slika 6.1 Metodologija izvođenja analize

Postupak sprovođenja analize se sastoji od četiri koraka, i to:

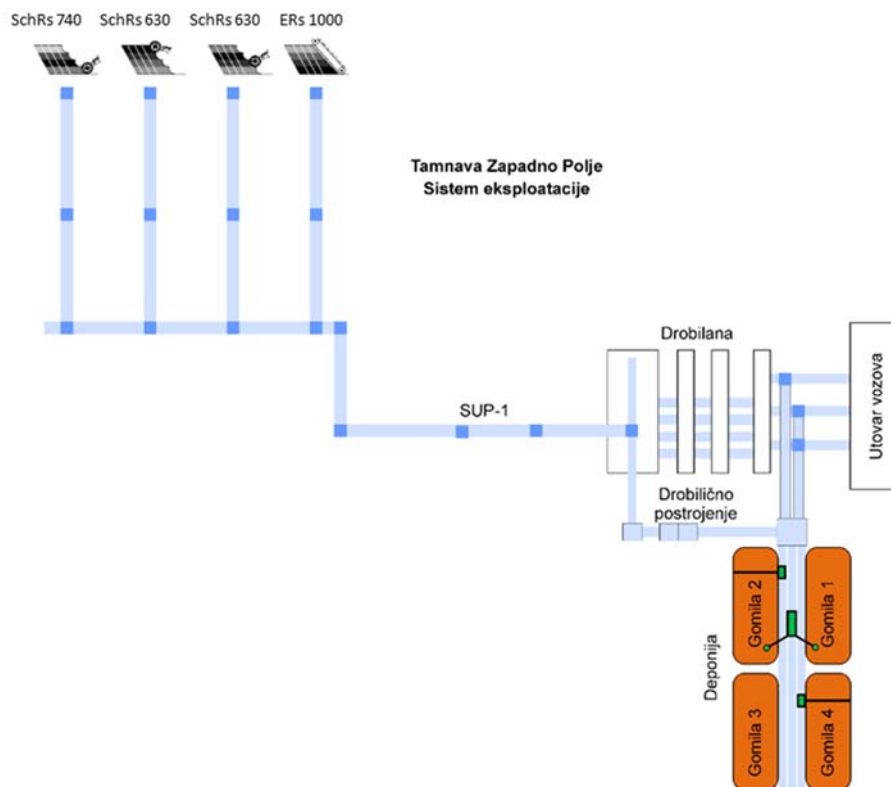
1. Kreiranje detaljnog operativnog modela ležišta sa procenom kvaliteta uglja; Kvalitet uglja je procenjen korišćenjem Minex interpolacione metode inverznog rastojanja stepena dva za svaki otkopni blok;

2. Prevođenje operativnog blok modela u tehnološke eksploatacione blokove i optimizacija operativnog plana otkopavanja u funkciji ispunjenja planskih zahteva u pogledu količina i kvaliteta uglja;
3. Ukoliko su uslovi iz koraka (2) ispunjeni krajnja destinacija uglja je utovarno mesto; ukoliko uslovi nisu ispunjeni, potrebno je izvršiti ponovnu optimizaciju operativnog plana uz korišćenje deponije uglja radi dodatne homogenizacije do zahtevanog nivoa. Za direktan utovar u vozove određen je opseg 6700 kJ/kg \pm 5%, dok se ugalj izvan ovog opsega usmerava na deponiju.
4. Analize količina i kvaliteta isporučenog uglja potrošačima.

6.2. Opis sistema eksploatacije na kopu Tamnava Zapadno polje

Kontinualni sistem eksploatacije uglja na ovom površinskom kopu (slika 6.2) se sastoji od paralelnih otkopnih frontova (linija), gde svaki sistem počinje sa bagerom kontinualnog dejstva koji otkopani materijal šalje na transportere sa trakom kojim se dalje transportuje do distributivnog centra. Od distributivnog centra se ugalj, u zavisnosti od potreba i kvaliteta, prosleđuje na deponiju i preko odlagača deponuje ili direktno na utovar u vozove. Deponija se sastoji od četiri odvojene gomile sa kojih mašina za uzimanje homogenizovan ugalj predaje transporterima, i dalje na utovar u vozove. Vozovima se ugalj prevozi ka termoelektrani, prema planskim dnevnim potrebama.

Integralni sistem eksploatacije od mesta otkopavanja uglja do krajnje destinacije – deponije uglja i/ili utovarnog mesta za vozove je povezan mrežom transportera sa trakom, koji predstavljaju veoma složen tehnološki podsistem sa aspekta optimizacije celog procesa proizvodnje.



Slika 6.2 Šematski prikaz sistema eksploatacije na kopu Tamnava Zapadno polje

U daljem tekstu će najpre biti dat kratak prikaz lokacije, modela ležišta i sistema operativnog planiranja na posmatranom kopu, a zatim i eksperiment sa analizom rezultata.

6.2.1. Opšti prikaz modela ležišta

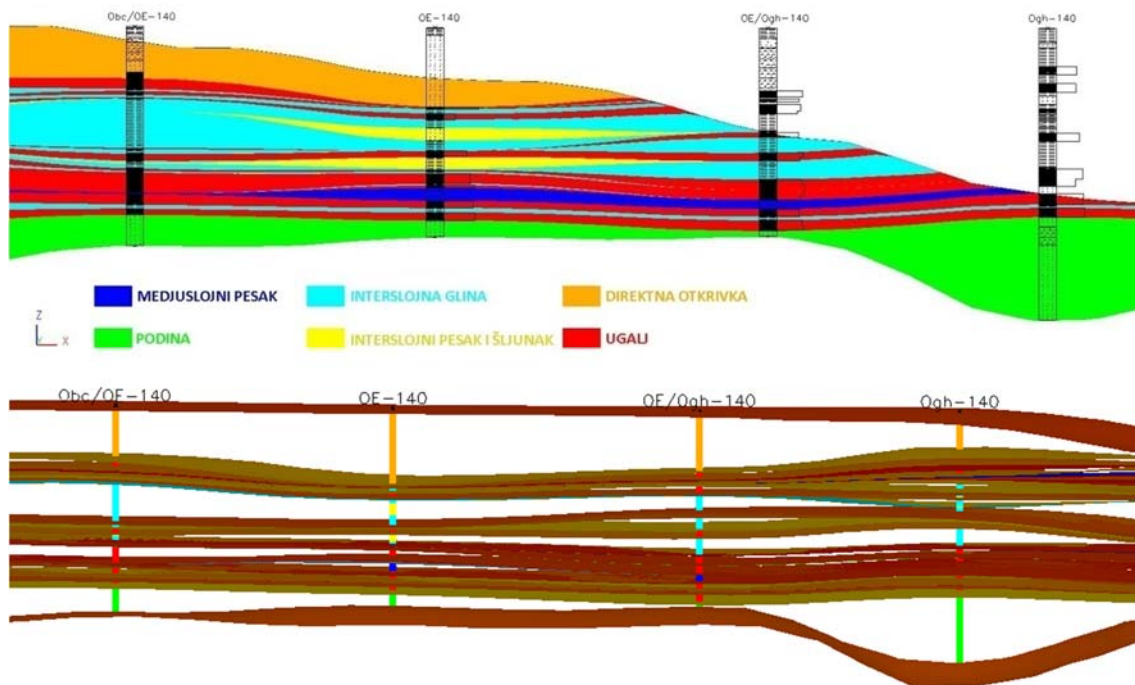
Ležište Tamnava Zapadno polje ima površinu približno 21 km² i predstavlja jedno od značajnijih ležišta u Kolubarskom basenu. Resursi u ležištu iznose oko 500 miliona tona uglja, a projektovani godišnji kapacitet površinskog kopa je 12.000.000 t uglja.

Detaljna analiza geološke građe ležišta, posebno njegovog južnog dela, pokazala je veliku raslojenost ugljene serije, sa brojnijim proslojcima peskova, glina i ugljevitih glina debljine i po više desetina metara.

Ležište je istraženo sa 648 istražnih bušotina, a osnovni podaci o kvalitetu uglja su dobijeni korišćenjem 261 bušotine iz kojih je uzeto 1543 probe.

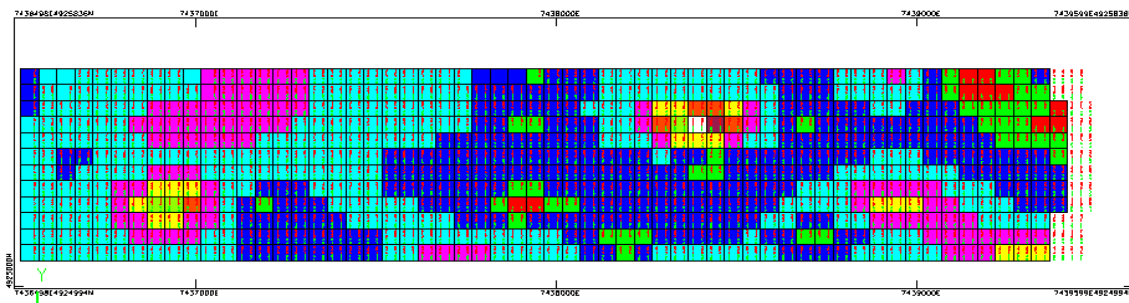
Operativni geološki model za potrebe ove analize je razvijen u Minex softveru na bazi geoloških informacija iz elaborata i laboratorijskih analiza isporučenog kvaliteta uglja. Istražni podaci su eksportovani iz BpUBS (Baza podataka ugljenih basena Srbije, Gojak i dr. (2011)), u okviru koje je integrisan veliki broj logičkih kontrola nad podacima i kreirana je Minex geološka baza i definisane promenljive kao što su litološki kod, DTE, S (sadržaj sumpora), P (sadržaj pepela), itd. Na osnovu profila i karata vršeno je kodiranje slojeva i formirana stratigrafska sekvenca.

Na prostoru otkopanog blok modela urađena je geološka interpretacija ležišta (slika 6.3) i model kvaliteta, pri čemu su posmatrani parametri donja toplotna vrednost, sadržaj pepela i sadržaj vlage. Veličina blokova u mreži koja je korišćena u i za strukturni model i za model kvaliteta je 25x25 m.



Slika 6.3 Interpretacija gridova u Minex eksperimentalnog dela ležišta

U sledećem koraku je urađena transformacija gridova u operativni blok model ležišta sa interpretacijom parametara kvaliteta uglja, slika 6.4.



Slika 6.4 Interpretacija parametara kvaliteta uglja u blok modelu

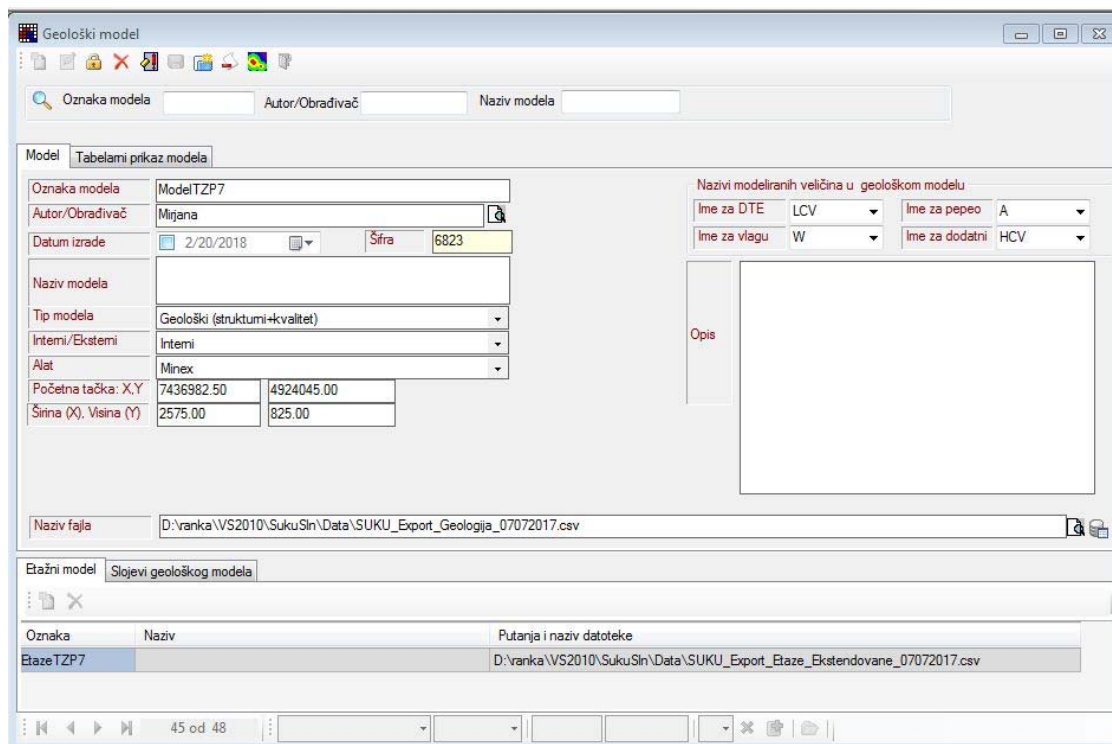
Specifičnost problema sa otkopanim ugljem iz opitnog blok modela u posmatranom periodu se ogleda u velikim varijacijama kvaliteta uglja zbog velikog raslojavanja ugljenih slojeva i prisustva glinovitih proslojaka. U tabeli 6.1 su prikazani rasponi parametra kvaliteta i ugljenih proslojaka u opitnom bloku.

Tabela 6.1 Parametri kvaliteta ugljenih slojeva u okviru opitnog blok modela

Materijal	DTE, kJ/kg	Pepeo, %	Vlaga, %	Sumpor, %
Ugalj	5238-8332	10-22	47-62	0,21-0,86
Glinoviti proslojci	306-3294	28-55	32-51	-

6.2.2. Izrada tehnološkog blok modela

Kreirani operativni geološki model se u sledećem koraku eksportuje za korišćenje u razvijenom softveru za operativno planiranje (SUKU), odnosno geološki model se preseca sa odgovarajućim etažnim modelom (slika 6.5)



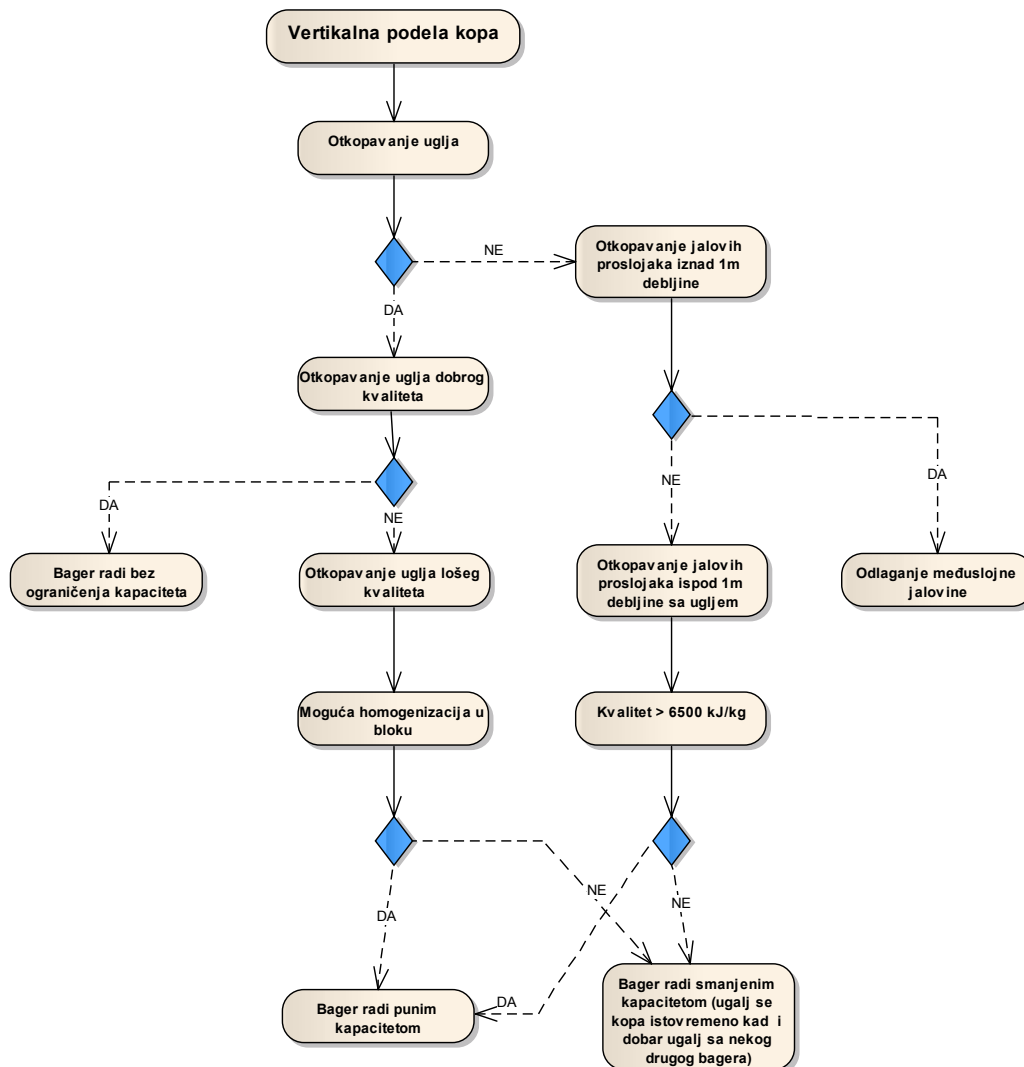
Slika 6.5 Opšti podaci o modelima

Tehnološki eksploatacioni blokovi se kreiraju spajanjem potrebnog broja geoloških blokova u okviru etažnih ravni. U konkretnom slučaju dva geološka bloka kreiraju jedan tehnološki blok dimenzija 50x25m. Na slici 6.6 je prikazan 3D izgled kreiranih tehnoloških blokova na posmatranom području sa pozicijama bagera u radu.



Slika 6.6 Prikaz tehnoloških blokova po etažama i pripadajućim bagerima

Svaki tehnološki blok se deli na podetaže saglasno tehnološkim mogućnostima pojedinih bagera i kvalitetu otkopavanog uglja i na taj način se kreira tehnološki model. To je prvo od tri mesta u tehnološkom lancu gde je moguće vršiti homogenizaciju. Prema tome, pri kreiranju tehnološkog modela potrebno je definisati selektivnost rada bagera, vodeći računa o tri kriterijuma: selektivnosti, homogenizaciji i potrebnom kapacitetu bagera. Algoritam za definisanje selektivnosti rada bagera dat je na slici 6.7, a sažima se u sledećem:

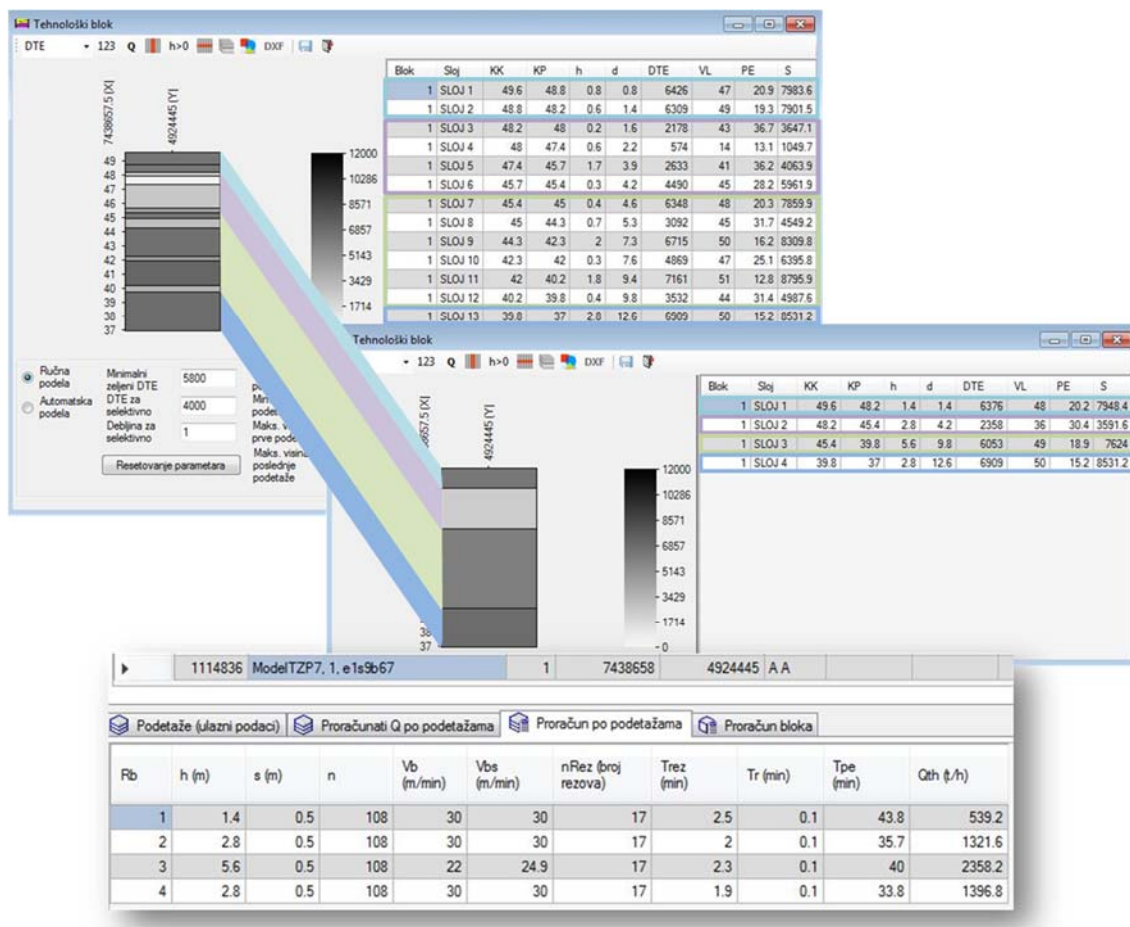


Slika 6.7 Algoritam za definisanje selektivnosti rada bagera

- Vertikalna podela bloka na podetaže se izvršava na osnovu kriterijuma selektivnosti, tako da se prvo izdvajaju podetaže koje se moraju selektivno otkopavati;
- Položaj i visine podetaže treba odrediti tako da se kombinacijom slojeva uglja različitog kvaliteta ili slojeva uglja i proslojaka jalovine stvore svi preduslovi da se u okviru otkopnog bloka vrši zadovoljavajuća homogenizacija uglja ukoliko je to moguće;
- Pri vertikalnoj podeli otkopnog bloka na podetaže, sa stanovišta homogenizacije uglja, mora se respektovati i kriterijum izbora visine podetaže sa aspekta zadovoljavajućeg kapacitetnog iskorišćenja bagera;
- Rešenje mora zadovoljiti: potreban kvalitet uglja, potrebne količine i zahtevani kontinuitet u isporuci uglja termoelektranama.

Podela blokova na podetaže izvršava se automatski, uz mogućnost manuelnog korigovanja prema potrebi. Nakon toga se za svaki tehnološki blok proračunava maksimalni kapacitet rada bagera za zadate parametre. Izlaz iz ovog koraka predstavlja definisan blok model za svaki od bagera sa vrednostima kvaliteta (DTE_i) i kapaciteta (Q_i) u svakom bloku.

Na slici 6.8 data je ilustracija pravljenja tehnoloških blokova sa ponderisanjem ugljevitih proslojaka u okviru neke od podetaža, i kapacitet pripadajućeg bagera za svaki pojedinačni tehnološki blok.



Slika 6.8 Definisiranje podetaža sa ponderisanjem proslojaka i proračunom kapaciteta

6.2.3. Transportni model i model deponije

Transportni model objedinjuje sve transportne tokove uglja od radnih bagera do krajne destinacije (deponije ili utovarnog mesta za voz). Na osnovu pojedinačnih kapaciteta bagera i kvaliteta uglja sa svakog od njih, u ovom modelu se računa ukupan kapacitet i ponderisani kvalitet i na osnovu njihove vrednosti određuje se dalji tok materijala, odnosno krajnja destinacije. Ukoliko vrednosti kvaliteta uglja (DTE, pepeo) na izlazu iz transportnog modela zadovoljavaju predefinisane vrednosti (za unapred definisani period) koje termoelektrana zahteva ($6700 \pm 5\%$, kJ/kg) uglj se upućuje direktno na utovar u vozove za termoelektranu. Ako to nije slučaj, uglj se preusmerava na deponiju gde se vrši dodatna homogenizacija. Softver za simulaciju transportnog i modela deponije je detaljno opisan u glavi 5

ove disertacije. Ovde je važno napomenuti samo da je primenjena takozvana strata metoda deponovanja (poglavlje 5.2.5.1), da je broj slojeva na deponiji funkcija kvaliteta uglja, i da dobra tehnološka podela u samom otkopnom bloku, čak i ako ne daje ugalj zahtevanog kvaliteta, omogućuje značajno smanjivanje broja slojeva na deponiji.

6.2.4. Definisane optimalnih operativnih planova proizvodnje

Finalni ishod optimizacije proizvodnog plana sistema eksploatacije, odnosno kontinualnih utovarno-transportnih sistema jesu upravo operativni planovi, koji su u funkciji predefinisanih parametara kvaliteta i količina. Operativni planovi se generišu za različite vremenske periode u zavisnosti od potreba proizvodnje (smena, dan, sedmica, itd).

Pri definisanju planova za dnevni rad bagera kreće se od godišnjeg potrebnog kapaciteta i godišnjeg plana rada celovitog kontinualnog tehnološkog sistema. Godišnji plan uključuje između ostalog i definisanje angažovane opreme sa planom zastoja i raspoloživosti, projektovanje zona eksploatacije i odobrenje menadžmenta kompanije za aktiviranje plana.

Godišnji plan se izrađuje na osnovu godišnjih potreba potrošača, u konkretnom slučaju termoelektrane. Podatak o godišnjem kapacitetu kopa koji je usklađen sa potrebama termoelektrane i ostalim planovima površinskog kopa se unosi kao polazna osnova za dalje kratkoročno i operativno planiranje. Pre izrade plana podrazumeva se da su definisani i uneti svi planirani zastoji od uticaja na godišnje planiranje (remonti i slični dugi planski zastoji).

Pri iniciranju novog godišnjeg plana, sistem kreira formu na kojoj se sa jedne strane nalazi prikaz svih bagera na ugljenim sistemima, a na drugoj strani je deo forme gde se vrši unos podataka. Nakon provere unetih zastoja i ukupnog godišnjeg kapaciteta kopa, potrebno je izvršiti raspodelu ukupno planirane godišnje proizvodnje uglja, ali i planirane količine jalovine po mesecima. Na slici

6.9 je dat prikaz forme sa unetim ukupnim mesečnim količinama uglja za sve sisteme površinskog kopa Tamnava Zapadno polje.

Tamnava Zapadno Polje		Planiranje		Statust plana	
Oprema		Ukupna godišnja količina uglja (t): 12,150,000 ; Ukupna godišnja količina jalovine (m3): 225,851			
SchRs 630 25/6(G-4)		Bager: P.K. Tamnava Zapad() . Lokalna sifra bagera: 5 . Globalna sifra bagera:			
SchRs 630 25/6(G-1)					
ERs 1000/20(Vedričari)					
SchRs 740 25/6(G-5)					
Mesec	Količina uglja (t)	Vreme rada (h)	Planirani DTE (kJ/kg)	Količina jalovine (m3)	Područje eksploatacije
Januar	1,293,000	0	27,419	0	
Februar	976,000	580	27,419	0	
Mart	1,006,999	0	27,419	0	
April	1,059,000	0	27,419	0	
Maj	349,000	0	27,419	0	
Jun	617,000	0	27,419	0	
Jul	1,162,999	0	27,419	0	
August	1,109,001	0	27,419	0	
Septembar	1,125,001	0	27,419	0	
Oktober	1,181,999	0	27,419	225,850	
Novembar	1,102,000	0	27,419	0	
Decembar	1,168,001	0	27,419	1	
Ukupno	12,150,000	580	27,419	225,851	

Slika 6.9 Panel za definisanje godišnjeg plana

Dalje se vrši unos podataka po sistemima. Izborom pojedinačnog bagera otvara se forma (slika 6.10) za unos podataka o planiranim godišnjim količinama uglja i jalovine, planiranom kvalitetu i broju časova rada za odabrani bagera po mesecima. Moguće je i dati opis zona eksploatacije za posmatrani period. Nakon svakog unosa sistem preračunava ukupne godišnje količine i vreme rada, kao i prosečni kvalitet na godišnjem nivou za izabrani bager.

Tamnava Zapadno Polje		Planiranje		Statust plana	
Oprema		Ukupna godišnja količina uglja (t): 12,150,000 ; Ukupna godišnja količina jalovine (m3): 225,851			
SchRs 630 25/6(G-4)		Bager: SchRs 630 25/6(G-4) . Lokalna sifra bagera: 501 . Globalna sifra bagera: 104			
SchRs 630 25/6(G-1)					
ERs 1000/20(Vedričari)					
SchRs 740 25/6(G-5)					
Mesec	Količina uglja (t)	Vreme rada (h)	Planirani DTE (kJ/kg)	Količina jalovine (m3)	Područje eksploatacije
Januar	165,632		6,817		
Februar	125,025	580	6,817		
Mart	128,996		6,817		
April	135,657		6,817		
Maj	44,707		6,817		
Jun	79,037		6,817		
Jul	148,979		6,817		Роторни ба...
August	142,062		6,817		
Septembar	144,112		6,817		
Oktober	151,413		6,817	78,450	Почетком и...
Novembar	141,165		6,817		
Decembar	149,620		6,817		
Ukupno	1,556,405	580	6,817	78,450	
Područje eksploatacije					

Slika 6.10 Godišnji plan za bagere

Plan pre nego što postane validan verifikuje se od strane planera i menadžmenta kopa, posle čega se može po potrebi revidovati-optimizirati za novonastala

ograničenja po istoj proceduri. Svaka revizija plana je praćena verifikacijom odgovornog lica. Nakon verifikacije plan postaje validan za dalje nivoe planiranja (mesećni, kvartalni).

Na osnovu podataka iz aktivnog godišnjeg plana mogu se izvoditi kvartalni planovi, dok se njihova eventualna revizija može izvršiti na identičan naćin.

Mesećni plan se kreira na dosta detaljnijem nivou i zahteva ispunjenje više preduslova. Pri kreiranju mesećnog plana sistem poziva podatke za taj mesec iz aktuelnog godišnjeg plana. U ovoj fazi planiranja uneti su svi planirani zastoji (ukljućujući i svakodnevene zastoje - pauze) i potrebno je aktivirati izraćen tehnološki model na delu ležišta koje će biti obuhvaćeno planom. Sistem dobija podatke o poziciji bagera i informacije o otkopanim blokovima, kako bi se stekao uvid u stepen ispunjenosti prethodnog plana i definisala poćetna taćka novog plana.

Forma za kreiranje mesećnog plana prikazana je na slici 6.11. Kao i kod godišnjeg, na levoj strani panela se nalazi spisak bagera sa BTĐ sistema. Za svaki bager se vezuje tabela po nedeljama u koju se unose planirane kolićine uglja i jalovine, u skladu sa godišnjim kapacitetom. Vreme rada koje se prikazuje predstavlja efektivno vreme za prikazanu nedelju.

Planirani bager: 630 25/RIG-4 | Lokalna sifra bagera: 501 | Globalna sifra bagera: 104

Ukupna mesećna kolićina uglja (t): 151.500

Ukupna mesećna kolićina jalovine (m³): 0

Redni broj u godini	Kolićina uglja (t)	Kolićina jalovine (m ³)	Vreme rada	Planirani DTE (t/kg)	Suma uglja po blokovima (t)	Suma jalovine po blokovima (m ³)	Sum_by_Blocks_Hour	Dnevna suma uglja (t)	Dnevna suma jalovine (m ³)
39. (1.10-7.10) - 7	5.000	0	22.50		0	0	0.00	0	0
40. (2.10-8.10) - 7	37.000	0	157.50		0	0	0.00	0	0
41. (9.10-15.10) - 7	31.500	0	133.50		0	0	0.00	0	0
42. (16.10-22.10) - 7	36.000	0	157.50		0	0	0.00	0	0
43. (23.10-29.10) - 7	32.000	0	133.50		0	0	0.00	0	0
44. (30.10-31.10) - 2	10.000	0	45.00		0	0	0.00	0	0
Ukupno	151.500	0	649.50		0	0	0.00	0	0

Planirani tehnološki blokovi

Order/Number	Label	Kolićina uglja (t)	Kolićina jalovine (m ³)	Vreme na jalovini (min)	Vreme na uglju (min)	DTE (t/kg)
Ukupno		0	0	0	0	

Planirane dnevne kolićine

Dan	Kolićina uglja (t)	Kolićina jalovine (m ³)	Vreme na uglju (min)	Vreme na jalovini (min)
16.10.2017	0	0	0	0
17.10.2017	0	0	0	0
18.10.2017	0	0	0	0
19.10.2017	0	0	0	0
20.10.2017	0	0	0	0
21.10.2017	0	0	0	0
22.10.2017	0	0	0	0

Slika 6.11 Panel za definisanje mesećnog plana

U delu panela Planirani tehnološki blokovi se unose blokovi iz tehnološkog modela koji su planirani za otkopavanje po nedeljama, imajući u vidu dokle je prethodni plan stigao sa realizacijom. Sistem pri tome automatski povlači količine uglja i jalovine, vreme na otkopavanju i DTE uglja za svaki blok i prikazuje ih sumirano u gornjem delu panela.

Kada je u pitanju verifikacija i revizija plana, postupak je identičan kao kod godišnjeg. Revizija je moguća samo za one nedelje koje još nisu u realizaciji. Rok za izradu mesečnog plana je poslednji dan u prethodnom mesecu.

Nedeljni plan se kreira na osnovu verifikovanog mesečnog plana. Iz mesečnog plana se preuzimaju podaci o planiranim količinama uglja i jalovine, planiranom kvalitetu i broju radnih sati. Pored informacija koje su preduslov za kreiranje mesečnog plana u nedeljni plan se uključuje rad deponije, pa su potrebne informacije o realnom stanju na deponiji. Za te potrebe sistem uzima informacije o količinama i kvalitetu uglja na gomilama, maksimalnoj količini koju je moguće odložiti, u kom je modu deponija (uzimanje i/ili skladištenje) kao i o stepenu realizacije plana za prethodnu nedelju.

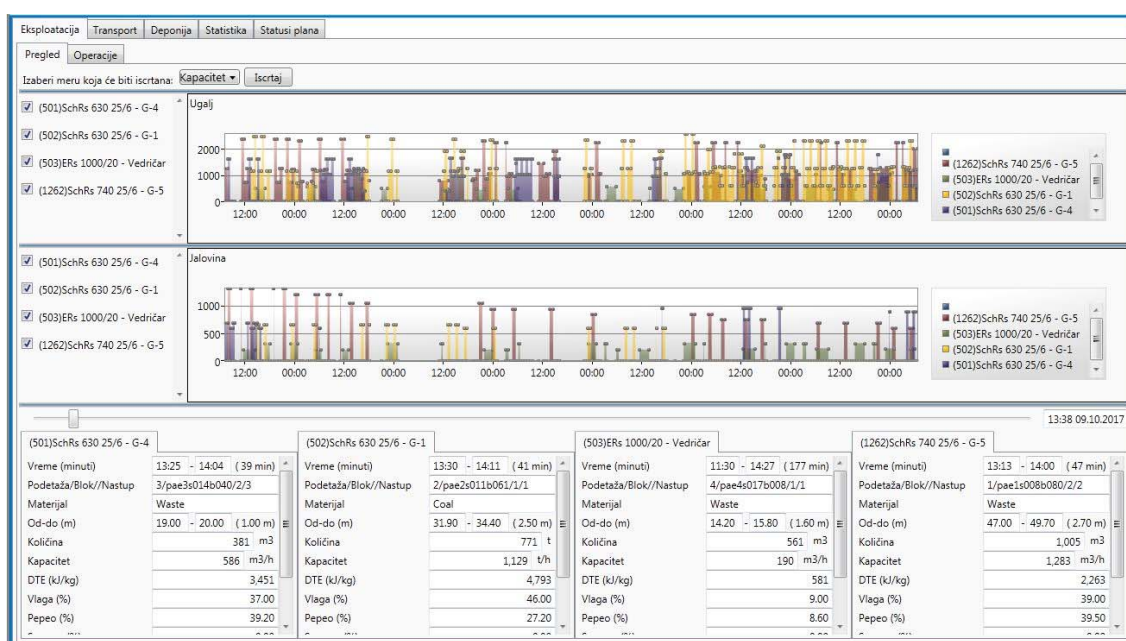
Sledeći korak u definisanju nedeljnog operativnog plana je definisanje parametara simulacije prema kojima će, uzimajući u obzir sve navedene informacije, sistem kreirati optimalni nedeljni operativni plan. Najpre se određuje period od sedam dana za koji se kreira plan. Ukoliko je posmatrana nedelja na kraju meseca i prelazi u sledeći, neophodno je da i sledeći mesečni plan bude verifikovan. Parametri koji definišu simulaciju (slika 6.12) između ostalih su opseg kapaciteta svih bagera i eksploatacioni kvaliteta uglja na zbirnom transporteru. Startovanjem simulacije sistem generiše operativni plan koji sadrži tri dela: (1) plan rada svakog bagera pojedinačno; (2) plan rada deponije; i (3) plan utovara vozova i isporuke uglja potrošačima.

Parametres		DefRanges_Par_Optimization		
	Value	Min	Max	Opt
SimCfgID	1	Q (t/h)	3500	4000
Udeo_za_odlaganje	0.00	DTE (kJ/kg)	6100	7400
Kapacitet_voza	1500	Pepeo (%)		25.00
Kapacitet_ekstraktora	2500	Sumpor (%)		2.00

Slika 6.12 Ulazni parametri za generisanje nedeljnog plana

Plan rada svakog bagera daje redosled operacija otkopavanja bloka i podetaža. Svaka operacija je definisana trajanjem, kapacitetom, dubinom kopanja, brzinom kružnog kretanja, kvalitetom i krajnjom destinacijom materijala (deponija, odlagalište).

Plan deponije može da ima tri planska prikaza, i to (1) plan kreiranja nove gomile sa brojem slojeva i količinom za smeštanje, plan odlaganja na gomilu sa trajanjem odlaganja, količinom, kvalitetom i kapacitetom; (2) plan uzimanja sa gomile sa trajanjem, količinom, kvalitetom i kapacitetom; i (3) plan utovara vozova sadrži količine koje se šalju u voz i da li stižu sa kopa i/ili sa deponije i podatke o kapacitetu, kvalitetu i trajanju operacije utovara. Izgled panela sa nedeljnim planom dat je na slici 6.13.



Slika 6.13 Nedeljni plan

Dnevni plan, odnosno njegova priprema je izvršena tokom kreiranja nedeljnog plana. Pre aktivacije dnevnog plana potrebno je proveriti realne uslove u proizvodnji da li odgovaraju predviđenim planskim okolnostima. Ako se utvrdi da je sve odgovarajuće plan se aktivira i šalje u proizvodnju. Ukoliko se relevantni planski podaci ne slažu, pravi se nov plan koji se takođe mora verifikovati.

Optimizacija utovarno-transportnih sistema uključenih u proizvodnju uglja na delu ležišta obuhvaćenom ovim istraživanjem, kroz razvijeni model, daje se detaljan dnevni operativni plan rada svih pojedinačnih delova sistema. U sklopu ovog plana se na nivou nastupa dobijaju detaljni podaci o radu. Lokacija na kojoj bager otkopava je definisana blokom, podetažom i nastupom u kojem se bager nalazi. Vreme otkopavanja je izraženo u minutima i prikazano je vreme početka i kraja trenutne operacije. Može se očitati o u kom materijalu se radi (ugalj ili jalovina), kolika je visina podetaže, kapacitet koji se postiže i količina otkopavanog materijala, kao i parametri kvaliteta. Detaljni dnevni plan dat je na slici 6.14. Pored parametara mogu se videti i dnevni dijagrami za svaki bager i to po kapacitetu (slika 6.15) i kvalitetu.



Slika 6.14 Dnevni operativni plan za sve bagere

Kada je u pitanju smenski plan, on je inkorporiran u dnevnom planu, tako da se u slučaju potrebe izmena za sledeću smenu može napraviti novi dnevni plan koji će biti aktivan sa početkom sledeće smene.



Slika 6.15 Dijagrami za bagere - kapacitet

Panel na kojem se daje operativni plan rada transportnog sistema prikazan je na slici 6.16. Plan transportnog sistema daje podatke o ukupno otkopanim i transportovanim količinama sa svih bagera u toku vremena, zatim količinama koje se isporučuju termoelektranama sa direktnog utovara i/ili deponije. Ako ugalj koji stiže sa zbirnog transportera (svi bageri u radu) zadovoljava kvalitetom i količinom potrebe termoelektrane, sve količine su u direktnom utovaru (slika 6.16). Ukoliko ugalj ne zadovoljava kvalitetom on se šalje na deponiju radi dodatne homogenizacije, a sa deponije se uzima ranije homogenizovan ugalj i šalje u termoelektranu (slika 6.17).



Slika 6.16 Plan rada otkopno-transportnog sistema

The figure displays five data tables, each corresponding to a stage of the process. Each table lists various parameters such as start and end times, capacity, quantity, DTE, moisture, ash, and sulfur content.

Uzimanje sa deponije		Skladištenje na deponiju		Direktni utovar		Ispunuka TE (t)		Svi bageri	
Vreme početka	05.10.2017 12:58	Vreme početka	05.10.2017 12:58	Vreme početka		Vreme početka	05.10.2017 12:58	Vreme početka	05.10.2017 12:58
Vreme završetka	05.10.2017 13:08	Vreme završetka	05.10.2017 13:08	Vreme završetka		Vreme završetka	05.10.2017 13:08	Vreme završetka	05.10.2017 13:08
Kapacitet (t/h)	2.500	Kapacitet (t/h)	1.519	Kapacitet (t/h)		Kapacitet (t/h)	2.500	Kapacitet (t/h)	1.519
Količina (t)	417	Količina (t)	253	Količina (t)		Količina (t)	417	Količina (t)	253
DTE (kl/kg)	6420	DTE (kl/kg)	5.876	DTE (kl/kg)		DTE (kl/kg)	6420	DTE (kl/kg)	5.876
Vlaga (%)	0.00	Vlaga (%)	44.80	Vlaga (%)		Vlaga (%)	45.90	Vlaga (%)	44.80
Pepeo (%)	0.00	Pepeo (%)	23.40	Pepeo (%)		Pepeo (%)	23.20	Pepeo (%)	23.40
Sumpor (%)	0.00	Sumpor (%)	0.00	Sumpor (%)		Sumpor (%)	0.00	Sumpor (%)	0.00

Slika 6.17 Transportni modul sa uključenom deponijom

Sa dijagrama protoka materijala na slici 6.16 primetan je uticaj optimizacije rada pojedinačni bagera i homogenizacije uglja unutar otkopnog bloka odgovarajućim tehnološkim podelama, jer je u konkretnom slučaju zastupljenost deponije jako mala.

6.2.5. Realizacija operativnog plana proizvodnje

Kao što je već rečeno, cilj primene novog pristupa je analiza mogućnosti realizacije strateških ciljeva poslovanja kroz optimizaciju operativnih planova. Realizacija operativnog plana biće izvedena otkopavanjem eksperimentalnog bloka saglasno prethodno napravljenim operativnim planovima rada svakog bagera pojedinačno i sistema u celini uključujući transportni sistem i deponiju. Analiza se sprovodi za tri scenarija:

Scenario 1: Analiza istorijskih podataka o kvalitetu isporučenog uglja termoelektranama iz istog opitnog bloka uglja.

Scenario 2: Realizacija operativnog plana, koji je optimizovan na nivou tehnološkog bloka i sistema transporta, tako da sav ugalj ide direktno na utovarno mesto i isporučuje se termoelektrani;

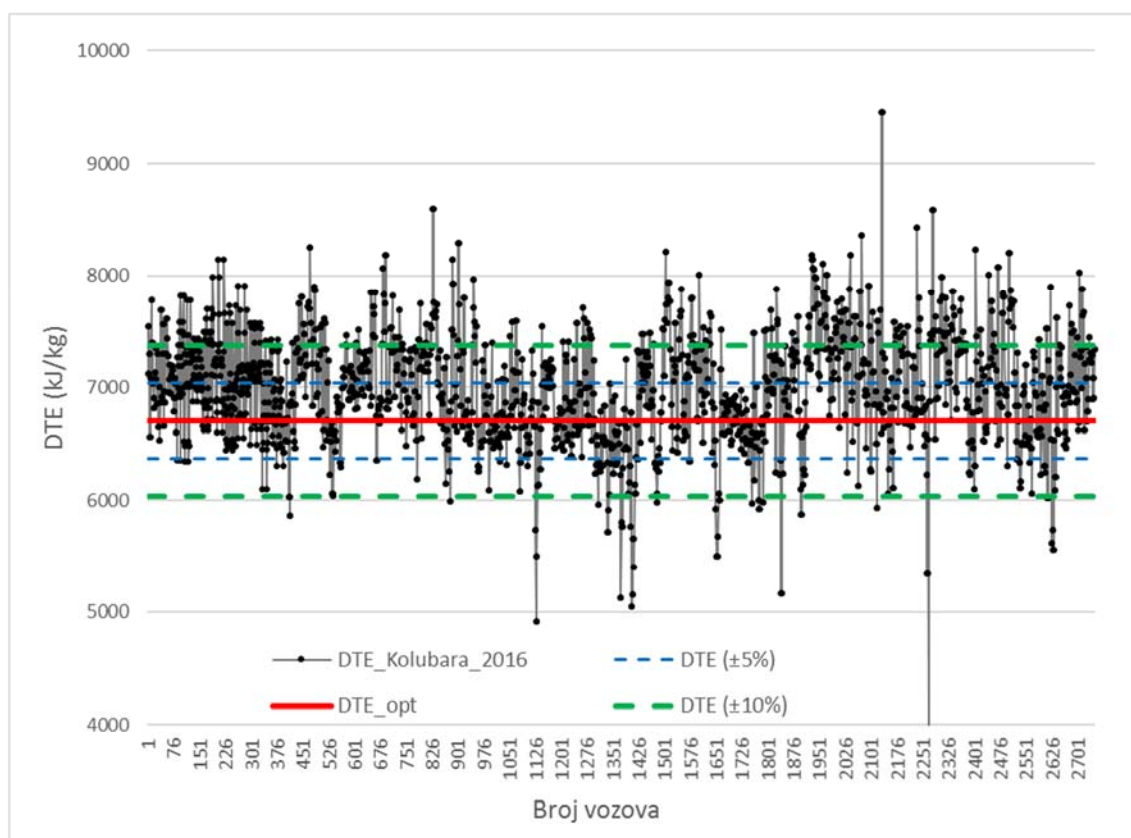
Scenario 3: Realizacija operativnog plana, koji je optimizovan na nivou tehnološkog bloka i sistema transporta, tako da ugalj koji zadovoljava zahteve termoelektrana (DTE 6700 kJ/kg $\pm 5\%$) ide direktno na utovarno mesto i isporučuje se termoelektrani, dok ostali ugalj ide na deponiju radi dodatne homogenizacije.

U nastavku teksta slede rezultati analize i komentari u vezi efekata optimizacije operativnih planova za različite scenarije proizvodnje.

Scenario 1 - Analiza rezultata i komentari

Opitni deo ležišta od 100 tehnoloških blokova je otkopan prema klasičnim rudarskim planovima. Otkopano je i isporučeno termoelektranama oko 4 miliona tona uglja, 2751 voz. Iz svakog voza je uzet uzorak za laboratoriju, i urađeno je 1375 hemijskih analiza o kvalitetu isporučenog uglja, odnosno utvrđene su vrednosti DTE-a. Model uglja baziran na laboratorijski verifikovanim vrednostima kvaliteta je korišćen kao osnova za upoređivanje i procenu metoda optimizacije.

Kvalitet isporučenog uglja termoelektrani u tromesečnom periodu prikazan je na dijagramu, slika 6.18. Tačkama su predstavljene vrednosti kvaliteta uglja u jednom otpremljenom vozu. Količina uglja koja je aproksimirana u toj vrednosti iznosi približno 1.500 tona po vozu. Crvena horizontalna linija na sredini dijagrama predstavlja optimalnu vrednost, odnosno kvalitet od 6700 kJ/kg. Isprekidane plave linije opisuju opseg od $\pm 5\%$ oko optimalne vrednosti, dok zelene isprekidane linije označavaju opseg od $\pm 10\%$ oko optimuma, što je ujedno opseg kvaliteta koji termoelektrana zahteva. Sa dijagrama je uočljivo da je isporučen uglj često imao dosta veću kalorijsku vrednost nego što je bilo potrebno. Takođe su primetni, iako dosta ređe, i podaci o nižoj kalorijskoj vrednosti od zahtevane. Ovde treba naglasiti da ova pojava nije vezana samo za posmatrani period, već ona odslikava generalno stanje na ovom površinskom kopu duži vremenski period.



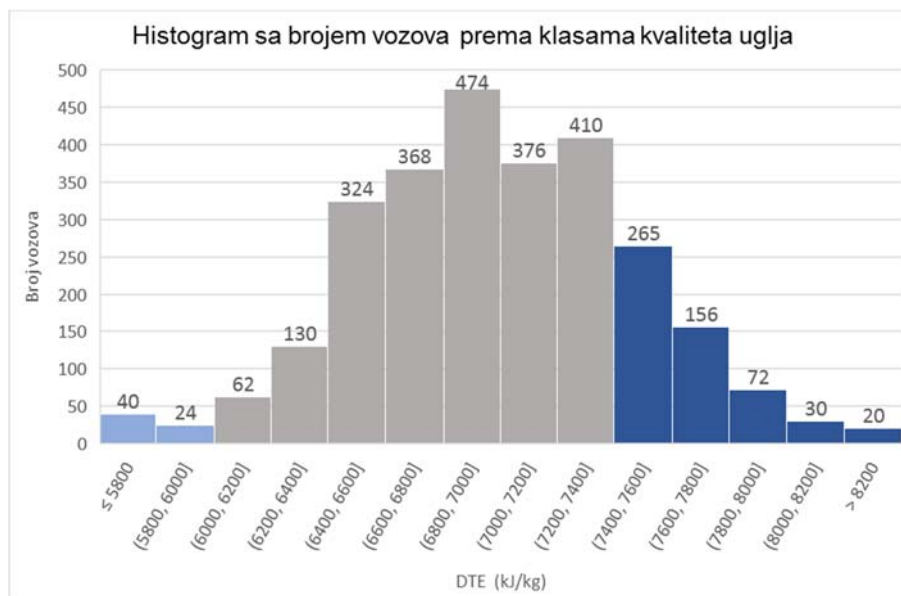
Slika 6.18 Kvalitet isporučenog uglja u tromesečnom periodu

Analizom promenljivosti uzorkovanih podataka kvaliteta na dijagramu, dolazi se do zaključka da je otkopavanje uglja redom blok po blok, bez operativne planske

analize kvaliteta uglja, neefikasan proces, sa velikim finansijskim gubicima. Od ukupno 2751 voza, koliko je obuhvaćeno analizom, 75%, odnosno 2072 voza, imali su kalorijsku vrednost uglja u zahtevanom opsegu. Vrednost ispod dozvoljenih 6030 kJ/kg imala su 72 voza (3%), dok je 22%, odnosno 607 vozova imalo vrednost iznad potrebnih 7370 kJ/kg. Ako bi se analizom obuhvatio manji opseg vrednosti oko optimalne (6700 kJ/kg $\pm 5\%$), broj vozova sa zadovoljavajućom kalorijskom vrednošću uglja bi imalo samo 45%, odnosno 1244 voza. Raspodela ostalih vozova je 246 (9%) ispod opsega i 1261 (46%) iznad.

Kako se za veću kalorijsku vrednost ne plaća dodatni bonus, a za manju se plaćaju penali i istovremeno termoblok troši mazut za podršku procesa sagorevanja uglja lošijeg kvaliteta, to evidentno vodi ka značajnim finansijskim gubicima. Ukupna prosečna vrednost za sve analizirane vozove je preko 4% veća od optimalne, odnosno za ceo posmatrani period iznosi 6990 kJ/kg.

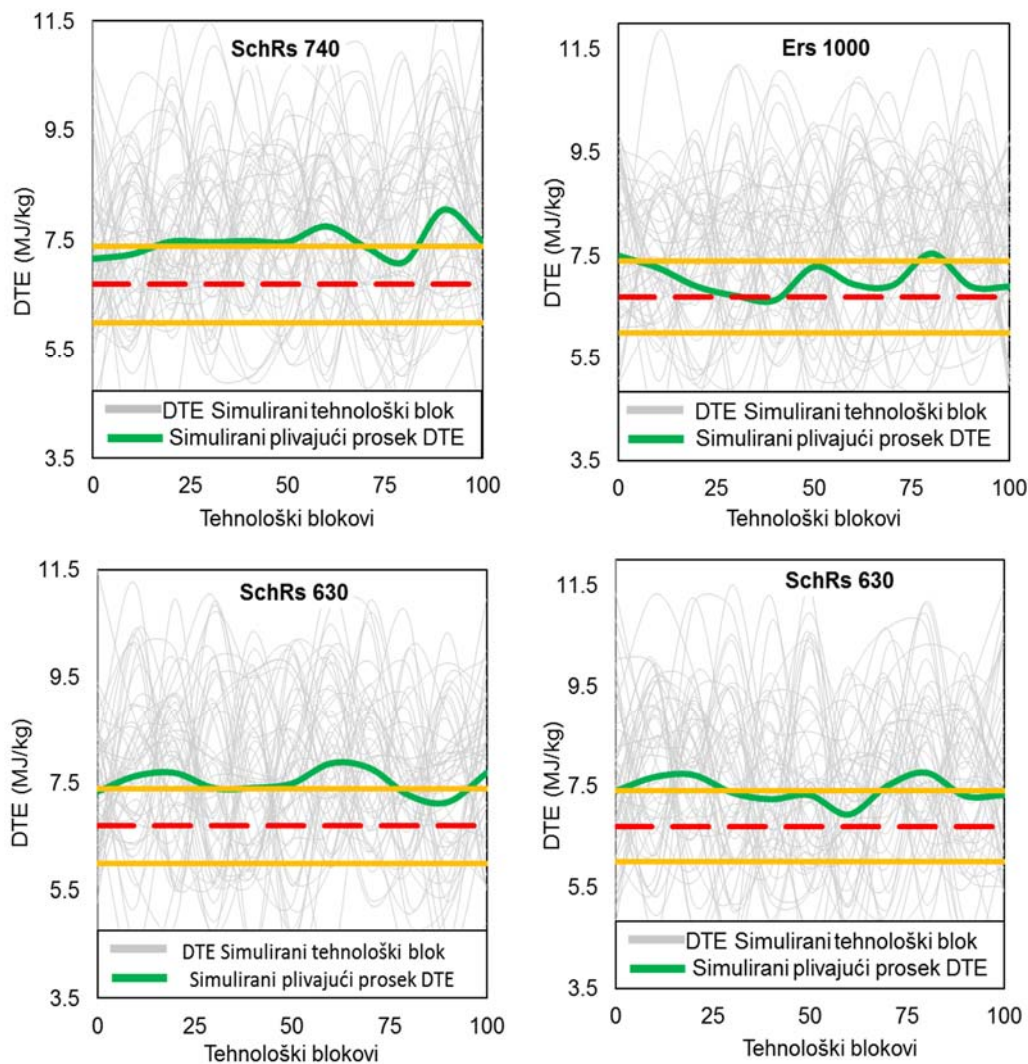
U ovakvim okolnostima planiranja eksploatacije ne obezbeđuju se maksimalan ekonomski efekat (NPV) poslovnog sistema, prvenstveno u raslojenim ležištima slabijeg kvaliteta uglja kao što je Kolubarski ugljeni basen. Znatno bolje iskorišćenje ležišta moglo bi se postići kada bi se ugalj slabije kalorijske vrednosti mešao sa ugljem boljeg kvaliteta. Ovo je posebno očigledno ako pogledamo histogram raspodele vozova prema kalorijskoj vrednosti uglja (slika 6.19). Predstavljeni primer pokazuje da se selektivnim otkopavanjem i mešanjem uglja iznad i ispod zadatih vrednosti, može dobiti veća količina uglja sa kalorijskom vrednošću u predefinisanim granicama za termoelektranu, a samim tim i poboljšati iskorišćenje ležišta i postići veći ekonomski efekat.



Slika 6.19 Histogram kvaliteta uglja po isporučenim vozovima

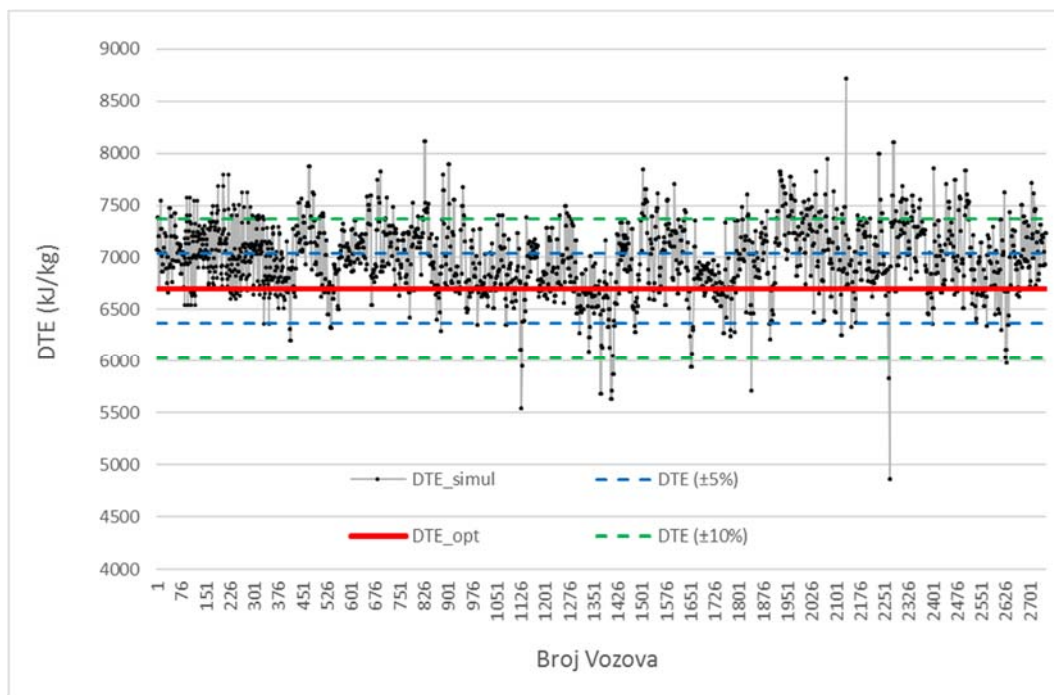
Scenario 2 - Analiza rezultata i komentari

Eksploatacija 100 tehnoloških blokova iz istog opitnog bloka po ovom scenariju otkopano je osnovu napravljenog operativnog plana u prethodnom poglavlju 6.2.4. Kvalitet uglja (DTE) koji se otkopava po optimizovanim tehnološkim blokovima na pozicijama svakog od četiri bagera prikazan je na slici 6.20. Kao što se može videti sa dijagrama kvaliteta uglja svaki od bagera je otkopavao određene količine uglja koje su bile van predviđenog opsega kvaliteta. Otkopani uglj sa pozicija bagera se dodatno mešao na sistemu transporteru, tako da se konačno formirani ponderisani kvalitet postizao na zbirnom transporteru (SUP 1) preko koga je uglj dopreman na utovarno mesto vozova.



Slika 6.20 Planirane vrednosti DTE po otkopnim pozicijama

Kvalitet isporučenog uglja sa zbirnog transportera (SUP) termoelektrani u posmatranom tromesečnom periodu za čije otkopavanje je urađena optimizacija plana otkopavanja prikazan je na slici 6.21. Na prikazanom dijagramu svaka tačka predstavlja jedan isporučeni voz, odnosno približnu količinu od 1500 tona uglja. Crvena horizontalna linija predstavlja optimalnu vrednost od 6700 kJ/kg, isprekidane plave linije definišu opseg od $\pm 5\%$ oko optimalne vrednosti, dok zelene isprekidane linije označavaju granične vrednosti prihvatljive od strane termoelektrane, odnosno $\pm 10\%$ oko optimuma.



Slika 6.21 Predviđene vrednosti kvaliteta uglja za posmatrani tromesečni period

Izvršenjem optimizacije operativnih procedura u tehnološkim blokovima smanjuje se standardna devijacija kvaliteta uglja po vozu. Ovo smanjenje konkretno u prikazanom scenariju istraživanja iznosi oko 30% (tabela 6.2), odnosno standardna devijacija vrednosti DTE je smanjena sa 497 kJ/kg na 348 kJ/kg. Kada se analizira broj vozova izvan opsega $\pm 10\%$ primetno je sledeće: broj vozova sa kvalitetom iznad opsega je pao sa 22% na 13% (sa 605 na 358), dok je broj vozova sa kvalitetom ispod opsega pao sa 3% na 1% (sa 72 na 24). Unutar opsega je umesto 75% (2074 voza), porastao broj vozova na 86% (2369 vozova). Kada se posmatra uži opseg $6700 \text{ kJ/kg} \pm 5\%$, broj vozova ispod opsega je 98 (4%), iznad opsega je 1227 (45%) vozova, dok je unutar opsega 52%, odnosno 1426 vozova.

Kako se iz priloženih rezultata može videti, homogenizacija uglja u otkopanim blokovima je dala određene rezultate, mada i dalje postoje određene količine uglja van opsega. Međutim, posle analize opsega $\pm 5\%$, odlučeno je da se za opseg direktne isporuke prihvati $6700 \text{ kJ/kg} \pm 5\%$, a da se ostali ugalj šalje na dodatnu homogenizaciju na deponiji. U tom slučaju bi 52% količine otkopanog uglja poslato

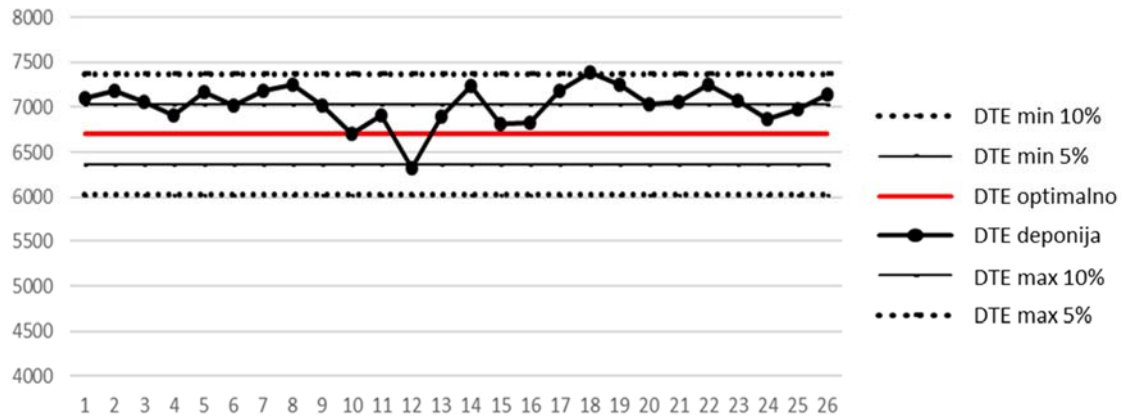
direktno u termoelektranu, a 48% količina bi bilo poslato na deponiju radi homogenizacije.

Prema tome, saglasno ovom scenariju operativnog plana možemo zaključiti da postoji mogućnost unapređenja, odnosno dalje optimizacije plana tako što će se 48% količina uglja van zahtevanog opsega dodatno homogenizovati na deponiji uglja. Upravo naredni scenario optimizacije operativnog plana tretira ovaj postupak.

Scenario 3 - Analiza rezultata i komentari

Kako se iz priloženih rezultata može videti, homogenizacija uglja u otkopanim blokovima je dala određene rezultate. Međutim, posle analize opsega $\pm 5\%$, odlučeno je da se za opseg direktne isporuke prihvati $6700 \text{ kJ/kg} \pm 5\%$, a da se ostali ugalj šalje na dodatnu homogenizaciju na deponiji. U tom slučaju bi 52% količine otkopanog uglja poslato direktno u termoelektranu, a 48% količina bi bilo poslato na deponiju.

Rezultati dodatne homogenizacije 48% količina uglja prikazani su na slici 6.22. Svaka tačka na dijagramu predstavlja količinu od 90.000 tona uglja, što je količina uglja na jednoj deponijskoj gomili. Sa dijagrama je uočljivo da je od 26 homogenizovanih gomila samo jedna iznad traženog opsega i to za 14 kJ/kg . Ukoliko se to predstavi kao problem, može se lako prevazići, kombinovanjem konkretne gomile sa direktnim utovarom unutar užeg opsega. Dalja analiza pokazuje da je mera efekta homogenizacije, standarda devijacija kvaliteta (DTE) uglja, pala sa početnih 497 kJ/kg na 209 kJ/kg , što daje ukupan efekat od 0.42. Ovaj broj govori o tome koliki je zapravo efekat homogenizacije uglja korišćenjem predloženog pristupa optimizacije operativnih planova, a sve u funkciji strateških ciljeva, odnosno maksimalnog ekonomskog efekta (NPV).



Slika 6.22 Vrednosti kvaliteta uglja po gomilama na deponiji

U tabeli 6.2 su prikazani efekti korišćenja integralnog pristupa optimizacije operativnih planova u cilju postizanja maksimalnih efekata i održivosti rudarskih projekata u životnom veku.

Planirano smanjenje varijabilnosti kvaliteta za 30%, odnosno 58% je omogućeno kombinovanjem optimizacije rada pojedinačnih bagera kroz podetaže otkopnog bloka korišćenjem metoda genetskog algoritma (GA) i linearnog programiranja (LP) sa simulacijom homogenizacije uglja na deponiji strata metodom. Takođe, ovim postupkom dodatno je otkopano još oko 3% količina uglja nižeg kvaliteta (ispod 5000 kJ/kg), koje bi u realnim okolnostima bile otkopane i odložene na odlagalište. Ovaj efekat je još veći kod eksploatacije ležišta sa jako raslojenim slojevima uglja kao što su određena ležišta u Kolubarskom basenu.

Tabela 6.2 Smanjenje varijabilnosti kvaliteta uglja

Analiza	Standardna devijacija vrednosti DTE uglja (kJ/kg)			
	Istorijski skup podataka	Optimizovani plan bez korišćenja deponije	Optimizovani plan sa korišćenjem deponije	Smanjenje varijabilnosti (%)
Scenario 1	497	-	-	-
Scenario 2		348		30
Scenario 3			209	58

Poređenjem stvarnih podataka dobijenih otkopavanjem blokova i modelom predviđenih vrednosti za istu opitnu oblast dokazuje se efikasnost predložene metodologije.

Integralna optimizacija plana sa predloženim sistemskim pristupom analize sistema eksploatacije je omogućila postizanje maksimalnih efekata, odnosno korišćenja ugljeva nižih kvaliteta što automatski omogućava veće iskorišćenje niskokvalitetnih ugljenih resursa, a time i ostvarenje strateških finansijskih ciljeva kompanije na duži rok.

7. ZAKLJUČAK I PREPORUKE ZA DALJI RAD

Ubrzano unapređenje i korišćenje rudarskih tehnologija u drugoj polovini 20 veka podstaklo je intezivan rast površinske eksploatacije, tako da se savremeno rudarstvo suočava sa stalnim pogoršanjem uslova poslovanja. Složenost eksploatacije proističe iz činjenica da su mineralna ležišta sve veće dubine, složenije strukture, nižeg mineralnog sadržaja ili neodgovarajućih svojstava, a vrlo često na lokacijama sa veoma nepovoljnom infrastrukturom ili u državama i regionima sa izraženom političkom nestabilnošću. Profitabilna eksploatacija ovakvih ležišta je složen i težak zadatak koji prvenstveno zavisi od sveobuhvatnog procesa analize, planiranja i projektovanja rudnika.

Cilj svakog strateškog plana je da napravi izvodljiv rudarski projekat koji će obezbediti maksimalnu neto sadašnju vrednost i održivost projekta na duži rok. Izvodljiv rudarski plan znači da plan zadovoljava sva ograničenja u procesu realizacije. Ovo podrazumeva tehničko-tehnološka ograničenja opreme i procesa, ograničenja primenjene metode eksploatacije, geometrijska ograničenja ležišta i ekonomska ograničenja u formi dostupnog kapitala i tržišta.

Dodatni izazovi na dizajnu plana su svakako značajni tehnički rizici (geološka i geotehnička neizvesnosti, proces prerade, itd), ekonomski rizik (procena tržišne cene, procena kapitalih i operativnih troškova) i potencijalno regulatorni i socijalni rizik (promene u poreskom sistemu, režim rudne rente, ekologija, javni protesti, itd.). Takođe, vreme dostupno da se sprovede kvalitetna analiza i uradi studija opravdanosti pravi određene poteškoće procesu planiranja površinskog kopa.

Efikasnost procesa površinske eksploatacije zavisi od velikog broja manje ili više uticajnih faktora. Potpuna optimizacija po svim ovim faktorima nije moguća, već se rešenje, nalazi u vidu *optimalnog kompromisa*. U tom smislu od izuzetnog značaja je odabir pristupa kojim se određuje važnost svakog faktora. Uspostavljanje ovakve hijerarhije je složen proces, koji je i pored zajedničkih generalnih postavki, svojstven i autentičan za svaki pojedinačni rudarski projekat.

Klasične metode planiranja i optimizacije, koje su donedavno korišćene, ne daju globalno optimalno rešenje u većini slučajeva, a pogotovu u složenim tehnološkim procesima kakvi su sistemi eksploatacije na površinskim kopovima. Koncept optimizacije utovarno-transportnih sistema, u okviru celog sistema eksploatacije, je dosta kompleksan postupak imajući u vidu činjenicu da se radi o različitim strukturama podsistema koji kontinualno utiču jedan na drugi tokom dugoročnog razvoja površinskog kopa. Tradicionalno, ove komponente sistema su optimizovane nezavisno, što dovodi do suboptimalnih rešenja za rudarski kompleks u celini.

Integralni pristup optimizaciji planiranja i analizi sistema eksploatacije jedan je od veoma važnih pristupa evaluaciji rudarskih projekata, i u značajnoj meri utiče na ekonomsku efikasnost rudarskih preduzeća na duži rok. Holistički pristup je takođe osnova za tehnoekonomsku evaluaciju ležišta, izradu studije izvodljivosti, planiranje i projektovanje kopa, i na kraju osnova za donošenje odluka o investicijama. Pri tome, optimizacija planiranja sistema eksploatacije jedan je od osnovnih i ključnih faktora upravljanja i donošenja poslovnih odluka u procesu definisanja strategije dugoročnog razvoja površinskih kopova.

Konvencionalni sistem planiranja, koji je zastupljen kod većine rudnika, vrlo često ne omogućava postizanje zacrtanih strateških ciljeva rudarskog projekta. Ne postoji globalni optimajzer za planiranje i projektovanje površinskih kopova. Umesto toga sub-aktivnosti u okviru sistema za planiranje se optimiziraju zasebno, ili su ko-optimizovane sa jednom ili dve druge aktivnosti. Optimizacione aktivnosti često uključuju potrebu heurističkih pristupa, uključujući okvirna pravila i metaheurističke metode. Ovo je delimično zbog vremena računarske obrade zbog veličine rudarskih blokova (broja varijabli, ograničenja, odluka itd.). Ključno je da planer razume da optimizacijom niza individualnih aktivnosti neće rezultirati globalno optimalnim rešenjem. Lokalna optimizacija koja nameće ograničenja na druge aktivnosti planiranja može značajno da ošteti potencijalnu vrednost projekta. Prema tome, globalni pristup podrazumeva proces planiranja koji će uključiti sve aktivnosti u okviru predloženog modela.

Bez posmatranja celokupnog sistema, optimizacija svake tehnološke faze pojedinačno često dovodi do loše ekonomske strategije i neodrživosti projekta. Metodologija optimizacije proizvodnog procesa od kopa preko prerade do tržišta uzima u obzir integralno sve procese u sistemu. Štaviše, jedan važan uslov za bilo koje ležište da postane eksploataбилno, jeste izvođenje evaluacije projekta sa tehničkog i ekonomskog stanovišta. Stoga, ciljevi holističke optimizacije planiranja i razvoja sistema eksploatacije su:

- postizanje konzistentnosti i efikasnosti u proizvodnji,
- smanjenje troškova u tehnološkim procesima,
- poboljšanje kontrole i upravljanja procesima kako bi se održala stabilnost, predvidivost i održivost, i
- razmatranje i uključanje svih ekoloških i socijalnih potreba lokalne zajednice.

Svrha istraživanja u ovoj disertaciji je bila da se kreira i implementira integralni pristup optimizacije planiranja sa posebnim naglaskom na utovarno-transportne sisteme na površinskim kopovima uglja. Razvijeni integralni model je koncipiran tako da podržava: strateško, srednjeročno, kratkoročno i operativno planiranje sa uključenim optimizacionim modelima za pojedine tehnološke celine od otkopavanja preko transporta pa do krajnje destinacije uglja: utovarnog mesta u vozove i/ili deponije uglja.

Implementirani model je podržan softverskim rešenjem za optimizaciju operativnog planiranja kontinualnih utovarno-transportnih sistema na površinskim kopovima, kako bi pomogao planeru- rudarskom inženjeru da pravovremeno izvede efikasan operativni plan tako da se dugoročno realizuju strateški ciljevi projekta.

Simulacioni eksperiment u studiji slučaja je implementirao i ilustrovao efekte primene integralne optimizacije planiranja na performanse kompleksnih otkopno-transportnih sistema eksploatacije. Da bi primenjivost pristupa bila verodostojna, analiza je sprovedena na potpuno poznatom i potpuno kontrolisanom okruženju.

Uzeti su istorijski podaci sa površinskog kopa Tamnava Zapadno polje za period od 3 meseca i sa njima je analizirana robusnost modela.

Rezultati analize, u ovom slučaju, su pokazali da se primenom predloženog integralnog pristupa optimizacije operativnih planova postiže zahtevani efekat homogenizacije (potrebno smanjenje varijabilnosti kvaliteta uglja) tako da sav uglj koji se isporučuje termoelektrani može ispuniti zahtevani opseg kvaliteta.

Takođe, primenom razvijenog modela dodatno je otkopano i iskorišćeno još oko 3% količina uglja nižeg kvaliteta (ispod 5000 kJ/kg), koje bi u realnim okolnostima bile otkopane i odložene na odlagalište. Ovaj efekat je još veći kod eksploatacije ležišta sa jako raslojenim slojevima uglja kao što su određena ležišta u Kolubarskom basenu.

Ovi efekti su postignuti kroz primenu metoda genetskog algoritma (GA), linearnog programiranja (LP) i simulacionog modela za homogenizaciju uglja na deponiji strata metodom. Poređenjem stvarnih podataka dobijenih otkopavanjem blokova i modelom predviđenih vrednosti za isti opitni blok, dokazuje se efikasnost predložene metodologije.

Konačno, na osnovu prikazanih rezultata, dokazano je da predloženi model ima svoju praktičnu primenu u realnim uslovima eksploatacije ležišta polimetalčnih mineralnih sirovina.

Naučni doprinos disertacije, saglasno postavljenim ciljevima, se ogleda u:

- Predloženom integralnom modelu optimizacije planiranja sa posebnim naglaskom na utovarno-transportne sisteme na površinskim kopovima uglja. Razvijeni model je koncipiran tako da podržava: strateško, srednjeročno, kratkoročno i operativno planiranje sa uključenim optimizacionim modelima za sve tehnološke celine od otkopavanja preko transporta i deponije pa do krajnje destinacije uglja.
- Implementirani model je podržan softverskim rešenjem za optimizaciju operativnog planiranja kontinualnih utovarno-transportnih sistema na

površinskim kopovima, kako bi pomogao planeru- rudarskom inženjeru da pravovremeno izvede efikasan operativni plan tako da se dugoročno realizuju strateški ciljevi rudarskog projekta.

Dalje naučno istraživanje treba da se odvija u smeru pouzdanije prostorne interpretacije ležišta i procene kvaliteta uglja. Stalna reinterpretacija ležišta treba da se bazira na: povećanju obima istražnih radova sa čela ugljenih etaža kao i korišćenje laboratorijskih podataka o kvalitetu već isporučenog uglja termoelektranama.

Često u praksi je ovo neizvodljivo, ali nadgradnja razvijenog modela uvođenjem stohastičkih prognoznih parametara kvaliteta uglja u model ležišta, svakako bi se postigla veća pouzdanost rudarskog planiranja i smanjila tržišna neizvesnost proizvodnje električne energije u proizvodnom lancu rudnik – termoelektrana.

LITERATURA

Abichequer, L., Costa, J., Pasti, H., Koppe, J., 2011, Design of blending piles by geostatistically simulated models—A real case reconciliation. *International Journal of Mineral Processing*, 99 (1), 21-26.

Davidson et al., 2015, *Mining & Metals in a Sustainable World 2050*, prepared for: World Economic Forum

Allen, H. E. K., 2012, Aspects of evaluating mining projects. Available: http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/aad95253aee7437_ek.pdf [Accessed 07.12.2017].

Aspinall, T., Isles, P., Davidson, C., 1993, Strip Mining. In: MARTIN, C. H. & HARGRAVES, A. J. (eds.) *Australasian coal mining practice*. Melbourne, Australia: Australasian Institute of Mining and Metallurgy [AusIMM].

Aykul, H., Yalcin, E., Ediz, I., Dixon-Hardy, D., Akcakoca, H., 2007, Equipment selection for high selective excavation surface coal mining. *Journal of the South African Institute of Mining & Metallurgy*, 107 (3), 195-210.

Bag, S., Detlev, S., 2000, *New technology in surface mining*.

Banković, M., Stevanović, D., Pešić, M., Tomašević, A., Kolonja, L., 2017, Improving Efficiency of Thermal Power Plants Through Mine Coal Quality Planning and Control. *Thermal Science*, (Online), DOI: 10.2298/TSCI170605209B

Barnes, R. J., 1982, *Optimizing the ultimate pit*. PhD Thesis, Colorado School of Mines. Arthur Lakes Library.

Basçetin, A., 2003, *A decision support system for optimal equipment selection in open pit mining: analytical hierarchy process*. Istanbul University, Mining Engineering Department, 16 (2), 1-11.

Basçetin, A., 2004, An application of the analytic hierarchy process in equipment selection at Orhaneli open pit coal mine, *Mining Technology*, 113 (3), 192-199.

Bascetin, A., Kesimal, A., 1999, The study of a fuzzy set theory for the selection of an optimum coal transportation system from pit to the power plant. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 13 (3), 97-101.

Baucom, J., 2011, *The Evolution of Mining Trucks is Changing Interactions and Productivity at Minesites*. Pincock, Allen and Holt, a division of Runge Inc.

Baumann, S., 1999, Review your assets to determine maximum fleet size. A case study history of Glamis Gold's Operation.

Bazzazi, A. A., Osanloo, M., Karimi, B., 2011, A new fuzzy multi criteria decision making model for open pit mines equipment selection. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 28 (03), 279-300.

Bell, F. G., Donnelly, L. J., 2006, *Mining and its Impact on the Environment*, CRC Press.

Benndorf, J., 2011, Investigating the variability of key coal quality parameters in continuous mining operations when using stockpiles. *Advances in Orebody Modelling and Strategic Mine Planning I*. AusIMM.

Benndorf, J., 2013, Application of efficient methods of conditional simulation for optimising coal blending strategies in large continuous open pit mining operations. *International Journal of Coal Geology*, 112, 141-153.

Benndorf, J., Yueksel, C., Shishvan, M. S., Rosenberg, H., Thielemann, T., Mittmann, R., Lohsträter, O., Lindig, M., Minnecker, C., Donner, R., 2015, RTRO-coal: real-time resource-reconciliation and optimization for exploitation of coal deposits. *Minerals*, 5 (3), 546-569.

Beretta, F., Costa, J., Koppe, J., 2010, Reducing coal quality attributes variability using properly designed blending piles helped by geostatistical simulation. *International Journal of Coal Geology*, 84 (2), 83-93.

Bian, Z., Dong, J., Lei, S., Leng, H., Mu, S., Wang, H., 2009, The impact of disposal and treatment of coal mining wastes on environment and farmland. *Environmental geology*, 58 (3), 625-634.

Bozorgebrahimi, A., Hall, R., Morin, M., 2005, Equipment size effects on open pit mining performance. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 19 (1), 41-56.

Bozorgebrahimi, E., 2004, The evaluation of haulage truck size effects on open pit mining, PhD Thesis, University of British Columbia.

Bozorgebrahimi, E., Hall, R., Blackwell, G., 2003, Sizing equipment for open pit mining—a review of critical parameters. *Mining Technology*, 112 (3), 171-179.

Buhl, B., 2002, The surface mine planning and design course. MMPE410. University of British Columbia, Industrial Presentations.

Burt, C., Caccetta, L., 2013, Equipment Selection for Surface Mining: A Review - Draft paper. Available: http://www.optimization-online.org/DB_FILE/2013/04/3831.pdf [Accessed 18.12.2017].

Burt, C., Caccetta, L., Welgama, P., Fouché, L., 2011, Equipment selection with heterogeneous fleets for multiple-period schedules. *Journal of the Operational Research Society*, 62 (8), 1498-1509.

Burt, C. N., 2008, An optimisation approach to materials handling in surface mines. PhD Thesis, Curtin University.

Caccetta, L., Hill, S. P., 2003, An application of branch and cut to open pit mine scheduling. *Journal of global optimization*, 27 (2-3), 349-365.

Chandran, B. G., Hochbaum, D. S., 2009, A computational study of the pseudoflow and push-relabel algorithms for the maximum flow problem. *Operations research*, 57 (2), 358-376.

CKIT, 2017, The Bulk Materials Handling Knowledge Base [Online]. Available: <http://www.ckit.co.za>, 2017].

Cross, C., 2005, A Rio Tinto view of collaborative research in Europe and the World. 16th. Society of Mining Professors (SOMP). Ankara, Turkey.

Czaplicki, J. M., 1992, On a number of spare haulage units for the shovel-truck system in open pit mines. International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 6 (2), 57-59.

Dagdelen, K., 1985, Optimum multi period open pit mine production scheduling. PhD Thesis, Colorado School of Mines.

Dagdelen, K., 1986, Optimum open pit mine production scheduling by Lagrangian parameterization. Proc. of the 19th APCOM, 127-142.

Darwen, P. J., 2001, Genetic Algorithms and Risk Assessment to Maximise NPV With Robust Open-Pit Scheduling. Fourth Biennial Conference: Strategic Mine Planning 2001, Proceedings, 2001. 29-34.

De Ferranti, D., Perry, G. E., Lederman, D., Maloney, W. E., 2002, From natural resources to the knowledge economy: trade and job quality, Washington, DC: World Bank.

DeLilla, E., 1995, Continous surface mining equipment: how to achieve success. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1995. 171A.

Dimitrakopoulos, R., 1998, Conditional simulation algorithms for modelling orebody uncertainty in open pit optimisation. International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 12 (4), 173-179.

Dimitrakopoulos, R., Farrelly, C., Godoy, M., 2002, Moving forward from traditional optimization: grade uncertainty and risk effects in open-pit design. Mining Technology, 111 (1), 82-88.

Dorin, I., Diaconescu, C., Topor, D. I., 2014, The role of mining in national economies. *International Journal of Academic Research in Accounting, Finance and Management Sciences*, 4 (3), 155-160.

Dos Santos, J., 2016, Cost value of High-angle conveying - 2011. *Mining engineering*. Englewood, USA: SME.

Douglas, J.,1964, Prediction Shovel-Truck Production: A Reconciliation Of Computer And Conventional Estimates, Technical report no. 37, prepared for: Stanford University, California

Durst, W., Vogt, W., 1988, Bucket wheel excavator, Trans Tech Publications.

Dzakpata, I., Knights, P., Kizil, M. S., Nehring, M., Aminossadati, S. M., 2016, Truck and shovel versus in-pit conveyor systems: a comparison of the valuable operating time.

Ercelebi, S., Bascetin, A., 2009, Optimization of shovel-truck system for surface mining. *Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 109 (7), 433-439.

Ferreira, F., Chaves, A., Delboni, H., 1992, Conditional simulation method for design of blending piles. *Proceedings of 23th International Symposium on Computer Applications in the Mineral Industries*, 1992 Phoenix. 615–623.

Fox, R., 2011, A Study on the effectiveness of mine design software for pit optimisation and scheduling at the Mt. Thorley Warkworth Coal Mine. BE Thesis, School of MiningEngineering, The University of New South Wales.

Gershon, M. E., 1983, Optimal mine production scheduling: evaluation of large scale mathematical programming approaches. *International journal of mining engineering*, 1 (4), 315-329.

Gerstel, A. W., 1979, The homogenisation of bulk material in blending piles.

Gianazza, R., 2010, Strip optimization at Curragh mine. BE Thesis, School of Mining Engineering, The University of New South Wales.

Gilewicz, P., 2001, Large truck report. World Mining Equipment Magazine.

Gilewicz, P., 2002, Large excavators and haul trucks in surface mining, What mines are using today & where they may be headed. Haulage 2002. Tuscan, Arizona.

Godoy, M., Dimitrakopoulos, R., 2004, Managing risk and waste mining in long-term production scheduling of open-pit mines. SME Transactions, 316 (3).

Gojak, Z., Mitrović, S., Stanković, R., Kitanović, O., 2011, BPUBS: Informacioni sistem za istražne radove ugljenih basena Srbije. Ugalj 2011, Jugoslovenski komitete za površinsku eksploataciju, 66-73.

Goldberg, A. V., Tarjan, R. E., 1988, A new approach to the maximum-flow problem. Journal of the ACM (JACM), 35 (4), 921-940.

Goovaerts, P., 1997, Geostatistics for natural resources evaluation, Oxford University Press, New York.

Grobler, F., Elkington, T., Rendu, J., 2011, Robust decision making-Application to mine planning under price uncertainty. 35th APCOM Symposium-Application of Computers and Operations Research in the Minerals Industry, Proceedings, 371-380.

Gy, P. M., 1981, A new theory of bed-blending derived from the theory of sampling—development and full-scale experimental check. International Journal of Mineral Processing, 8 (3), 201-238.

Hall, B., 2006, Short-term gain for long-term pain - How focussing on tactical issues can destroy long-term value. 2nd International Seminar Strategic versus Tactical Approaches in Mining, 1-19.

Hartman, H. L., 1998, SME mining engineering handbook, second edition, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration

Hays, R., 1990, Trucks. Surface Mining (2nd Edition),(Ed: BA Kennedy), 672-691.

Hochbaum, D. S., 2008, The pseudoflow algorithm: A new algorithm for the maximum-flow problem. Operations research, 56 (4), 992-1009.

Hustrulid, W. A.,Kuchta, M., 1998, Open Pit Mine Planning and Design, Rotterdam, Netherlands, A.A. Balkema.

Ignjatović, D., 2012, Mašine za površinsku eksploataciju - Skipta za studete IV godine Rudarskog odseka, Beograd, Rudarsko geološki fakultet, Univerziteta u Beogradu.

Ignjatović, D., Jovančić, P., 2012, Mašine i uređaji za površinsku eksploataciju i transport - Zbirka zadataka, Univerzitet u Beogradu - Rudarsko-geološki fakultet.

Ignjatović, D., Knežević, D., Kolonja, B., Lilić, N., Stanković, R., 2007, Upravljanje kvalitetom uglja, Beograd, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet.

Johnson, T. B., 1968, Optimum open pit mine production scheduling, prepared for: DTIC Document

Jovančić, P., 2004, Razvoj metodologije utvrđivanja ponašanja konstrukcije rotornog točka. Magistraska teza, Univerzitet u Beogradu - Rudarsko-geološki fakultet.

Kawalec, W., 2004, Short-term scheduling and blending in a lignite open pit mine with BWEs. 13th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection, 2004 Wroclaw. 53-59.

King, B., 2011, Optimal mining practice in strategic planning. Journal of Mining Science, 47 (2), 247-253.

Kloppers, B., Horn, C., Visser, J., 2015, Strategic and tactical requirements of a mining long-term plan. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 115 (6), 515-521.

Kolonja, B., Jovanović, M., Tomašević, A., Kolonja, L., Stanković, R., 2011, Operativno planiranje proizvodnje uglja na tamnavskim kopovima. Ugalj 2011, Jugoslovenski komitete za površinsku eksploataciju 162-170.

Kolonja, B., Knežević, D., 2000, Transport u pripremi mineralnih sirovina, Beograd, Rudarsko-geološki fakultet.

Kolonja, B., Stevanović, D., Georgijadis, M., Banković, M., Kolonja, L., 2015, Uncertainty in open pit optimisation. 5th International symposium Mining and environmental protection. Vrdnik, Serbia.

Korobov, S., 1974, Method for determining optimal open pit limits, prepared for: Department of Mineral Engineering Ecole Polytechnique Montreal

Kose, T., Aksoy, C., Gonen, A., Kun, M., Malli, T., 2005, Economic evaluation of optimum bench height in quarries. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 105 (2), 127-135.

Krause, G., 2001, Large heavy haulers: is bigger better? University of Alberta Learning Seminar.

Lashof, D. A., Delano, D., Devine, J., Finamore, B., Hammel, D., Hawkins, D., Hershkowitz, A., Murphy, J., Qian, J., Simms, P., 2007, Coal in a changing climate, Natural Resources Defense Council.

Lemieux, M., 1979, Moving cone optimizing algorithm. Computer methods for the 80's in the Mineral Industry, 80, 329-345.

Lerchs, H., Grossmann, 1965, Optimum design of open pit mines. Transactions CIM Bullitin, Vol. 58, 17-24.

Li, Z., 1995, Truck-haulage economics of mining open pits by high bench. CIM bulletin, 88, 50-52.

Lizotte, Y., 1988, Economic and technical relations between open-pit design and equipment selection. Mine Planning and Equipment Selection. Singhal (Ed). Balkema, Rotterdam, 3-12.

Marques, D. M., Costa, J. F. C., 2013, An algorithm to simulate ore grade variability in blending and homogenization piles. International Journal of Mineral Processing, 120, 48-55.

Martinez, L. A., 2003, Can quantification of geological risk improve open pit mine design? MPhil Thesis, DepartmentThe University of Queensland, Brisbane.

Moon, C. J., Whateley, M. K., Evans, A. M., 2006, Introduction to mineral exploration, Blackwell publishing.

Morgan, W., Peterson, L., 1968, Determining shovel-truck productivity. Mining Engineering, 20 (12), 76-80.

Morton, J., 2017, Is the Ultra-class Truck Dream Dead? Engineering and Mining Journal, 218 (9), 32-36.

Naworyta, W., Sypniowski, S., Benndorf, J., 2015, Planning for reliable coal quality delivery considering geological variability: A case study in polish lignite mining. Journal of Quality and Reliability Engineering, 2015.

Nel, S., Kizil, M., Knights, P., 2011, Improving truck-shovel matching. 35th APCOM Symposium-Application of Computers and Operations Research in the Minerals Industry, Proceedings, Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 381-391.

Niemann-Delius, C., 2006, Continuous Surface Mining in the World, 8th International Symposium Continuous Surface Mining, Aachen, Germany. 13-18.

Noran, O. S., 2000, Business modelling: UML vs. IDEF. School of Computing and Information Technology, Griffith University.

Osanloo, M., Gholamnejad, J., Karimi, B., 2008, Long-term open pit mine production planning: a review of models and algorithms. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 22 (1), 3-35.

Pana, M., Carlson, T., 1966, Description of a computer technique used in mine planning of the Utah Mine of Kennecott Copper Corp. 6th APCOM.

Pavloudakis, F., Agioutantis, Z., 2001, Development of a software tool for the prediction of the coal blending efficiency in longitudinal stockpiles. Proc. 17th Int. Mining Congress and Exhibition of Turkey, Ankara, Turkey, June, Chamber of Mining Engineers of Turkey.

Pavlović, V., Ignjatović, D., 2012, Selektivna površinska eksploatacija uglja kontinualnim sistemima, Beograd, Univerzitet u Beogradu - Rudarsko-geološki fakultet.

Phillips, D., 1972, Optimum design of an open pit. Application of Computer Methods in the Mineral Industry, Proc. of 10th International Symposium, Johannesburg, SA, 145-147.

Picard, J.-C., 1976, Maximal closure of a graph and applications to combinatorial problems. *Management science*, 22 (11), 1268-1272.

Rakonjac, M., Jevtić, B., Ćatić, R., Uticaj tehnoloških parametara otkopavanja na rad i kapacitet rotornog bagera SchRs 630x25/6. In: EPS, J. K. (ed.).

Ramazan, S., 2001, Open pit mine scheduling based on fundamental tree algorithm. PhD Thesis, Colorado School of Mines. Arthur Lakes Library.

Ramazan, S., Dagdelen, K., Johnson, T., 2005, Fundamental tree algorithm in optimising production scheduling for open pit mine design. *Mining Technology*, 114 (1), 45-54.

Ramazan, S., Dimitrakopoulos, R., 2007, Stochastic optimisation of long-term production scheduling for open pit mines with a new integer programming formulation. *Orebody Modelling and Strategic Mine Planning, Spectrum Series*, 14, 359-365.

Rasper, L., 1975, *The bucket wheel excavator: development-design-application*. Vol.1 (2).

Ravenscroft, P., 1992, Risk analysis for mine scheduling by conditional simulation. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy. Section A. Mining Industry*, 101, 104-108.

Roman, R., 1974, The role of time value of money in determining an open pit mining sequence and pit limits. *Proc. 12th Symp. Application Computers and Operation Research in the Mineral Industry*.

Rudrajit, M., Serkan, S., 2012, Surface coal mining methods in Australia. In: ONARGAN, P. T. (ed.) *Mining Methods*. InTech.

Rumbaugh, J., Jacobson, I., Booch, G., 2004, *Unified modeling language reference manual*, the, Pearson Higher Education.

Sabour, S., Wood, G., 2009, Modelling financial risk in open pit mine projects: implications for strategic decision-making. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 109 (3), 169-175.

Sabour, S. A., Dimitrakopoulos, R., 2011, Incorporating geological and market uncertainties and operational flexibility into open pit mine design. *Journal of Mining Science*, 47 (2), 191-201.

Salomons, W., 1995, Environmental impact of metals derived from mining activities: processes, predictions, prevention. *Journal of Geochemical exploration*, 52 (1-2), 5-23.

Samanta, B., Sarkar, B., Mukherjee, S., 2002, Selection of opencast mining equipment by a multi-criteria decision-making process. *Mining Technology*, 111 (2), 136-142.

Schaffer, M., 1993, Continuous Mining of Strong Rock with the Voest-Alpine Surface Miner. *Bulk solids handling*, 13, 258-258.

Schimm, B., 2006, Surface Miner as a tool for improvement of the stripping ratio. 8th International Symposium Continuous Surface Mining, Aachen, Germany. 201-205.

Schofield, C. G., 1980, Homogenisation/blending systems design and control for minerals processing, Aedermannsdorf (Switzerland), Trans Tech Publications, .

Sharma, N., 1999, An alternative approach to procurement of equipment: Coal India's experience. International Conference on the Management of Mining Machinery, 8-9 July 1999 Calcuta, India.

Shishvan, M., Benndorf, J., 2014, Performance optimization of complex continuous mining system using stochastic simulation. Proceedings of Engineering Optimization 2014, the 4th International Conference on Engineering Optimization, 2014. 273-278.

Simonović, M., 1967, Bageri, odlagači i transportni mostovi na površinskim otkopima, Beograd, Rudarski institut.

Soltanmohammadi, H., Osanloo, M., Sami, A., Malekzadeh, S. B., 2010, Selection of practical bench height in open pit mining using a multi-criteria decision making solution. *Journal of Geology and Mining Research*, 2 (3), 48-59.

Stevanović, D., 2015, Optimizacija i planiranje površinskih kopova stohastičkim modelima. Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet.

Stevanovic, D., Banković, M., Rupar V., Milisavljević, V., Cvetić, A., Kržanović, D., 2017, Waste dump design optimization, case study open pit Drmno. 6th International Symposium Mining and Environmental Protection. Srbija.

Stevanović, D., Malbašić, V., Čebašek, M., 2012, Optimizacija sistema transporta jalovine na površinskom kopu Buvač. Tehnika, 4, 545-552.

Stevanović, D. R., Kolonja, B. M., Stanković, R. M., Knežević, D. N., Banković, M. V., 2014, Application of stochastic models for mine planning and coal quality control. Thermal Science, 18 (4), 1361-1372.

Ta, C. H., Kresta, J. V., Forbes, J. F., Marquez, H. J., 2005, A stochastic optimization approach to mine truck allocation. International journal of surface mining, reclamation and environment, 19 (3), 162-175.

Thompson, M., Jennings, A., 2016, Impumelelo coal mine is home to the world's longest belt conveyor. Mining engineering. Englewood, USA: SME.

Thompson, R., 2005, Surface strip coal mining handbook. South African Colliery Managers Association.

Thorley, U., 2012, Open Pit Mine Planning: Analysis and system modeling of conventional and oil sands applications. PhD Thesis, Queen's University.

Thyssenkrupp, 2017, Available: www.thyssenkrupp-industrial-solutions.com 2017].

Tilton, J. E., Eggert, R. G., Landsberg, H. H., 1988, World mineral exploration, Washington.

Weber-Fahr, M., 2002, Mining and Development, prepared for: World Bank and the International Finance Corporation

Westcott, P., 2004, Dragline and/or truck/shovel assist: Some technical and business considerations, prepared for: Inaugural UNSW/Mitsubishi Lecture Notes Presented to the School of Mining Engineering, University of New South Wales

Westcott, P., Pitkin, G., Aspinall, T., 2009, Open-cut mining. In: KININMONTH, R. & BAAFI, E. Y. (eds.) Australasian coal mining practice. Third ed. Melbourne, Victoria, Australia: Australasian Institute of Mining and Metallurgy.

Whittle, J., 1989, The facts and fallacies of open pit optimisation, Whittle Programming Pty. Ltd., Australia.

Whittle, J., 2011, Long-term scheduling. 35th International Symposium: Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry 2011 Wollongong. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 75-80.

Wright, G.,Czelusta, J., 2003, Mineral resources and economic development, Conference on Sector Reform in Latin America, Stanford Center for International Development, November 13-15, 2003. Stanford University,.

Xiaoyu, B. V., Turczynski, G., Baxter, N., Place, D., Sinclair-Ross, H., Ready, S., 2017, Pseudoflow Method for Pit Optimization, Geovia Whittle - White Paper.

Zhao, Y., Kim, Y., 1992, A new Optimum Pit Design Algorithm. Proceedings 23rd Application of Computer in Mineral Industry, 423-434.

BIOGRAFIJA

Mirjana Banković, rođena Jovanović, dipl. rud. inž. rođena je 28. jula 1980. godine u Beogradu. Nakon završene gimnazije školske 1998/1999, upisala je Rudarsko-geološki fakultet, Univerziteta u Beogradu, smer za Površinsku eksploataciju ležišta mineralnih sirovina.

Osnovne studije završila je 2007. godine, odbranom diplomskog rada sa temom "Definisanje transportnih sistema u funkciji razvoja površinskog kopa Drmno na 12 miliona tona uglja godišnje". Studije je završila sa prosečnom ocenom 8,15.

Na mestu stručnog saradnika na Rudarsko – geološkom fakultetu stalno je zaposlena od 2008. godine. Kao saradnik u nastavi na Rudarsko – geološkom fakultetu angažovana je od 2012. godine. U tom periodu učestvovala je u pripremi nastave iz predmeta Sistemi površinske eksploatacije i Informatika. Takođe je koautor Praktikuma za vežbe iz Informatike 1.

Mirjana Banković u svojstvu istraživača učestvuje od 2011. godine u realizaciji naučno istraživačkog projekta (Projekat TR 33039) koji se finansira od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja, u okviru programa istraživanja u oblasti tehnološkog razvoja.

Stručni ispit iz oblasti površinske eksploatacije položila je 2015. godine.

U dosadašnjem periodu objavila je 14 naučnih radova i učestvovala u izradi tri tehnička rešenja. U objavljenim radovima fokus je uglavnom na problematici vezanoj za optimizaciju sistema i planiranje proizvodnje na površinskim kopovima, kao i upravljanje i kontrolu kvaliteta u površinskoj eksploataciji uglja.

Uporedno sa naučnim radom Mirjana Banković se bavi i stručnim radom iz domena površinske eksploatacije. Kao saradnik na projektima učestvovala je u izradi velikog broja studijskih rešenja i rudarskih projekata.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Мирјана В. Банковић

Број индекса Р703/08

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

ОПТИМИЗАЦИЈА УТОВАРНО-ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМА У ФУНКЦИЈИ
ПЛАНИРАЊА ПОВРШИНСКОГ КОПА

- 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, 01.03.2018. год.

Мирјана Банковић

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Мирјана В. Банковић

Број индекса Р703/08

Студијски програм Рударско инжењерство

Наслов рада ОПТИМИЗАЦИЈА УТОВАРНО-ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМА У
ФУНКЦИЈИ ПЛАНИРАЊА ПОВРШИНСКОГ КОПА

Ментор Проф. др Божо Колоња


Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла 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, 01.03.2018. год.



Изјава о коришћењу

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

ОПТИМИЗАЦИЈА УТОВАРНО-ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМА У ФУНКЦИЈИ ПЛАНИРАЊА ПОВРШИНСКОГ КОПА

која је моје ауторско дело.

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

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/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, 01.03.2018. год.



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

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

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

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

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

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