

UNIVERZITET U BEOGRADU
RUDARSKO-GEOLOŠKI FAKULTET

Snežana M. Savković

**METODOLOGIJA IZBORA KAPITALNIH
RUDARSKIH MAŠINA ZA PROCESE
REVITALIZACIJE I MODERNIZACIJE**

Doktorska disertacija

Beograd, 2026.

UNIVERSITY OF BELGRADE

FACULTY OF MINING AND GEOLOGY

Snežana M. Savković

**METODOLOGY FOR THE SELECTION OF
CAPITAL MINING MACHINERY FOR
REVITALIZATION AND MODERNIZATION
PROCESSES**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2026.

KOMISIJA

Mentori:

dr Dragan Ignjatović, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet
Uža naučna oblast: Mehanizacija u rudarstvu i energetici

dr Stevan Đenadić, docent
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet
Uža naučna oblast: Mehanizacija u rudarstvu i energetici

Članovi komisije:

dr Igor Miljanović, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet
Uža naučna oblast: Računarstvo i sistemsko inženjerstvo

dr Miloš Tanasijević, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet
Uža naučna oblast: Elementi mašinskih i energetske sistema

dr Uglješa Bugarić, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet
Uža naučna oblast: Industrijsko inženjerstvo

Datum odbrane: _____

METODOLOGIJA IZBORA KAPITALNIH RUDARSKIH MAŠINA ZA PROCESSE REVITALIZACIJE I MODERNIZACIJE

Sažetak

Upravljanje životnim vekom kapitalnih mašina u rudarskoj industriji predstavlja zahtevan i složen zadatak, naročito u procesu odlučivanja o produžetku životnog veka kroz revitalizaciju i modernizaciju. Kapitalne rudarske mašine su gigantska mehanizovana postrojenja, koja se koriste za masovno iskopavanje rude i otkrivke, najčešće na površinskim kopovima. Najznačajniji predstavnici kapitalnih rudarskih mašina su rotorni bageri, koji zahtevaju pouzdan i sveobuhvatan metodološki pristup odlučivanju. Postojeći pristupi izbora za procese revitalizacije i modernizacije uglavnom su tradicionalni i ne omogućavaju integrisanu i objektivnu evaluaciju relevantnih parametara.

U ovoj disertaciji razvijen je inovativni hibridni model koji omogućava sistematično i transparentno praćenje rada i održavanja kapitalnih rudarskih mašina, kao i njihovu evaluaciju i rangiranje za procese revitalizacije i modernizacije. Model je zasnovan na kombinaciji višekriterijumskih metoda odlučivanja, čime se postiže veća sistematičnost i smanjuje subjektivnost u procesu donošenja odluka. Formirana su tri parcijalna hibridna modela: AHP-PROMETHEE, AHP-TOPSIS i AHP-VIKOR, definisana na osnovu četiri grupe parametara. Validacija i izbor optimalnog modela izvršeni su primenom upitnika eksperata.

Predloženi model je verifikovan na kapitalnim rudarskim mašinama (rotornim bagerima) sa površinskih kopova rudarskog basena Kolubara. Rezultati ukazuju na unapređenje postojećeg pristupa kroz objektivniju evaluaciju i izbor mehanizacije, uz uravnoteženo uključivanje subjektivnih i objektivnih elemenata odlučivanja.

Ključne reči: kapitalne rudarske mašine, hibridni model, višekriterijumske metode odlučivanja, revitalizacija, modernizacija.

Naučna oblast: Rudarsko inženjerstvo

Uža naučna oblast: Mehanizacija u rudarstvu i energetici i Računarstvo i sistemsko inženjerstvo

UDK broj: 622.678.7-048.35(043.3)

METHODOLOGY FOR THE SELECTION OF CAPITAL MINING MACHINERY FOR REVITALIZATION AND MODERNIZATION PROCESSES

Abstract

Life-cycle management of capital mining machinery represents a demanding and complex task, particularly in the decision-making process concerning life extension through revitalization and modernization. Capital mining machines are large-scale mechanized systems used for excavation of minerals and overburden, predominantly in surface mining operations. The most significant representatives of this category are bucket-wheel excavators, which require a reliable and comprehensive decision-making approach. Existing approaches to selecting machines for revitalization and modernization processes are predominantly based on traditional methods and do not provide an integrated and objective evaluation of relevant parameters.

In this dissertation, an innovative hybrid model was developed to enable the systematic and transparent monitoring of the operation and maintenance of capital mining equipment, as well as its evaluating and ranking for revitalization and modernization purposes. The model is based on the integration of multi-criteria decision-making methods, which enhances the systematic nature of evaluation process and reduces subjectivity in decision-making. Three partial hybrid models were developed: AHP-PROMETHEE, AHP-TOPSIS and AHP-VIKOR, structured on the basis of four groups of parameters. Validation and selection of the optimal model were carried out through structured expert questionnaires.

The proposed model was validated using capital mining machinery (bucket wheel excavators) operating at the Mining basin Kolubara surface mines. The obtained results indicate an improvement over existing approaches through the objective evaluation and selection of equipment, while ensuring a balanced integration of subjective and objective decision-making elements.

Key words: capital mining machinery, hybrid model, multi-criteria decision-making methods, revitalization, modernization

Scientific field: Mining engineering

Scientific subfield: Mechanization in mining and energy and Computer science and systems engineering

UDC: 622.678.7-048.35(043.3)

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Predmet i cilj naučnog istraživanja	1
1.2. Naučne hipoteze, metode i doprinos istraživanja	3
1.3. Struktura disertacije sa kratkim prikazom glava	5
2. OSVRT NA DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA	6
2.1. Izbor mehanizacije za otkopavanje i utovar na površinskim kopovima	6
2.2. Izbor mehanizacije za transport na površinskim kopovima i u podzemnoj eksploataciji	11
2.3. Izbor mehanizacije u podzemnoj eksploataciji (za izradu tunela, širokočelno otkopavanje, komorno-stubnu metodu i provetravanje)	13
2.4. Ostala primena u oblasti rudarstva	14
3. PREDMET ANALIZE.....	17
3.1. Osnovna mehanizacija za otkopavanje i utovar na površinskim kopovima.....	18
3.2. Rotorni bageri sa površinskih kopova RB-a Kolubara.....	19
3.3. Održavanje i pouzdanost rudarske mehanizacije	20
3.4. Ekonomska opravdanost zamene mehanizacije	29
3.5. Produžetak životnog veka rudarske mehanizacije.....	30
3.6. Postupci za produženje životnog veka rudarskemehanizacije	33
4. TEORIJA ODLUČIVANJA	37
4.1. Istorijski osvrt i osnovni pojmovi.....	37
4.2. Inženjersko odlučivanje.....	40
4.3. Višekriterijumskoodlučivanje	42
4.4. Višekriterijumske metode odlučivanja	44
4.4.1. AHP metoda.....	44
4.4.2. PROMETHEE metoda.....	52
4.4.3. TOPSIS metoda	55
4.4.4. VIKOR metoda.....	58
5. MATEMATIČKO MODELIRANJE VIŠEKRITERIJUMSKIH METODA ZA IZBOR ROTORNIH BAGERA.....	62
5.1. Analizirani rotorni bageri sa površinskih kopova RB-a Kolubara	62
5.2. Ulazni podaci za matematički model	62
5.2.1. Tehnički parametri rotornog bagera	62
5.2.2. Radni parametri i parametri održavanja rotornog bagera	64
5.2.3. Ekonomski parametri rotornog bagera	65
5.3. Matematička formulacija problema višekriterijumskog izbora.....	66
6. RAZVOJ, PRIMENA I VERIFIKACIJA HIBRIDNIH MODELA.....	69

6.1. Model AHP-PROMETHEE	71
6.1.1. Tehnički parametri.....	72
6.1.2. Radni parametri	74
6.1.3. Parametri održavanja	77
6.1.4. Ekonomski parametri.....	79
6.1.5. Zbirno model AHP-PROMETHEE	81
6.2. Model AHP-TOPSIS.....	83
6.2.1. Tehnički parametri.....	83
6.2.2. Radni parametri	86
6.2.3. Parametri održavanja	88
6.2.4. Ekonomski parametri.....	89
6.2.5. Zbirno model AHP-TOPSIS.....	91
6.3. Model AHP-VIKOR.....	92
6.3.1. Tehnički parametri.....	93
6.3.2. Radni parametri	94
6.3.3. Parametri održavanja	95
6.3.4. Ekonomski parametri.....	96
6.3.5. Zbirno model AHP-VIKOR	98
6.4. Diskusija rezultata i poređenje hibridnih modela.....	99
7. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA	108
LITERATURA.....	111
SPISAK PRILOGA.....	I
PRILOZI	II
Prilog broj 1 – Analizirani rotorni bageri sa površinskih kopova RB-a Kolubara	II
Prilog broj 2 – Ulazni podaci za modele višekriterijumskih metoda.....	VIII
Prilog broj 3 – Model AHP-TOPSIS – Proračun parametara održavanja (PO).....	XI

Spisak slika

Slika 3.1. Kriva “kada” dobijena na osnovu različitih vrednosti parametra β Weibull-ovom raspodelom [73]	25
Slika 3.2. Dekompozicija rotornog bagera (složena hijerarhijska struktura)	27
Slika 3.3. Procena životnog veka rotornog bagera [71]	32
Slika 4.1. Hijerarhijska struktura problema (korak 1) [1], [104]	45
Slika 4.2. Funkcije preferencije PROMETHEE metode [88]	54
Slika 5.1. Algoritam za proračun tehničkih parametara [7], [123]	63
Slika 5.2. Konceptualni prikaz matematičkog modela izbora rotornih bagera	67
Slika 5.3. Model izbora i ocene rotornih bagera višekriterijumskim metodama	68
Slika 6.1. Konceptualni model izbora i ocene rotornih bagera višekriterijumskim metodama odlučivanja	70
Slika 6.2. Koraci AHP metode [1]	71
Slika 6.3. Rangiranje rotornih bagera model AHP-PROMETHEE	83
Slika 6.4. Koraci TOPSIS metode [1]	83
Slika 6.5. Rangiranje rotornih bagera model AHP-TOPSIS	92
Slika 6.6. Rangiranje rotornih bagera model AHP-VIKOR	99
Slika 6.7. Dekompozicija rotornog bagera za ocenu sa ponderima	102
Slika 6.8. Relacija između primenjenih modela i rotornih bagera a)	103
Slika 6.8. Rangiranje rotornih bagera b)	103
Slika 6.9. Konceptualni okvir matematičkog modela izbora rotornih bagera sa višekriterijumskim metodama odlučivanja (P je skup bagera na osnovu AHP-PROMETHEE modela, a E je skup na osnovu ekspertskog mišljenja)	104

Spisak tabela

Tabela 4.1. Saaty-jeva skala vrednovanja (korak 3) [97]	46
Tabela 4.2. Vrednosti slučajnog indeksa (RI) u zavisnosti od broja elemenata (n)	46
Tabela 4.3. Poređenje metoda AHP-PROMETHEE-TOPSIS-VIKOR	61
Tabela 5.1. Analizirani rotorni bageri sa površinskih kopova RB Kolubara	62
Tabela 5.2. Tehnički parametri rotornih bagera za period 2008-2018 [123]	64
Tabela 5.3. Eksploatacioni-radni parametri rotornih bagera za period 2008-2018 [123]	65
Tabela 5.4. Parametri održavanja rotornih bagera za period 2008-2018 [123]	65
Tabela 5.5. Ekonomski parametri rotornih bagera za period 2008-2018 [123]	65
Tabela 6.1. Podkriterijumi tehničkih parametara u odnosu na razmatrane alternative	72
Tabela 6.2. AHP - Matrica poređenja u parovima tehničkih parametara i vrednosti težinskog koeficijenta W_i	73
Tabela 6.3. AHP – Konzistentnost (tehnički parametri)	73
Tabela 6.4. PROMETHEE – Rangiranje alternativa u odnosu na tehničke parametre	74
Tabela 6.5. AHP-PROMETHEE Tehnički parametri – rangiranje rotornih bagera	74
Tabela 6.6. Podkriterijumi radnih parametara u odnosu na razmatrane alternative	75
Tabela 6.7. AHP - Matrica poređenja u parovima radnih parametara i vrednosti težinskog koeficijenta W_i	75
Tabela 6.8. AHP – Konzistentnost (radni parametri)	76
Tabela 6.9. PROMETHEE – Rangiranje alternativa u odnosu na radne parametre a)	76
Tabela 6.9. PROMETHEE – Rangiranje alternativa u odnosu na radne parametre b)	77
Tabela 6.10. AHP – PROMETHEE Radni parametri – rangiranje rotornih bagera	77
Tabela 6.11. Podkriterijumi parametara održavanja u odnosu na razmatrane alternative	77
Tabela 6.12. AHP – Matrica poređenja u parovima parametara održavanja i vrednosti težinskog koeficijenta W_i	78
Tabela 6.13. AHP – Konzistentnost (parametri održavanja)	78
Tabela 6.14. PROMETHEE – Rangiranje alternativa u odnosu na parametre održavanja a)	78
Tabela 6.14. PROMETHEE – Rangiranje alternativa u odnosu na parametre održavanja b)	79
Tabela 6.15. AHP – PROMETHEE Parametri održavanja – rangiranje rotornih bagera	79
Tabela 6.16. Podkriterijumi ekonomskih parametara u odnosu na razmatrane alternative	79
Tabela 6.17. AHP – Matrica poređenja u parovima ekonomskih parametara i vrednosti težinskog koeficijenta W_i	80
Tabela 6.18. AHP – Konzistentnost (ekonomski parametri)	80
Tabela 6.19. PROMETHEE – Rangiranje alternativa u odnosu na ekonomske parametre a)	80
Tabela 6.19. PROMETHEE – Rangiranje alternativa u odnosu na ekonomske parametre b)	81
Tabela 6.20. AHP – PROMETHEE Ekonomski parametri – rangiranje rotornih bagera	81
Tabela 6.21. AHP – PROMETHEE Zbirni rezultat sa preferencijama W_i	82
Tabela 6.22. AHP – PROMETHEE Prikaz parcijalnih rangova i konačnog ranga	82
Tabela 6.23. TOPSIS – Tehnički parametri	84

Tabela 6.24. TOPSIS – Tehnički parametri - Odstupanja S_i^+ od idealnog pozitivnog rešenja A_i^+	86
Tabela 6.25. TOPSIS – Tehnički parametri - Odstupanja S_i^- od idealnog negativnog rešenja A_i^-	86
Tabela 6.26. AHP – TOPSIS Tehnički parametri – rangiranje rotornih bagera	86
Tabela 6.27. TOPSIS – Radni parametri	86
Tabela 6.28. TOPSIS – Radni parametri - Odstupanja S_i^+ od idealnog rešenja pozitivnog A_i^+	87
Tabela 6.29. TOPSIS – Radni parametri - Odstupanja S_i^- od idealnog negativnog rešenja A_i^-	87
Tabela 6.30. AHP-TOPSIS Radni parametri – rangiranje rotornih bagera	88
Tabela 6.31. TOPSIS – Parametri održavanja	88
Tabela 6.32. TOPSIS – Parametri održavanja - Odstupanja S_i^+ od idealnog pozitivnog rešenja A_i^+	89
Tabela 6.33. TOPSIS – Parametri održavanja - Odstupanja S_i^- od idealnog negativnog rešenja A_i^-	89
Tabela 6.34. AHP-TOPSIS Parametri održavanja – rangiranje rotornih bagera	89
Tabela 6.35. TOPSIS - Ekonomski parametri	90
Tabela 6.36. TOPSIS – Ekonomski parametri - Odstupanja S_i^+ od idealnog pozitivnog rešenja A_i^+	90
Tabela 6.37. TOPSIS – Ekonomski parametri - Odstupanja S_i^- od idealnog negativnog rešenja A_i^-	90
Tabela 6.38. AHP-TOPSIS Ekonomski parametri – rangiranje rotornih bagera	91
Tabela 6.39. AHP – TOPSIS Zbirni rezultat sa preferencijama W_i	91
Tabela 6.40. AHP – TOPSIS Prikaz parcijalnih rangova i konačnog ranga	91
Tabela 6.41. VIKOR – Tehnički parametri	93
Tabela 6.42. VIKOR – Pesimističko rešenje S_j , očekivano rešenje R_j i međuvrednosti	94
Tabela 6.43. AHP – VIKOR – Rangiranje kompromisnog rešenja	94
Tabela 6.44. VIKOR – Radni parametri a)	94
Tabela 6.44. VIKOR – Radni parametri b)	95
Tabela 6.45. VIKOR – Pesimističko rešenje S_j , očekivano rešenje R_j i međuvrednosti	95
Tabela 6.46. AHP – VIKOR – Rangiranje kompromisnog rešenja	95
Tabela 6.47. VIKOR – Parametri održavanja	96
Tabela 6.48. VIKOR – Pesimističko rešenje S_j , očekivano rešenje R_j i međuvrednosti	96
Tabela 6.49. AHP – VIKOR – Rangiranje kompromisnog rešenja	96
Tabela 6.50. VIKOR – Ekonomski parametri	97
Tabela 6.51. VIKOR – Pesimističko rešenje S_j , očekivano rešenje R_j i međuvrednosti	97
Tabela 6.52. AHP – VIKOR – Rangiranje kompromisnog rešenja	97
Tabela 6.53. AHP – VIKOR Zbirni rezultat sa preferencijama W_i	98
Tabela 6.54. AHP – VIKOR Prikaz parcijalnih rangova i konačnog ranga	98
Tabela 6.55. Uporedno rangiranje metodama AHP-PROMETHEE, AHP-TOPSIS i AHP-VIKOR	99
Tabela 6.56. Ocene na osnovu upitnika	101
Tabela 6.57. Rotorni bageri – ekspertske rangiranje	101
Tabela 6.58. Rangiranje modela i rotornih bagera	101
Tabela 6.59. Poređenje rezultata dobijenih VKO metodama i na osnovu ekspertskog mišljenja	101

1. UVOD

Kapitalne rudarske mašine, rotorni bageri predstavljaju najveće samohodne mašine sa višedecenijskom eksploatacijom, projektovane za rad u teškim i složenim uslovima površinske eksploatacije, uz kontinuirani režim rada, namenjene su otkopavanju i utovaru. Čine početni i najznačajniji deo kontinualnog BTO (bager-transporter-odlagač) ili BTĐ (bager-transporter-deponijska mašina) sistema eksploatacije. Njihova vrednost je izuzetno visoka i do nekoliko desetina miliona €, a izrađuju se prema specifičnim zahtevima korisnika. Period od projektovanja do puštanja u rad jedne ovakve mašine iznosi od 3 do 5 godina, što dodatno naglašava značaj pravilnog upravljanja tokom celokupnog životnog ciklusa [1].

Rotorni bageri su angažovani na otkopavanju uglja i otkrivke na površinskim kopovima RB-a Kolubara [2]. Rotorni bager kao ključna mašina za otkopavanje i utovar u kontinualnom sistemu ima dominantan uticaj na pouzdanost, kontinuitet i ukupnu efikasnost čitavog proizvodnog sistema [3]. Adekvatno upravljanje proizvodnjom površinskog kopa i mehanizacijom ostvaruje se blagovremenim i kvalitetnim analizama podataka na osnovu kojih se definišu ključni parametri.

Stohastički karakter opterećenja kojima su izloženi u radu dovodi do zastoja, otkaza i značajnih finansijskih gubitaka. Operativni troškovi koji nastaju usled otkaza mogu biti direktni (popravke, zamene delova i rad) i indirektni (gubici usled neostvarene planirane proizvodnje). U poslednje vreme često se donose odluke da se postojeći rotorni bageri revitalizuju i modernizuju u cilju produženja životnog veka i povećanja tehnološke efikasnosti. Dosadašnja iskustva pokazuju da ovakvi postupci, posebno revitalizacija čelične konstrukcije i modernizacija mašinske i elektroopreme, mogu u potpunosti zadovoljiti zahteve korisnika. Odluka o ulasku mašine u proces revitalizacije mora se zasnivati na sveobuhvatnoj proceni tehničkog stanja i ekonomske opravdanosti. Smatra se da ulaganje ima smisla ukoliko troškovi revitalizacije iznose 25-35% od nabavne cene nove mašine, što dodatno potvrđuje potrebu za sistematičnim i objektivnim modelom odlučivanja.

1.1. Predmet i cilj naučnog istraživanja

Donošenje odluka u rudarstvu predstavlja složene i višeznačne inženjerske zadatke, često visoke osetljivosti i sa niskim pragom tolerancije na rizik [4]. Odluke se u ovoj oblasti veoma često donose u uslovima neizvesnosti, sa dugoročnim tehničkim, ekonomskim i bezbednosnim posledicama. Teorija odlučivanja se bavi problemom racionalnog izbora u situacijama u kojima donosilac odluka bira između više mogućih alternativa. Racionalnost odluke se ne procenjuje isključivo na osnovu konačnog ishoda, već kroz razmatranje svih mogućih ishoda, njihovih verovatnoća i međusobnih odnosa. Pojedini istraživači ukazuju da se u realnim sistemima donošenje odluka često zasniva na opravdanosti razloga za izbor određene alternative, a ne isključivo na ostvarenim rezultatima.

U teoriji se izdvajaju dva osnovna pristupa odlučivanju: normativni, koji opisuje kako bi racionalni donosilac odluke trebalo da postupa i deskriptivni, koji objašnjava kako se odluke zaista donose u praksi. U tom kontekstu, jedno od ključnih pitanja predstavlja pronalaženje ravnoteže između objektivnosti i subjektivnosti u procesu odlučivanja. Predmet ove doktorske disertacije jeste razvoj i primena metodološkog okvira koji omogućava uravnoteženo i kvantifikovano uključivanje subjektivnih elemenata (ekspertske procene i stručne ocene) i objektivnih podataka (merljivi parametri, statističke i tehničke analize) u proces odlučivanja u rudarstvu, u uslovima rizika i neizvesnosti. Prikupljanje informacija, sticanje znanja i proces učenja predstavljaju osnovne činioce svakog savremenog sistema odlučivanja, jer u inženjerskim sistemima subjektivnost ne predstavlja proizvodljivost, već struktuiran i na iskustvu utemeljen izvor informacija.

Predmet istraživanja ove doktorske disertacija obuhvata analizu, modelovanje i unapređenje procesa odlučivanja u vezi sa izborom kapitalnih rudarskih mašina za procese revitalizacije i modernizacije u sistemima površinske eksploatacije. Istraživanje je usmereno najznačnije predstavnike kapitalnih rudarskih mašina, rotorne bagere kao strateški značajnu mehanizaciju, čije tehničke, eksploatacione i ekonomske karakteristike direktno utiču na pouzdanost, produktivnost i održivost rudarskih sistema.

U okviru toga, predmet istraživanja obuhvata sledeće tematske celine:

- ✓ *Kapitalne rudarske mašine – rotorne bagere*, kao najveće samohodne mašine u površinskoj eksploataciji i izuzetno kompleksne tehničke sisteme od strateškog značaja.
- ✓ *Održavanje tehničkih sistema*, sa posebnim osvrtom na unapređenje aktivnosti u izboru mašina i u procesima održavanja, revitalizacije i modernizacije u cilju produženja njihovog životnog veka.
- ✓ *Pouzdanost i raspoloživost*, kao osnovne indikatore upotrebnog kvaliteta mašina, koji u funkciji vremena zavise od aktivnosti održavanja i postupaka revitalizacije i modernizacije.
- ✓ *Primenu i razvoj višekriterijumskih metoda odlučivanja* kao alata za podršku u procesu izbora najsvrsishodnijih rešenja.
- ✓ *Formulaciju i verifikaciju hibridnih modela*, zasnovanih na integraciji nekoliko višekriterijumskih metoda, sa ciljem postizanja višeg nivoa preciznosti, transparentnosti i pouzdanosti u procesu donošenja odluka.

Opšti cilj ovog istraživanja jeste razvoj i formulacija sveobuhvatne metodologije za izbor najpovoljnijih strategija u procesima revitalizacije i modernizacije kapitalnih rudarskih mašina, zasnovane na primeni i integraciji višekriterijumskih metoda odlučivanja.

U skladu sa opštim ciljem, istraživanje je usmereno ka sledećim posebnim ciljevima:

- ✓ Identifikaciji, sistematizaciji i kategorizaciji tehničkih, eksploatacionih i ekonomskih parametara relevantnih za procese revitalizacije i modernizacije.
- ✓ Definisanju i struktuiranju skupa kriterijuma i podkriterijuma za podršku procesu višekriterijumskog odlučivanja u oblasti kapitalnih rudarskih mašina.
- ✓ Razvoju, implementaciji i testiranju hibridnog modela kao integrativnog koncepta različitih višekriterijumskih metoda odlučivanja.
- ✓ Verifikaciji i izboru adekvatnog hibridnog modela na osnovu ekspertske analize.
- ✓ Rangiranju rotornih bagera kroz studiju slučaja a prema prioritetima za revitalizaciju i modernizaciju.
- ✓ Uspostavljanju metodološkog okvira koji omogućava donošenje racionalnih, efikasnih i naučno utemeljenih odluka o izboru rotornih bagera za procese revitalizacije i modernizacije.
- ✓ Doprinosu unapređenja nivoa pouzdanosti, produktivnosti i održivosti rudarskih mašina u uslovima savremene površinske eksploatacije.

Za razvoj predloženog hibridnog modela od posebnog značaja su: kapitalne rudarske mašine (rotorni bageri) na kojima se model proverava i verifikuje, višekriterijumske metode odlučivanja koje se koriste u njegovom formiranju kao i procesi revitalizacije i modernizacije. Dosadašnje aktivnosti održavanja, revitalizacije i modernizacije u velikoj meri se zasnivaju na iskustvu i parcijalnim procenama, koje nisu u dovoljnoj meri podržane sveobuhvatnim analizama karakteristika mašina i ostvarenih radnih učinaka. Cilj ovog istraživanja jeste unapređenje postojećeg pristupa kroz kreiranje hibridnog modela utemeljenog na višekriterijumskim metodama odlučivanja. Adekvatnim upravljanjem kapitalnim rudarskim mašinama zasnovanim na sistematskim analizama i odgovarajućim aktivnostima na održavanju, revitalizaciji i modernizaciji, moguće je ostvariti pozitivne efekte na održivo upravljanje životnim ciklusom, poboljšanje tehnološkog iskorištenja, kao i povećanje vremenskog i kapacitetnog iskorištenja mašina. Svi navedeni efekti direktno se odražavaju i na ekonomske pokazatelje poslovanja.

1.2. Naučne hipoteze, metode i doprinos istraživanja

Implementacija hibridnog modela zasnovanog na višekriterijumskim metodama odlučivanja značajno unapređuje kvalitet i pouzdanost izbora rotornih bagera za procese revitalizacije, modernizacije i održavanja u odnosu na klasične jednokriterijumske pristupe i manje struktuirane metode odlučivanja.

Hipoteze slede respektivno:

- ✓ Kada rudarska mašina dostigne granično stanje u smislu upotrebljivosti – postoje dva osnovna rešenja: otpisivanje mašine i kupovina nove, koja menja postojeću i/ili revitalizacija mašine u cilju produženja njenog životnog veka.
- ✓ Izbor rudarske mašine i početak aktivnosti revitalizacije treba da se temelji na oceni tehničkog stanja mašine i ekonomskoj opravdanosti ulaganja.
- ✓ Mnoge kapitalne industrijske mašine, sa aspekta pouzdanosti nalaze se u rednoj vezi gde zastoj jedne mašine dovodi do zastoja čitavog sistema – jedan od najznačajnijih primera su rotorni bageri u okviru BTO ili BTD sistema.
- ✓ Kapitalne rudarske mašine a posebno rotorni bageri nose veliki rizik od zastoja zbog uslova rada i složenosti sistema.
- ✓ Tradicionalni pristupi analizi rada kapitalnih rudarskih mašina poseduju brojne nedostatke, pre svega u pogledu sistematičnosti i sveobuhvatnosti u analizama.
- ✓ Razvoj hibridnog modela na osnovu višekriterijumskih metoda odlučivanja omogućava sistematično i transparentno praćenje svih zajedničkih indikatora rada kompleksnih tehničkih sistema.
- ✓ Postoji značajan prostor za unapređenje u sledećim oblastima: izbor rudarske mehanizacije, očuvanje i unapređenje radnih performansi, upravljanje aktivnostima održavanja, kao i definisanje vremenskih i strukturnih prioriteta za procese revitalizacije i modernizacije.
- ✓ Nepredviđeni kvarovi dovode do zastoja u proizvodnji, što uzrokuje značajne ekonomske posledice kroz direktne troškove održavanja i indirektne gubitke planirane proizvodnje.
- ✓ Indirektni troškovi u mnogim slučajevima premašuju direktne troškove.
- ✓ Rezultati ocenjivanja rotornih bagera primenom hibridnog modela mogu se koristiti kao indikatori trenutnog stanja i preostalih mogućnosti sistema.
- ✓ Razvoj hibridnog modela za ocenu i rangiranje rotornih bagera omogućava kvalitetnije upravljanje održavanjem i doprinosi efikasnijem definisanju prioriteta u organizaciji održavanja.
- ✓ Za kompleksne tehničke sisteme kakvi su kapitalne rudarske mašine (rotorni bageri), sveobuhvatne analize i evaluacija realizuju se ako se sistematično utvrde značajni kriterijumi i podkriterijumi.
- ✓ U oblasti rudarstva odluke se donose u uslovima rizika i neizvesnosti, što dodatno opravdava primenu višekriterijumskih metoda odlučivanja.

U okviru ove doktorske disertacije primenjene su sledeće metode istraživanja:

- ✓ *Kombinacija kvalitativnih i kvantitativnih metoda* za prikupljanje, obradu i interpretaciju podataka i informacija iz razmatranih oblasti.
- ✓ *Analiza stručne i naučno-istraživačke literature* iz oblasti rudarstva, pouzdanosti, održavanja, višekriterijumskog odlučivanja i psihologije.
- ✓ *Statistička obrada podataka o radu i održavanju rotornih bagera*, kao i analiza raspoložive tehničke i eksploatacione dokumentacije mašina izabranih za studiju slučaja.
- ✓ *Primena višekriterijumskih metoda odlučivanja (u nastavku teksta VKO) – AHP* (engl. *Analytical Hierarchy Process*), *TOPSIS* (engl. *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*), *VIKOR* (engl. *Multi-criteria Optimization and Compromise Solution*) i *PROMETHEE* (engl. *Preference Ranking Organization for Enrichment Evaluation*), radi formiranja hibridnih modela za ocenjivanje i rangiranje kapitalnih rudarskih mašina.

- ✓ *Metode* koje čine hibridni model za evaluaciju osnovnih parametara koji karakterišu rad kapitalnih rudarskih mašina su: AHP, PROMETHEE, TOPSIS i VIKOR.
- ✓ *Razvoj parcijalnih hibridnih modela* – AHP-PROMETHEE, AHP-TOPSIS i AHP-VIKOR na osnovu dobijenih prioriteta kriterijuma i vrednosti alternativa.
- ✓ *Ekspertske analize* kao alat za validaciju rezultata i izbor najadekvatnije kombinacije metoda u okviru hibridnog modela.
- ✓ *Komparativna analiza rezultata* dobijena primenom različitih višekriterijumskih metoda odlučivanja u cilju provere robusnosti i pouzdanosti predloženog pristupa.

Na osnovu postavljenog cilja rada i definisanog sadržaja istraživanja, kao i na osnovu obrađenih podataka, koji su delimično kvalitativni, vrši se odabir modela koji će obezbediti izbor kapitalne rudarske mašine za procese revitalizacije i modernizacije. Očekivani rezultati ovog istraživanja ogledaju se u razvoju, verifikaciji i primeni integrisanog metodološkog okvira za podršku odlučivanju u procesima revitalizacije i modernizacije kapitalnih rudarskih mašina. Predloženi hibridni model omogućava sistematičnu, transparentnu i kvantitativno zasnovanu evaluaciju kapitalnih rudarskih mašina, uz istovremeno uvažavanje tehničkih, eksploatacionih, ekonomskih i organizacionih aspekata. Stvara se pouzdana osnova za rangiranje alternativa i definisanje prioriteta u složenim uslovima površinske eksploatacije.

Sa naučnog aspekta, disertacija doprinosi razvoju oblasti višekriterijumskog odlučivanja kroz integraciju komplementarnih višekriterijumskih metoda (AHP, PROMETHEE, TOPSIS i VIKOR) u jedinstven hibridni model. Poseban doprinos ogleda se u prilagođavanju ovih metoda specifičnostima rudarskih sistema, kao i u povezivanju teorijskih koncepata sa realnim problemima upravljanja kapitalnom mehanizacijom. Uporedna analiza rezultata različitih hibridnih modela i njihova validacija putem ekspertskog znanja predstavlja dodatnu vrednost u metodološkom smislu.

Metodološki doprinos istraživanja ogleda se u definisanju struktuiranog skupa kriterijuma i pondera, kao i u uspostavljanju postupka koji omogućava uravnoteženo uključivanje objektivnih podataka i subjektivnih ekspertskih procena. Razvijeni model obezbeđuje fleksibilnost u primeni, mogućnost prilagođavanja različitim sistemima i scenarijima, kao i potencijal za dalju nadogradnju kroz uključivanje novih kriterijuma i metoda.

Praktični doprinos disertacije ogleda se u mogućnosti direktne primene predložene metodologije u rudarskim kompanijama, posebno u sistemima sa starijom mehanizacijom. Model omogućava identifikaciju mašina koje imaju najveći potencijal za revitalizaciju i modernizaciju, racionalizaciju investicionih odluka, smanjenje rizika i optimizaciju troškova. Time se doprinosi povećanju pouzdanosti, raspoloživosti i produktivnosti kapitalnih rudarskih mašina, kao i dugoročnoj održivosti sistema površinske eksploatacije.

Tema doktorske disertacije je savremena, a očekivani naučni i inženjersko-tehnički doprinos ostvaruje se kroz razvoj i primenu integrisanog metodološkog pristupa u oblasti upravljanja kapitalnom rudarskom mehanizacijom. Doprinos disertacije ogleda se pre svega u razvoju hibridnog modela zasnovanog na kombinaciji višekriterijumskih metoda odlučivanja, čime se postiže robusnija, stabilnija i objektivnija evaluacija kapitalnih rudarskih mašina u odnosu na primenu pojedinačnih metoda.

Dodatni doprinos disertacije ogleda se u definisanju i primeni metodološkog pristupa koji omogućava uravnoteženo uključivanje subjektivnih elemenata (stručne i ekspertске procene) i objektivnih pokazatelja (merljivi podaci i statističke analize) u proces odlučivanja u uslovima rizika i neizvesnosti.

Posebna pažnja posvećena je analizi odnosa između ovih komponenti, čime se subjektivnost transformiše u kontrolisani i kvantifikovani deo sistema odlučivanja, umesto izvora nekontrolisanog rizika.

Doktorska disertacija daje originalan naučni i inženjersko-tehnički doprinos kroz razvoj, verifikaciju i primenu hibridnog višekriterijumskog modela za podršku odlučivanju u procesima revitalizacije i modernizacije kapitalne rudarske mehanizacije. Integracijom metoda višekriterijumskih metoda, obezbeđen je robustan, transparentan i sistematičan okvir za evaluaciju tehničkih, eksploatacionih i ekonomskih performansi kapitalnih rudarskih mašina, čime se prevazilaze ograničenja klasičnih i parcijalnih pristupa.

Poseban doprinos ogleda se u sistematskom definisanju kriterijuma i podkriterijuma, kao i uvođenju uravnoteženog odnosa objektivnih podataka i ekspertskeg znanja u uslovima rizika i neizvesnosti, čime subjektivnost postaje kontrolisani i kvantifikovani deo procesa odlučivanja. Razvijeni metodološki okvir omogućava identifikaciju trenutnog stanja i preostalih tehničkih potencijala mehanizacije, definisanje prioriteta održavanja, revitalizacije i modernizacije, povećanje raspoloživosti i pouzdanosti sistema, kao i smanjenje direktnih i indirektnih troškova usled zastoja, čime se doprinosi dugoročnoj održivosti i efikasnosti savremenih rudarskih sistema.

1.3. Struktura disertacije sa kratkim prikazom glava

Disertacija se sastoji od sedam glava.

U prvoj glavi, u uvodnom delu su date polazne hipoteze, predmet, cilj istraživanja i metode istraživanja. Isto tako je prikazan i naučni doprinos disertacije.

U drugoj glavi je prikazan osvrt na dosadašnja istraživanja. Osvrt je podeljen na četiri poglavlja u kojima je dat izbor mehanizacije za površinsku i podzemnu eksploataciju, izbor mehanizacije za transport, izbor mehanizacije za podzemnu eksploataciju i ostali tipovi izbora.

U trećoj glavi je dat pregled rudarske mehanizacije, pojmovi životnog veka, održavanja i pouzdanosti kapitalne rudarske mehanizacije, kao i predmet analize – rotorni bageri sa površinskih kopova RB-a Kolubara.

Četvrta glava je glava u kojoj je data teorija odlučivanja i višekriterijumske metode odlučivanja koje su primenjene u disertaciji, sa posebnim osvrtom na subjektivnost u odlučivanju.

Matematičko modeliranje višekriterijumskih metoda je prikazano u petoj glavi, kao i ulazni podaci i parametri koji su korišteni u matematičkom modelu.

Šestu glavu čine hibridni modeli, gde je prikazan razvoj, primena i verifikacija hibridnih modela. Na kraju glave je dato poređenje hibridnih modela, kao i diskusija rezultata.

Poslednja sedma glava je glava zaključnih razmatranja.

Sledi pregled literature i potom prilozi.

2. OSVRT NA DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA

Izbor kapitalnih mašina u industriji oduvek je predstavljao zahtevan i strateški značajan zadatak. Ovaj problem naročito dolazi do izražaja u rudarstvu, usled značajnog uticaja eksploatacionih procesa i specifičnih uslova rada na izbor odgovarajuće mehanizacije. Tokom poslednjih godina objavljen je veliki broj naučnih radova u kojima su prikazane višekriterijumske metode odlučivanja (engl. *Multi-Criteria Decision Making, MCDM*), koje su primenjene u oblasti rudarstva i pripreme mineralnih sirovina [5].

Višekriterijumske metode pokazale su se kao efikasan alat za prevazilaženje složenih problema izbora mehanizacije, jer omogućavaju istovremeno razmatranje većeg broja međusobno suprotstavljenih kriterijuma. Među njima, Metoda analitičkog hijerarhijskog procesa (AHP) predstavlja jednu od najčešće primenjivanih metoda u dosadašnjim istraživanjima u ovoj oblasti.

Postupak izbora rudarske mehanizacije podrazumeva vrednovanje razmatranih alternativa i izbor optimalnog rešenja na osnovu definisanog skupa kriterijuma. Proces donošenja odluka u rudarstvu uključuje integrisanu primenu multidisciplinarnih znanja i kao takav ima ključnu ulogu, jer direktno utiče na tehničku, ekonomsku i ekološku održivost rudarske proizvodnje. Zadatak izbora mehanizacije može obuhvatiti izbor tipa mehanizacije, njenog kapaciteta, kao i određivanje optimalnog broja potrebnih jedinica.

Analiza dosadašnjih istraživanja u oblasti rudarstva, može se podeliti na:

- ✓ Izbor mehanizacije za otkopavanje i utovar na površinskim kopovima,
- ✓ Izbor mehanizacije za transport (na površinskim kopovima i u podzemnoj eksploataciji),
- ✓ Izbor mehanizacije u podzemnoj eksploataciji (za izradu tunela, širokočelno otkopavanje, komorno-stubnu metodu i provetravanje)
- ✓ Ostala primena u oblasti rudarstva.

2.1. Izbor mehanizacije za otkopavanje i utovar na površinskim kopovima

Na površinskim kopovima mineralne sirovine (uglja) se koristi raznovrsna i brojna osnovna i pomoćna mehanizacija, među kojom su kao osnovna mehanizacija zastupljeni bageri, transporteri sa gumenom trakom i odlagači, dok se buldozeri, utovarivači, cevopolagači, grejderi, skreperi i druga oprema svrstavaju u pomoćnu mehanizaciju. Pored navedenog, sastavni deo proizvodnog sistema predstavljaju i postrojenja za pripremu i preradu mineralnih sirovina.

Podela mehanizacije može se izvršiti na osnovu veka trajanja i konstrukcione savršenosti. Osnovnu mehanizaciju karakteriše duži vek trajanja i niži stepen konstrukcione savršenosti, dok pomoćna mehanizacija, poput buldozera, ima viši stepen konstrukcione savršenosti i kraći vek trajanja [6].

Tehnološki proces u površinskoj eksploataciji obuhvata osnovne proizvodne procese, među kojima se izdvajaju otkopavanje otkrivke i eksploatacija mineralne sirovine. Prvi i jedan od najvažnijih zadataka pri izboru osnovne mehanizacije na površinskom kopu jeste izbor mašina za otkopavanje i utovar, odnosno bagera, kao i odgovarajućih transportnih sistema za otkrivku i mineralnu sirovinu [7].

Autori Samanta i drugi [8], u radu „*Selection of open cast mining equipment by a multi-criteria decision-making process*”, bavili su se izborom mehanizacije za otkopavanje uglja i otkrivke na površinskim kopovima. Izbor mehanizacije predstavlja odlučujući faktor ekonomske isplativosti eksploatacije, s obzirom na to da troškovi otkopavanja i transporta učestvuju sa oko 50-70% u ukupnim troškovima proizvodnje. U rudarskoj praksi moguće je ostvariti planiranu proizvodnju uz minimalne jedinične troškove i steći konkurentsku prednost izborom najprikladnije mehanizacije. U navedenom radu autori su primenili metodu AHP formiranu na tri hijerarhijska hivoa.

Kao ključni parametri za izbor mehanizacije identifikovani su parametri lokacije, visina sloja uglja, nagib sloja uglja, stanje podine, koeficijent otkrivke, pritisak na tlo, udaljenost i primenjena metoda eksploatacije. Zaključak autora ukazuje na to da je teško definisati univerzalne i sveobuhvatne kriterijume za izbor mehanizacije, što dodatno potvrđuje potrebu za primenom višekriterijumskih metoda odlučivanja u ovoj oblasti.

Prema mišljenju autora [9] Bascetin i saradnici, izbor mehanizacije predstavlja jedan od ključnih faktora u projektovanju površinskog kopa i planiranju proizvodnje, što je prikazano u radu "*An application of the analytic hierarchy process in equipment selection at Orhanell open pit coal mine*". Izbor odgovarajuće mehanizacije direktno utiče na troškove projektovanja i eksploatacije površinskog kopa i zavisi od parametara lokacije, kao i od dubine ležišta. Metoda AHP pokazala se kao veoma koristan alat u donošenju odluka sa međusobno suprotstavljenim ciljevima, jer omogućava postizanje konsenzusne odluke. U navedenom radu prikazan je izbor sistema za utovar i transport primenom AHP modela na površinskom kopu uglja u Turskoj. Autori ističu da se predloženi model može uspešno primeniti za unapređenje grupnog odlučivanja u procesu izbora mehanizacije koja zadovoljava optimalne zahteve. Takođe, proces odlučivanja je sistematičan, a primena predloženog modela značajno skraćuje vreme potrebno za izbor optimalne mehanizacije. Isti autor [10], u radu "*The study of decision making tools for equipment selection in mining engineering operations*", daje uporedni prikaz AHP metode i različitih fazi metoda, koje su predstavljene kao inovativni alati za agregaciju kriterijuma u problemima odlučivanja u rudarstvu. Navedene metode omogućavaju vrednovanje alternativa u višekriterijumskim problemima u uslovima neizvesnosti.

Izbor mehanizacije u rudarstvu predstavlja jednu od najvažnijih odluka koja utiče na projektovanje rudnika, planiranje proizvodnje i ekonomske pokazatelje površinskog kopa. Bazzazi sa saradnicima [11], [12], u radovima "*Loading-haulage equipment selection in open pit mines based on fuzzy-TOPSIS method*" i "*Optimal Open Pit Mine Equipment Selection Using Fuzzy Multiple Attribute Decision Making Approach*", bavili su se problemom izbora utovarno-transportne mehanizacije u rudniku bakra Sungun. U rudarskoj praksi inženjeri često donose odluke na osnovu iskustva i intuicije; međutim, takav pristup nije uvek pogodan za rešavanje složenih višekriterijumskih problema. U navedenim radovima razmatrana je primena višekriterijumskih modela odlučivanja, posebna pažnja posvećena je TOPSIS metodi. U realnim uslovima eksploatacije, zbog nepotpunih i teško dostupnih informacija, podaci u često neprecizni i neodređeni, što dodatno otežava proces odlučivanja. Cilj istraživanja bio je proširenje Fazi TOPSIS metode za rešavanje problema donošenja odluka u uslovima nepreciznih podataka. U drugom radu, autori su kombinovali metodu AHP i entropijsku metodu za određivanje globalnih težina atributa, dok je za konačno rangiranje alternativa primenjena metoda TOPSIS, čime je izvršen izbor optimalne rudarske mehanizacije.

Bazzazi i saradnici [13], u radu "*Deriving preference order of open pit mines equipment through MADM methods: Application of modified VIKOR method*", razmatrali su problem donošenja odluka pri izboru optimalne alternative rudarske mehanizacije. S obzirom na to da je u praksi teško pronaći alternativu koja istovremeno u potpunosti zadovoljava sve kriterijume, u procesu odlučivanja često se preferira kompromisno rešenje. Metoda VIKOR razvijena je za višekriterijumsku optimizaciju složenih sistema i fokusira se na rangiranje i izbor alternativa u prisustvu međusobno suprotstavljenih kriterijuma. U navedenom radu autori su predstavili model evaluacije zasnovan na egzaktno definisanim podacima, fazi brojevima, intervalima brojeva i lingvističkim terminima, sa ciljem prevazilaženja neizvesnosti i nejasnoće koje proizilaze iz subjektivne percepcije i iskustva donosilaca odluka. Za određivanje težinskih koeficijenata kriterijuma primenjena je kombinacija metode AHP (analitički hijerarhijski proces) i entropijske metode. Predloženi pristup korišten je za rešavanje problema izbora mehanizacije na površinskim kopovima.

Iste godine, Bazzazi i saradnici [14], u radu *“A new Fuzzy multi criteria decision making Model for open pit mines Equipment Selection”*, predložili su novi višekriterijumski model za izbor rudarske mehanizacije. U realnim uslovima eksploatacije, zbog nepotpunih i teško dostupnih informacija, ulazni podaci su često neprecizni i nejasni. Predloženi model obuhvata objektivne, kritične i subjektivne faktore kao zajedničke elemente u analizi izbora mehanizacije, kritični i subjektivni faktori definisani su na osnovu procena donosilaca odluka. Validacija modela izvršena je kroz studiju slučaja, kojom je ilustrovana primena predloženog pristupa i demonstrirana njegova efikasnost. Rezultati istraživanja ukazuju na značajno smanjenje vremena potrebnog za proračun, uz zadržavanje zadovoljavajućeg nivoa preciznosti u procesu odlučivanja.

Utovar i transport predstavljaju značajan deo ukupnih troškova na površinskim kopovima, zbog čega izbor najpogodnijeg sistema, koji obezbeđuje smanjenje troškova po toni i istovremeno zadovoljava zahteve planirane proizvodnje, predstavlja jedan od ključnih zadataka u projektovanju i planiranju rudnika. Prema navodima autora Lashgari i dr. [15], u radu *“Equipment Selection Using Fuzzy Multi Criteria Decision Making Model: Key Study of Gole Gohar Iron”*, izbor optimalne mehanizacije često je složen problem, s obzirom na veliki broj mogućih alternativa i faktora koji utiču na proces odlučivanja. Pored toga, kriterijumi koji utiču na izbor mehanizacije mogu biti kvantitativne i kvalitativne prirode, što dodatno otežava donošenje odluka. U takvim uslovima, primena višekriterijumskih metoda odlučivanja pokazuje se kao veoma efikasan pristup. U navedenom istraživanju autori su se bavili izborom mehanizacija za rudnik gvožđa Gole Gohar. Proces odlučivanja je realizovan u više faza, primenom AHP metode i Fazi TOPSIS metode. Rezultati istraživanja pokazali su da kombinacija bager-kamion predstavlja najekonomičniji sistem utovara i transporta. Takođe je zaključeno da predloženi model omogućava izbor najbolje alternative među razmatranim sistemima i doprinosi donošenju racionalnih i pouzdanih odluka u procesu izbora mehanizacije.

U studiji slučaja autora Adebimpe i drugi [16], *“Mine Equipment Selection for Ajabanoko Iron Ore Deposit, Kogi State, Nigeria”*, izvršen je izbor rudarske mehanizacije primenom višeatributivne kombinovane metode odlučivanja (MADM). U analizi su razmatrani kiperi, utovarivači na točkovima, bageri na gusenicama sa obrnutom kašikom, buldozeri i oprema za bušenje. Atributi koji su uzimani u obzir pri izboru mehanizacije su: odnos cena/jedinica, radna težina, nosivost, kapacitet kašike, maksimalna dubina kopanja i snaga pogona. Na osnovu sprovedene analize, kao optimalna rešenja za eksploataciju ležišta gvožđa Ajabanoko izabrani su sledeći modeli mehanizacije: Euclid R90, CAT IT 62H, Tereks TC 225 LC, Hitachi 2505 i Tereks SKT-12. Rezultati studije ukazuju da je pri izboru mehanizacije za optimalnu eksploataciju ležišta od ključnog značaja redosled izbora pojedinih vrsta rudarske mehanizacije, što dodatno potvrđuje potrebu za sistematskim i struktuiranim pristupom donošenju odluka.

Problem izbora mehanizacije ima značajnu ulogu u ukupnim troškovima rudarskog projekta, te može uticati na odvijanje i kontinuitet projekta, zbog čega se smatra strateškim problemom u rudarstvu. Yazdani-Chamzini [17], u radu *“An integrated fuzzy multi criteria group decision making model for handling equipment selection”*, predložio je integrisani model zasnovan na primeni dve fazi višekriterijumske tehnike odlučivanja za izbor mehanizacije. Predloženi model evaluacije razvijen je na osnovu teorije fazi skupova i višekriterijumskih metoda odlučivanja AHP i TOPSIS. U okviru modela, Fazi AHP metoda (FAHP) koristi se za izračunavanje relativne važnosti kriterijuma evaluacije, dok se u narednoj fazi primenjuje Fazi TOPSIS metoda (FTOPSIS) za vrednovanje i rangiranje alternativa. Verifikacija predloženog modela izvršena je primenom studije slučaja, čime je demonstrirana njegova primenljivost i efikasnost. Takođe, radi ispitivanja osetljivosti rezultata na promene težinskih koeficijenata kriterijuma, sprovedena je analiza osetljivosti, koja dodatno potvrđuje stabilnost dobijenih rešenja.

U radu "*An equipment Selection Application using AHP method*", autor Yavuz [18], primenjuje metodu AHP za rešavanje problema izbora mehanizacije, koji podrazumeva interakciju više subjektivnih i objektivnih faktora, odnosno kriterijuma. Donošenje odluka u ovakvim problemima često je složeno i praćeno međusobno suprotstavljenim zahtevima. U okviru istraživanja razvijen je AHP model koji obuhvata četiri glavna kriterijuma i dvadeset i jedan podkriterijum. Od četiri razmatrane alternative Alternativa A ocenjena je kao najprihvatljivija, uzimajući u obzir sve glavne kriterijume i podkriterijume obuhvaćene analizom. Za razliku od tradicionalnog pristupa izboru utovarivača, AHP metod predstavlja naučno zasnovan pristup koji obezbeđuje integritet, transparentnost i veću objektivnost procesa vrednovanja. Predloženi model je jasan, lako razumljiv i praktično primenljiv. Autor ističe da je AHP model za izbor utovarivača posebno pogodan zbog identifikacije većeg broja atributa, minimalnih zahteva u pogledu količine ulaznih podataka i relativno kratkog vremena potrebnog za sprovođenje analize. AHP metoda se može primeniti u različitim segmentima rudarske industrije, donosioci odluka treba da obrate posebnu pažnju na broj kriterijuma i alternativa, kako bi se obezbedila konzistentnost i validnost procesa odlučivanja. Preporučuje se da broj alternativa bude u intervalu 7 ± 2 , dok se u suprotnom slučaju može primeniti metod grupisanja alternativa, kako je prikazano u ovom radu. Rezultati istraživanja potvrđuju da AHP metoda omogućava inženjerima efikasno i sistematično vrednovanje alternativa u problemima rudarskog inženjerstva.

Jedan od izazovnih problema u optimizaciji rudarskih operacija je i izbor optimalne mehanizacije između više razmatranih alternativa. Proces izbora mehanizacije zahteva precizno definisanje kriterijuma, jer podrazumeva interakciju većeg broja subjektivnih i objektivnih faktora. Kako ističe Yavuz [19], odluke koje se donose u ovom procesu često su složene i mogu biti međusobno kontradiktorne, zbog čega se problem izbora mehanizacije smatra pogodnim za primenu višekriterijumskih metoda odlučivanja. U radu "*Equipment selection based on the AHP and Yagers method*", prikazan je izbor utovarivača za Aegean rudnik lignita primenom AHP i Yager metode. U radu je predložena unapređena procedura donošenja odluka, imajući u vidu da je Yager metoda u prethodnim istraživanjima često neadekvatno primenjivana. Autor preporučuje grupisanje kriterijuma i alternativa na način koji ne prelazi granice ljudskog kognitivnog kapaciteta, odnosno broj kriterijuma i alternativa koji je veći od devet.

U okviru istraživanja analizirana su najprikladnija rešenja, a rezultati koji su dobijeni primenom različitih metoda su potom upoređivani. Na kraju procesa odlučivanja sprovedena je analiza osetljivosti za svaku metodu, kako bi se ispitao uticaj pojedinačnih kriterijuma na konačnu odluku. Takođe su identifikovane prednosti i nedostaci koji se javljaju tokom primene svake od metoda. Razvijeni modeli obuhvatali su 4 kriterijuma i 21 podkriterijum, među četiri alternative, alternativa A je identifikovana kao najprihvatljivija za obe metode. Za razliku od tradicionalnog pristupa izboru utovarivača, primenjene metode odlučivanja predstavljaju naučno utemeljen pristup, koji obezbeđuje integritet, transparentnost i veću objektivnost procesa procene. Predloženi modeli su jasni, lako razumljivi i primenljivi u praksi, te mogu biti korisni u različitim oblastima rudarske industrije. Radi očuvanja validnosti i doslednosti procesa odlučivanja, donosioci odluka treba pažljivo da definišu broj kriterijuma i alternativa u AHP i Yager metodama. Racionalno rešenje izbora rudarske mehanizacije zasnovano na primeni kamiona, bagera, utovarivača na točkovima i drobilica, mora biti rezultat temeljne analize tehničkih i ekonomskih aspekata eksploatacije, uključujući kako investicione, tako i eksploatacione troškove, odnosno sve faktore koji mogu imati presudan uticaj na ukupnu cenu eksploatacije.

Metodologija predstavljena u radu "*Multi-criteria Decision-making for the choice of equipment in mining using the AHP method*", ilustruje praktičnu primenu višekriterijumskih metoda, odnosno AHP metode, za rešavanje problema izbora mehanizacije u konkretnim uslovima površinske eksploatacije mineralnih sirovina. Bodziony i saradnici [20], nastojali su da razviju nove i univerzalne kriterijume, kao i odgovarajući način vrednovanja i izbora mehanizacije za površinske kopove.

Prikazani primer jasno ukazuje na prednosti AHP metode u situacijama kada postoji konflikt interesa među donosiocima odluka, jer omogućava struktuirano i transparentno razumevanje različitih kriterijuma. Poseban značaj ima primena metode za utvrđivanje preferencija kriterijuma u obliku relativnih težinskih koeficijenata, koji odražavaju njihov značaj u konačnoj evaluaciji alternativa. Predložena metodologija je univerzalna i može se primeniti u različitim oblastima rudarstva, naročito u postupcima procene i izbora rudarske mehanizacije.

U radu *“A multiple criteria decision making method to weight the sustainability criteria of equipment selection for surface mining”*, Patyk i saradnici [21], predstavili su skup kriterijuma za procenu i izbor rudarske mehanizacije za utovar, transport i preradu, uz istovremeno razmatranje tehnoloških, ekonomskih, ekoloških i operativnih aspekata, kao i pouzdanosti. Primenjena ELECTRE III metoda se pokazala efikasnom u rešavanju problema procene performansi rudarske mehanizacije, dok dobijeni konačni rezultati ukazuju na poželjne pravce daljeg razvoja sistema. Rezultati sprovedenih analiza pokazuju da alternativa V_1 ima prednost u odnosu na ostale razmatrane alternative, ispunjava sve ključne kriterijume naglašene od strane stručnjaka u oblastima površinske eksploatacije i zaštite životne sredine. Posebno se ističe činjenica da alternativa V_1 ostvaruje najbolje rezultate u pogledu troškova vezanih za proces eksploatacije, kriterijuma kojima su donosioci odluka E_1 , E_2 i E_3 dali najveći relativni značaj. Na osnovu mišljenja većine donosilaca odluka, kriterijumi sa najvećim stepenom važnosti su: udaljenost postrojenja za drobljenje od stambenih zgrada (7,5 poena), dužina transportnih puteva (7,0 poena) i troškovi vezani za proces eksploatacije (7,0 poena). Visok rang alternative V_1 potvrđen je u odnosu na ostale kriterijume, kao i njen povoljan odnos sa drugim alternativama u stručnim evaluacijama. Razvijena metodologija ima univerzalni karakter i može se primeniti na drugim površinskim kopovima sa sličnim geološkim i rudarskim uslovima, posebno se naglašava značaj uključivanja ekoloških aspekata i kvaliteta ležišta, kao što je slučaj eksploatacije ležišta kamena slabijeg kvaliteta.

Patyk & Bodziony [22], u radu *“Application of the Analytical Hierarchy Process to Select the Most appropriate Mining Equipment for the Exploitation of Secondary Deposits”*, prikazali su metodologiju koja omogućava praktičnu primenu višekriterijumske analize odlučivanja, zasnovanu na AHP metodi, kao alata za podršku izbora mehanizacije za površinsko otkopavanje u eksploataciji sekundarnih ležišta. Ovaj aspekt izbora mehanizacije do sada je bio relativno malo istraživani u literaturi. Univerzalni elementi predložene metodologije obuhvataju: formulisanje pouzdanih kriterijuma, implementaciju kompleksnog modela i agregaciju interdisciplinarnih faktora odlučivanja (kriterijuma) i uključivanje stvarnih operativnih uslova u proceduru modeliranja. Izbor optimalne mehanizacije u kontekstu eksploatacije sekundarnog ležišta predstavlja izazov, s obzirom na to da je uslovljen velikim brojem međusobno nepovezanih, često i konfliktnih faktora. Osnovna svrha sprovedene analize bila je definisanje modela odlučivanja kojim bi eksploatacija sekundarnog ležišta bila tehnički izvodljiva i ekonomski isplativa, dok bi proces otkopavanja celokupnog ležišta istovremeno bio održiv i sa aspekta zaštite životne sredine. Dodatna prednost AHP metode ogleda se u mogućnosti sprovođenja analize osetljivosti putem promene relativnih težina kriterijuma i osnovnih parametara modela.

Bodziony i saradnici [23], u radu *“A multiple Criteria Decision Making Method to weight Sustainability Criteria of Equipment Selection for surface Mining”*, predstavili su metodologiju zasnovanu na principima višekriterijumskih metoda odlučivanja, koja omogućava namensko rangiranje alternativa i uključuje primenu ELECTRE III metode. Izbor i procena rudarske mehanizacije koja se koristi na površinskim kopovima kamena u praksi se najčešće zasnivaju na proceni ukupnih troškova eksploatacije. Međutim, racionalnom rasporedu rudarske mehanizacije i sistema koji obuhvataju mašine za utovar, transportna sredstva i postrojenja za drobljenje, mora prethoditi temeljna analiza tehničkih i ekonomskih aspekata, uključujući investicione izdatke i troškove dalje eksploatacije, koji u velikoj meri određuju ukupne troškove rudarskih operacija. Pored navedenog, neophodno je uzeti u obzir i operativne parametre rada rudarske mehanizacije.

U okviru ove studije slučaja razvijen je univerzalni skup kriterijuma za evaluaciju, kao i metodologija za izbor mehanizacije za površinsko otkopavanje i sistema za preradu, prilagođena specifičnim rudarskim uslovima koje definiše korisnik. Cilj istraživanja bio je razvoj i primena nove metodologije izbora mehanizacije za površinsku eksploataciju kamena, zasnovanu na postupcima višekriterijumskog odlučivanja, kako bi se omogućila optimizacija procesa otkopavanja, utovara i drobljenja. Razvijena metodologija ima univerzalni karakter i može se primeniti i na drugim površinskim kopovima sa sličnim geološkim i rudarskim uslovima.

Za izbor i evaluaciju rotornih bagera Abulkishik & Al-majed [24], predložili su tehniku za procenu i ocenjivanje rotornih bagera, u radu *“Hybrid multi-criteria decision making model creation for bucket wheel excavator evaluation and selection”*. U istraživanju je primenjena ARAS (engl. *Additive Ratio Assessment*) metoda višekriterijumskog odlučivanja. Razvijeni model, zasnovan na procedurama metoda višekriterijumskog odlučivanja, koristi se za procenu ključnih metrika koje definišu performanse rotornog bagera, u razmatranje su uključeni svi relevantni faktori, njihovi podparametri i potencijalne vrednosti. Model se sastoji iz dva osnovna dela. U prvom delu primenom ARAS metode, identifikuju se najvažniji parametri i definišu odgovarajući vektori prioriteta, dok se u drugom delu vrši analiza dostupnih opcija i njihovo rangiranje u skladu sa utvrđenim kriterijumima primenom drugih tehnika višekriterijumskog odlučivanja. Prvi korak u postupku podrazumeva izbor najpogodnije hibridne tehnike, dok drugi korak obuhvata rangiranje rotornih bagera bez obzira na njihov inicijalni raspored. Vrednosti funkcije korisnosti su direktno proporcionalne brojevima i težinama najvažnijih kriterijuma. Primenom ARAS metode, autori su nastojali da pojednostave složen proces donošenja odluka i identifikuju optimalnu alternativu na osnovu relativnog indikatora, odnosno stepena korisnosti, koji omogućava sagledavanje razlika između alternativa i idealnog rešenja, uz eliminisanje uticaja različitih mernih jedinica.

2.2. Izbor mehanizacije za transport na površinskim kopovima i u podzemnoj eksploataciji

Transport u velikoj meri određuje produktivnost, efektivnost i ekonomičnost rudnika. U površinskoj eksploataciji, transport mineralne sirovine i otkrivke zauzima 40-70% ukupnih eksploatacionih troškova [7]. Mehanizacija za transport predstavlja osnovnu mehanizaciju na površinskim kopovima. Posle izbora bagera, koji predstavlja osnovnu mašinu, vrši se izbor ostalih osnovnih mašina (transportnih i odlagališnih), kao i pomoćnih mašina u kompleksu mašina.

Elevli & Demirci [25], bavili su se izborom najpogodnije sistema transporta rude za podzemni rudnik hromita u Turskoj, u radu *“Multicriteria choice of ore transport system for an underground mine: Application of PROMETHEE methods”*. Razmatrani problem obuhvata pet mogućih sistema transporta rude i šest kriterijuma za njihovu evaluaciju. Kao metoda za evaluaciju i rangiranje alternativa primenjena je PROMETHEE metoda. PROMETHEE I je korištena za delimično rangiranje alternativa, u situacijama kada postoji mogućnost njihove međusobne uporedivosti, dok je PROMETHEE II metoda primenjena za potpuno rangiranje alternativa. Rezultati istraživanja pokazali su da se PROMETHEE metode mogu uspešno koristiti u rešavanju složenih problema rudarskog inženjerstva. U rudniku hromita Dedeman identifikovano je usko grlo koje se odnosi na transport rude sa nižih nivoa u okviru podzemnih operacija.

Primena PROMETHEE metode na izbor sistema podzemnog transporta rude rezultirala je sledećim redosledom alternativa: alternativa IRH (postojeće okno – vertikalni hodnik i rampa), alternativa ERH (rampa sa površine), alternativa SIS (interno okno), alternativa DES (produblјavanje postojećeg okna) i alternativa SNS (novi vitao kroz okno). Obe primenjene metode potvrdile su superiornost alternative IRH nad drugim alternativama. Studija je potvrdila da se višekriterijumske metode odlučivanja mogu efikasno primeniti u rešavanju inženjerskih problema u podzemnoj eksploataciji, naročito u procesima izbora sistema za transport rude.

Metoda višekriterijumskog odlučivanja AHP često se primenjuje u rešavanju problema u rudarskom inženjerstvu, gde se iz skupa dostupnih alternativa bira najpogodnije rešenje na osnovu definisanog broja kriterijuma. Ova metoda je naročito pogodna u situacijama kada ne postoje potpune informacija o razmatranim alternativama u procesu donošenja odluka. Despodov i saradnici [26], u radu *“Application of the AHP method for selection of a transportation system in mine planning”*, su prikazali primenu AHP metode pri izboru optimalnog transportnog sistema u glavnom koridoru rudnika olova i cinka, u fazi planiranja. Jedan od ključnih problema u primeni ove metode jeste definisanje kriterijuma odlučivanja drugog nivoa, kao i procena njihovih relativnih težina. Autori su kriterijume i odgovarajuće težinske koeficijente definisali na osnovu sopstvenog iskustva, kao i prethodnih naučnih istraživanja. Preciznom implementacijom postupka u primeni AHP metode dobija se najveća ukupna vrednost (0,3595) za treću alternativu, koja je time identifikovana kao najpogodnije rešenje u postupku izbora transportnog sistema. Usvojeno rešenje podrazumeva transport rude visećim transporterom, koji se sastoji od dve sekcije, dok bi se prevoz radne snage i sirovina obavljao dizel transporterima.

Despodov i saradnici [27], u radu *“Methodology for selection of the most convenient ore transportation system in regard to the environmental protection”*, istraživali su uspostavljanje optimalnog sistema za transport rude, transport od površinskog kopa do postrojenja za preradu s obzirom na ekološki aspekt zaštite, korišćenjem AHP metode. Negativan uticaj transporta rude na životnu sredinu zahteva sistematsku procenu potencijalnih štetnih efekata na zemljište, vazduh i vodu, intenzitet i karakter tih uticaja nisu isti za svaku sredinu. Procena uticaja na životnu sredinu podrazumeva kategorizaciju prostora na više nivoa, unutar svake kategorije je moguće sprovesti dodatnu klasifikaciju radi preciznije kvantifikacije potencijalne štete. Konvencionalni vidovi transporta, kao što su železnica, kamionski transport i transport trakom, moraju ispunjavati određene zahteve u pogledu zaštite životne sredine kako bi se njihova primena smatrala prihvatljivom. Uočavanjem ograničenja i nedostataka standardnih transportnih sistema otvara se mogućnost uvođenja novih rešenja i savremenih tehnologija, među kojima se posebno izdvaja transport cevnim transporterima, kao ekološki povoljnija alternativa u određenim uslovima eksploatacije.

U svim rudarskim projektima, troškovi transporta utiču na neto profit, zbog čega su studije ekonomske opravdanosti nabavke ili zamene transportne flote deo procesa odlučivanja. De Sousa Junior i drugi [28], u radu *“Multi-Criteria Decision Aid methodology applied to highway trucks selection at a mining company”*, prikazali su studiju slučaja izbora kamiona za transport rude iz rudnika (ROM) u kompaniji za eksploataciju boksita, koja posluje u saveznoj državi Minas Gerais u Brazilu. Problem izbora i kupovine rudarske mehanizacije analiziran je primenom metoda VPM, ELECTRE I i PROMETHEE II, koje pripadaju grupi višekriterijumskih metoda odlučivanja. Studija slučaja se odnosi na nabavku i zamenu 10 kamiona za transport rude boksita. Prema klasičnoj literaturi koja se bavi problematikom izbora mehanizacije, uobičajeno je korišćenje ekonomskih pokazatelja kao što su neto sadašnja vrednost, interna stopa povrata i period povrata investicija. Polazeći od pretpostavke da analizirane alternative kamiona imaju veoma slične ekonomske pokazatelje sa stanovišta donosilaca odluka, autori su primenili višekriterijumsku metodologiju koja omogućava istovremeno razmatranje kvalitativnih i kvantitativnih faktora. Prednost primene višekriterijumskih metoda odlučivanja ogleda se u mogućnosti objedinjavanj različitih tipova kriterijuma, čime se dobijaju rezultati koji reflektuju iskustvo i stavove učesnika u procesu donošenja odluka. Kao najpovoljnije rešenje pokazala se kombinacija metoda VPM i PROMETHEE II.

Racionalno projektovanje sistema za transport kamionima treba da bude rezultat detaljne analize tehničkih i ekonomskih aspekata, uključujući i troškove nabavke i dalje eksploatacije, koji imaju presudan uticaj na cenu eksploatacije minerala, što ističu Bodziony i saradnici [29], u radu *“The problem of multiple criteria selection of the surface mining haul trucks”*.

U radu je prikazan univerzalni skup kriterijuma za evaluaciju, kao i primena metode ocenjivanja izbora kamiona u specifičnim uslovima eksploatacije na površinskom kopu. Predložena metodologija zasniva se na principima višekriterijumskog odlučivanja i koristi jednu od metoda, ELECTRE III. Metodologija obuhvata: definisanje univerzalnog i pouzdanog skupa kriterijuma, sprovođenje složenog procesa modeliranja i agregaciju interdisciplinarnih kriterijuma odlučivanja, rešavanje analiziranog problema odlučivanja primenom ELECTRE III, kao i analizu preferencija donosilaca odluka iz različitih grupa eksperata. Značajnu ulogu imaju modeli odlučivanja i ispitivanje osetljivosti rezultata kroz definisanje pragova indiferencije, preferencije i veto-pragova.

Održivi razvoj i poslovanje rudarskih preduzeća, kao značajnih nosilaca ekonomskog rasta u mnogim zemljama, zasnivaju se na uspostavljanju ravnoteže između ekonomskih, ekoloških i društvenih ciljeva i raspoloživih resursa. Transport predstavlja jedan od ključnih procesa na površinskim kopovima, na njega otpada i do 70% ukupnih operativnih troškova. Iz tog razloga, parametri transportnih sredstava moraju biti usklađeni kako sa karakteristikama površinskog kopa, tako i sa konkretnim uslovima njegovog rada. Problem izbora modela kiperu u radu *“Multi-Criteria System's Design Methodology for Selecting Open Pits Dump Trucks”*, rešen je primenom dvostepenog sistema selekcije kriterijuma, uz dodatno diferenciranje vrednovanja kriterijuma prema nivou stručnosti donosilaca odluka metodom FUCOM (engl. *Ful Consistency Method*). Predloženi su skupovi kriterijuma za ocenjivanje od strane stručnjaka različitih nivoa ekspertize. Dobijeni rangovi kriterijuma predstavljaju korisnu osnovu za rukovodioce rudarskih preduzeća pri izboru optimalnog modela kiperu, dok se prikazana metodologija pokazala pogodnom za razvoj novih sistema kriterijuma u uslovima promene radne sredine ili pojave faktora koji nisu obuhvaćeni predmetnom analizom, kako navode Rakhmangulov i saradnici [30].

2.3. Izbor mehanizacije u podzemnoj eksploataciji (za izradu tunela, širokočelno otkopavanje, komorno-stubnu metodu i provetravanje)

U radovima *“Analytical hierarchy process for selection of roadheaders”* i *“Selection of roadheaders by fuzzy multiple attribute decision making method”*, Acarouglu i saradnici [31], [32], bavili su se izborom mašina za izradu tunela, odnosno otkopnih mašina za tunele projektovane u različitim vrstama stena. Istražena je mogućnost primene višekriterijumskih metoda donošenja odluka koje su u velikoj meri korišćene u različitim oblastima inženjerstva. Autori su nastojali da identifikuju najprikladniju mašinu za basen uglja Cayirhan primenom AHP metode, kao jedne od metoda višekriterijumskog odlučivanja i fazi pristupa. Zaključeno je da se metode odlučivanja sa više kriterijuma mogu koristiti u različitim oblastima rudarstva gde postoje nejasnoće pri izboru mašina za otkopavanje.

Fazi AHP metoda predstavlja višekriterijumsku metodu donošenja odluka koja se može uspešno koristiti za rangiranje alternativa mašina za izradu tunela na osnovu skupa kriterijuma. Ebrahimabadi [33], je u radu *“A Fuzzy AHP Approach to Select the Proper Roadheader in Tabas Coal Mine Project of Iran”* primenio FAHP metodu za izbor optimalne mašine za izradu tunela u rudniku uglja Tabas u Iranu. Izbor odgovarajuće mašine za izradu tunela jedno je od ključnih pitanja u podzemnoj eksploataciji, kod metoda širokočelnog otkopavanja i komorno-stubne metode, te ima značajnu ulogu u rudarskim projektima sa tehničkog i ekonomskog aspekta. Prilikom izbora mašine razmatraju se geološka i geotehnička svojstva rudnog ležišta i njegovih okolnih slojeva (krovina i podina), ekonomski i tehnički parametri kao i operativni parametri. Cilj rada bio je izbor najpogodnije mašine za izradu tunela primenom FAHP metode, koja omogućava poređenje kriterijuma i alternativa u paru, uz uvažavanje neizvesnosti i nepreciznosti podataka. Vrednosti poređenja u paru transformisane su u trouglaste fazi brojeve, dok su prioritetne težine kriterijuma i alternativa određene primenom Changove metode analize obima. Na osnovu kombinacija dobijenih težina izvršeno je rangiranje alternativa i određen optimalan izbor. Rezultati primene pokazali su da je najpogodnija mašina za izradu tunela u rudniku uglja Tabas DOSCO MD1100, a sledeće pozicije zauzimaju KOPEISK KP21 i VIRTH T2.11, redom.

Ozfirat i saradnici [34], su u radu *“Integration of fuzzy analytic hierarchy process and multi-objective fuzzy goal programming for selection problems: An application on roadheader selection”*, razvili opštu metodologiju koja integriše fazi AHP metod i višeciljno orijentisano programiranje za rešavanje problema selekcije. Predložena metodologija sastoji se od dve osnovne faze. U prvoj fazi primenjuju se fazi trouglasti brojevi, na osnovu kojih se vrši poređenje kriterijuma odlučivanja u paru i određuju njihove relativne važnosti. U drugoj fazi dobijene vrednosti i odgovarajući trouglasti fazi brojevi integrišu se u model višeciljnog programiranja, čime se određuju konačni prioriteti kriterijuma odlučivanja. Na osnovu dobijenih prioriteta kriterijuma iz modela programiranja izračunava se ponderisani zbir ocena za svaku alternativu, čime se omogućava rangiranje i izbor optimalne alternative. Predložena metodologija verifikovana je na realnom problemu izbora mašina za izradu tunela u rudarskoj industriji. Dobijeni rezultati pokazali su da je metodološki pristup jednostavan za primenu, fleksibilan i da obezbeđuje pouzdane i zadovoljavajuće rezultate u procesu donošenja odluka.

Kursunoglu & Önder [35], su u radu *“Selection of an appropriate fan for an underground coal mine using Analytic Hierarchy Process”*, razmatrali problem izbora ventilacionog sistema u podzemnom rudniku uglja. Provetravanje predstavlja jedan od ključnih procesa u podzemnoj eksploataciji, jer direktno utiče na bezbednost rada, uslove radne sredine i kontinuitet proizvodnje. U ovom istraživanju AHP metoda je primenjena kao višekriterijumska metoda odlučivanja za izbor najpogodnijeg ventilatora u podzemnom rudniku uglja u Turskoj. U razvijenom AHP modelu razmatrane su tri alternative (Fan₁, Fan₂ i Fan₃), koje su ocenjene na osnovu četiri glavna kriterijuma i odgovarajućih podkriterijuma. Rezultati evaluacije pokazali su da je alternativa Fan₁ najpogodnija prema osnovnim rezultatima AHP metode. Analiza osetljivosti pokazala je da se, u zavisnosti od promena relativne važnosti kriterijuma, kao prihvatljive alternative mogu izdvojiti Fan₁ ili Fan₂. Rezultati istraživanja potvrđuju da izbor odgovarajućeg ventilatora za podzemni rudnik zahteva razmatranje velikog broja kriterijuma, uključujući tehničke, operativne, ekološke i ekonomske aspekte. U ovoj studiji AHP metoda se pokazala kao moćan i fleksibilan alat, za podršku donošenja odluka u procesu izbora ventilacionog sistema u podzemnoj eksploataciji.

2.4. Ostala primena u oblasti rudarstva

Rudarstvo predstavlja multidisciplinarnu oblast gde se u funkciji vremena vrše različiti izbori kako sa aspekta tehnologije rada tako i sa aspekta mehanizacije. Osnovni cilj je donošenje ispravnih odluka, kako bi se optimizovali proizvodni procesi i poboljšali ekonomski efekti. Pored izbora rudarske mehanizacije, višekriterijumske metode odlučivanja nalaze značajnu primenu i u drugim oblastima rudarskog inženjerstva, kao što su: izbor rudarske metode u zavisnosti od mineralne sirovine koja se otkopava, izbor tehnologije otkopavanja, izbor lokacije rudnika, planiranje proizvodnje u rudniku, izbor projekta rekultivacije i izbor projekta upravljanja rizikom. Ovi problemi se odlikuju velikim brojem međusobno zavisnih kriterijuma, kao i potrebom za donošenje strateških odluka koje imaju dugoročne posledice na tehničke, ekonomske i ekološke aspekte rudarskih projekata.

Izbor odgovarajuće tehnologije eksploatacije zahteva sagledavanje geoloških karakteristika ležišta, kapaciteta proizvodnje, investicionih i operativnih troškova, kao i uticaja na životnu sredinu. U takvim uslovima, primena višekriterijumskih metoda omogućava sistematsko poređenje alternativnih tehnologija i donošenje odluka koje su u skladu sa ciljevima održivog razvoja. Metode poput AHP, ELECTRE, PROMETHEE i TOPSIS često se koriste za rangiranje tehnoloških rešenja na osnovu kombinacija kvantitativnih i kvalitativnih kriterijuma.

Izbor lokacije rudarskih objekata, uključujući postrojenja za preradu, odlagališta otkrivke i infrastrukturne objekte, predstavlja složen problem odlučivanja. Ovaj proces zahteva razmatranje prostorno-planskih ograničenja, dostupnosti infrastrukture, ekoloških i društvenih faktora, kao i ekonomskih pokazatelja. Višekriterijumske metode omogućavaju integraciju različitih interesa i procenu kompromisnih rešenja, čime se smanjuje rizik od nepovoljnih dugoročnih posledica.

Planiranje proizvodnje u rudarstvu obuhvata definisanje dinamike otkopavanja, kapaciteta proizvodnje i optimalnog korišćenja raspoloživih resursa. U uslovima promenljivih tržišnih zahteva i tehničkih ograničenja, višekriterijumski pristup omogućava donošenje fleksibilnih i robusnih planova koji uzimaju u obzir više ciljeva istovremeno, kao što su maksimizacija profita, smanjenje troškova i obezbeđenje kontinuiteta proizvodnje.

Upravljanje rizikom u rudarskim projektima predstavlja posebno važan segment odlučivanja, s obzirom na prisutne tehničke, ekonomske, bezbednosne i ekološke neizvesnosti. Primena višekriterijumskih metoda omogućava identifikaciju, procenu i rangiranje rizika, kao i izbor odgovarajućih mera za njihovo ublažavanje. Ove metode doprinose povećanju pouzdanosti projekata i smanjenju mogućnosti nastanka nepredviđenih gubitaka.

Primenom višekriterijumskih metoda u zavisnosti od mineralne sirovine koja se otkopava, bavili su se mnogi istraživači:

- ✓ Ugalj (AHP – Bascetin [9], [10]; Kizil i drugi [36]; Yavuz, 2015 [19], [37]; Samanta [8]; Acarouglu [31], [32]; AHP-FAHP – Ebrahimabadi [33])
- ✓ Boksit (AHP – Ataei i drugi, [38]; Samimi i drugi, [39]; FAHP-TOPSIS – Mikaeil i drugi, [40]; VPM, ELECTRE, PROMETHEE – de Souza Junior [28]) AHP – Ataei i drugi, [41]; TOPSIS – Ataei i drugi, [42]; MAHP – Ataei i drugi, [38])
- ✓ Gvožđe (FAHP – Azadeh i drugi, [43]; TOPSIS – Samimi i drugi, [44]; GRAY – TODIM – Deghani i drugi, [45]; AHP-FTOPSIS – Lashagari [15])
- ✓ Bakar (FTOPSIS – Namin i drugi, [46]; FAHP – Ghazikalazeh i drugi, [47]; FTOPSIS – Bazzazi [11]; AHP-TOPSIS – Bazzazi [12])
- ✓ Olovo i cink (AHP-TOPSIS – Shariati i drugi, [48]; VIKOR – Hayati, [49]; AHP – Despodov i saradnici [26])
- ✓ Hromit (AHP-TOPSIS – Yavuz & Alpay, [50]; AHP-Yager – Yavuz & Alpay, [19], [37]; PROMETHEE – Elevli & Demirci [25])
- ✓ Platina (AHP – Klunge & Malan, [51]; Musingwini, [52]; Petit, [53])
- ✓ So (FAHP – Karimnia & Bagloo, [54])
- ✓ Magnezit (FAHP – Yavuz & Alpay, [55])
- ✓ Kamen (ELECTRE III – Bodziony [23]; ELECTRE III – Patyk [21].[5])

Izbor tehnologije u rudarstvu obrađen je od strane različitih autora kroz metode:

- ✓ AHP – Dessureault & Scoble, [56]; Petit & Fraser, [57]; Vujić i drugi, [58];
- ✓ Hibridni AHP - Stojanović i drugi, [59] i
- ✓ Hibridni PROMETHEE - Bouhedja i drugi, [60].

Definisanje optimalnih lokacija za razmeštaj rudarskih objekata ili razvoj otkopa predstavlja veliki izazov. U odnosu na primenjene metode, ovu temu su obrađivali sledeći autori:

- ✓ AHP – Dey & Ramcharan, [61]; Golestanifar & Aghajani Bazzazi, [62]; Straka i drugi, [63];
- ✓ Aditivno ponderisanje SAV-TOPSIS-AHP - Hekmat i drugi, [64] i
- ✓ PROMETHEE-ELECTRE-AHP-VIKOR - Hudej i drugi, [65].

Upravljanje rizikom je značajno za rudarsko inženjerstvo i u njemu se primenjuju višekriterijumske metode odlučivanja, kao kod autora:

- ✓ AHP - Dawotola i saradnici, [66]
- ✓ AHP i TOPSIS – Đenadić, [1] i
- ✓ FAHP – Zhigang Yan i saradnici, [67].

Sprovedena analiza relevantne domaće i međunarodne naučne literature pokazuje da problem izbora u rudarstvu predstavlja složen proces odlučivanja, koji obuhvata izbor rudarske mehanizacije, transportnih sistema, tehnologije eksploatacije, lokacije, planiranje proizvodnje i upravljanje rizicima. Ovi problemi se karakterišu velikim brojem kriterijuma heterogene prirode – tehničkih, ekonomskih, operativnih, ekoloških i društvenih – koji su često međusobno konfliktni, zbog čega njihovo rešavanje zahteva primenu savremenih višekriterijumskih metoda odlučivanja.

U okviru poglavlja 2.1 utvrđeno je da izbor mehanizacije za otkopavanje, utovar, transport i odlaganje na površinskim kopovima ima presudan uticaj na investicione i operativne troškove, produktivnost sistema i ukupnu ekonomsku efikasnost eksploatacije. Analizirani radovi potvrđuju dominantnu primenu metoda višekriterijumskog odlučivanja, kao što su AHP, FAHP, TOPSIS, FTOPSIS, VIKOR, ELECTRE i ARAS, koje omogućavaju struktuirano vrednovanje sistema alternativa u uslovima neizvesnosti i nedovoljno preciznih ulaznih podataka. Poseban značaj ima primena fazi pristupa koji omogućava normalizaciju subjektivnih procena eksperata i uključivanje lingvističkih varijabli u proces odlučivanja. Međutim, uočeno je da se većina postojećih istraživanja zasniva na parcijalnim studijama slučaja, uz ograničeno povezivanje teorijskih modela sa realnim eksploatacionim podacima o radu rudarske mehanizacije.

Analiza literature u okviru poglavlja 2.2 pokazuje da izbor transportnih sistema, kako na površinskim kopovima, tako i u podzemnoj eksploataciji, predstavlja jedan od ključnih strateških problema u projektovanju i planiranju rudnika. Transportni procesi često učestvuju sa dominantnim udelom u ukupnim operativnim troškovima, zbog čega racionalan izbor transportne mehanizacije ima direktan uticaj na ekonomsku održivost rudarskih projekata. Prikazane studije potvrđuju uspešnu primenu višekriterijumskih metoda odlučivanja u evaluaciji kamionskog, tračnog, železničkog i kombinovanog transporta, kao i u izboru podzemnih transportnih sistema. U novijim istraživanjima se sve veći značaj pridaje ekološkim kriterijumima i principima održivog razvoja. Ipak, identifikovan je nedostatak integrisanih modela koji istovremeno obuhvataju tehničke, ekonomske i operativne parametre transportnih sistema u realnim uslovima eksploatacije.

U okviru poglavlja 2.3 analizirani su problemi izbora mehanizacije u podzemnoj eksploataciji, uključujući izbor mašina za izradu tunela, sisteme širokočelnog otkopavanja, komornu-stubnu metodu i ventilacione sisteme. Rezultati analize pokazuju da se višekriterijumske metode odlučivanja, naročito AHP, FAHP i njihovi integrisani fazi modeli, uspešno primenjuju u uslovima složenih geoloških i geotehničkih karakteristika ležišta i istražene neizvesnosti. Poseban doprinos ovih metoda ogleda se u mogućnosti sprovođenja analize osetljivosti i procene stabilnosti donetih odluka. Međutim, uočen je ograničen broj istraživanja koja problem izbora mehanizacije razmatraju u širem kontekstu upravljanja podzemnim rudarskim sistemima.

U poglavlju 2.4 razmatrani su ostali tipovi problema izbora u rudarstvu, uključujući izbor tehnologije, lokacije, planiranje proizvodnje i upravljanje rizicima. Analizirani radovi potvrđuju da višekriterijumske metode odlučivanja predstavljaju fleksibilan i univerzalan alat za rešavanje ovih problema, ali istovremeno ukazuju na potrebu njihovog prilagođavanja rudarskim uslovima, dostupnosti podataka i ciljevima donosilaca odluka.

Na osnovu sprovedenog pregleda literature može se zaključiti da su višekriterijumske metode odlučivanja postale nezaobilazan deo savremenog rudarskog inženjerstva, jer omogućavaju sistematičan, transparentan i racionalan pristup rešavanju složenih problema. Međutim, identifikovan je izražen istraživački jaz u pogledu razvoja integrisanih modela koji u dovoljnoj meri povezuju teorijske pristupe višekriterijumskog odlučivanja sa realnim podacima o radu kapitalne rudarske mehanizacije, naročito u kontekstu revitalizacije, modernizacije i unapređenja postojećih rudarskih sistema. Postojeći modeli su često statičnog karaktera i ne obezbeđuju potpunu vezu između pretpostavki projekta i stvarnih eksploatacionih performansi sistema.

Iz navedenih razloga, u narednim poglavljkima biće razvijen hibridni model izbora kapitalnih rudarskih mašina, koji integriše više metoda višekriterijumskog odlučivanja i omogućava sveobuhvatnu evaluaciju alternativnih rešenja na osnovu tehničkih, ekonomskih i operativnih parametara. Predloženi model ima za cilj unapređenje procesa odlučivanja i obezbeđivanja pouzdane podrške racionalnom upravljanju rudarskim sistemima u savremenim uslovima površinske i podzemne eksploatacije.

3. PREDMET ANALIZE

Kompleksna mehanizacija primenjena u površinskoj eksploataciji se sastoji od otkopno-utovarne, transportne, odlagališne i pomoćne mehanizacije. Primenjena oprema omogućava otkopavanje otkrivke¹ i eksploataciju korisne mineralne sirovine. Sve osnovne i pomoćne mašine i procesi u površinskoj eksploataciji su u međusobnoj korelaciji i moraju biti usklađeni prema kapacitetima i sinhronizovani prema tehnološkom redosledu izvođenja. Kada se vrši izbor mehanizacije neophodno je razmotriti načine otvaranja, transporta, sistem eksploatacije i pravac razvoja rudarskih radova, isto tako i prirodne i rudarsko-tehničke uslove, pre svega čvrstoću stena. Sistem eksploatacije definiše redosled izvođenja radova na otkrivci, eksploataciji mineralne sirovine, kao i pomoćnih radova, sa ciljem postizanja maksimalnog iskorišćenja mašina i realizacije planiranog (maksimalno mogućeg) proizvodnog kapaciteta površinskog kopa. Izbor mehanizacije, otvaranja i sistema površinske eksploatacije u velikoj meri zavisi i od geomehaničkih svojstava otkrivke i mineralne sirovine: čvrstoće, tvrdoće, elastičnosti, žilavosti, poroznosti, raspucalosti, slojevitosti, rastresitosti, vlažnosti, konzistencije, vodopropusnosti, gustine, zapreminske mase i abrazivnosti, budući da ovi parametri direktno utiču na radne performanse i pouzdanost rudarske mehanizacije.

Tehnologiju površinske eksploatacije čine kompleksna mehanizacija i sistem eksploatacije. Kada se izabere bager kao osnovna mašina, biraju se druge osnovne mašine za procese transporta i odlaganja ili deponovanje materijala, kao i pomoćne mašine. Formira se celovit tehnološki sistem čije funkcionisanje zavisi od međusobne usklađenosti svih njegovih elemenata. Izbor rotornog bagera kao ključne mašine u sistemu površinske eksploatacije može se sagledati kroz tri osnovna pristupa: „*Kod izbora bagera moguća su uglavnom tri pristupa: tehnološki, konstruktivni i ekonomski*“ [7]. Tehnološki pristup podrazumeva analizu međusobne zavisnosti uslova radne sredine, odnosno rudarsko-tehničkih uslova, parametara sistema eksploatacije i radnih karakteristika mehanizacije. Konstruktivni pristup obuhvata razmatranje odnosa mase, energije i radnih dimenzija, kao i kapaciteta rotornog bagera. Ekonomski pristup usmeren je na analizu investicionih i eksploatacionih troškova, kako u procesu otkopavanja otkrivke, tako i u procesu dobijanja mineralne sirovine. Primenjena mehanizacija ima presudan uticaj na ukupne troškove eksploatacije. Najvažniji faktori koji određuju izbor mehanizacije su: prirodni, tehničko-tehnološki, organizacioni i ekonomski. Ovi pristupi se ne razmatraju odvojeno, već istovremeno.

Prirodni faktori imaju značajan uticaj na izbor mehanizacije u površinskoj eksploataciji, budući da direktno određuju uslove rada i tehničke zahteve koji se postavljaju pred rudarske mašine. U ovu grupu faktora ubrajaju se fizička svojstva otkrivke i mineralne sirovine, dimenzije i oblik ležišta, kao i uslovi zaleganja ležišta i prostorni raspored korisnih komponenti. Pored navedenog, značajnu ulogu imaju hidrogeološki i hidrološki uslovi, koji u velikoj meri mogu uticati na stabilnost radnih kosina, izbor sistema otkopavanja i pouzdanost rada mehanizacije. Takođe, prisustvo usputnih mineralnih sirovina, klimatski uslovi i topografske karakteristike terena predstavljaju važne prirodne faktore koji se moraju uzeti u obzir prilikom izbora odgovarajuće mehanizacije za površinsku eksploataciju [7].

Tehničko-tehnološki faktori predstavljaju jednu od ključnih grupa kriterijuma koji utiču na izbor mehanizacije u površinskoj eksploataciji. U ovu grupu faktora ubrajaju se potreban proizvodni kapacitet, režim razvoja rudarskih radova na površinskom kopu, kao i mogućnosti nabavke odgovarajuće mehanizacije. Pored toga, značajni su i raspoloživi izvori snabdevanja vodom i energijom, kao i lokacija odlagališta [7].

¹ Otkrivka se deli na nezagađenu i mineralizovanu. Nezagađena otkrivka je zemlja koja ne sadrži opasne supstance nastale od rudarskih aktivnosti. Mineralizovana otkrivka može biti zagađena.

Organizacioni faktori takođe imaju značajan uticaj na izbor mehanizacije, jer određuju realne mogućnosti realizacije planiranog tehnološkog rešenja. U ovu grupu faktora spadaju raspoloživost i kvalifikovanost radne snage, dnevni i godišnji režim rada, dinamika izgradnje i dostizanje projektovanog kapaciteta, kao i logističke mogućnosti vezane za dopremu, montažu i puštanje mehanizacije u rad. Takođe, obezbeđenje stabilnog dovoda vode i energije predstavlja važan organizacioni preduslov za uspešno funkcionisanje izabranog sistema mehanizacije, odnosno površinskog kopa u celini [7].

Ekonomski faktori imaju presudan uticaj na izbor mehanizacije u površinskoj eksploataciji, jer direktno određuju opravdanost primene određenog tehnološkog rešenja. U ovu grupu faktora ubrajaju se investiciona ulaganja, produktivnost rada, veličina ostvarene dobiti, kao i cena koštanja procesa otkopavanja i dobijanja mineralne sirovine [7].

U razmatranju potrebe za revitalizacijom i modernizacijom mehanizacije na površinskim kopovima, rudarska mehanizacija se može podeliti u dve osnovne grupe prema vremenu upotrebe i konstrukcionoj savršenosti [6]:

- ✓ U prvu grupu spadaju mašine sa dužim vekom trajanja i nižim stepenom konstrukcione savršenosti: bageri, odlagači i tračni transporteri;
- ✓ Drugu grupu čine mašine kraćeg veka trajanja i sa višim stepenom konstrukcione savršenosti: buldozeri, pumpe i bušaće garniture.

Kada mehanizacija dostigne granično stanje u smislu upotrebe, mehanizacija se povlači iz upotrebe ili se menja novom ili se razmatra potreba za revitalizacijom i modernizacijom mehanizacije, da bi se vratila u trenutno stanje ili poboljšale njene karakteristike. Mašine koje imaju duži vek trajanja se mogu razmatrati za procese revitalizacije i modernizacije [6].

3.1. Osnovna mehanizacija za otkopavanje i utovar na površinskim kopovima

Tehnologija površinske eksploatacije podrazumeva obavljanje osnovnih i pomoćnih radova. Eksploataciji korisne mineralne sirovine prethodi otkopavanje otkrivke kako bi se pristupilo ležištu odnosno eksploataciji korisne mineralne sirovine. Dakle, osnovne radove čine otkopavanje i/ili utovar otkrivke i korisne mineralne sirovine, transport do mesta odlaganja (otkrivke) ili deponovanja ili prerade (korisne mineralne sirovine) i odlaganje/deponovanje. Pomoćni radovi podrazumevaju prethodne, prateće, naknadne i uslužne radove u cilju postizanja optimalnih radnih uslova za vršenje osnovnih radova.

Prema tehnologiji rada, osnovni procesi mogu biti kontinualni ili diskontinualni. U skladu sa tim se klasifikuje i primenjena rudarska mehanizacija. Kontinualne radne operacije podrazumevaju primenu mašina kao što su rotorni bageri i bageri vedričari za otkopavanje, transporter i sa gumenom trakom za transport i odlagači ili deponijske mašine za odlaganje/deponovanje materijala. Osnovna karakteristika ove tehnologije rada i mašina je neprekidnost u radu, sve operacije se obavljaju u jednom ciklusu. Diskontinualne radne operacije podrazumevaju primenu mašina kao što su na primer bageri dreglajni, hidraulični bageri ili bageri kašikari na otkopavanju, kamioni za transport i različite mašine u procesu odlaganja i deponovanja. Pomenute diskontinualne mašine rade u ciklusima gde, na primer jedan ciklus bagera čine otkopavanje, okretanje do mesta istovara, istovar i povratak na mesto ponovnog utovara. Klasifikacija bagera može se izvršiti u odnosu na više različitih obeležja. Osnovna klasifikacija je direktno u korelaciji sa tehnologijom rada. Rotorni bager je karakterističan predstavnik kontinualnih mašina za otkopavanje i ima radni organ sa više radnih elemenata (kašika tj. vedrica) koje se okreću zajedno sa radnim točkom po zatvorenoj putanji.

Predmet analize je rotorni bager, mašina koja se najčešće primenjuje u otkopavanju materijala čija čvrstoća nije velika. U okviru kontinualnog sistema, nalazi se na početnom i najodgovornijem mestu.

3.2. Rotorni bageri sa površinskih kopova RB-a Kolubara

Površinski kopovi sa najvećom proizvodnjom uglja za potrebe termoelektrana se nalaze u sastavu RB-a Kolubara. Druga najveća eksploatacija uglja je na PK Drmno u okviru TE-KO Kostolac. Ugalj sa ova dva površinska kopa obezbeđuje oko 50-70% proizvodnje električne energije u Republici Srbiji [2].

Eksploatacija korisne mineralne sirovine (uglja) i otkrivke na pomenutim površinskim kopovima se vrši visoko produktivnim kontinualnim BTO (bager – tračni transporter – odlagač) i BTĐ (bager – tračni transporter – drobilana/deponija) sistemima, zbog povoljnih uslova ležišta. Najznačajniju ulogu imaju rotorni bageri koji se nalaze na početnom mestu kontinualnog sistema. Sa aspekta pouzdanosti, čitav sistem je u rednoj vezi gde zastoj jednog činioca sistema indukuje zastoj čitavog sistema. Isto tako i sam rotorni bager ima složenu hijerarhijsku strukturu velikog broja podsistema, sklopova i elemenata, koji su u rednoj vezi. Otkaz bilo kog podsistema dovodi do otkaza celog sistema (rotornog bagera), isto tako i do otkaza čitavog BTO ili BTĐ sistema. Rotorni bager kao osnovna mašina u sistemu dominantno utiče na rad celog sistema [3].

Rotorni bageri kao mašine za otkopavanje i utovar, predstavljaju osnovne i najveće samohodne mašine u površinskoj eksploataciji. Imaju neprekidan rad u složenim i teškim uslovima eksploatacije. Vrednost rotornih bagera je jako velika (nekoliko desetina miliona €), a izrađuju se prema zahtevima korisnika. Vreme koje je potrebno da protekne od projektovanja do puštanja u rad je u intervalu od 3 do 5 godina [1]. S obzirom na kompleksnost izuzetno složene hijerarhijske strukture, velikih gabarita i ogromnog kapaciteta, i ne zahtevaju angažovanje velikog broja ljudi kako u radu, tako i na održavanju i stvaraju raznovrsne direktne i indirektne troškove. Investicioni i operativni troškovi predstavljaju direktne troškove, dok su indirektni troškovi generisani zastojem odnosno gubitkom od planirane proizvodnje. Sat vremena zastoja BTO i BTĐ sistema čiji je rotorni bager činilac, generiše troškove u iznosu od nekoliko desetina hiljada evra [1].

Rotorni bageri koji su predmet analize, rade na površinskim kopovima RB-a “Kolubara” i to:

- ✓ SRs 1200.24/4 (G-6) RB5,
- ✓ SRs 1200.24/4 (G-5) RB4,
- ✓ SRs 1200.22/2 (G-1) RB1,
- ✓ SRs 1200.24/4 (G-4) RB3,
- ✓ SRs 1200.24/4 (G-3) RB2,
- ✓ SRs 1300.26/5+VR (G-8) RB7,
- ✓ SchRs 630.25/6 (G-7) RB6,
- ✓ SchRs 630.25/6 (G-2) RB 8 i
- ✓ SchRs 900.25/6 (G-1) RB9.

Predmet analize su rotorni bageri stariji od 35 godina, srednjih dimenzija, klase B, imaju oblik rama C, kapaciteta do 6.600 m³/h (u proseku oko 4.000 m³/h). Od navedenih 9 rotornih bagera, neki su radili na uglju a neki i na uglju i na otkrivci². Da bi podaci bili uporedivi, korišten je koeficijent rastresitosti. Za rotorni bager predviđeni vek upotrebe iznosi 35-40 godina, ali se teži produženju veka za 20 godina postupcima revitalizacije i modernizacije. U toku svog radnog veka rotorni bageri su radili na različitim površinskim kopovima u istočnom i zapadnom delu RB-a Kolubara.

Dokorašnja iskustva pokazala su da revitalizacija rotornih bagera u potpunosti može da zadovolji zahteve korisnika, kao najznačajnije se izdvajaju revitalizacija čelične konstrukcije, kao i modernizacija elektroopreme i mašinske opreme.

²U rudarskoj praksi se koristi izraz jalovina umesto otkrivka. Bez obzira na činjenicu da je jalovina otpad koji nastaje u postrojenjima za preradu mineralnih sirovina. Odgovarajući termin za zemlju i stene koje se nalaze iznad mineralizovanog sloja je otkrivka i/ili čak jalove stene (sloj u kojem je došlo do mineralizacije ali zbog niske koncentracije nije ekonomski isplativ).

Ulazak mašine u revitalizacijske aktivnosti sa ciljem produženja životnog veka mora se zasnivati na detaljnoj proceni tehničkog stanja mehanizacije, kao i na ekonomskoj oceni opravdanosti takvih ulaganja. S obzirom na to da rotorni bager predstavlja izuzetno skupu rudarsku mašinu, ulaganje u njegovu revitalizaciju ima smisla ukoliko troškovi revitalizacije iznose približno 25-30% nabavne cene nove mehanizacije.

Osnovne tehničke karakteristike analiziranih rotornih bagera prikazane su tabeli 5.1 (glava 5), dok su detaljni tehnički podaci i fotografije svakog pojedinačnog rotornog bagera dati u prilogima. Prikazani skup podataka predstavlja osnovu za dalju analizu pouzdanosti, održavanja i mogućnosti produženja životnog veka rotornog bagera, koja će biti razmatrana u narednim poglavljima.

3.3. Održavanje i pouzdanost rudarske mehanizacije

Održavanje i pouzdanost predstavljaju ključne elemente upravljanja životnim vekom rudarske mehanizacije, posebno kod kapitalnih mašina koje rade u složenim i promenljivim eksploatacionim uslovima. Pouzdan rad mehanizacije direktno utiče na kontinuitet proizvodnje, ostvarenje planiranog kapaciteta, bezbednost zaposlenih i ukupne ekonomske efekte rudarskog sistema. Efikasno održavanje omogućava očuvanje projektovanih tehničkih karakteristika mašina, smanjenje broja zastoja i produženje radnog veka, dok pouzdanost predstavlja meru sposobnosti mehanizacije da u definisanim uslovima i tokom određenog vremena obavlja zadatu funkciju bez otkaza.

U savremenim uslovima eksploatacije, sistemi održavanja sve više se zasnivaju na praćenju stanja i ponašanja mehanizacije, primeni tehničke dijagnostike i analizi pouzdanosti, čime se omogućava pravovremeno planiranje intervencija, smanjenje neplaniranih zastoja i racionalizacija troškova održavanja.

Održavanje se definiše kao „*sprovođenje svih mera nužnih da bi jedna mašina, postrojenje ili rudnik funkcionisao na propisan način, razvijajući performanse u propisanim granicama, tj. sa traženim učincima i kvalitetom, bez otkaza i uz propisano obezbeđenje životne okoline, a pod pretpostavkom dobre obezbeđenosti svih uslova, odnosno uz potrebnu ljudsku podršku*“ [68]. Porast entropije, koja predstavlja meru neodređenosti sistema, izaziva otkaze, poremećaje i prekide kod svih sistema koji se nalaze u prirodi. Neophodan uslov za rad tehničkog sistema u određenom vremenskom intervalu je da se isti održava na odgovarajući način. Strategija održavanja mehanizacije jeste skup definisanih pravila na temelju kojih se donose odluke o održavanju svake pojedinačne mašine, kao i mehanizacije u celini.

„*Konstruisanje i održavanje mašina su uzajamno povezane delatnosti, pošto se radi o dve najvažnije faze životnog ciklusa mašine, u razvoju i korišćenju, u okviru kojih konstruisanje, odnosno održavanje predstavljaju bitne komponente*“ [69]. Osnovne faze životnog ciklusa mašina obuhvataju: konceptijsko i idejno rešenje, razvoj i projektovanje (konstruisanje), proizvodnju i instalaciju (puštanje u rad), korišćenje i održavanje uz odgovarajuću logističku podršku, kao i završnu fazu životnog veka. Po isteku radnog veka, moguće su različite opcije upravljanja mašinom, među kojima se izdvajaju rekonstrukcija uz modernizaciju, prodaja, prerada u sekundarne sirovine ili druga odgovarajuća rešenja [68], [69].

Karakteristike sistema održavanja koje ga opisuju su: raspoloživost i pogodnost održavanja. Raspoloživost predstavlja verovatnoću da će sistem u proizvoljnom trenutku vremena biti u ispravnom, odnosno radnom stanju i sposoban da se uključi u rad. Sistem se može uključiti u rad u dva osnovna stanja: tokom eksploatacije ili iz stanja skladištenja. Ukoliko se sistem već nalazi u eksploataciji, njegovo uključivanje u rad ne prati dodatna neizvesnost, dok u slučaju kada se sistem nalazi u skladištu njegovo stanje nije u potpunosti poznato, što uvodi određeni stepen neizvesnosti u pogledu njegove spremnosti za rad.

“Pogodnost održavanja je osobina elementa ili sistema da se merama održavanja lako sprečavaju, otkrivaju i otklanjaju kvarovi i neispravnosti” [69]. Ona se kvantitativno izražava kumulativnom funkcijom verovatnoće trajanja postupaka održavanja, a može se definisati i kao sposobnost sistema da pod određenim uslovima upotrebe i održavanja, zadrži ili povрати stanje u kojem je sposoban da obavlja zahtevane funkcije, uz primenu propisanih procedura, odgovarajućih sredstava i resursa.

Sigurnost funkcionisanja predstavlja objedinjeni pojam koji opisuje ukupnu performansu sistema sa stanovišta raspoloživosti, kao i parametre koji na nju utiču i koji određuju ukupne troškove životnog veka mehanizacije. Ovi parametri obuhvataju: pouzdanost, pogodnost održavanja i logističku podršku održavanju [70], [71].

U savremenoj praksi eksploatacije primenjuju se različite metodologije održavanja, od kojih se posebno izdvajaju održavanje zasnovano na pouzdanosti *RCM* (engl. *Reliability Centered Maintenance*) i totalno produktivno održavanje *TPM* (engl. *Total Productive Maintenance*). Održavanje zasnovano na pouzdanosti polazi od teorije pouzdanosti i sistemskih nauka i ima za cilj obezbeđenje pouzdanog i bezbednog funkcionisanja sistema tokom eksploatacije.

Ova metodologija omogućava vraćanje sistema na prethodni nivo pouzdanosti nakon pojave kvara, obezbeđuje informacije neophodne za unapređenje pouzdanosti, kao i optimizaciju troškova održavanja i posledica otkaza. U uslovima površinske eksploatacije, zbog velikih dimenzija, složenosti i visokih troškova zastoja, metodologije održavanja zasnovane na pouzdanosti imaju poseban značaj kod rotornih bagera. Totalno produktivno održavanje zasniva se na proceni trenutnog stanja sistema, bez oslanjanja na detaljna saznanja o njegovom prethodnom radu i istoriji otkaza. Primenuje se u situacijama kada postoji saznanje da će do otkaza doći, osnovni cilj ove metodologije je smanjenje zastoja izazvanih iznenadnim otkazima i povećanje ukupne raspoloživosti sistema.

Savremeni sistemi održavanja rudarske mehanizacije zasnivaju se na različitim konceptima, na osnovu kojih se usvajaju odgovarajuće strategije održavanja. U najčešće primenjene strategije ubrajaju se preventivno održavanje, oportunističko održavanje, korektivno održavanje zasnovano na pouzdanosti i totalno produktivno održavanje [71]. Konceptija održavanja se rukovodi načelima donošenja odluka u vezi sa sprovođenjem postupaka održavanja i obuhvata definisanje elemenata, sadržaja i vremenskog rasporeda postupaka održavanja. U osnovi se razlikuju dve koncepcije održavanja: preventivno i korektivno održavanje.

Preventivno održavanje podrazumeva sprovođenje odgovarajućih postupaka pre pojave otkaza, odnosno dok je sistem u funkcionalnom stanju, sa ciljem sprečavanja ili odlaganja nastanka otkaza i očuvanja projektovanih performansi sistema. Nasuprot tome, korektivno održavanje se sprovodi nakon pojave otkaza, intervencije se preduzimaju isključivo kada je sistem u stanju nefunkcionalnosti, radi njegovog vraćanja u radno stanje.

U praksi se najčešće primenjuje kombinacija preventivnog i korektivnog održavanja, pojedini delovi sistema se održavaju preventivno, dok se za druge primenjuje korektivni pristup, u zavisnosti od njihove važnosti, pouzdanosti i ekonomskih kriterijuma. Preventivno održavanje može razlikovati dva osnovna oblika. Prvi oblik zasniva se na pouzdanosti sistema i koristi informacije o raspodelama, verovatnoćama vremena do pojave otkaza, dok se drugi oblik temelji na kontinuiranom praćenju stanja ponašanja sistema u eksploataciji, uz korišćenje podataka o pouzdanosti.

Modeli održavanja se, u skladu sa navedenim koncepcijama, dele na modele preventivnog održavanja, modele korektivnog održavanja i kombinovane modele. Modeli preventivnog održavanja u najvećoj meri zasnivaju na kriterijumu ukupnih troškova održavanja tokom životnog veka sistema, uz nastojanje da se postigne optimalan odnos između pouzdanosti, raspoloživosti i ekonomskih efekata.

Strategija održavanja rudarske mehanizacije predstavlja skup unapred definisanih pravila i smernica na osnovu kojih se donose odluke o načinu, obimu i vremenu sprovođenja aktivnosti održavanja, kako na nivou celokupne mehanizacije rudnika, tako i na nivou svake pojedinačne mašine. U ovom radu pojam strategije održavanja koristi se u nešto modifikovanom značenju u odnosu na pojedine definicije prisutne u literaturi, kako bi se obuhvatili specifični uslovi rada i eksploatacije rudarske mehanizacije. U stručnoj i naučnoj literaturi opisani su različiti koncepti na osnovu kojih se formiraju strategije održavanja u industriji, a koji se prvenstveno razlikuju prema vrsti i pristupu održavanju, odnosno prema odnosu između postupaka zasnovanih na preventivnom, oportunističkom, korektivnom, održavanju prema pouzdanosti i totalnom produktivnom održavanju [71].

U uslovima prisutnim u našim rudnicima, na osnovu dugogodišnjih iskustava se može zaključiti da strategiju održavanja rudarske mehanizacije nije moguće univerzalno definisati, već je neophodno njeno prilagođavanje postojećim okolnostima (tehničkim, organizacionim i eksploatacionim). Na sistem održavanja neposredno utiče i pouzdanost tehničkog sistema, budući da ona predstavlja jednu od ključnih determinanti učestalosti intervencija, obima održavanja i raspoloživosti mehanizacije.

Mašina se smatra pouzdanom ukoliko je u stanju da svoju projektovanu funkciju izvršava bez pojave kvara, odnosno otkaza. Pouzdanost se definiše kao verovatnoća, na određenom nivou poverenja, da tehnički sistem uspešno obavlja funkciju za koju je namenjen, bez otkaza i u toku određenog vremenskog intervala, pri unapred definisanim uslovima eksploatacije i u okviru propisanih granica performansi, uzima se u obzir prethodno vreme korišćenja sistema [71], [72], odnosno pokazatelj očekivanog ponašanja sistema tokom rada. Pouzdanost predstavlja jednu od najznačajnijih karakteristika tehničkog sistema i predstavlja složen pojam, čije kvantitativno određivanje zahteva detaljno poznavanje strukture sistema, njegovih elemenata i uslova rada. Budući da pouzdanost zavisi od stohastičkih procesa, izbor njenih pokazatelja se zasniva na teoriji verovatnoće i statističkoj analizi pojave određenih događaja, pre svega kvarova i otkaza.

Sistem predstavlja celinu sastavljenu od međusobno povezanih delova, čije zajedničko funkcionisanje omogućava ostvarenje definisane funkcije. Element predstavlja sastavni deo sistema i može biti deo, sklop, podsistem ili samostalan sistem. Prema rečniku Evropske organizacije za kontrolu kvaliteta (EOQC), element se definiše kao deo, sklop, podsistem ili sistem koji se može pojedinačno razmatrati i odvojeno ispitivati i testirati [69], [71].

Osobine (svojstva) pouzdanosti su: bezotkaznost, pogodnost za opravke i trajnost. Bezotkaznost predstavlja sposobnost sistema da u određenim uslovima rada obavlja svoju funkciju bez pojave otkaza tokom definisanog vremenskog intervala. Ovo svojstvo kvantitativno se opisuje sledećim pokazateljima: verovatnoćom pojave otkaza, intenzitetom (parametrom toka) otkaza, vremenom rada bez otkazai koeficijentom tehničke pouzdanosti.

Pogodnost za opravke (održivost) predstavlja sposobnost sistema da se nakon pojave otkaza u što kraćem vremenskom periodu dovede u ispravno stanje primenom odgovarajućih postupaka održavanja. Ovo svojstvo se opisuje verovatnoćom uspešne popravke i vremenom trajanja zastoja, odnosno vremenom potrebnim za otklanjanje kvara i vraćanje sistema u radno stanje.

Trajnost predstavlja sposobnost tehničkog sistema da zadrži zadovoljavajući nivo performansi do dostizanja graničnog stanja, definiše se preko tehničkog resursa i roka službe. Tehnički resurs označava ukupno dozvoljeno vreme ili obim rada sistema do pojave stanja u kome dalja eksploatacija više nije tehnički ili ekonomski opravdana, dok rok službe predstavlja kalendarski period tokom koga se sistem može bezbedno i pouzdano koristiti [7].

Pouzdanost predstavlja verovatnoću rada mehanizacije, kompleksa mehanizacije, etaže i/ili površinskog kopa bez zastoja. Postoje mehanička (tehnička) i fizička pouzdanost i odgovarajući koeficijenti pouzdanosti.

Mehanička (tehnička) pouzdanost predstavlja tehničko stanje mehanizacije ili kompleksa mehanizacije, zapravo predstavlja spremnost (raspoloživost) za rad. Koeficijent mehaničke (tehničke) pouzdanosti autora [7], je količnik vremena rada i zbira vremena rada i vremena remonta mehanizacije i može se predstaviti kao:

$$k_p^{meh} = \frac{\sum_1^{n_1} t_{ri}}{\sum_1^{n_1} t_{ri} + \sum_1^{n_1} t_{remi}} = \frac{\sum_1^{n_1} t_{ri}}{\sum_1^{n_1} t_{ri} + \sum_1^{n_1} t_{otki} + \sum_1^{n_1} t_{ppri}} \quad (3.1)$$

Kada se izraz (3.1) podeli sa vremenom remonta $\sum_1^{n_1} t_{ri}$ dobija se sledeći izraz:

$$\begin{aligned} k_p^{meh} &= \frac{1}{1 + \frac{\sum_1^{n_1} t_{rem}}{\sum_1^{n_1} t_r}} = \frac{1}{1 + \frac{\sum_1^{n_1} t_{otki}}{\sum_1^{n_1} t_{ri}} + \frac{\sum_1^{n_1} t_{ppr}}{\sum_1^{n_1} t_{ri}}} = \\ &= \frac{1}{1 + k_{otk} + k_{ppr}} = \frac{1}{1 + k_{rem}} \end{aligned} \quad (3.2)$$

gde su:

$$\sum_1^{n_1} t_{ri} = \sum_1^{n_1} t_{otki} + \sum_1^{n_1} t_{ppri} - \text{vreme remonta} \quad (3.3)$$

$$k_{rem} = \frac{\sum_1^{n_1} t_{remi}}{\sum_1^{n_1} t_{ri}} = k_{otk} + k_{ppr} \quad (3.4)$$

$$k_{otk} = \frac{\sum_1^{n_1} t_{otki}}{\sum_1^{n_1} t_{ri}} = \frac{\lambda_1}{v_1} = k_{rem} - k_{ppr} \quad (3.5)$$

$$k_{ppr} = \frac{\sum_1^{n_1} t_{ppri}}{\sum_1^{n_1} t_{ri}} = k_{rem} - k_{otk} \quad (3.6)$$

U navedenim izrazima se javljaju sledeći parametri:

k_{rem} – koeficijent remonta (opravki);

k_{ppr} – koeficijent plansko-preventivnog remonta;

k_{otk} – koeficijent otkaza;

λ_1 – matematičko očekivanje otkaza, ili matematičko očekivanje remonta;

v_1 – matematičko očekivanje rada;

t_{ri} – vreme ispravnog rada između $(i-1)$ -og i i -tog otkaza, odnosno remonta;

t_{otki} – vreme opravke i -tog otkaza;

n_1 – broj otkaza, odnosno remonta u obračunskom periodu; i

$\sum_1^{n_1} t_{ppri}$ – vreme planiranih opravki u plansko-preventivnom remontu.

Fizička pouzdanost predstavlja stepen verovatnoće da će mehanizacija ili kompleks mehanizacije biti mehanički (tehnički) ispravni u vremenu koje je predviđeno za rad. Koeficijent fizičke pouzdanosti mehanizacije se može dobiti kao količnik zbira vremena rada i organizacionih zastoja (uključeni su svi zastoji izuzev zastoja remonta) i kalendarskog vremena i računa se na sledeći način:

$$k_p^{fiz} = \frac{\sum_1^{n_1} t_{ri} + \sum_1^{n_2} t_{orgi}}{T_{kal}} \quad (3.7)$$

gde su:

n_2 – broj organizacionih zastoja,

T_{kal} – kalendarsko vreme u obračunskom periodu (izraženo u časovima).

Koeficijent organizacione (operativne) pouzdanosti, odnosno koeficijent iskorišćenja fizičke pouzdanosti, može se dobiti kao količnik vremena rada i zbira vremena rada i organizacionih zastoja, a računa se:

$$k_p^{op} = k_v^{op} = \frac{\sum_1^{n_1} t_{ri}}{\sum_1^{n_1} t_{ri} + \sum_1^{n_2} t_{orgi}} \quad (3.8)$$

Koeficijent iskorišćenja radnog vremena, koeficijent eksploatacione pouzdanosti, se dobija kao proizvod fizičke pouzdanosti i iskorišćenja fizičke pouzdanosti:

$$k_p^{ex} = k_v = k_p^{fiz} \cdot k_p^{op} = k_p^{fiz} \cdot k_v^{op} = \frac{\sum_1^{n_1} t_{ri}}{T_{kal}} \quad (3.9)$$

Eksploataciona pouzdanost povezuje mehaničku i operativnu pouzdanost kao što je prikazano sledećim obrascem:

$$k_p^{ex} = k_v = \frac{k_p^{meh} \cdot k_v^{op}}{k_p^{meh} + k_v^{op} - k_p^{meh} \cdot k_v^{op}} = \frac{1}{\frac{1}{k_v^{op}} + \frac{1}{k_p^{meh}} - 1} \quad (3.10)$$

Parametar toka otkaza se uvodi kao:

$$\lambda = \frac{1}{t_r} \quad (3.11)$$

gde je: t_r – srednje vreme rada između otkaza - opravki.

Ukoliko se koristi parametar toka otkaza navedeni koeficijenti se mogu napisati na sledeći način:

$$k_p^{meh} = \frac{1}{1 + \lambda_{rem} \cdot t_{rem}} \quad (3.12)$$

$$k_v^{org} = \frac{1}{1 + \lambda_{org} \cdot t_{org}} \quad (3.13)$$

$$k_v = \frac{1}{1 + \lambda_{rem} \cdot t_{rem} + \lambda_{org} \cdot t_{org}} \quad (3.14)$$

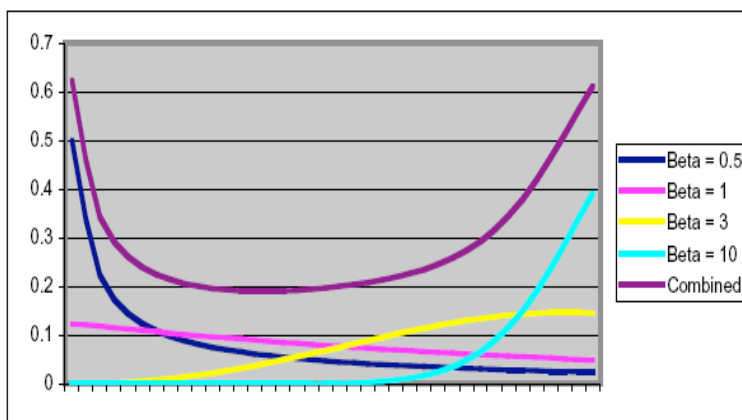
Otkaz ili kvar je prestanak sposobnosti elementa da obavlja funkciju za koju je namenjen. Otkaz pojedinačnog elementa ne mora nužno dovesti do otkaza cele mašine, ukoliko je reč o elementu perifernog značaja i ukoliko sistem poseduje funkcionalnu redundansu. Međutim, u slučaju otkaza elementa vitalnog značaja, njegov otkaz neposredno dovodi do otkaza mašine kao celine. Jedan od najznačajnijih kvantitativnih pokazatelja pouzdanosti jeste učestanost (intenzitet) otkaza, koja se najčešće definiše kao očekivani broj otkaza u određenom vremenskom intervalu, pri zadatim uslovima eksploatacije.

Kod velikog broja tehničkih sistema, pa tako i u oblasti rudarstva kriva „kada“ interpretira trenutni otkaz u vremenu, prikazuje ponašanje sistema tokom celokupnog životnog ciklusa – od puštanja u rad do povlačenja iz eksploatacije („od kolevke pa do groba“). Prvi period, period ranih neispravnosti, karakteriše povišen intenzitet otkaza, koji je uglavnom posledica grešaka nastalih u fazama konstruisanja, projektovanja, uključivanja u rad i kontrolisanja. Drugi period predstavlja period normalne eksploatacije, u kome je intenzitet otkaza približno konstantan i relativno nizak. U ovoj fazi mašina je razrađena, stabilna i funkcioniše u skladu sa projektovanim performansama. Treći period, period starenja, odlikuje se progresivnim porastom intenziteta otkaza, usled zamora materijala, habanja, korozije i tehnološke zastarelosti. U ovoj fazi neophodno je doneti odluku da li je mašinu opravdano revitalizovati i modernizovati ili je ekonomski i tehnički svrsishodnije izvršiti njenu zamenu novom mehanizacijom [68], [71].

U oblasti analize pouzdanosti tehničkih sistema najčešće se primenjuju četiri statističke raspodele vremena do otkaza: eksponencijalna, normalna, lognormalna i Weibull-ova raspodela. Weibull-ova raspodela ima najširu primenu zbog svoje fleksibilnosti i sposobnosti da modeluje različite faze životnog ciklusa tehničkih sistema. Weibull-ova raspodela se najčešće koristi kao dvoparametarska, gde je β parametar oblika i η parametar razmere, dok se u određenim slučajevima može razmatrati i treći parametar – vreme kašnjenja. Parametar oblika β ima ključno značenje jer opisuje karakter promene intenziteta otkaza u vremenu.

Za vrednost $\beta < 1$, Weibull-ova raspodela opisuje period ranih otkaza, karakterističan za početnu fazu eksploatacije, kada je intenzitet otkaza opadajući. Kada je $\beta = 1$, Weibull-ova raspodela prelazi u eksponencijalnu raspodelu, što odgovara periodu normalne eksploatacije, u kome je intenzitet otkaza približno konstantan i otkazi imaju slučajni karakter. Za vrednost $\beta > 1$, dolazi do porasta intenziteta otkaza, što odgovara periodu starenja sistema; pri većim vrednostima parametra β poprima oblik sličan normalnoj raspodeli i ukazuje na izraženo slabljenje tehničkih performansi usled zamora, habanja i degradacije materijala.

Zahvaljujući mogućnosti prilagođavanja različitim oblicima krivih intenziteta otkaza, Weibull-ova raspodela omogućava preciznu analizu pouzdanosti, procenu rizika i predviđanje ponašanja sistema tokom celokupnog životnog veka. Kombinovanjem karakterističnih oblika raspodele za različite vrednosti parametra β dobija se resultantna kriva intenziteta otkaza, koja je po obliku analogna tzv. “kada” (bathub) krivoj prikazanoj na slici 3.1. Ispitivanja pouzdanosti se često sprovode primenom metoda ubrzanog starenja, kojima se skraćuje vreme ispitivanja i ubrzava degradacija performansi sistema, čime se omogućava efikasna procena ponašanja mehanizacije u realnim uslovima dugotrajne eksploatacije. Slika 3.1 ilustruje uticaj parametra oblika β Weibull-ove raspodele na promenu intenziteta otkaza u vremenu, kao i mogućnost modelovanja svih faza životnog ciklusa tehničkog sistema. Formule 3.15 do 3.25, daju matematičko-statističke pokazatelje pouzdanosti.



Slika 3.1. Kriva “kada” dobijena na osnovu različitih vrednosti parametra β Weibull-ovom raspodelom [73]

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \text{ - funkcija pouzdanosti} \quad (3.15)$$

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \text{ - funkcija otkaza} \quad (3.16)$$

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \text{ - funkcija gustine otkaza} \quad (3.17)$$

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} - \text{intenzitet otkaza} \quad (3.18)$$

$$t_{dt} = \eta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) - \text{srednja vrednost raspodele} \quad (3.19)$$

$$S^2 = \eta^2 \cdot \left\{ \Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right]^2 \right\} - \text{disperzija} \quad (3.20)$$

gde se koristi Ojlerov integral:

$$\Gamma(p) = \int_0^{\infty} t^{p-1} \cdot e^{-t} dt \quad (3.21)$$

Svojstva Ojlerovog integrala su:

$$\Gamma(1) = \Gamma(2) = 1 \quad (3.22)$$

$$\Gamma(p + 1) = p \cdot \Gamma(p) \quad (3.23)$$

$$\Gamma(p + 1) = p! \quad (3.24)$$

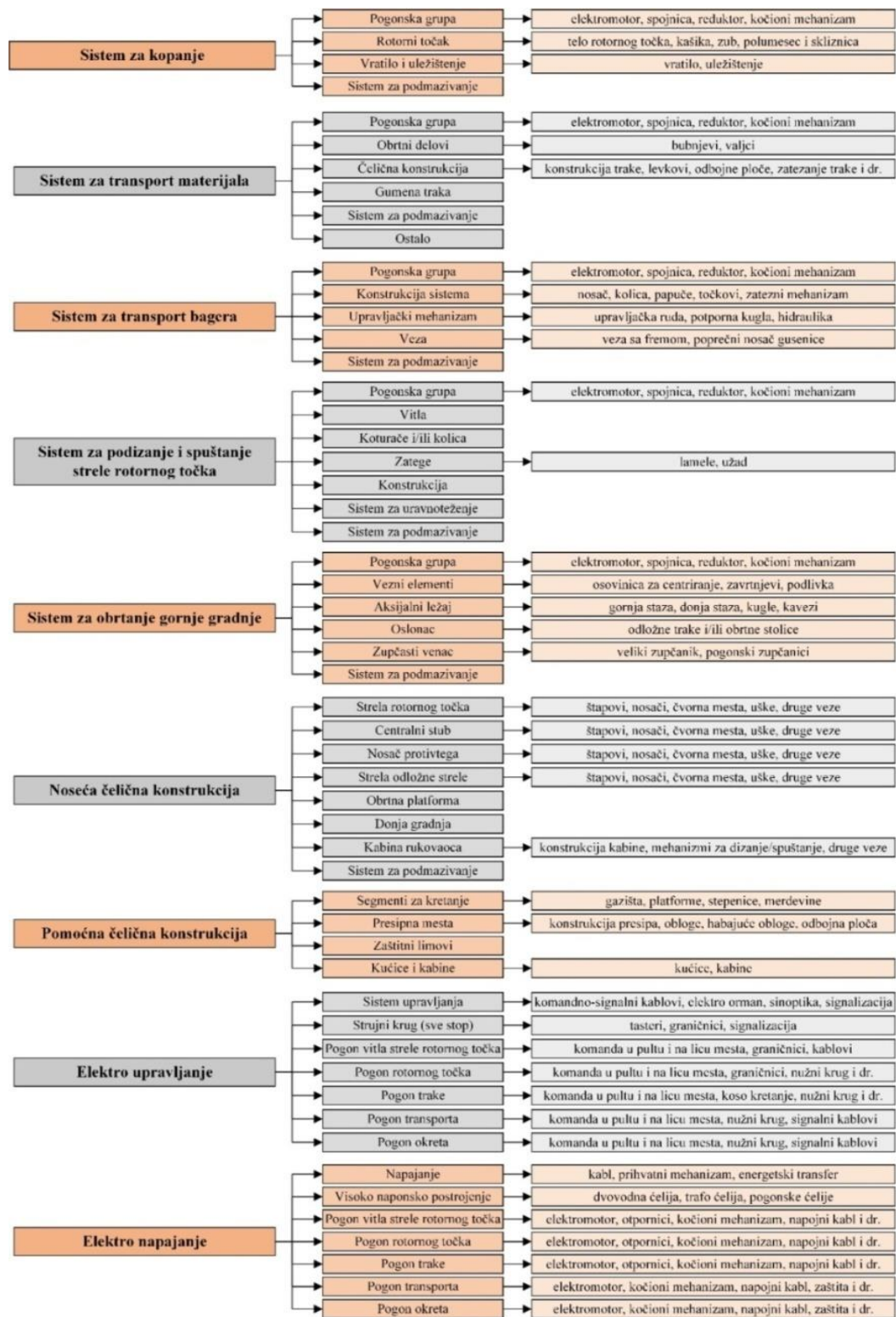
$$\Gamma(p)\Gamma\left(p + \frac{1}{2}\right) = \frac{\sqrt{\pi}}{2^{2p-1}} \Gamma(2p) \quad (3.25)$$

gde je: $p = 1+1/\beta$; i $p = 1+2/\beta$. [74]

Otkazi su „događaji koji element (član), podsistem ili sistem čine neupotrebljivim (potpuni otkaz) ili mu smanjuju radnu sposobnost (delimičan otkaz)“ [7]. U uslovima rada na površinskim kopovima, u praksi se javljaju različite vrste otkaza rudarske mehanizacije, koje se mogu klasifikovati prema načinu nastanka i mogućnosti predviđanja.

Deterministički otkazi obuhvataju plansko-preventivne remonte, koji su unapred definisani u pogledu trajanja i vremena nastanka, u skladu sa planovima održavanja i tehnološkim zahtevima sistema. Ovi otkazi ne predstavljaju nepredviđene događaje, već su sastavni deo organizovanog procesa održavanja. Stohastički otkazi su otkazi čija se pojava može prognozirati na osnovu statističkih raspodela i prethodnih iskustava. U ovu grupu spadaju tehnološki zastoji, koji nastaju usled poremećaja u procesu rada i za koje se u proračunima kapaciteta koristi koeficijent smanjenja kapaciteta, definisan za svaki površinski kop pojedinačno. Slučajni otkazi, obuhvataju havarije i nepredviđene kvarove, koji se ne mogu pouzdano prognozirati ni po vremenu nastanka, ni po trajanju. Njihova analiza zahteva prikupljanje i obradu odgovarajućih statističkih podataka, koji predstavljaju osnovu za praćenje pouzdanosti sistema i unapređenje strategije održavanja.

Prema načinu pojavljivanja otkazi se dele na: iznenadne, postupene i periodične. Prema stepenu ispoljavanja dele se na: delimične i potpune. A na osnovu povezanosti sa drugim otkazima se dele na: zavisne i nezavisne [7]. Hijerarhijska dekompozicija rotornog bagera kao složenog tehničkog sistema, gde je bager razložen na podsisteme, sklopove, podsklopove i pojedinačne elemente, prikazana je na slici 3.2.



Slika 3.2. Dekompozicija rotornog bagera (složena hijerarhijska struktura)

Dekompozicija omogućava identifikaciju kritičnih podsistema sa aspekta pouzdanosti, kao što su sistem za kopanje, pogonski sistemi, noseća čelična konstrukcija i elektroenergetski podsistemi, što je od posebnog značaja za planiranje strategija održavanja i revitalizacije. Rotorni bageri predstavljaju najveće samohodne rudarske mašine i projektovani su za višedecenijsku eksploataciju, zbog čega je neophodno razmatrati pouzdanost, održavanje, sigurnost i postupke revitalizacije i modernizacije rotornih bagera. Rotorni bager se posmatra kao složen tehnički sistem sa hijerarhijskom strukturom koja obuhvata nivoe sklopa, podslopa i komponente.

Osnovni izvor poremećaja koji deluju na rotorni bager tokom eksploatacije je otpor kopanju, koji direktno utiče na dinamičko opterećenje konstrukcije i pogonskih elemenata. Ovakav pristup omogućava sistematsko sagledavanje strukture bagera i predstavlja osnovu za analizu pouzdanosti, održavanja i upravljanja radnim vekom.

Hijerarhijska struktura jasno ukazuje na činjenicu da rotorni bager funkcioniše kao sistem sa pretežno serijskom vezom elemenata, gde otkaz pojedinog vitalnog podsistema može dovesti do otkaza celokupnog sistema. Na osnovu hijerarhijske strukture moguće je definisati različite nivoe pouzdanosti, analizirati učestalost i posledice otkazai primeniti selektivne mere održavanja u zavisnosti od značaja pojedinih elemenata. Time se obezbeđuje racionalnije upravljanje održavanjem, povećanje raspoloživosti sistema i smanjenje ukupnih troškova tokom životnog veka rotornog bagera.

Ukupni otpor koji deluje na rotorni bager odnosno na rotorni (radni) točak u procesu rada se razlaže na tangencijalnu, normalnu i bočnu komponentu. Komponente otpora se savlađuju pogonima i to: pogonom kopanja, pogonom kružnog kretanja gornje gradnje bagera i pogonom transporta. Veličina otpora kopanju je u korelaciji sa fizičko-mehaničkim karakteristikama materijala koji se otkopava. Najčešće se izražava kao specifični otpor kopanja po površini poprečnog preseka odreska k_F [N/cm^2] ili po dužini reznih ivica k_L [N/cm]. Na osnovu brojnih istraživanja i mišljenja, najveći broj zastoja rotornih bagera je izazvan otkazom podsistema rotornog točka sa pogonom, gde su najviše zastupljeni reduktor i pogonski motor. Istraživanja pouzdanosti rotornog bagera su pokazala da se podizanjem nivoa pouzdanosti rotornog bagera, može najviše doprineti pouzdanosti celog kontinualnog sistema. Pouzdanost rotornog bagera dominantno utiče na pouzdanost celog sistema, osim u slučaju jako dugačkih sistema za transportovanje. Analize su pokazale da je najmanje pouzdan podsistem za kopanje [3], [71].

U ovom poglavlju razmatrana je uloga održavanja i pouzdanosti kao ključnih elemenata upravljanja radnim vekom i eksploatacionim performansama rudarske mehanizacije. Održavanje je sagledano kao neodvojivi deo životnog ciklusa tehničkog sistema, čija je osnovna funkcija očuvanje funkcionalnosti, raspoloživosti i sigurnosti rada mehanizacije u realnim uslovima eksploatacije. Poseban akcenat stavljen je na povezanost koncepcije i strategije održavanja sa pouzdanošću sistema, s obzirom na to da pouzdanost direktno utiče na učestalost otkaza, trajanje zastoja i ukupne troškove životnog veka.

Analizom različitih koncepcija održavanja, uključujući preventivno, korektivno, održavanje prema pouzdanosti i totalno produktivno održavanje, ukazano je da izbor strategije mora biti prilagođen specifičnim uslovima rada, starosti mehanizacije i tehničkom stanju sistema. Posebno je naglašeno da u uslovima rada površinskih kopova, gde dominiraju kapitalne i dugovečne mašine, kombinovani pristupi održavanju predstavljaju najrealnije i najefikasnije rešenje. U tom kontekstu, održavanje zasnovano na pouzdanosti omogućava racionalno planiranje intervencija i smanjenje neplaniranih zastoja.

Pouzdanost je razmatrana kao kompleksna i stohastička karakteristika tehničkog sistema, definisana verovatnoćom da sistem izvršava svoju funkciju bez otkaza u zadatom vremenu i pod propisanim uslovima. Prikazani su osnovni pokazatelji pouzdanosti, kao što su bezotkaznost, pogodnost za opravke i trajnosti njihova kvantitativna interpretacija kroz odgovarajuće matematičko-statističke modele. Posebna pažnja posvećena je analizi otkaza, njihovoj klasifikaciji i učestalosti značaju identifikacije vitalnih elemenata i podsistema čiji otkazi dovode do zastoja celokupnog sistema.

Primena statističkih raspodela u analizi pouzdanosti, naročito Weibull-ove raspodele, omogućava modelovanje različitih faza životnog veka mehanizacije, od ranih otkaza, preko perioda stabilnog rada, do faze starenja i povećane učestalosti otkaza. Time se stvara osnova za donošenje odluka o revitalizaciji, modernizaciji ili zameni mehanizacije. Dekompozicija složenih sistema, kao što su rotorni bageri, na podsisteme i komponente, dodatno omogućava preciznije sagledavanje izvora otkaza i unapređenje pouzdanosti celokupnog sistema eksploatacije.

Na osnovu razmatranja održavanja i pouzdanosti rudarske mehanizacije u poglavlju 3.3, jasno se uočava da su ovi pojmovi neraskidivo povezani sa dugoročnom eksploatacijom i upravljanjem vekom složenih tehničkih sistema. Posebno mesto u tom kontekstu zauzimaju rotorni bageri, kao ključne i najodgovornije mašine u kontinuiranim sistemima površinske eksploatacije. Zbog njihove složene hijerarhijske strukture, visoke vrednosti i dominantnog uticaja na raspoloživost celokupnog BTO/BTD sistema, neophodno je detaljno sagledati njihove tehničke, eksploatacione i karakteristike pouzdanosti.

3.4. Ekonomska opravdanost zamene mehanizacije

Zamena mehanizacije se vrši u svim slučajevima kada je radni vek površinskog kopa duži od roka amortizacije mehanizacije. Kako vreme prolazi tako se mehanizacija troši i zastareva. Fizičko trošenje mehanizacije je direktno proporcionalno intenzitetu korištenja mehanizacije, a obrazac za fizičko trošenje dao je autor Astahov [7]:

$$N = \frac{U - O}{t_{rm}} \cdot t \cdot \left(1 + 0,7 \cdot \frac{Q - Q_1}{Q_1} \right) \quad (3.26)$$

gde su:

N – vrednost fizičkog trošenja mehanizacije za period eksploatacije između dva remonta, [din];

U – nabavna cena mehanizacije, [din];

t – period stvarne eksploatacije mehanizacije u remontnom ciklusu, [godina];

O – ostatak vrednosti mehanizacije, [din];

t_{rm} – vreme između dva remonta, [godina];

Q – tehnički kapacitet mehanizacije, [m^3 /god];

Q_1 – ostvareni kapacitet mehanizacije, [m^3 /god].

Kada se dostigne granično stanje, treba odlučiti da li je racionalno i svrsishodno nabaviti novu mehanizaciju umesto stare, pritom treba razmotriti odnos ukupnih godišnjih troškova eksploatacije nove mehanizacije i ukupne troškove eksploatacije stare mehanizacije, obrazac Astahova [7]:

$$\frac{U}{Q_n \cdot t_n} + S_v + S_t < \frac{R}{Q_{rm} \cdot t_{rm}} + S_v + \frac{S_t}{Q_{rm}} \quad (3.27)$$

gde su:

S_v – varijabilni troškovi po jedinici proizvoda, [din/ m^3];

S_t – ukupni uslovno fiksni troškovi, [din];

R – cena generalne opravke, [din];

Q_{rm} – kapacitet mehanizacije u remontnom ciklusu, [din/ m^3];

t_n – vreme remontnog ciklusa nove mehanizacije, [godina];

t_{rm} – vreme remontnog ciklusa stare mehanizacije, [godina];

Q_n – kapacitet nove mehanizacije u remontnom ciklusu, [m^3].

Najpogodniji momenat za opravku (remont) se može predstaviti na sledeći način:

$$S > \frac{R}{Q_{rm} \cdot t_{rm}} + S_v + \frac{S_t}{Q_{rm}} \quad (3.28)$$

gde je: S – ukupna cena koštanja jedinice proizvoda, [din/ m^3].

Kada se vrši poređenje više varijanti zamene mehanizacije, najsvrsishodnija je ona koja ima najkraći rok otplate, dok se vreme otplate se računa kao:

$$T_{ot} = \frac{U_2 - U_1 + U_r}{C_1 - C_2} \quad (3.29)$$

gde su:

T_{ot} – vreme otplate dodatnih investicija za zamenu mehanizacije, [godina];

U_1 – vrednost osnovnih sredstava do zamene mehanizacije, [dinara];
 U_2 – vrednost osnovnih sredstava posle zamene mehanizacije, [dinara];
 U_r – neamortizovani deo stare mehanizacije koja se rashoduje, [dinara];
 C_1 – cena koštanja proizvoda do zamene mehanizacije, [din/ m³];
 C_2 – cena koštanja proizvoda posle zamene mehanizacije, [din/ m³].

Ukoliko treba upoređivati veliki broj varijanti može se upotrebiti sledeći obrazac:

$$F = (C_1 + f \cdot U_1) - [C_2 + f \cdot (U_2 + U_r)] \quad (3.30)$$

gde su:

F – godišnji ekonomski efekat usled zamene mehanizacije, [dinara];
 f – koeficijent dobiti (koeficijent efektivnosti investicija), $f = 0,14$ [7].

3.5. Produžetak životnog veka rudarske mehanizacije

Osnovna mehanizacija za otkopavanje i odlaganje mineralne sirovine i otkrivke, može se razmatrati sa aspekta potrebe za revitalizacijom i modernizacijom. Proces modernizacije mehanizacije obuhvata niz aktivnosti usmerenih ka identifikaciji i otklanjanju slabih mesta, gde značajnu ulogu ima sistem održavanja. Revitalizacija mehanizacije u značajnoj meri se realizuje upravo kroz proces održavanja, prvenstveno putem zamene istrošenih i dotrajalih komponenti. Posebno važan element u ovom procesu predstavlja čelična konstrukcija, koja je tokom dugotrajnog eksploatacionog rada izložena dejstvu zamora materijala i korozije, što može dovesti do potrebe za sprovođenjem postupka revitalizacije radi produženja životnog veka mehanizacije [6].

Životni vek rudarske mehanizacije predstavlja radno trajanje mehanizacije, koje počinje neposredno posle faza projektovanja i proizvodnje i obuhvata vreme tokom kojeg se mehanizacija nalazi u funkcionalnom stanju i koristi se za rad [71]. Pri tome, mehanizacija se ne koristi tokom svog celokupnog životnog veka, već samo u jednom njegovom delu, tako da je vreme korišćenja manje od vremena njenog trajanja. Održavanje se smatra nezamenljivim i sastavnim delom životnog veka svakog tehničkog sistema. Tehnička dijagnostika predstavlja posebno značajan segment tehnologije održavanja, budući da omogućava pravovremeno otkrivanje oštećenja i procenu stvarnog stanja komponenti [75]. Vek trajanja rudarske mehanizacije srednjeg kapaciteta u praksi iznosi približno 20 do 35 godina, dok kod mehanizacije većeg kapaciteta može biti duži od 35 godina. Kod rotornih bagera, usled kvalitetnog i sistematskog održavanja, radni vek može biti i znatno duži [76]. Rotorni bager je vrlo složen tehnički sistem i kao takav proizvodi se pojedinačno prema specifičnim potrebama i uslovima površinskog kopa gde će raditi. Kvalitet rada rotornog bagera zavisi od konstrukcionih karakteristika i isto tako od eksploatacionih uslova. Pri kraju prošlog veka broj proizvedenih bagera se smanjio, a broj revitalizovanih se povećao.

Dokorašnja iskustva su pokazala da revitalizacija zadovoljava zahteve korisnika, pre svega revitalizacija čelične konstrukcije, kao i modernizacija elektroopreme i mašinske opreme. Ulazak mašine u proces revitalizacije sa ciljem produženja njenog životnog veka mora se zasnivati na objektivnoj proceni tehničkog stanja mehanizacije i na ekonomskoj proceni opravdanosti takvog zahvata.

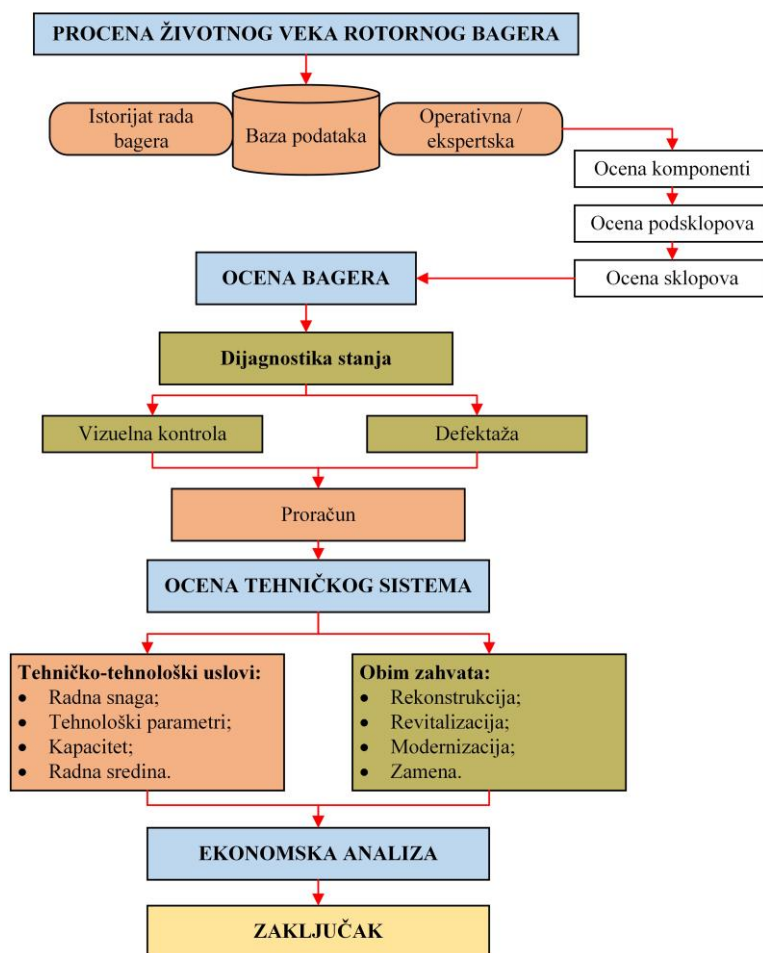
U tom smislu, primenjuju se različite metode za određivanje preostalog veka trajanja pojedinih komponenti bagera, budući da pouzdanost rada i ekonomski učinci revitalizacije u velikoj meri zavise od pravovremenog otkrivanja skrivenih defekata i sprečavanja razvoja ozbiljnijih oštećenja mehanizacije. Za detekciju komponenti kod kojih su prisutni mehanizmi starenja konstrukcije usled zamora materijala i korozije, koriste se posebne dijagnostičke metode. Ovi mehanizmi dovode do smanjenja raspoloživosti mašina i pogoršanja njihovih radnih karakteristika, čime se direktno utiče na efikasnost eksploatacionog sistema.

Radi pouzdanog utvrđivanja stvarnog tehničkog stanja mašine, često je neophodno izvršiti demontažu određenih sklopova i privremeno isključenje mašine iz procesa eksploatacije. Produženje životnog veka rotornog bagera predstavlja kompleksan proces čiji obim, struktura i granice nisu jasno definisani, naročito u poređenju sa klasičnim velikim godišnjim opravkama. Rotorni bager se sastoji od više grupa sklopova i podsistema, uključujući mašinske, elektro i ostale sisteme, što ukazuje na izrazito složenu strukturu sistema u kojoj svaki pojedinačni deo može imati različit i specifičan radni vek. Heterogenost sklopova i elemenata mehanizacije dovodi do toga da se njihov radni vek značajno razlikuje. Zbog potreba planiranja opravki, nabavke rezervnih delova i efikasnog organizovanja službe održavanja, neophodno je izvršiti kategorizaciju komponenti prema stepenu upotrebljivosti. Efektivno radno vreme predstavlja vremenski interval rada (radno vreme) umanjen za organizacione i tehničko-tehnološke gubitke vremena, stoga se u proračune uvode korekcionni faktori. Ovi faktori odražavaju realne uslove eksploatacije u kojima rotorni bager funkcioniše, a na njih prvenstveno utiču tip bagera, primenjena tehnologija otkopavanja i geološki uslovi ležišta. Pri tome, iskustva iz prakse pokazuju da mašinska mehanizacija u najvećem broju slučajeva ne predstavlja glavni uzrok većih havarija rotornih bagera, što dodatno potvrđuje značaj pravilnog održavanja i pravovremene revitalizacije ključnih konstrukcionih elemenata [76].

Kada je reč o elektroopremi, ona predstavlja vitalni deo rotornog bagera i raspoređena je po čitavom bageru. Pri određivanju starosti i preostalog radnog veka elektroopreme razmatra se više relevantnih parametara. Pre svega, analiziraju se intenzitet efektivnog rada, koji obuhvata broj uključenja i isključenja, kao ukupan broj ostvarenih radnih sati. Pored toga, u obzir se uzima i dužina eksploatacije od momenta ugradnje i pripadnost određenoj generaciji opreme, odnosno vreme njenog projektovanja i proizvodnje. Dodatno, značajni kriterijumi pri proceni elektroopreme jesu kompatibilnost sa ostalim elektro i upravljačkim sistemima i realne mogućnosti i opravdanost zamene pojedinih komponenti u okviru procesa modernizacije i revitalizacije. Sveobuhvatno sagledavanje navedenih faktora omogućava donošenje optimalnih odluka u pogledu produženja životnog veka elektroopreme, uz istovremeno očuvanje pouzdanosti i bezbednosti rada celokupnog sistema [76]. Ekonomski kriterijumi, kao što su troškovi revitalizacije, efekti poboljšanja ostvareni primenom revitalizacije potencijalni rizici u toku trajanja produženog životnog veka, predstavljaju osnovne elemente na kojima se zasniva definitivna odluka o produžetku životnog veka.

U trenutku kada mašina dostigne granično stanje, moguće su dve osnovne opcije: otpisivanje postojeće mašine uz nabavku nove, koja menja postojeću ili sprovođenje procesa revitalizacije kojim se mašina dovodi u stanje funkcionalne sposobnosti za rad u produženom životnom veku. Granično stanje mašine nastaje kao rezultat kombinovanog dejstva više faktora. Pre svega, ono može biti posledica tehnološke zastarelosti mehanizacije, usled koje postojeća rešenja više ne zadovoljavaju savremene zahteve u pogledu produktivnosti, pouzdanosti i energetske efikasnosti. Dalje, ekonomski neisplativa upotreba mašine javlja se u situacijama kada su tehničke performanse značajno degradirane, što dovodi do povećanja specifičnih troškova rada. Poseban značaj ima smanjena radna sigurnost mehanizacije, koja predstavlja potencijalnu opasnost po bezbednost zaposlenih i može izazvati značajne materijalne štete. U praksi, utvrđivanje graničnog stanja mašine predstavlja složeni i višedimenzionalan problem, koji je teško precizno i jednoznačno definisati.

Kao indikatori približavanja graničnom stanju najčešće se koriste porast intenziteta otkaza, produženje trajanja zastoja i kontinuirani troškovi održavanja, ukoliko se uporede sa sličnom mehanizacijom ili u poređenju sa pomenutim pokazateljima za posmatranu mehanizaciju u prethodnom periodu rada [69], [71]. Analizom navedenih pokazatelja omogućava se objektivnije sagledavanje tehničke i ekonomske opravdanosti daljeg korišćenja mehanizacije, odnosno donošenje odluke o revitalizaciji ili njenoj zameni. Slika 3.3 prikazuje sistematski i hijerarhijski pristup proceni životnog veka rotornih bagera, zasnovan na integrisanju tehničkih, eksploatacionih i ekonomskih kriterijuma.



Slika 3.3. Procena životnog veka rotornog bagera [71]

Polaznu osnovu predstavlja analiza tehničkog stanja mašine, koja obuhvata ocenu stanja čelične konstrukcije, mehaničkih sklopova i elektroopreme i rezultate primenjenih metoda tehničke dijagnostike i pouzdanosti rada. Poseban značaj ima identifikacija dominantnih mehanizama degradacije, pre svega zamora materijala i korozijskih procesa, koji direktno utiču na smanjenje raspoloživosti i pouzdanosti rotornog bagera [71]. Na osnovu dobijenih rezultata vrši se procena dostizanja graničnog stanja mašine.

Granično stanje predstavlja fazu u kojoj dalja eksploatacija bez značajnih intervencija postaje tehnički nesigurna ili ekonomski neopravdana. Ono se karakteriše povećanjem intenziteta otkaza, produženjem trajanja zastoja, rastom troškova održavanja, kao i smanjenjem tehničkih performansi i nivoa sigurnosti rada. Procena graničnog stanja ne zasniva se samo na jednom parametru, već na kombinovanom delovanju više pokazatelja koji odražavaju realne uslove eksploatacije. Ukoliko analiza pokaže da granično stanje još nije dostignuto, moguće je planirati produžetak životnog veka kroz optimalno upravljanje održavanjem i parcijalne zamene komponenti. U suprotnom, razmatraju se dve osnovne alternative: otpisivanje postojeće mehanizacije i nabavka nove ili sprovođenje procesa revitalizacije i modernizacije.

Revitalizacija podrazumeva tehničke intervencije kojima se mašina dovodi u stanje funkcionalne pouzdanosti u produženom životnom veku, uz istovremenu modernizaciju mehaničkih i elektro sistema u skladu sa savremenim tehnološkim zahtevima [69], [71].

Završni deo prikazanog koncepta odnosi se na ekonomsku evaluaciju donetih odluka. U okviru ove faze analiziraju se troškovi revitalizacije, očekivani efekti poboljšanja rada, povećanje pouzdanosti i raspoloživosti i potencijalni rizici u periodu produženog životnog veka.

Integrisanom analizom tehničkih i ekonomskih pokazatelja moguće je doneti racionalnu i održivu odluku o daljoj eksploataciji rotornog bagera. Prikazani model procene životnog veka predstavlja pouzdanu osnovu za strateško planiranje revitalizacije kapitalne rudarske mehanizacije na površinskim kopovima.

Savremeni koncept produženja životnog veka ne podrazumeva isključivo zamenu dotrajalih komponenti, već integrisanu primenu tehničke dijagnostike, analize pouzdanosti, evaluacije rizika i ekonomske opravdanosti. Poseban značaj ima pravovremeno prepoznavanje graničnog stanja mašine, čime se omogućava donošenje racionalnih odluka između zamene i revitalizacije mehanizacije. U tom smislu, produženje životnog veka rotornog bagera, predstavlja ne samo tehničku, već i stratešku odluku, koja direktno utiče na kontinuitet proizvodnje, sigurnost rada i ukupnu ekonomsku efikasnost sistema površinske eksploatacije.

3.6. Postupci za produženje životnog veka rudarskemehanizacije

„U toku eksploatacije mašine ispoljavaju svoje osobine, od kojih neke nisu u skladu sa projektovanim vrednostima, u pogledu pouzdanosti, pogodnosti za održavanje, kapaciteta, troškova eksploatacije, štetnog uticaja na okolinu.“[69] U cilju prevazilaženja uočenih nedostataka i unapređenja ukupnih performansi sistema, korisnici pristupaju tehničkim izmenama na mašini ili njenim pojedinim elementima, najčešće radi poboljšanja radnog učinka, pouzdanosti i energetske efikasnosti, odnosno vrše izmene prvobitne konstrukcije ili rekonstrukciju. Rekonstrukcija predstavlja *„radnju kojom se vrši izmena na sredstvu (elementu), najčešće u cilju poboljšanja učinka“*[64].

Rekonstrukcija kao inženjerski postupak ima znatno veća ograničenja u odnosu na projektovanje nove mehanizacije, jer se sprovodi u okviru postojećih konstrukcionih, tehnoloških i eksploatacionih okvira, što zahteva pažljivo usklađivanje tehničkih, ekonomskih i organizacionih zahteva. Postupci za produženje životnog veka mehanizacije predstavljaju značajan segment njenog ukupnog životnog ciklusa i obuhvataju:

- ✓ revitalizaciju,
- ✓ modernizaciju,
- ✓ rekonstrukciju i
- ✓ sanaciju.

Pre sprovođenja navedenih postupaka, neophodno je izvršiti detaljna istraživanja, ispitivanja i praćenja ponašanja i stanja mehanizacije tokom eksploatacije. Kada je reč o rotornom bageru, njegov vek u najvećoj meri određuje vek noseće čelične konstrukcije, a u manjem opsegu utiču ostale grupe bagera. Čelična konstrukcija se deli na osnovnu (noseću) i pomoćnu konstrukciju (gazišta, stepenice, ograde i sl.), na njen vek trajanja značajno utiče usklađenost parametara radne sredine i sistema za kopanje. Poseban uticaj imaju dinamički efekti procesa otkopavanja, kao i promenljive sile koje dovode do zamora materijala i progresivnog degradiranja konstrukcionih elemenata. Osnovni izvor poremećaja koji deluju na rotorni bager tokom eksploatacije predstavlja otpor kopanju.

Na osnovu brojnih istraživanja i praktičnih iskustava, utvrđeno je da je najveći broj zastoja rotornih bagera uzrokovan otkazom podsistema rotornog točka sa pogonom, reduktor i pogonski elektromotor su najčešće elementi kvara. Sistem za kopanje pokazuje najniži stepen pouzdanosti u odnosu na ostale podsisteme bagera [3], [71].

Proces kopanja zavisi od više međusobno povezanih faktora, među kojima se izdvajaju: fizičko-mehanička svojstva materijala, konstrukciono-tehnološki parametri rotornog bagera i primenjena tehnologija otkopavanja. Otpor rezanja predstavlja jednu od ključnih komponenti ukupnog otpora kopanju. Na osnovu eksperimentalnih istraživanja može se zaključiti da povećanje čvrstoće materijala, utiče na povećanje sile rezanja i dovodi do pojačanih dinamičkih opterećenja i oscilacija elemenata konstrukcije bagera.

Pored produžetka životnog veka kao osnovnog cilja, aktivnostima održavanja (revitalizacije, modernizacije i sl.) postiže se i unapređenje performansi mašine, povećanje raspoloživosti i efikasnosti rada.

„Integritet konstrukcije se može definisati kao karakteristika konstrukcije koja garantuje pouzdanu eksploataciju tokom radnog veka, dok se vek konstrukcije može definisati kao period vremena u toku koga je konstrukcija u stanju da ispunjava sigurno, pouzdano i ekonomično svoju funkciju za koju je namenjena“ [76]. Integritet konstrukcije definiše se kao skup svojstava konstrukcije koji obezbeđuje njenu sigurnu i pouzdanu eksploataciju tokom celokupnog radnog veka. Vek konstrukcije predstavlja vremenski period u kojem je konstrukcija sposobna da bezbedno, pouzdano i ekonomski opravdano obavlja funkciju za koju je projektovana.

Pre sprovođenja postupaka produženja životnog veka, neophodno je prikupiti relevantne informacije o tehničkom stanju mehanizacije. Ove informacije se dobijaju na osnovu analize tehničke dokumentacije, uključujući uputstva za rukovanje i održavanje i detaljnog pregleda istorijata održavanja, izvršenih sanacija i eventualnih havarija. Poseban značaj ima sagledavanje uslova eksploatacije, odnosno karakteristika mineralne sirovine koja se otkopava, kako u uslovima bez prethodnog razaranja, tako i nakon primene metoda razaranja. Dodatno, neophodno je sprovesti ispitivanja tehničkog stanja pogonskih sistema i analizu zabeleženih otkaza i uočenih defekata, kako bi se obezbedila pouzdana osnova za donošenje odluka o daljim revitalizacionim i modernizacionim postupcima.

Revitalizacija se definiše kao *“izmena konstrukcije postojeće mašine čiji je cilj da se vek rada postrojenja produži znatno preko projektovanog”* [69]. Revitalizacija predstavlja plansku i ciljanu izmenu konstrukcije postojeće rudarske mašine sa osnovnim ciljem produženja njenog veka iznad projektovanih granica.

Za razliku od nabavke nove mašine, revitalizacija postojeće mašine predstavlja znatno složeniji i odgovorniji inženjerski poduhvat, koji zahteva detaljnu tehničku i ekonomsku analizu. Motivi za sprovođenje revitalizacije mogu biti višestruki i obuhvataju tehnološku zastarelost, pogoršanje tehničkih performansi, povećanje troškova održavanja i potrebu za prilagođavanjem savremenim proizvodnim i bezbednosnim zahtevima.

Revitalizacija mora biti ekonomski opravdana, njen obim definiše na osnovu opšteg tehničkog stanja mašine i jasno postavljenih ciljeva revitalizacije. Optimalni vek mašine određuje se kroz odnos ukupnih ulaganja u revitalizaciju i ostvarenih efekata, kao što su povećanje pouzdanosti, raspoloživosti, produktivnosti i bezbednosti rada.

Održavanje, kontinuirano praćenje tehničkog stanja i ponašanja mehanizacije imaju ključnu ulogu u upravljanju radnim vekom sistema, s obzirom na to da eksploatacioni i pogonski uslovi direktno utiču na trajnost i pouzdanost kako celokupnog sistema, tako i njegovih pojedinačnih komponenti. Tehnička dijagnostika predstavlja osnovni alat za utvrđivanje stvarnog tehničkog stanja i ponašanja rudarske mehanizacije u eksploataciji za procenu ekonomski opravdanog veka i definisanje obima revitalizacije.

Revitalizacija je složen i višefazni proces zamene zastarelih, dotrajalih i oštećenih delova, pre svega elemenata čelične konstrukcije, koji nije precizno definisan ni po obimu, ni po strukturi, niti su jasno utvrđene granice u odnosu na velike godišnje opravke [71].

Pre pristupanja procesu revitalizacije neophodno je izvršiti sveobuhvatnu analizu koja obuhvata utvrđivanje stepena istrošenosti i preostalog veka mehanizacije, identifikaciju stvarnih potreba za revitalizacijom i procenu ekonomske opravdanosti celokupnog procesa. Sistematskim praćenjem ponašanja i tehničkog stanja rotornih bagera tokom eksploatacije i održavanja omogućava se pouzdana procena preostalog veka, odnosno određivanje optimalnog trenutka za ulazak mašine u proces revitalizacije.

Proces revitalizacije treba da obezbedi ostvarenje sledećih osnovnih ciljeva: unapređenje tehničkih karakteristika i radne sigurnosti bagera, povećanje pouzdanosti i raspoloživosti sistema, produženje radnog veka, poboljšanje pogodnosti za održavanje, usklađivanje sa ekološkim zahtevima i obezbeđenje visokog nivoa bezbednosti osoblja tokom eksploatacije i održavanja [71].

Stanje čelične konstrukcije može u značajnoj meri uticati na skraćivanje radnog veka bagera i odlagača, što u krajnjem slučaju nameće potrebu za revitalizacijom velikog obima, kako u pogledu neophodnih finansijskih sredstava, tako i u pogledu vremena potrebnog za realizaciju takvih aktivnosti. Vek čelične konstrukcije u najvećoj meri zavisi od procesa zamaranja materijala usled delovanja dinamičkih opterećenja, zatim od procesa korozije, progresivnog slabljenja nosivosti konstrukcionih elemenata i od procesa starenja materijala [6].

Osnovni pravci revitalizacionih aktivnosti kod rotornih bagera obuhvataju: revitalizaciju okreta gornje gradnje, sanaciju i modernizaciju rotora, sistema za dizanje strele rotora, noseće čelične konstrukcije, modernizaciju pogonskih i prenosnih elemenata i potpunu ili delimičnu elektroenergetsku i upravljačku modernizaciju sistema [76].

Modernizacija označava postupak menjanja pojedinih sklopova, podsklopova i elemenata, gde se koriste komponente koje su savremenije i proizvedene su nakon proizvodnje rudarske mašine. Dakle, zamenske komponente su novije generacije i one menjaju komponente koje su zastarele i/ili se više ne proizvode. Zapravo, označava sve izmene na mašini, što se može nazvati delom poboljšanja konstrukcije.

Modernizacija rudarske mehanizacije predstavlja skup tehničko-tehnoloških i organizacionih zahvata kojima se postojeća mašina ili sistem unapređuje u cilju povećanja efikasnosti, pouzdanosti, bezbednosti i ekološke prihvatljivosti, uz zadržavanje osnovne konstrukcione koncepcije. Za razliku od revitalizacije, čiji je primarni cilj produženje radnog veka preko projektovanog, modernizacija je usmerena na poboljšanje performansi mehanizacije i njeno prilagođavanje savremenim tehničkim, tehnološkim i zakonskim zahtevima.

Modernizacija se najčešće sprovodi kroz zamenu ili unapređenje pojedinih podsistema, kao što su pogonski i prenosni sistemi, elektroenergetska i upravljačka oprema, sistemi automatizacije i nadzorai sistemi zaštite i bezbednosti. Poseban značaj u savremenim uslovima eksploatacije ima modernizacija elektroopreme i upravljačkih sistema, kojom se omogućava preciznija kontrola rada, smanjenje dinamičkih opterećenja, optimizacija potrošnje energije i unapređenje pouzdanosti celokupnog sistema.

Kod rotornih bagera, modernizacija se često sprovodi sa revitalizacijom, čelična konstrukcija se sanira i ojačava, dok se pogonski, elektroenergetski i upravljački sistemi menjaju savremenijim rešenjima. Postiže se sinergijski efekat: produženje radnog veka osnovne konstrukcije, uz istovremeno povećanje tehničko-tehnološkog nivoa mehanizacije i njene usklađenosti sa savremenim zahtevima eksploatacije. Sa ekonomskog aspekta, modernizacija predstavlja racionalnu alternativu potpunoj zameni mehanizacije, naročito u uslovima visokih investicionih troškova nabavke nove mehanizacije.

Opravdanost modernizacije procenjuje se na osnovu odnosa uložених sredstava i ostvarenih efekata, kao što su povećanje raspoloživosti, smanjenje zastoja, smanjenje troškova održavanja, poboljšanje bezbednosti rada i smanjenje negativnog uticaja na životnu sredinu. U širem smislu, modernizacija obuhvata sve intervencije na mašini, koje imaju za cilj unapređenje njenih tehničkih i eksploatacionih karakteristika i može se posmatrati kao sastavni deo poboljšanja konstrukcije.

Proces modernizacije treba da ispunі sledeće zahteve: usklađivanje mašine sa rudarsko-geološkim parametrima radne sredine, optimizaciju tehničko-tehnoloških parametara mašine, unapređenje tehnološkog nivoa mašine i poboljšanje sistema upravljanja u uslovima otkopavanja u bloku, sa ciljem postizanja maksimalnog proizvodnog kapaciteta uz stabilan i siguran rad.

Mogućnosti modernizacije su brojne i mogu se realizovati kroz različite tehničke zahvate, među kojima se posebno izdvajaju: modernizacija čelične konstrukcije, uvođenje mera za ublažavanje vibracija čelične konstrukcije, istraživanje i primena povoljnije geometrije reznih elemenata i unapređenje sistema upravljanja rotornim bagerom pri otkopavanju bloka. Navedeni postupci omogućavaju povećanje pouzdanosti, raspoloživosti i efikasnosti rada mašine i smanjenje dinamičkih opterećenja i negativnih efekata eksploatacije.

Rekonstrukcija označava postupak pri kojem se vrši korekcija tehničkih i radnih parametara postojeće mašine u skladu sa planiranim tehnološkim i eksploatacionim zahtevima. Istovremeno se identifikuju i otklanjaju uočena slaba mesta konstrukcije i sistema, sa ciljem povećanja ukupnog učinka i poboljšanja funkcionalnosti, bez suštinske promene osnovne namene mašine.

Sanacija predstavlja postupak koji se sprovodi na pojedinim delovima konstrukcije mašine, najčešće na zavarenim spojevima i lokalno oštećenim elementima. Sprovodi se sa ciljem otklanjanja nastalih defekata, sprečavanja daljeg širenja oštećenja i vraćanja osnovne nosivosti i sigurnosti konstrukcije, bez značajnijeg uticaja na produženje ukupnog radnog veka mašine.

Na osnovu izloženog, može se zaključiti da postupci revitalizacije, modernizacije, rekonstrukcije i sanacije predstavljaju međusobno povezane, ali jasno razgraničene intervencije u okviru upravljanja životnim vekom rudarske mehanizacije. Njihova primena zavisi od tehničkog stanja mašine, ekonomskih kriterijuma, zahteva eksploatacionog procesa i planiranog vremena daljeg rada. Pravilnim izborom i kombinovanjem navedenih postupaka moguće je obezbediti produženje životnog veka, unapređenje performansi, povećanje pouzdanosti i sigurnosti rada i racionalizaciju troškova eksploatacije i održavanja, što je od posebnog značaja u uslovima revitalizacije i modernizacije postojećih rudarskih sistema.

U ovom delu razmotreni su ključni aspekti produženja životnog veka, održavanja i pouzdanosti rudarske mehanizacije, sa posebnim osvrtom na rotorne bagere kao složene i kapitalno intenzivne tehničke sisteme. Prikazani su osnovni pojmovi i postupci revitalizacije, modernizacije, rekonstrukcije i sanacije, kao i njihov značaj u upravljanju životnim vekom mašina u uslovima dugotrajne i intenzivne eksploatacije. Analizirana je veza između održavanja i pouzdanosti, uz definisanje osnovnih pokazatelja pouzdanosti, vrsta otkaza i karakterističnih raspodela vremena do otkaza. Posebna pažnja posvećena je hijerarhijskoj strukturi rotornog bagera i njegovom dominantnom uticaju na pouzdanost celokupnog eksploatacionog sistema. Razmatranja iz ovog dela predstavljaju teorijsku i metodološku osnovu za dalju analizu konkretnih rotornih bagera u eksploataciji, koja je predmet narednih glava.

4. TEORIJA ODLUČIVANJA

Teorija odlučivanja proučava racionalno donošenje odluka u situacijama u kojima donosilac odluke bira između više mogućih alternativa. Pri oceni racionalnosti neke odluke ne razmatra se isključivo njen konačni ishod, već se uzimaju u obzir svi mogući ishodi i njihovi međusobni odnosi i verovatnoća pojavljivanja. Pojedini autori ukazuju na to da se u procesu odlučivanja često veći značaj pridaje opravdanosti razloga za donošenje odluke nego samom ishodu odluke [77]. Kako u realnim sistemima postoje faktori na koje donosilac odluke ne može da utiče, proces odlučivanja je neminovno povezan sa rizikom, te se u tom kontekstu razlikuje odlučivanje u uslovima neizvesnosti. U rudarstvu se odluke vrlo često donose upravo u uslovima izražene neizvesnosti. Operaciona istraživanja polaze od principa objektivnosti, međutim u praksi je teško uspostaviti optimalan odnos između objektivnih i subjektivnih elemenata u procesu odlučivanja. Poseban izazov predstavlja određivanje trenutka i načina na koji se objektivne mere mogu ili moraju zameniti subjektivnim procenama. Prikupljanje informacija, sticanje znanja i proces učenja predstavljaju ključne činioce svih savremenih postupaka donošenja odluka.

Pretpostavke koje donosilac odluke usvaja, kao i pogled na svet koji zastupa, u značajnoj meri određuju način na koji se problemi sagledavaju, analiziraju i rešavaju na koji način se donose odluke. Odluke donete u sadašnjosti neposredno utiču na rezultate koji se manifestuju u budućnosti, posledice donetih odluka mogu imatidugoročni i dalekosežni značaj. Donosioci odluka u realnim sistemima koriste dostupne podatke relevantne za proces odlučivanja, ali se pri tome suočavaju sa brojnim ograničenjima. *"Doneta odluka tako nije samo plod objektivno utvrđenog činjeničnog stanja, već i subjektivnih okolnosti [78]."* U praksi donosioci odluka često ne raspolažu potpunim i adekvatnim informacijama o suštini problema, nemaju dovoljno vremena niti resursa za prikupljanje i obradu informacija, suočavaju se sa ograničenjima u razumevanju raspoloživih podataka, nemogućnošću memorisanja velike količine informacija i ograničenim računskim sposobnostima. Usled navedenih ograničenja, donosioci odluka ne donose nužno optimalnu odluku u matematičkom smislu, već onu koja je u datim uslovima najsvrsishodnija. *"Donosioci odluka, na taj način donose odluku koja nije najbolja, već onu koja je najviše zadovoljavajuća [79]."*

Subjektivna komponenta u procesu odlučivanja neizostavno je prisutna i kao takva uvek podleže proceni i analizi [78]. Uticaj psiholoških faktora na donošenje odluka detaljno je razmatran u okviru teorije očekivanog izbora, u kojoj se svaka odluka posmatra kao nezavisan događaj. Donosioci odluka u praksi mogu ispoljavati kako racionalne, tako i iracionalne aspekte ličnosti, što dodatno komplikuje proces odlučivanja. Međutim, ukoliko postoji svest o prisustvu subjektivne komponente, moguće je govoriti o racionalnom donošenju odluka koje eksplicitno uključuje i subjektivnost kao sastavni deo procesa. U inženjerskim disciplinama, pa tako i u rudarstvu, subjektivnost ne predstavlja proizvoljnost niti nekontrolisani relativizam: *"..., subjektivnost nije nužno proizvoljna, subjektivnost u jezgru svog značenja nije proizvoljnost. Subjektivnost ne implicira relativizam [80]."* Subjektivni faktor nije moguće u potpunosti eliminisati. *"Moguće je ublažiti posledice koje proističu iz prirodne sklonosti donosioca odluke da reaguje na očekivani način"* [78].

4.1. Istorijski osvrt i osnovni pojmovi

Nicolas Bernoulli, matematičar iz Švajcarske je 1713. godine postavio Paradoks *Sant Petersburg*. Donosilac odluke koji treba da donese odluku u uslovima rizika, može se voditi kriterijumom očekivane vrednosti. Bernoulli je želeo da sazna koliko bi novca ljudi platili da igraju sledeću igru:

- ✓ Novčić se baca dok ne padne pismo,
- ✓ Igrač dobija 2 dolara ukoliko pismo padne u prvom bacanju, 4 dolara na drugom, 8 dolara na trećem.

Najveći broj ljudi je spreman da plati najviše par dolara. Iako je očekivana vrednost ako bi se igra ponovila nebrojeno puta, beskonačna.

Verovatnoća da igrač dobije 2 dolara je $\frac{1}{2}$, da dobije 4 dolara je $\frac{1}{4}$, da dobije 8 dolara je $\frac{1}{8}$, Postavlja se pitanje: „Zašto ljudi nisu spremni da ulože novac u igru sa beskonačnim povratom [77]?“

$$E(x) = 2 \cdot \frac{1}{2} + 4 \cdot \frac{1}{4} + \dots = 1 + 1 + 1 + \dots = \infty \quad (4.1)$$

Daniel Bernoulli, matematičar, 1738. godine je uveo pojam moralne vrednosti. Primetio je da ljudi ne maksimiziraju očekivanu vrednost, nego očekivanu korisnost. Bernoulli je uveo funkciju korisnosti, kojom je prikazao odnos donosioca odluke prema riziku, „praktično u načelu nesklonost prema riziku [77].“

John von Neumann i Oskar Morgenstern, 1944. godine su razvili pristup korisnosti, tako što su uveli skup aksioma. Da bi donosilac odluke doneo racionalnu odluku, njegove preferencije treba da zadovolje navedene aksiome: asimetričnosti, tranzitivnosti, kompletnosti, kontinuiteta preferencija, mogućnosti supstitucije, monotonosti i redukcije složenih lutrija. Navedene aksiome predstavljaju uslove racionalnosti za Normativnu teoriju očekivane korisnosti. John von Neumann i Oskar Morgenstern, su matematički dokazali da ako i kada donosilac odluke naruši principe odlučivanja, očekivana korisnost nije maksimalna [77].

Moris Ale, francuski ekonomista i dobitnik Nobelove nagrade, je 1953. godine postavio Aleov paradoks. Uveo je princip nezavisnosti, koji proizilazi iz prva tri aksioma John von Neumanna i Oskara Morgensterna, u kome predlaže da izbor između dve alternative treba da zavisi samo od toga kako i koliko se te dve alternative razlikuju, a da ne zavisi od onoga po čemu su slične.

Leonardo Jimmie Savage, američki matematičar i statističar, 1951. godine je u svojoj teoriji subjektivne verovatnoće dao aksiomatski pristup konstrukciji relacije preferencije i funkciji korisnosti, kao i metod Minmax kajanja (žaljenja) za donošenje odluke [81].

Herbert A. Simon, u svojoj knjizi, 1976. godine je u okviru koncepta ograničene racionalnosti pokazao da se u realnim sistemima odluke ne donose optimizacijom, već izborom zadovoljavajućih rešenja uslovljenih ograničenjima informacija, vremena i kognitivnih sposobnosti donosilaca odluka. Simonov pristup predstavlja važan teorijski most između normativnih modela racionalnog odlučivanja i empirijskih opažanja stvarnog ponašanja u inženjerskim i organizacionim sistemima [79].

Daniel Kahneman i Amos Tversky, godine 1979, su prikazali uticaj psiholoških faktora na donošenje odluka i dali su osnovu teorije očekivanog izbora. Teorija očekivanog izbora predstavlja kombinovanje težinskog koeficijenta odluke sa subjektivnom verovatnoćom. To je teorija koja svaku odluku postavlja kao nezavisan događaj [78].

Osnovni pojmovi

Odluka predstavlja izbor jedne alternative iz skupa raspoloživih mogućnosti, dok odlučivanje označava proces u kome se, na osnovu raspoloživih informacija, kriterijuma i preferencija, vrši izbor sa ciljem postizanja određenog ishoda.

Teorija odlučivanja rešava probleme odlučivanja i deli se na normativnu i deskriptivnu. Normativna teorija odlučivanja kazuje kako bi odluke trebalo da se donose (racionalno donošenje odluka), dok nam deskriptivna teorija kazuje kako se zaista donose odluke [77], [82]. U realnom svetu donosioci odluka koriste podatke koji su im potrebni, ali imaju i ogroman broj ograničavajućih faktora.

„Odluka predstavlja kombinaciju činjeničnog stanja i isto tako i subjektivnih okolnosti“ [78]. „Odlučivanje,..., predstavlja izbor između mogućih varijanti rešenja nekog problema. Donošenje odluke je završni čin procesa odlučivanja i njime se verifikuje sav obavljeni pripremni posao. Najznačajnija mera kvaliteta odluke je stepen dostizanja postavljenog cilja nakon njene realizacije [83].“

Alternativa predstavlja mogući pravac delovanja ili rešenje koje stoji na raspolaganju donosiocu odluke i koje se razmatra u procesu odlučivanja.

Kriterijum je merilo ili skup merila na osnovu kojih se alternative ocenjuju, upoređuju i rangiraju u procesu donošenja odluka.

Korisnost je najvažniji pojam teorije odlučivanja. Predstavlja numerički ili kvalitativni izraz stepena zadovoljstva ili koristi koju donosilac odluke pridružuje određenom ishodu ili alternativu.

Definicija.

Funkcija U koja numerički opisuje preferenciju između akcija naziva se funkcija korisnosti. Svaka funkcija korisnosti se može upoređivati sa drugom funkcijom korisnosti, isto tako i linearna transformacija funkcije korisnosti je takođe funkcija korisnosti. Bernoulli je dao ideju funkcije korisnosti. Paradoks Sant Petersburg je primer gde je predstavljena korisnost novčanih dobiti, ima nelinearnu (eksponencijalnu) funkciju oblika 2^x . Najčešće se kao funkcija korisnosti uzima logaritamska funkcija [81].

Posmatranje predstavlja skup informacija o stanju sistema, okruženju ili ishodima, koje donosilac odluke koristi u procesu procene alternativa. Kada se donosi odluka u teoriji odlučivanja, bira se omiljena akcija, odnosno ona akcija koja ima najveću moguću korisnost. Posle posmatranja se donosi odluka. Odluka jeste posledica posmatranja.

Definicija.

Posmatranje je (ne obavezno realna) slučajna promenljiva X koja svakom stanju s pridružuje opserviranu vrednost $X(s) = x$.

Relacija preferencije jeste sklonost prema nekom ili nečemu. Relacija preferencije definiše odnos između alternativa i izražava da li je jedna alternativa poželjnija, jednako poželjna ili manje poželjna u odnosu na drugu.

Definicija.

Relacija preferencije predstavlja davanje prednosti nekome ili nečemu, odnosno davanje prvenstva nekome ili nečemu.

Objektivna verovatnoća, zasniva se na mogućnosti neograničenog ponavljanja eksperimenta. Predstavlja verovatnoću događaja zasnovanu na statističkim podacima, frekvencijama ili zakonitostima koje su nezavisne od subjektivnog mišljenja donosioca odluke.

Subjektivna verovatnoća, predstavlja lično (subjektivno) uverenje (stav) pojedinca o mogućnosti da će se neki događaj realizovati [81]. Relacija upoređivanja događaja predstavlja relaciju verodostojnosti i razmatra se koji je događaj verovatniji da će se desiti. Aksiomske osnove subjektivne verovatnoće date su u dvadesetom veku, značajan doprinos je dao *L. J. Savage*. Izražava ličnu procenu donosioca odluke o verovatnoći nastanka nekog događaja, zasnovanu na iskustvu, znanju i raspoloživim informacijama.

Rizik se može definisati kao „*situacija donošenja odluka u uslovima merljive neizvesnosti* [78].“ Rizik predstavlja stanje odlučivanja u kome su ishodi neizvesni, ali su njihove verovatnoće poznate ili se mogu proceniti.

Ishod predstavlja rezultat primene izabrane alternative u određenim uslovima okruženja i ima direktan uticaj na vrednovanje donete odluke.

Proces odlučivanja zasniva se na izboru alternative iz skupa mogućih rešenja, alternative se ocenjuju prema definisanim kriterijumima i relacijama preferencije. Donosilac odluke raspolaže informacijama koje mogu biti potpune ili nepotpune, a odlučivanje se često odvija u uslovima rizika i neizvesnosti, gde objektivne i subjektivne verovatnoće imaju značajnu ulogu.

Korisnost i ishodi donetih odluka predstavljaju osnovu za vrednovanje izbora, dok subjektivna komponenta odlučivanja neizbežno utiče na proces procene.

U inženjerskim sistemima, a naročito u rudarstvu, odlučivanje se odvija u složenim uslovima koji zahtevaju struktuiran pristup, što dovodi do potrebe za formalnim metodama inženjerskog i višekriterijumskog odlučivanja.

4.2. Inženjersko odlučivanje

Za proces inženjerskog odlučivanja neophodno je jasno definisati stanje sistema i uslove u kojima se odluka donosi. U zavisnosti od količine i pouzdanosti raspoloživih informacija, odlučivanje se može odvijati u uslovima izvesnosti, rizika i neizvesnosti. U uslovima izvesnosti ishodi pojedinih alternativa su poznati, a njihova realizacija se može pouzdano predvideti. Odlučivanje u uslovima rizika podrazumeva postojanje više mogućih ishoda, verovatnoće ishoda su poznate ili se mogu proceniti na osnovu raspoloživih podataka. Nasuprot tome, u uslovima neizvesnosti nije moguće pouzdano odrediti ni ishode alternativa ni njihove verovatnoće, što značajno otežava racionalno vrednovanje odluka. U inženjerskoj praksi prisutan je i poseban oblik odlučivanja u uslovima ignorisanja, kada se relevantni signali i informacije zanemaruju, što može dovesti do negativnih tehničkih i ekonomskih posledica.

Rizik predstavlja situaciju u kojoj donosilac odluke ne može sa potpunom sigurnošću da predvidi ishod određene alternative, ali na osnovu dovoljne količine raspoloživih podataka može da proceni verovatnoću nastupanja budućeg događaja. Verovatnoća se u tom kontekstu može razmatrati kao subjektivna i objektivna. U praksi se proces odlučivanja najčešće zasniva na kombinaciji subjektivne i objektivne verovatnoće. Rizik se može definisati i kao poremećaj sistema ili nepredviđena promena ulaznih veličina, koja dovodi do promene izlaznih veličina sistema i utiče na ostvarenje planiranih ciljeva. U opštem slučaju, rizik se može kvantitativno predstaviti kao funkcija verovatnoće pojave rizičnog događaja i veličine njegovih posledica na sledeći način:

$$\text{Rizik} = f(\text{verovatnoća}, \text{posledica}) \quad (4.2)$$

$$\text{Faktor rizika} = P_f + C_f - P_f \cdot C_f \quad (4.3)$$

gde je: P_f – verovatnoća neuspeha; C_f – posledica neuspeha.

Obrazac (4.3) je deterministički model za procenu rizika [84].

Odlučivanje koje se zasniva na proceni rizika predstavlja pristup koji se sve češće primenjuje u savremenim inženjerskim i upravljačkim sistemima. Upravljanje rizikom, odnosno *"proces procene rizika je skup logičkih, sistemskih i dobro definisanih aktivnosti koje pružaju donosiocu odluka mogućnost identifikacije, merenja, kvantifikacije i evaluacije rizika povezanog sa određenim prirodnim fenomenima ili ljudskim aktivnostima [78], [85]."*

Iako se procena rizika zasniva na analitičkim i kvantitativnim postupcima, u procesu donošenja odluka značajnu ulogu ima i subjektivni faktor, koji se ogleda u interpretaciji raspoloživih informacija, vrednovanja posledica i proceni prihvatljivosti rizika. *"Koristeći raspoložive tehnike i analize u odabiru rizika donosilac odluka daje subjektivnu ocenu prilikom izbora kriterijuma, ali i odabira ishoda [78]."*

Odlučivanje se, prema dominantnim teorijskim pristupima, može podeliti na klasično i bihejviorističko. Klasično odlučivanje zasniva se na primeni matematičkih, statističkih i ekonomskih metoda, pretpostavlja se racionalno ponašanje donosioca odluka i postojanje potpunih informacija.

Nasuprot tome, bihejvioristički pristup oslanja se na saznanja filozofije, psihologije, sociologije, antropologije i političkih nauka. *"Donosioci odluka donose određene odluke u uslovima ograničene racionalnosti"* [79].

U skladu s tim, odluke se mogu klasifikovati na programirane i neprogramirane. Programirane odluke odnose se na situacije koje se ponavljaju i donose se prema unapred definisanim pravilima i procedurama, dok se neprogramirane odluke donose u novim, složenim i nedovoljno struktuiranim situacijama. Suprotno bihejviorističkom pristupu, kognitivni pristup pretpostavlja da je moguće meriti i analizirati mentalne procese, uključujući mišljenje, percepciju, emocije i ciljeve donosilaca odluka.

Odnos subjektivnih i objektivnih faktora u donošenju odluka u rudarstvu

Objektivni elementi predstavljaju osnovu procesa odlučivanja, ali sami po sebi nikada nisu dovoljni. U rudarstvu postoji veliki broj merljivih, objektivnih parametara kao što su: fizičko-mehaničke karakteristike stena, produktivnost mašina, pouzdanost i raspoloživost mehanizacije, troškovi eksploatacije i tehnički kapacitet mašina. Ovi podaci su temelj svih inženjerskih i ekonomskih analiza i predstavljaju polaznu osnovu za donošenje odluka. Međutim, objektivni pokazatelji retko mogu u potpunosti obuhvatiti kompleksnost realnih uslove eksploatacije. Geološka građa ležišta je promenljiva, eksploatacioni uslovi se tokom vremena menjaju, dok tržišni i energetske faktori ostaju delimično nepredvidivi. Zbog toga se odluke u rudarstvu ne mogu donositi isključivo na osnovu objektivnih metrika, već zahtevaju uključivanje subjektivnih procena donosioca odluka, zasnovanih na iskustvu, stručnom znanju i proceni rizika.

Iskustvo inženjera i menadžera ima ključnu ulogu u procesu donošenja odluka u rudarstvu, naročito u uslovima neizvesnosti i promenljivih eksploatacionih okolnosti. Stručno znanje stečeno dugogodišnjim radom omogućava donosiocima odluka da prepoznaju obrasce ponašanja sistema koji nisu uvek vidljivi preko kvantitativnih pokazatelja i da pravilno tumače ograničene ili nepotpune informacije. Upravo na osnovu iskustva se vrši procena realne primenljivosti analitičkih modela i rezultata dobijenih matematičko-statističkim metodama.

Upravljačke odluke u rudarstvu često podrazumevaju usklađivanje tehničkih, organizacionih i ekonomskih zahteva, moraju se uzeti u obzir i dugoročne posledice po bezbednost, pouzdanost sistema i kontinuitet proizvodnje. U takvim uslovima, iskustvo omogućava balansiranje između objektivnih pokazatelja i subjektivnih procena, čime se smanjuje rizik donošenja neadekvatnih odluka. Zbog toga se savremeni pristupi odlučivanju sve češće zasnivaju na integraciji objektivnih podataka sa stručno zasnovanim subjektivnim ocenama, što predstavlja osnovu višekriterijumskog i višeekspertske odlučivanja.

Subjektivnost ima značajnu ulogu u proceni rizika i određivanju težinskih faktora u procesu odlučivanja. Čak i kada se primenjuju formalizovane metode višekriterijumskog odlučivanja, kao što su AHP, TOPSIS, PROMETHEE i VIKOR i fazi modeli, težinski faktori u najvećem broju slučajeva se određuju na osnovu ekspertske procena. Subjektivna komponenta prisutna je pri oceni značajnosti kriterijuma, proceni rizika, predviđanja budućih uslova eksploatacije i u interpretaciji podataka zasnovanoj na iskustvu inženjera i terenskih stručnjaka. Iako je subjektivnost neizbežna, u dobro koncipiranim modelima odlučivanja, ona je kontrolisana, sistematizovana i transparentna.

U praksi rudarstva, odluke se najčešće donose uz približan odnos subjektivnih i objektivnih elemenata od 20-30% prema 70-80%. Objektivni elementi obuhvataju merljive tehničke pokazatelje i ekonomske parametre, dok se subjektivna procena odnosi na ekspertske sudove, iskustvena znanja i procenu rizika. Optimalno donošenje odluka postiže se kombinovanjem pouzdanih objektivnih podataka i stručne interpretacije zasnovane na iskustvu.

Zašto subjektivnost ostaje važna u rudarstvu

Ne postoji model koji može u potpunosti da opiše sve aspekte rudarskog sistema, kao što su nepoznate karakteristike ležišta na većim dubinama, buduća dinamika otkopavanja, promene cena energenata i materijala i specifičnosti lokacije ležišta (nagib terena, stabilnost kosina, prisustvo podzemnih voda), ali ni ljudskog faktora i organizacije rada. Zbog toga subjektivnost u rudarstvu ne predstavlja slabost, već sastavni deo upravljanja rizikom.

Subjektivnost se ne može u potpunosti eliminisati, ali se može sistematski kontrolisati; njen uticaj je moguće strukturirati kroz organizovane ekspertske procene, kvantifikovati primenom fazi logike i srodnih metoda i umanjiti uvođenjem jasno definisanih kriterijuma i pouzdanih podataka. Subjektivna komponenta postaje transparentan i deo procesa odlučivanja kojim se može upravljati, umesto izvora nekontrolisane neizvesnosti. U nekim okolnostima na osnovu planova, kroz inženjerske odluke (subjektivnost) se definiše različitost značaja nekih aktivnosti ili parametara kako bi se postigli dugoročni ciljevi.

4.3. Višekriterijumsko odlučivanje

U realnim inženjerskim i rudarskim problemima odlučivanje se retko zasniva na jednom kriterijumu. Donosioci odluka se najčešće suočavaju sa potrebom da istovremeno razmatraju veći broj, često međusobno suprotstavljenih kriterijuma, kao što su tehnički, ekonomski, bezbednosni, eksploatacioni i ekološki zahtevi. U takvim uslovima, klasični jedno-kriterijumski pristupi nisu dovoljni za donošenje racionalnih i održivih odluka.

Višekriterijumsko odlučivanje (VKO) predstavlja skup metoda i postupaka koji omogućavaju sistematsko razmatranje više kriterijuma, uz istovremeno uvažavanje kako objektivnih podataka, tako i subjektivnih procena donosilaca odluka i eksperata. Poseban značaj ovih metoda ogleda se u mogućnosti struktuiranja problema, definisanja kriterijuma i alternativa i kvantifikovanja relativnog značaja pojedinih kriterijuma. Time se subjektivna komponenta odlučivanja čini transparentnom, kontrolisanom i metodološki opravdanom, što je od posebnog značaja u rudarstvu, gde odluke imaju dugoročne tehničke i ekonomske posledice i donose se u uslovima izražene neizvesnosti.

Teorija odlučivanja, kao naučna disciplina i višekriterijumsko odlučivanje kao njen sastavni deo, intenzivno su se razvijali i afirmisali tokom druge polovine prošlog veka. Razvoj složenih tehničkih sistema i potreba za racionalnim izborom u uslovima postojanja više, često međusobno konfliktnih kriterijuma, uslovili su nastanak velikog broja višekriterijumskih metoda odlučivanja. U literaturi postoji više podela ovih metoda, najviše je prihvaćena podela na:

- ✓ Metode višeatributivnog odlučivanja (MADM – engl. *Multi-Attribute Decision Making*) i
- ✓ Metode višeeobjektnog odlučivanja (MODM – engl. *Multi-Objective Decision Making*).

U literaturi se višekriterijumsko odlučivanje klasifikuje na više načina. Jedna od najčešće prihvaćenih podela zasniva se na prirodi skupa alternativa, prema kojoj se razlikuju problemi sa diskretnim MCDM (engl. *Discrete MCDM Methods*) i neprekidnim (engl. *Continuous MCDM Methods*) skupom alternativa. Diskretni višekriterijumski problemi obuhvataju konačan broj unapred definisanih alternativa, dok se kod neprekidnih odluka donosi optimizacijom više kriterijuma u kontinuiranom prostoru odlučivanja. U literaturi se ova podela često povezuje sa terminima MADM i MODM, u ovom radu se koristi terminologija diskretne i kontinuirane MCDM metode.

Višekriterijumske metode se dele na dve osnovne grupe, na osnovu radova autora [86], [87] i [88]:

- ✓ Diskretni tipovi MCDM (engl. *Discrete MCDM Methods*) problem se zasniva na konačnom broju alternativa i na familiji mera izvođenja koje su namenjene ocenjivanju alternativa. Diskretne metode se dalje dele na:
 - Metode višeg ranga (engl. *Outranking Methods*): ELECTRE, PROMETHEE³, AHP⁴ i ostale metode (poređenje alternativa, metode koje uključuju rastojanje od idealne alternative – TOPSIS, metode permutacije),

³ PROMETHEE metoda je klasična metoda višeg ranga (engl. *Outranking methods*). Kao takva se zasniva na parnim poređenjima, uvodi relacije preferiranja, indiferencije i neuporedivosti, ne traži kompenzaciju u punom smislu i ne zahteva potpuno ordinalnu ili kardinalnu skalu.

- Ordinalne metode (engl. *Ordinal Methods*) – leksikografska metode,
 - Težinske metode (engl. *Weighting Methods*),
 - Višeatributivne metode korisnosti (engl. *Multi-Attribute Utility Based Methods*);
- ✓ Nепrekidne MCDM metode (engl. *Continuous MCDM Methods*), višekriterijumske metode optimizacije, koje koriste linearno programiranje za minimizaciju ili maksimizaciju jedne funkcije cilja, dok se dodatni ciljevi su uglavnom posmatraju kao ograničenja. Definisana je oblast izvodljivosti a broj alternativa je beskonačan.

Među diskretnim višekriterijumskim metodama izdvajaju se metode zasnovane na konceptu višeg ranga, kao što je PROMETHEE metoda, koje se zasnivaju na uspostavljanju relacije dominacije između alternativa. Metoda AHP iako koristi parna poređenja i formiranje relacije preferencije, zasniva se na kompenzacionom modelu agregacije i često se klasifikuje kao metoda ponderisanog rangiranja, ali se u praksi koristi zajedno sa metodama zasnovanim na višem rangu zbog sličnosti u postupku evaluacije.

Sa aspekta dostupnosti informacija, višekriterijumski problemi odlučivanja mogu se razmatrati u uslovima izvesnosti, rizika i neizvesnosti. U rudarstvu, zbog promenljivih geoloških uslova, dugoročnog planiranja i složenih tehničkih sistema, odlučivanje se najčešće odvija u uslovima rizika i delimične neizvesnosti, što dodatno naglašava značaj višekriterijumskih metoda i ekspertskih procena [89], [90]. Proces odlučivanja je sistematičan, racionalan i misaoni proces izbora najboljeg smera delovanja između više dostupnih alternativa, na osnovu većeg broja najčešće konfliktnih kriterijuma i predstavlja višekriterijumsko odlučivanje [91], [92], [93]. Čovek rešava probleme različite složenosti. Imajući u vidu da za većinu problema postoji više rešenja, potrebno je analizirati veći broj rešenja i izvršiti izbor najsvrsishodnijeg [93], [94]. Uopšteno, proces odlučivanja može se podeliti u četiri osnovne faze: identifikaciju i definisanje problema, određivanje skupa alternativnih rešenja, definisanje kriterijuma za vrednovanje alternativa i konačno vrednovanje i izbor optimalne alternative [93]. Rešavanje višekriterijumskih problema podrazumeva istovremeno razmatranje i sukobljavanje međusobno konfliktnih kriterijuma, a donosilac odluke mora da izvrši izbor na osnovu unapred definisanog skupa kriterijuma.

U takvim uslovima ne postoji rešenje koje je optimalno prema svim kriterijumima, već se odluka donosi kao kompromis između suprotstavljenih zahteva, u skladu sa ciljevima sistema i preferencijama donosioca odluke. Najznačajnija svojstva koja karakterišu višekriterijumsko odlučivanje su: alternative, višestruki kriterijumi u hijerarhiji i konflikt kriterijuma, hibridna struktura i neuporedivost jedinica, težine odluka, razmera i neodređenost [95].

U višekriterijumskom odlučivanju ne postoji jedinstveno optimalno rešenje koje istovremeno maksimizira sve kriterijume. Zbog konfliktnosti kriterijuma, rešenja se najčešće posmatraju u smislu kompromisa. Kao jedno od osnovnih teorijskih polazišta uvodi se pojam Pareto optimalnosti, prema kojem je rešenje Pareto optimalno ukoliko nije moguće poboljšati vrednost nijednog kriterijuma a da se pritom ne pogorša vrednost bar jednog (nekog drugog) kriterijuma. Skup Pareto optimalnih rešenja predstavlja osnovu za dalje odlučivanje, konačan izbor zavisi od preferencija donosioca odluke i relativne važnosti pojedinih kriterijuma.

Višekriterijumske metode odlučivanja posebno su pogodne za primenu u rudarstvu, jer se problemi u ovoj oblasti odlikuju velikim brojem tehničkih, ekonomskih, bezbednosnih, eksploatacionih, organizacionih i ekoloških kriterijuma koji su često međusobno suprotstavljeni. Donošenje odluka u rudarstvu podrazumeva istovremeno razmatranje pouzdanosti i raspoloživosti mehanizacije, troškova, rizika, uticaja na životnu sredinu, bezbednosti rada i dugoročnih eksploatacionih efekata.

⁴AHP metoda se ponekad svrstava u (engl. *outranking-like methods*), ali nije klasična metoda višeg ranga, češće se klasifikuje kao *MADM* metoda zasnovana na poređenju. AHP metoda koristi parna poređenja, formira relaciju preferencije i stvara rang alternativa, međutim koristi potpuno kompenzacioni agregacioni model, zasniva se na sopstvenim vrednostima i rezultat metode je jedinstvena numerička vrednost korisnosti.

Zbog takve složenosti, klasični jedno-kriterijumski pristupi nisu dovoljni, te se primenjuju formalizovane višekriterijumske metode koje omogućavaju sistematičnu, transparentnu i analizu alternativa koja se može ponoviti, što predstavlja osnovu za metode koje su prikazane u poglavlju 4.4.

4.4. Višekriterijumske metode odlučivanja

Višekriterijumske metode odlučivanja predstavljaju formalizovane postupke koji omogućavaju sistematično vrednovanje i rangiranje alternativa u prisustvu većeg broja međusobno konfliktnih kriterijuma. Njihova osnovna uloga je da donosiocu odluke obezbede strukturu i transparentnost u procesu odlučivanja, posebno u složenim inženjerskim i rudarskim problemima gde se istovremeno razmatraju tehnički, eksploatacioni, organizacioni, ekonomski, bezbednosni i drugi aspekti. Različite višekriterijumske metode zasnivaju se na različitim teorijskim osnovama, poput ponderisanog rangiranja, relacije višeg ranga (engl. *Outranking*), udaljenosti od idealnog rešenja ili kompromisnog rešenja. Zbog svega navedenog njihov izbor zavisi od prirode problema, dostupnosti podataka i uloge subjektivne procene. U nastavku rada biće prikazane i analizirane najčešće korišćene metode višekriterijumskog odlučivanja primenjene za razvoj modela: AHP, PROMETHEE, TOPSIS i VIKOR.

4.4.1. AHP metoda

Metodu AHP – analitički hijerarhijski proces osmislio je *Thomas L. Saaty*, 1980. godine, postavljajući metodološku i matematičku osnovu. AHP predstavlja naučnu metodu za podršku odlučivanju, namenjenu kako pojedinačnim, tako i složenim problemima odlučivanja, sa ciljem donošenja racionalnih i argumentovanih odluka. Posebno je značajna u grupnom odlučivanju i u rešavanju konfliktnih situacija, jer omogućava struktuirano uključivanje različitih stavova i preferencija donosilaca odluka.

Osnovu AHP metode čini hijerarhijska struktura problema, koja se razlaže na nivoe cilja, kriterijuma, podkriterijuma i alternativa, cilj se ne poredi ni sa jednim drugim elementom hijerarhije. Elementi na istom hijerarhijskom nivou poredi se međusobno u parovima, uz dodeljivanje odgovarajućih preferencija, odnosno težina. Upravo u procesu dodeljivanja težina dolazi do izražaja kombinovanje objektivnih podataka i subjektivnog mišljenja donosilaca odluka, što AHP metodu izdvaja od mnogih drugih višekriterijumskih metoda.

Dodatna prednost AHP metode ogleda se u njenoj primeni u situacijama kada se značajni elementi teško kvantifikuju ili direktno poredi. Za poređenje elemenata koristi se Saaty-jeva skala vrednovanja, a dobijeni rezultati služe za formiranje matrice poređenja.

Na osnovu matrice poređenja određuje se sopstveni vektor, čijim se kriterijumima i alternativama dodeljuju težinski koeficijenti, koji izražavaju njihov relativni značaj u odnosu na postavljeni cilj. Na kraju postupka vrši se provera konzistentnosti donetih procena, primenom indeksa konzistentnosti i Saaty-jeve tabele slučajnih indeksa [96], [97], [98].

Prednosti AHP metode mogu se sistematizovati na sledeći način:

1. Integracija kvantitativnih i kvalitativnih kriterijuma

Osnovna prednost ove metode je mogućnost, kako kvantitativnog, tako i kvalitativnog opisivanja podataka, odnosno kriterijuma. Svrha AHP je u organizovanju ljudskih misli i procena za donošenje odluka [99], [100].

2. Hijerarhijska dekompozicija složenih problema

Kompleksni problemi sa više kriterijuma, vremenskih perioda odlučivanja i donosilaca odluka razlažu se na odgovarajući broj hijerarhijskih nivoa. Na svakom nivou vrši se dodela težina primenom matrice poređenja parova, nakon čega sledi postupak normalizacije težina. Dobijeni težinski koeficijenti koriste se za evaluaciju kriterijuma i alternativa na svim nivoima hijerarhijske strukture problema [97].

3. Efikasno rešavanje kompleksnih problema

Osnovna ideja AHP metode je da se kompleksni problemi mogu znatno efikasnije rešiti njihovom hijerarhijskom dekompozicijom [101].

4. Jednostavnost primene i kontrola konzistentnosti

AHP metoda je relativno jednostavna za razumevanje i praktičnu primenu, a istovremeno omogućava identifikaciju i kvantifikaciju nekonzistentnosti u procenama donosilaca odluka. Provera konzistentnosti predstavlja važnu prednost metode, jer doprinosi pouzdanosti i validnosti dobijenih rezultata.

Kao jedan od najznačajnijih nedostataka AHP metode navodi se mogućnost netranzitivnosti rangiranja dobijenog primenom metode, što u određenim slučajevima može dovesti do nelogičnih i kontradiktornih rezultata. Iako je princip poređenja parova intuitivan, dobijene težine ne moraju u potpunosti odražavati stvarne preferencije donosilaca odluka, naročito kada su procene opterećene subjektivnošću ili nedoslednošću u poređenjima, „za težine dobijene poređenjem parova, smatra se da ne iskazuju prave preferencije donosilaca odluka [93]“. Upravo iz navedenih razloga, u savremenim istraživanjima AHP metoda se često kombinuje sa drugim višekriterijumskim metodama, čime se ublažavaju njeni nedostaci i povećava pouzdanost konačnih odluka.

AHP metoda se zasniva na sledećim aksiomama:

Aksioma 1. (Aksioma recipročnosti)

„Ako je element A n puta značajniji od elementa B , tada je element B $1/n$ puta značajniji od elementa A .“

Aksioma 2. (Aksioma homogenosti)

„Poređenje ima smisla jedino ako su elementi uporedivi“.

Aksioma 3. (Aksioma zavisnosti)

„Dozvoljeno je poređenje među grupom elemenata jednog nivoa u odnosu na elemenat višeg nivoa, odnosno poređenja na nižem nivou zavise od elemenata višeg nivoa.“

Aksioma 4. (Aksioma očekivanja)

„Svaka promena u strukturi hijerarhije zahteva ponovno računanje prioriteta u novoj hijerarhiji“ [98], [102], [103].

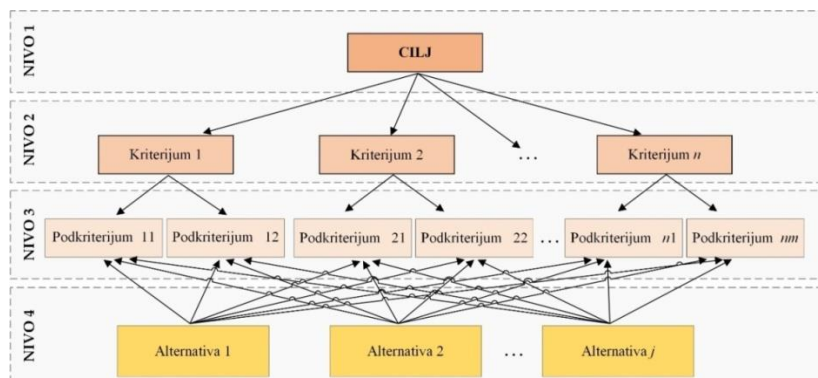
Na osnovu navedenih aksioma definišu se dva zadatka u AHP metodi:

1. Formulacija i rešavanje zadatka na osnovu hijerarhije, gde se koriste Aksiome 3 i 4.
2. Donošenje zaključaka na osnovu poređenja u parovima, gde se koriste Aksiome 1 i 2 [96].

Osnovni koraci pri korišćenju AHP metode su:

1. Hijerarhijski model – razvoj i definicija.
2. Prikupljanje i merenje podataka.
3. Procena težinskih faktora.
4. Analiza osetljivosti.

Na slici 4.1 je prikazana tipična šema AHP metode kroz četiri označena nivoa.



Slika 4.1. Hijerarhijska struktura problema (korak 1) [1], [104]

Definisanje cilja, kriterijuma, podkriterijuma i alternativa u izboru predstavljaju deo prvog koraka primene AHP metode odnosno kreiranje modela. Nakon toga se u okviru drugog koraka vrši prikupljanje podataka, merenja prema potrebi, sortiranje podataka, statistička obrada i sl. Zatim se vrši priprema podataka u skladu sa definisanom hijerarhijskom strukturom kreiranog modela u odnosu na kriterijume, podkriterijume odnosno alternative u izboru.

Treći korak podrazumeva procenu težinskih faktora koja se vrši u skladu sa tabelom *Saaty*-jeve skale vrednovanja prikazane u nastavku.

Tabela 4.1. Saaty-jeva skala vrednovanja (korak 3) [97]

Značaj	Definicija	Objašnjenje
1	Istog značaja	Dva elementa imaju identičan značaj u odnosu na cilj
3	Slaba dominantnost	Na osnovu rasuđivanja ili iskustva favorizuje se neznatno jedan element u odnosu na drugi
5	Jaka dominantnost	Na osnovu rasuđivanja ili iskustva favorizuje se znatno jedan element u odnosu na drugi
7	Demonstrirana dominantnost	Dominantnost jednog od elemenata je potvrđena u praksi
9	Apsolutna dominantnost	Dominantnost najvišeg stepena
2,4,6,8	Međuvrednosti	Potreban je kompromis ili dalja podela

Poslednji korak primene AHP metode je provera konzistentnosti donosioca odluka. Kada se ispituje konzistentnost u AHP metodi, ispituje se doslednost težinskih koeficijenata kriterijuma i odnosa u modelu. Velika prednost AHP metode je i mogućnost da se odmeri stepen nekonzistentnost i izvrši korekcija modela prema potrebama.

Nekonzistentnost smanjuje pouzdanost rezultata. AHP metoda nije previše osetljiva na greške u prosuđivanju, zbog redundantnosti poređenja u parovima [96]. Kako bi se izvršila provera konzistentnosti potrebno je da se odredi indeks konzistentnosti (engl. *Consistency Index* – *CI*) i stepen konzistentnosti (engl. *Consistency Ratio* – *CR*) [105], [106], [107]. Ukoliko je stepen konzistentnosti *CR* manji od 0,10 rezultat je tačan i nije potrebno vršiti korekcije u poređenjima ili u računu. Ukoliko je stepen konzistentnosti veći, potrebno je proučiti rezultate i utvrditi razloge nekonzistentnosti, pa ponoviti poređenja. U najgorem slučaju da ni prethodni postupak nije urodio plodom, postupak se ponavlja iz početka.

Stepen konzistentnosti (*CR*) se računa na sledeći način:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4.5)$$

Slučajni indeks (*RI*) zavisi od reda matrice poređenja (prva vrsta u tabeli 4.2).

Tabela 4.2. Vrednosti slučajnog indeksa (*RI*) u zavisnosti od broja elemenata (*n*)

<i>n</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<i>RI</i>	0,0	0,0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56	1,57	1,59

Indeks konzistentnosti (*CI*) se računa na sledeći način:

$$C.I. = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (4.6)$$

gde je λ_{max} najveća svojstvena vrednost matrice upoređivanja, odnosno ponderisana srednja vrednost koeficijenta λ_i izračunatog primenom jednačine (4.8), a *n* je broj alternativa ili kriterijuma koji se porede [85], [50].

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (4.7)$$

$$\lambda_i = \frac{\sum_{j=1}^n (a_{ij} \cdot W_j)}{W_i} \quad (4.8)$$

Linearna algebra - Matrice i determinante [108], [109]

Definicija 1.

Neka je F polje, $m, n \in \mathbb{N}$, te $D_{m,n} = \{1, 2, \dots, m\} \times \{1, 2, \dots, n\}$ Dekartov proizvod. Svako preslikavanje $A: D_{m,n} \rightarrow F$ naziva se matrica tipa $m \times n$ nad poljem F .

Elementi matrice A , koja ima n vrsta i m kolona, označavaju se sa α_{ij} , (element polja F pridružen paru (i, j) koja se u tablici nalazi u preseku i -te vrste i j -te kolone), a matrica $A = (\alpha_{ij})$, može se predstaviti u sledećem obliku:

$$A = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \cdots & \alpha_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{m1} & \cdots & \alpha_{mn} \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

Matrica koja ima jednak broj vrsta i kolona naziva se kvadratna matrica reda n . Za kvadratnu matricu može se definisati glavna dijagonala kao n -torka elemenata $(\alpha_{11}, \alpha_{22}, \dots, \alpha_{nn})$ za čije indekse važi da je $i = j$.

Jedinična matrica I je kvadratna matrica kod koje su svi elementi na glavnoj dijagonali jednaki 1, dok su ostali elementi jednaki 0. Matrica koja ima samo jednu kolonu, naziva se kolona matrica – vektor, a matrica koja ima samo jednu vrstu naziva se vrsta matrica.

Uređeni par matrica (A, B) gde je matrica A tipa $m \times n$, a matrica B tipa $p \times q$ se mogu množiti jedino ukoliko broj kolona matrice A jednak broju vrsta matrice B , odnosno $n = p$, drugim rečima matrice A i B su ulančane⁵ matrice.

Definicija 2.

Neka su $A = (\alpha_{ij})$ tipa $m \times n$ i $B = (\beta_{ij})$ tipa $p \times q$ dve ulančane matrice nad poljem F . Proizvod matrica A i B definiše se kao matrica $C = (\gamma_{ij})$ nad poljem F gde je

$$\gamma_{ij} = \sum_{k=1}^n \alpha_{ik} \beta_{jk} \quad (4.10)$$

za sve $i \in 1, \dots, m$, $j \in 1, \dots, q$. Matrica $C = AB$ je tipa $m \times q$. Ako matrice A i B nisu ulančane njihov proizvod nije definisan.

Definicija 3.

Za kvadratnu matricu $A = (\alpha_{ij})$ reda n nad poljem F determinanta matrice A označava se sa $\det(A)$ i definiše se kao

$$\det(A) = \sum_{p \in S_n} (-1)^{I(p)} \alpha_{1p(1)} \alpha_{2p(2)} \cdots \alpha_{np(n)} \quad (4.11)$$

gde se vrši sabiranje po svim permutacijama p skupa $\{1, \dots, n\}$ gde je $I(p)$ inverzija permutacije.

Ako se neka vrsta ili kolona matrice sastoji samo od nula, determinanta te matrice jednaka je nuli. Ako je A trougaona matrica (elementi iznad ili ispod glavne dijagonale jednaki su nuli), determinanta je jednaka proizvodu elemenata na glavnoj dijagonali.

Definicija 4.

Kvadratna matrica čija je determinanta različita od nule naziva se regularna. Singularna matrica je kvadratna matrica čija je determinanta jednaka nuli.

Ako se u matrici $A = (\alpha_{ij})$ tipa $m \times n$ proizvoljno ukloni nekoliko njenih vrsta i nekoliko kolona dobija se matrica koja predstavlja podmatricu matrice A . Matrica A ima rang k , gde je $k \leq \min\{m, n\}$ ako među kvadratnim podmatricama matrice A postoji barem jedna regularna podmatrica reda k , dok su sve kvadratne podmatrice reda većeg od k i ako postoje, singularne. Tada, važi: $r(A) = k$, gde je $r(A)$ oznaka za rang matrice A .

⁵Matrice A i B su ulančane matrice, ukoliko je broj kolona matrice A jednak broju vrsta matrice B .

Za određivanje ranga matrice koriste se elementarne transformacije. Postoje tri tipa elementarnih transformacija: zamena dve kolone (vrste), množenje neke kolone (vrste) matrice skalarom različitim od nule i dodavanje neke kolone (vrste) drugoj koloni (vrsti) te matrice.

Definicija 5.

Neka je $A = (a_{ij})$ kvadratna matrica reda n nad poljem F . Vektor $v \neq 0$ naziva se svojstveni vektor matrice A ako postoji skalar $\lambda \in F$ takav da važi

$$Av = \lambda v. \quad (4.12)$$

Skalar λ predstavlja svojstvenu vrednost matrice A koja pripada svojstvenom vektoru v . Gornja jednačina se svodi na rešavanje jednačine

$$(A - \lambda I) v = 0 \quad (4.13)$$

koja predstavlja matični oblik homogenog sistema jednačina sa n nepoznatih veličina $(v_1, v_2, \dots, v_n)$. Homogen sistem jednačina se može rešiti na više načina.

Teorema 1. (Croncker-Capelli-jeva teorema)

Neka je dat sistem S od ukupno m lineranih jednačina sa n nepoznatih.

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n &= b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n &= b_2 \\ &\dots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n &= b_m \end{aligned} \quad (4.14)$$

Matrica sistema S je matrica

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \quad (4.15)$$

Proširena matrica sistema S je matrica

$$A_p = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} & b_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} & b_m \end{pmatrix} \quad (4.16)$$

1) Sistem S je saglasan i ima jedinstveno rešenje akko $r(A) = r(A_p) = n$.

2) Sistem S je saglasan i ima beskonačno mnogo rešenja akko $r(A) = r(A_p) < n$.

3) Sistem S je protivrečan (nema rešenja) akko $r(A) \neq r(A_p)$.

Definicija 6.

Sistem S je homogen ukoliko je $b_1 = b_2 = \dots = b_m = 0$.

Teorema 2.

Ukoliko je sistem S homogen, tada važi:

1) Sistem S je saglasan i ima jedinstveno rešenje $(x, y, z) = (0, 0, 0)$ ako je rang $r(A) = n$.

2) Sistem S je saglasan i ima beskonačno mnogo rešenja ako je rang $r(A) < n$ [110].

Pozitivne recipročne matrice

Pozitivne recipročne matrice su našle svoju primenu kao matrice poređenja kriterijuma i alternativa u parovima [111].

Definicija 7.

Kvadratna matrica reda n zove se pozitivna recipročna matrica ako za sve $i, j \in 1, \dots, n$ važi:

$$\begin{aligned} (i) \quad & a_{ij} > 0 \\ (ii) \quad & a_{ii} = 1 \end{aligned} \quad (4.17)$$

$$(iii) \quad \alpha_{ij} = \frac{1}{\alpha_{ji}}, i \neq j.$$

Pozitivna recipročna matrica A reda n je konzistentna, u Saaty-jevom smislu, ako vredi:

$$\alpha_{ij} = \alpha_{ik} \cdot \alpha_{kj} \quad (4.18)$$

za sve $i, j, k \in 1, \dots, n$.

Teorema 3.

Za konzistentnu pozitivnu recipročnu matricu A reda n vredi:

$$\begin{aligned} (i) \quad & r(A) = 1 \\ (ii) \quad & \lambda_{\max} = n \\ (iii) \quad & \text{Ako svojstvenoj vrednosti } \lambda = n \text{ pripada svojstveni vektor } v = (v_1, v_2, \dots, v_n), \\ & \quad \alpha_{ij} = \frac{v_i}{v_j}. \end{aligned} \quad (4.19)$$

Dokaz.

Prvi deo dokaza:

Neka je $A = (\alpha_{ij})$ konzistentna pozitivna recipročna matrica:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \frac{1}{a_{2n}} & \cdots & 1 \end{pmatrix} \quad (4.20)$$

Elementarnim transformacijama nad matricom, odnosno množenjem prve vrste sa $\frac{-1}{\alpha_{1k}} = -\alpha_{k1}$ i dodavanjem k -toj vrsti (zbog $\alpha_{1k} = \frac{1}{\alpha_{k1}}$ i $\alpha_{kj} = \alpha_{k1} \cdot \alpha_{1j}$) za sve $k \in 2, \dots, n$, dobija se matrica:

$$\begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix} \quad (4.21)$$

Sve kvadratne podmatrice drugog reda pa do $(n-1)$ -matrice A singularne, sledi da je $r(A) = 1$.

Drugi deo dokaza izvodi se matematičkom indukcijom.

Neka je $M = \{k \in N : A \text{ je reda } k \text{ i } \lambda_{\max} = k\}$.

Pretpostavlja se da važi: $1 \in M : \det(A - \lambda I) = 0 \Rightarrow 1 - \lambda = 0 \Rightarrow \lambda = 1$. Sledi, $\lambda_{\max} = 1 \Rightarrow 1 \in M$.

Pretpostavlja se da važi $(n-1) \in M$.

Dokazuje se da važi: $n \in M : \det(A - \lambda I) = 0 \Rightarrow$

$$\begin{vmatrix} 1-\lambda & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \cdots & \alpha_{1n-1} & \alpha_{1n} \\ \frac{1}{\alpha_{12}} & 1-\lambda & \alpha_{23} & \cdots & \alpha_{2n-1} & \alpha_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \frac{1}{\alpha_{1n}} & \frac{1}{\alpha_{2n}} & \frac{1}{\alpha_{3n}} & \cdots & \frac{1}{\alpha_{n-1n}} & 1-\lambda \end{vmatrix} = 0. \quad (4.22)$$

Pošto je $\det(A - \lambda I) = 0$ elementarne transformacije nad matricom ne menjaju determinantu matrice. Elementarnim transformacijama dobija se donje trougaona matrica, matrica u kojoj su elementi iznad glavne dijagonale jednaki 0.

Ako se prva vrsta pomnoži elementom $-\alpha_{21} = -\frac{1}{\alpha_{12}}$ i doda drugoj vrsti, zatim prva vrsta pomnoži sa $-\alpha_{31} = -\frac{1}{\alpha_{13}}$ i doda trećoj vrsti, $\dots$, pa se prva vrsta pomnoži sa $-\alpha_{n-1,1} = -\frac{1}{\alpha_{1,n-1}}$ i doda $(n-1)$ -oj vrsti, dobija se matrica:

$$\begin{pmatrix} 1-\lambda & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \cdots & \alpha_{1n-1} & \alpha_{1n} \\ \frac{\lambda}{\alpha_{12}} & -\lambda & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \frac{1}{\alpha_{1n-1}} & 0 & 0 & \cdots & -\lambda & 0 \\ \frac{1}{\alpha_{1n}} & \frac{1}{\alpha_{2n}} & \frac{1}{\alpha_{3n}} & \cdots & \frac{1}{\alpha_{n-1n}} & 1-\lambda \end{pmatrix} \quad (4.23)$$

gde je $\alpha_{1k} = \frac{1}{\alpha_{k1}}$ i $\alpha_{kj} = \alpha_{k1} \cdot \alpha_{1j}$ za sve $k \in \{2, \dots, n-1\}$. Poslednja vrsta matrice pomnoži se sa $-\frac{\alpha_{1n}}{1-\lambda}$ i dodaje prvoj vrsti kako bi bio poništen element α_{1n} . Ostali elementi prve vrste kada im se doda poslednja vrsta matrice, na osnovu definicije 7, izgledaju ovako:

$$\alpha_{1k} - \frac{\alpha_{1n}}{(1-\lambda)\alpha_{kn}} = \alpha_{1k} - \frac{\alpha_{1n} \cdot \alpha_{nk}}{(1-\lambda)} = \alpha_{1k} - \frac{\alpha_{1k}}{(1-\lambda)} = -\frac{\alpha_{1k} \cdot \lambda}{(1-\lambda)} \quad \text{za sve } k \in \{2, \dots, n-1\},$$

i formiraju matricu:

$$\begin{pmatrix} 1-\lambda - \frac{1}{1-\lambda} & \frac{\alpha_{12} \cdot \lambda}{1-\lambda} & \frac{\alpha_{13} \cdot \lambda}{1-\lambda} & \cdots & \frac{\alpha_{1n} \cdot \lambda}{1-\lambda} & 0 \\ \frac{\lambda}{\alpha_{12}} & -\lambda & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \frac{1}{\alpha_{1n-1}} & 0 & 0 & \cdots & -\lambda & 0 \\ \frac{1}{\alpha_{1n}} & \frac{1}{\alpha_{2n}} & \frac{1}{\alpha_{3n}} & \cdots & \frac{1}{\alpha_{n-1n}} & 1-\lambda \end{pmatrix} \quad (4.24)$$

Postupak se ponavlja u 2, 3, ..., $(n-1)$ -oj vrsti. U k -toj vrsti su svi elementi osim prvog i elementa na glavnoj dijagonali $-\lambda$ jednaki 0. Ukoliko se pomnoži k -ta vrsta sa $-\frac{\alpha_{1k}}{1-\lambda}$, prvi elemenat postaje $-\frac{\lambda}{1-\lambda}$ te ga $(n-2)$ puta treba dodati prvom elementu prve vrste. Dobijena je matrica B, kao rezultat linearnih transformacija.

$$B = \begin{pmatrix} 1-\lambda - \frac{1}{1-\lambda} - \frac{(n-2) \cdot \lambda}{1-\lambda} & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \frac{\lambda}{\alpha_{12}} & -\lambda & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \frac{1}{\alpha_{1n-1}} & 0 & 0 & \cdots & -\lambda & 0 \\ \frac{1}{\alpha_{1n}} & \frac{1}{\alpha_{2n}} & \frac{1}{\alpha_{3n}} & \cdots & \frac{1}{\alpha_{n-1n}} & 1-\lambda \end{pmatrix} \quad (4.25)$$

Determinanta matrice B je jednaka proizvodu elemenata na glavnoj dijagonali.

$$\left(1-\lambda - \frac{1}{1-\lambda} - (n-2) \cdot \frac{\lambda}{1-\lambda}\right) \cdot (-\lambda)^{n-2} \cdot (1-\lambda) = 0 \quad (4.26)$$

$$(-\lambda)^{n-2} \cdot (1-\lambda)\lambda^{n-1} = 0 \quad \lambda_1, \dots, \lambda_{n-1} = 0, \lambda_n = n. \quad (4.27)$$

Sledi da je $\lambda_{max} = n \Rightarrow n \in M$.

Na osnovu koraka matematičke indukcije može se zaključiti da je $M = N$, to jest da važi za svaki prirodni broj n .

Sopstveni vektor (svojstveni vektor)

Neka svojstveni vektor $v = (v_1, v_2, \dots, v_n)$ pripada svojstvenoj vrednosti $\lambda = n$. Analognim transformacijama jednačina $(A - \lambda I) \cdot v = 0$, $B \cdot v = 0$ i zamenom $\lambda = n$, dobija se matični zapis:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \frac{n}{\alpha_{12}} & -n & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & \dots & -n & 0 \\ \frac{\alpha_{1n-1}}{1} & 1 & 1 & \dots & 1 & 1-n \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_{n-1} \\ v_n \end{pmatrix} \quad (4.28)$$

odnosno sistem jednačina:

$$\begin{aligned} \frac{n}{\alpha_{12}} v_1 - n v_2 &= 0 \Rightarrow \alpha_{12} = \frac{v_1}{v_2} \\ \frac{n}{\alpha_{13}} v_1 - n v_3 &= 0 \Rightarrow \alpha_{13} = \frac{v_1}{v_3} \\ &\vdots \\ \frac{n}{\alpha_{1n-1}} v_1 - n v_{n-1} &= 0 \Rightarrow \alpha_{1n-1} = \frac{v_1}{v_{n-1}} \\ \frac{1}{\alpha_{1n}} v_1 + \frac{1}{\alpha_{2n}} v_2 + \dots + \frac{1}{\alpha_{n-1n}} v_{n-1} + (1-n)v_n &= 0 \end{aligned} \quad (4.29)$$

Ako se zameni $\alpha_{kn} = \alpha_{k1} \cdot \alpha_{1n} = \frac{\alpha_{1n}}{\alpha_{1k}} = \alpha_{1n} = \frac{v_k}{v_1}$ za svaki $k = 1, \dots, n-1$ u poslednju jednačinu dobija se:

$$\frac{n-1}{\alpha_{1n}} v_1 - (1-n)v_n = 0 \Rightarrow \alpha_{1n} = \frac{v_1}{v_n} \quad (4.30)$$

Na osnovu prethodnog izvođenja, dokaz je završen [108], [109]:

$$\alpha_{ij} = \alpha_{i1} \cdot \alpha_{1j} = \frac{\alpha_{1j}}{\alpha_{1i}} = \frac{\frac{v_j}{v_1}}{\frac{v_i}{v_1}} = \frac{v_j}{v_i} \quad (4.31)$$

Pozitivne recipročne matrice daju uvid u poređenja kriterijuma i alternativa gde je donosilac odluke u potpunosti konzistentan. „U tom slučaju takve matrice imaju jedinstvenu svojstvenu vrednost koja je jednaka redu matrice. Svako odstupanje od konzistencije utiče na promenu svojstvenih vrednosti koje služi kao sugestija donosiocu odluke da preispita svoje preferencije [111].“

Zahvaljujući svojstvima pozitivnih recipročnih matrica, prema *Perron-Frobenius* teoremi, postoji jedinstvena pozitivna dominantna sopstvena vrednost, čime je obezbeđena stabilnost i interpretabilnost vektora prioriteta. Primena *Perron-Frobenius* teoreme na pozitivne recipročne matrice poređenja obezbeđuje postojanje i jedinstvenost glavne sopstvene vrednosti i odgovarajućeg pozitivnog sopstvenog vektora, koji se u AHP metodi tumači kao vektor relativnih prioriteta. Što znači da za pozitivne recipročne matrice poređenja, postoji jedinstvena dominantna sopstvena vrednost sa pripadajućim sopstvenim vektorom, što omogućava jednoznačno određivanje vektora prioriteta u AHP metodi [97].

Prikazane matematičke osnove AHP metode obezbeđuju teorijski okvir za dalju primenu metode u složenim inženjerskim problemima. Poseban značaj imaju svojstva pozitivnih recipročnih matrica i analiza konzistentnosti, koje omogućavaju pozitivno rangiranje alternativa. U narednim poglavljima ove osobine AHP metode biće korišćene kao osnova za razvoj hibridnih modela odlučivanja.

4.4.2. PROMETHEE metoda

PROMETHEE metoda je jedna od najpoznatijih metoda višekriterijumskog odlučivanja zasnovana na relaciji nadređenosti (engl. *outranking*), koja je razvijena početkom osamdesetih godina prošlog veka. Metoda je namenjena rangiranju konačnog skupa diskretnih alternativa, na osnovu kriterijuma koji su često konfliktni, uz eksplicitno uvažavanje preferencija donosilaca odluka. Za razliku od metoda koje se zasnivaju na agregaciji kriterijuma u jednu ukupnu meru korisnosti, PROMETHEE metoda se temelji na parcijalnim poređenjima alternativa po svakom kriterijumu posebno. Na osnovu tih poređenja formira se relacija preferencije, kojom se procenjuje stepen u kome je jedna alternativa preferirana u odnosu na drugu.

PROMETHEE metodu (PROMETHEE I – parcijalno rangiranje i PROMETHEE II – potpuno rangiranje) razvio je *Jean-Pierre Brans* 1982. godine. Nekoliko godina kasnije, *Brans* i *B. Mareschal* proširili su osnovnu metodologiju razvojem dodatnih varijanti: PROMETHEE III, koja omogućava rangiranje alternativa na osnovu intervala preferencije i PROMETHEE IV, namenjenu rangiranju u slučaju kontinuiranog skupa alternativa.

Tokom 1990-tih godina razvijene su i dodatne verzije metode: PROMETHEE V, koja omogućava uvođenje ograničenja u proces odlučivanja i PROMETHEE VI, namenjena analizi stabilnosti i uključivanju dodatnih informacija u rešavanje višekriterijumskih problema. PROMETHEE metoda je široko rasprostranjena zahvaljujući relativnoj jednostavnosti primene i jasnoći interpretacije rezultata [112], [113], [114]. Metoda omogućava agregaciju kako kvalitativnih, tako i kvantitativnih kriterijuma različitog značaja, PROMETHEE I obezbeđuje parcijalno rangiranje alternativa, dok PROMETHEE II daje potpuno rangiranje na osnovu neto tokova preferencije.

Kako bi se subjektivne preferencije donosilaca odluka učinile operativnim i uporedivim, PROMETHEE metoda ih formalizuje kroz jasno definisan matematički aparat. Matematička osnova metode zasniva se na funkcijama preferencije, težinskim koeficijentima kriterijuma i tokovima preferencije, koji omogućavaju kvantifikaciju odnosa dominacije između alternativa. Kvalitativne procene i ekspertske preferencije se transformišu u numeričke pokazatelje, što omogućava transparentno, dosledno i reproduktivno rangiranje alternativa.

Osnovni koraci pri korišćenju PROMETHEE metode su:

1. Definisanje tipa parametara i težina.
2. Određivanje funkcija preferencija.
3. Određivanje indeksa preferencija.
4. Računanje ukupnog indeksa performansi.
5. Određivanje čistih tokova alternativa i njihovo rangiranje prema veličini.

PROMETHEE metoda se primenjuje na konačnom skupu alternativa. Za svaku kombinaciju dveju alternativa i za svaki kriterijum definiše se funkcija preferencije koja izražava intenzitet preferencije alternative a u odnosu na alternativu b . Vrednost funkcije preferencije je u intervalu $[0,1]$, gde vrednost 0 označava odsustvo preferencije, dok vrednost 1 označava strogu preferenciju. Metoda se bazira na šest različitih kriterijumskih funkcija, na osnovu kojih se uvodi matematička relacija za rangiranje. Funkcija preferencije $P(a,b)$ se uvodi za alternative a i b , koje su vrednovane kriterijumskim funkcijama. Funkcija preferencije glasi:

$$P(a,b) = \begin{cases} 0, & \text{ako } f(a) \leq f(b) \\ P(f(a) - f(b)), & \text{ako } f(a) > f(b) \end{cases} \quad (4.32)$$

Razmatra se višekriterijumski problem čije se alternative i kriterijumi nalaze u matrici odlučivanja. Potrebno je definisati parametre i težine kriterijuma. Svakom kriterijumu je potrebno dodeliti odgovarajuću težinu w_j .

Poredi se svaki par alternativa na osnovu izabranih kriterijuma, pa se potom vrši dodela preferencija. Donosilac odluke razmatra ponaosob svaki kriterijum i odgovarajuću funkciju preferencije. PROMETHEE metoda omogućava korišćenje različitih tipova funkcija preferencije, čime se prilagođava prirodi kriterijuma i načinu na koji donosilac odluke percipira razlike između alternativa. Funkcije preferencije su:

$$P(a, b) = \begin{cases} 0, & \text{if } d \leq 0 \\ 1, & \text{if } d > 0 \end{cases} \text{ (uobičajen oblik I)} \quad (4.33)$$

$$P(a, b) = \begin{cases} 0, & \text{if } d \leq q \\ 1, & \text{if } d > q \end{cases} \text{ (U-oblik II)} \quad (4.34)$$

$$P(a, b) = \begin{cases} 0, & \text{if } d \leq q \\ \frac{d-q}{p-q}, & \text{if } q < d \leq p \\ 1, & \text{if } d > p \end{cases} \text{ (V-oblik III)} \quad (4.35)$$

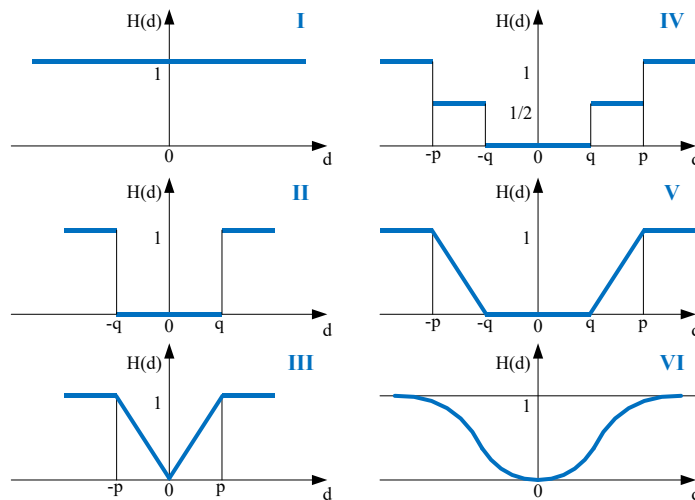
$$P(a, b) = \begin{cases} 0, & \text{if } d \leq q \\ 1/2, & \text{if } q < d \leq p \\ 1, & \text{if } d > p \end{cases} \text{ (oblik IV)} \quad (4.36)$$

$$P(a, b) = \begin{cases} 0, & \text{if } d \leq q \\ (d-q)/(p-q), & \text{if } q < d \leq p \\ 1, & \text{if } d > p \end{cases} \quad (4.37)$$

(linearni oblik sa indiferentnim oblastima V)

$$P(a, b) = \begin{cases} 0, & \text{if } d \leq q \\ 1 - e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}}, & \text{if } d > q \end{cases} \text{ (Gausov ob. VI)} \quad (4.38)$$

Gde p predstavlja najmanje odstupanje dve ocenjivane alternative, koje treba smatrati značajnim, a q je najveće moguće odstupanje. Parametar σ predstavlja Gausov prag značajnosti i odstupanje između dve ocenjivane alternative koje se smatraju sredeim stepenom preferencije. Funkcije preferencije su prikazane na slici 4.2.



Slika 4.2. Funkcije preferencije PROMETHEE metode [88]

Višekriterijumski koeficijent preferencije alternative a nad alternativom b je:

$$\prod(a, b) = \sum_{i=1}^n w_i P_i(a, b) \quad (4.39)$$

gde su: n – broj kriterijuma, w_i – težina i -tog kriterijuma.

Normalizacija težina je data sledećom formulom:

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (4.40)$$

gde je w_i – težina i -tog kriterijuma.

Na osnovu parcijalnih preferencija po svim kriterijumima formira se agregirani indeks preferencije, koji predstavlja meru u kojoj je jedna alternativa globalno preferirana u odnosu na drugu. Iz agregiranih indeksa određuju se pozitivni, negativni i neto tokovi preferencije, koji čine osnovu za rangiranje alternativa. PROMETHEE I obezbeđuje parcijalno rangiranje alternativa, moguće su situacije neuporedivosti. PROMETHEE II daje potpuno rangiranje alternativa na osnovu neto toka preferencije, što ga čini pogodnim za praktičnu primenu u inženjerskim problemima. Tokovi preferencije su:

$$\varphi^+(a_j) = \sum_{m=1}^j \prod(a_j, a_m) \quad (4.41)$$

$$\varphi^-(a_j) = \sum_{m=1}^j \prod(a_m, a_j) \quad (4.42)$$

Neto tok:

$$\varphi_j(a_j) = \varphi^+(a_j) - \varphi^-(a_j), \quad j = 1, \dots, J \quad (4.43)$$

gde je J – broj alternativa. Ako važi da $\varphi_j > \varphi_k$, u tom slučaju je alternativa a_j multikriterijumski bolja od alternative a_k .

Matematička formulacija PROMETHEE metode omogućava sistematsko uvažavanje preferencija donosilaca odluka kroz definisane funkcije preferencije i tokove, čime se obezbeđuje transparentno i fleksibilno rangiranje alternativa u uslovima višekriterijumskog odlučivanja.

Prednosti PROMETHEE metode su: jasna interpretacija, fleksibilnost ostvarena kroz funkcije preferencije i dobra primena u realnim sistemima (rudarska mehanizacija).

Nedostaci PROMETHEE metode su: subjektivnost u izboru funkcije preferencije, zavisnost od težina kriterijuma i moguća osetljivost rezultata.

Efikasnost primene PROMETHEE metode u velikoj meri zavisi od sposobnosti i iskustva donosilaca odluka da jasno i konzistentno izraze svoje preferencije između posmatranih alternativai da pravilno procene relativnu važnost kriterijuma. Pored toga, uspešna primena metode zahteva sposobnost donosilaca odluka da u proces odlučivanja identifikuju i uključe sve relevantne kriterijume, kako bi se postigao uravnotežen i prihvatljiv kompromis između često konfliktnih zahteva analiziranih kriterijuma [115].

Poređenje AHP i PROMETHEE metoda

AHP i PROMETHEE spadaju u najčešće korišćene metode višekriterijumskog odlučivanja, ali se zasnivaju na različitim filozofijama odlučivanja i imaju različite oblasti primene. AHP metoda se zasniva na hijerarhijskoj dekompoziciji problema i poređenja elemenata u parovima. Donosilac odluke izražava preferencije koristeći Saaty-jevu skalu, procene se prevode u težinske koeficijente.

Prednost AHP metode je u njenoj intuitivnosti, transparentnosti i mogućnosti kombinovanja kvantitativnih i kvalitativnih kriterijuma, kao i u proveri konzistentnosti procena. Zbog toga je posebno pogodna u situacijama kada problem ima jasnu hijerarhijsku strukturu i kada je neophodno uključiti subjektivno znanje i iskustvo eksperata.

PROMETHEE metoda, sa druge strane, pripada grupi metoda nadržavanja. Ona ne zahteva hijerarhijsku strukturu problema, već se zasniva na direktnom poređenju alternativa po kriterijumima uz primenu funkcija preferencije. PROMETHEE metoda omogućava fleksibilno modelovanje preferencija, jasno razdvajanje pozitivnih i negativnih tokova i obezbeđuje parcijalno (PROMETHEE I) ili potpuno rangiranje alternativa (PROMETHEE II).

Metoda je naročito pogodna za probleme sa većim brojem alternativa i kada se želi izbeći potpuna kompenzacija loših vrednosti pojedinih kriterijuma. U poređenju sa AHP metodom, PROMETHEE metoda je manje osetljiva na subjektivne nedoslednosti, ali zahteva pažljiv izbor funkcija preferencija i pragova. AHP je snažnija u fazi određivanja težina kriterijuma, dok je PROMETHEE izuzetno efikasna u rangiranju alternativa. U praksi se ove metode često kombinuju u hibridne modele, gde se AHP koristi za određivanje težina kriterijuma, a PROMETHEE za rangiranje alternativa, čime se postiže veća pouzdanost i robusnost rezultata, posebno u složenim industrijskim sistemima, kao što su rudarski sistemi.

4.4.3. TOPSIS metoda

Osnovna ideja TOPSIS metode zasniva se na izboru alternative koja je istovremeno najbliža idealnom rešenju i najudaljenija od anti-idealnog rešenja. Idealno rešenje predstavlja hipotetičku alternativu koja ima najbolje vrednosti svih kriterijuma, dok anti-idealno rešenje sadrži najgore vrednosti kriterijuma. Za razliku od metoda koje se zasnivaju na parcijalnom ili potpunom rangiranju na osnovu preferencijskih relacija, TOPSIS koristi geometrijski pristup merenja udaljenosti alternativa od referentnih tačaka u višedimenzionalnom prostoru kriterijuma. TOPSIS metoda je pogodna za rešavanje problema u kojima su kriterijumi međusobno konfliktne, različitih dimenzija i značaja, a vrednosti kriterijuma mogu biti izražene kvantitativno ili kvalitativno.

TOPSIS metoda pripada metodama višekriterijumskog odlučivanja i tokom poslednjih nekoliko decenija našla je široku primenu u različitim oblastima inženjerstva i upravljanja. Metodu karakteriše jednostavan matematički aparat i primena Euklidske geometrije za određivanje alternativa u prostoru kriterijuma. Sistematičan pregled i formalnu definiciju TOPSIS metode dali su Hwang C. L. i saradnici početkom osamdesetih godina prošlog veka, u radovima objavljenim 1981. i 1983-e godine.

TOPSIS metoda zasniva se na sledećem osnovnom principu: izabrana alternativa treba da ima najmanje rastojanje od pozitivnog idealnog rešenja i istovremeno najveće rastojanje od negativnog idealnog rešenja (anti-idealnog) rešenja [89], [90]. U geometrijskom smislu, na osnovu Euklidskog rastojanja, optimalna je ona alternativa koja se nalazi na najmanjoj udaljenosti od pozitivnog idealnog rešenja, a istovremeno na najvećoj udaljenosti od negativnog idealnog rešenja. Rangiranje alternativa se vrši prema stepenu njihove relativne bliskosti pozitivnom idealnom rešenju. Idealno rešenje definiše se posebno za svaki kriterijum. Pozitivno idealno rešenje formira se na osnovu najboljih vrednosti rejtinga alternativa, dok negativno idealno rešenje obuhvata najgore vrednosti kriterijuma. U zavisnosti od prirode kriterijuma, odnosno da li se kriterijum odnosi na minimum ili maksimum, za svaki kriterijum pojedinačno određuju se njegove optimalne i nepovoljne vrednosti [59], [116].

Euklidska geometrija

Euklid je svoju čuvenu knjigu Elementi napisao oko 300 godina p.n.e. To je prvo delo u kojem je na sistematičan način izloženo i objedinjeno znanje svih njegovih prethodnika iz oblasti geometrije. Od tog doba pa do današnjih dana, postala je nezaobilazni udžbenik. Ali i mnogo više od toga. „Postaje uzor egzaktnosti i elegancije za sve druge nauke, paradigma toga šta naučno znanje treba da bude. Taj zavidni položaj ovaj naučni sistem zadobija univerzalnošću i strogošću svojih zakona koji su apsolutni, u smislu da nisu nikad aproksimacija, koji su strogo deduktivno dokazani pa je njihova istinitost zajamčena logičkom nužnošću izvođenja [117].“ Ovakav stav nije dovođen u pitanje sve do 19. veka [117]. Još su stari Grci zapazili da peti postulat odudara od ostalih postulata i aksioma, zato što je peti postulat manje očigledan od ostalih postulata. Originalno Euklidov peti postulat glasi: „Ako jedna prava linija seče druge dve prave linije tako da je zbir dva unutrašnja ugla na jednoj strani manji od druga dva prava ugla, onda se te dve prave linije, ako se dovoljno produže, seku na istoj strani prave linije na kojoj se nalaze ti uglovi [118]“.

Tokom istorije razvijene su i druge ekvivalentne formulacije ovog postulata, među kojima je i Plejferova aksioma: „Iz jedne tačke van date prave može se povući jedna i samo jedna prava paralelna sa datom pravom“. Takođe sa petim postulatom su ekvivalentne i tvrdnje: „Zbir uglova u trouglu jednak je dvama pravim uglovima“ ili „Za bilo koje tri nekolinearne tačke koje leže u istoj ravni, postoji jedan i samo jedan krug koji ih sadrži [117]“.

Euklidska geometrija predstavlja temelj klasičnog shvatanja prostora i udaljenosti između tačaka. U tom okviru, rastojanje između dve tačke definisano je kao najkraća linija koja ih povezuje, odnosno duž, čija se dužina određuje primenom Euklidske metrike. Upravo ovaj koncept rastojanja ima ključnu ulogu u TOPSIS metodi, gde se svaka alternativa posmatra kao tačka u višedimenzionalnom prostoru kriterijuma, a Euklidsko rastojanje se koristi za kvantifikovanje njene blizine idealnom i anti-idealnom rešenju. Apstraktni geometrijski principi Euklida nalaze svoju savremenu primenu u višekriterijumskom odlučivanju, omogućavajući objektivno poređenje i rangiranje alternativa na osnovu njihove prostorne udaljenosti u kriterijumskom prostoru.

Definicija.

Euklidska udaljenost između tačaka P i Q je dužina segmenta prave koja ih povezuje $\overline{PQ}$. U Dekartovim koordinatama, ako su $P(p_1, p_2, \dots, p_n)$ i $Q(q_1, q_2, \dots, q_n)$ dve tačke Euklidskog n -prostora onda je udaljenost d od P do Q ili od Q do P data pomoću Pitagorine formule:

$$d(P, Q) = d(Q, P) = \sqrt{(q_1 - p_1)^2 + (q_2 - p_2)^2 + \dots + (q_n - p_n)^2} \quad (4.44)$$

$$d(P, Q) = d(Q, P) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (q_i - p_i)^2} \quad (4.45)$$

Položaj tačke u Euklidskom prostoru je vektor, to jest p i q su Euklidski vektori, a Euklidova norma ili Euklidska udaljenost je dužina vektora [119].

Jednodimenzionalna udaljenost - Udaljenost između dve tačke na realnoj pravoj je apsolutna vrednost njihove numeričke razlike. Ako su X i Y dve tačke, udaljenost između njih je:

$$\sqrt{(x - y)^2} = |x - y| \quad (4.46)$$

Osnovni koraci pri korišćenju TOPSIS metode su:

1. Normalizovanje matrice odlučivanja.
2. Računanje težinske normalizovane matrice odlučivanja.
3. Određivanje idealnih rešenja.
4. Određivanje rastojanja alternativa od idealnih rešenja.
5. Određivanje relativne blizine alternativa idealnom rešenju.
6. Rangiranje alternativa.

Neka je dato m alternativa $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ od kojih svaka zavisi od n parametara, koji čine skup kriterijuma $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$. Matrica odlučivanja sastoji se od elemenata (x_{ij}) , gde element matrice predstavlja meru realizacije j -te alternative u odnosu na i -ti kriterijum.

$$A = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix} \quad (4.47)$$

„Matrica odlučivanja A je matrica dimenzija $m \times n$, sa m alternativa (vrsta) i n kriterijuma (kolona). Dati element x_{ij} može biti: realan broj, interval, raspodela verovatnoća, kvalitativna vrednost [93], [120].“

Potrebno je normalizovati polaznu matricu zbog toga što brojne vrednosti elementa imaju različitu metriku. Koristi se sledeća formula:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}, \quad j=1, \dots, n \quad (4.48)$$

$W = \{W_1, W_2, \dots, W_n\}$ je skup težina svakog od n kriterijuma, pri čemu $\sum_{j=1}^n w_j = 1$. Normalizovana matrica je matrica bezdimenzionih veličina.

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mn} \end{pmatrix} \quad (4.49)$$

Težinska normalizovana matrica odlučivanja računa se prema:

$$v_{ij} = w_j r_{ij}, \quad i = 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, n \quad (4.50)$$

gde je w_{ij} težina j -og kriterijuma i $\sum_{j=1}^n w_j = 1$.

$$V = \begin{pmatrix} v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{m1} & v_{m2} & \cdots & v_{mn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_1 r_{11} & w_2 r_{12} & \cdots & w_n r_{1n} \\ w_1 r_{21} & w_2 r_{22} & \cdots & w_n r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_1 r_{m1} & w_2 r_{m2} & \cdots & w_n r_{mn} \end{pmatrix} \quad (4.51)$$

(A^*) predstavlja najbolju alternativu, idealno rešenje, a (A^-) idealno negativno rešenje, na osnovu sledećih formula:

$$\begin{aligned} A^* &= \left\{ \left(\max_i v_{ij} \mid j \in J^{max} \right), \left(\min_i v_{ij} \mid j \in J^{min} \right) \right\} = \{v_1^*, v_2^*, \dots, v_n^*\} \\ A^- &= \left\{ \left(\min_i v_{ij} \mid j \in J^{max} \right), \left(\max_i v_{ij} \mid j \in J^{min} \right) \right\} = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\} \\ i &= 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (4.52)$$

gde se J^{max} odnosi na kriterijume koji se maksimiziraju, a J^{min} na kriterijume koji se minimiziraju.

Odgovarajuće alternative su one koje imaju najveće vrednosti v_{ij} u odnosu na kriterijume koji se maksimiziraju i najmanje v_{ij} u odnosu na kriterijume koje minimiziraju. Kada se određuje rastojanje od idealnih rešenja, računaju se n -dimenziona Euklidska rastojanja svih alternativa od pozitivnog idealnog rešenja S_i^* i od negativnog idealnog rešenja S_i^- na osnovu sledećih relacija:

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^*)^2} \quad S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (4.53)$$

$i = 1, 2, \dots, m$.

Za svaku alternativu je potrebno odrediti relativno rastojanje RC_i od idealnog rešenja, na osnovu sledećeg obrasca:

$$RC_i = \frac{s_i^-}{s_i^* + s_i^-}, \quad (4.54)$$

gde je $0 \leq RC_i \leq 1$, a $i = 1, 2, \dots, m$.

Ukoliko je vrednost RC_i bliža 1, utoliko je alternativa A_i bliža idealnom rešenju. Rangiranjem alternativa se dobija opadajući niz vrednosti [89], [93].

Prednosti TOPSIS metode ogledaju se pre svega u njenoj jednostavnosti, transparentnosti i intuitivnom tumačenju rezultata. Metoda ima jasan matematički aparat i ne zahteva složene pretpostavke o raspodeli podataka. Omogućava istovremeno razmatranje većeg broja kriterijuma različitih dimenzija i jedinica mere, uz primenu normalizacije.

Posebna prednost TOPSIS metode je činjenica da uzima u obzir i najbolje i najgore rešenje, čime se alternativama dodeljuje relativni položaj u odnosu na ideal i anti-ideal. Metoda je pogodna za primenu u inženjerskim problemima, jer omogućava jasno rangiranje alternativa i laka je za implementaciju uz pomoć softverskih alata.

Osnovni nedostatak TOPSIS metode jeste zavisnost rezultata od izbora načina normalizacije i težinskih koeficijenata kriterijuma. Težine kriterijuma se često određuju subjektivno ili ekspertskom procenom, što može uticati na konačni rang alternativa. Takođe, TOPSIS ne uzima u obzir međusobne odnose i zavisnosti između kriterijuma, već pretpostavlja njihovu nezavisnost. Metoda ne razmatra eksplicitno nesigurnost i neizvesnost podataka, osim ako se ne primeni u kombinaciji sa fazi ili stohastičkim pristupima. Još jedan nedostatak je to što mala razlika u rastojanjima može dovesti do značajnih promena u rangiranju, naročito kada su alternative međusobno vrlo slične.

Poređenje TOPSIS metode sa drugim metodama

U poređenju sa AHP metodom, TOPSIS ne zahteva poređenje kriterijuma u parovima, čime se smanjuje subjektivno opterećenje donosilaca odluka. Za razliku od PROMETHEE metode, koja se zasniva na relacijama nadređenosti, TOPSIS koristi metrički pristup i omogućava direktno rangiranje alternativa. U odnosu na VIKOR metodu, koja teži kompromisnom rešenju, TOPSIS daje prednost alternativni sa optimalnim položajem u prostoru kriterijuma. Zbog toga se TOPSIS često koristi kao dopunska ili komparativna metoda u hibridnim modelima odlučivanja i u inženjerskim problemima.

TOPSIS metoda predstavlja jednu od najčešće primenjivanih tehnika višekriterijumskog odlučivanja zbog svoje jasnoće, matematičke utemeljenosti i praktične primenljivosti. Korišćenjem Euklidskog rastojanja omogućava geometrijsku interpretaciju problema odlučivanja, optimalna alternativa se definiše kao ona koja je istovremeno najbliža idealnom i najdalja od anti-idealnog rešenja.

4.4.4. VIKOR metoda

VIKOR metoda (VIšekriterijumska Optimizacija i Kompromisno Rešenje) predstavlja višekriterijumsku metodu odlučivanja namenjenu rešavanju problema sa konfliktnim kriterijumima, kod kojih ne postoji jedno rešenje koje je optimalno po svim kriterijumima istovremeno. Metodu su razvili S. Opricović i G. H. Tzeng početkom 2000-ih godina, sa ciljem da se donosiocu odluke omogući izbor kompromisnog rešenja koje je najbliže idealnom, uz uvažavanje stabilnosti odluke i prihvatljivosti rezultata. VIKOR metoda se zasniva na konceptu kompromisa, traži se alternativa koja obezbeđuje zadovoljavajuću ravnotežu između maksimalnog kolektivnog zadovoljavajućeg kriterijuma i minimalnog individualnog nezadovoljavajućeg kriterijuma.

VIKOR metoda je razvijena za rešavanje problema odlučivanja u raznorodnim i međusobno konfliktnim kriterijumima, polazi se od pretpostavke da je kompromisno rešenje prihvatljiv način razrešenja konflikta. Cilj metode je određivanje alternative koja je najbliža idealnom rešenju, uz istovremeno vrednovanje svih alternativa prema svim postavljenim kriterijumima.

VIKOR metoda predstavlja koristan alat za donošenje odluka, naročito u situacijama kada donosilac odluke ne može ili ne želi da eksplicitno definiše težinske koeficijente u matrici odlučivanja. Dobijeno kompromisno rešenje je prihvatljivo za donosioca odluke jer obezbeđuje maksimalnu ukupnu korist uz minimalno individualno nezadovoljstvo (žaljenje) po najnepovoljnijem kriterijumu [93], [121].

Osnovni koraci pri korišćenju VIKOR metode su:

1. Formiranje normalizovane matrice odlučivanja.
2. Formiranje težinski normalizovane matrice odlučivanja.
3. Računanje očekivane i pesimističke performanse.
4. Računanje ukupnog indeksa performansi.
5. Sortiranje vrednosti očekivanih, optimističkih i ukupnog indeksa performansi.
6. Određivanje kompromisnog rešenja.

Radi formalizacije postupka rangiranja alternativa i kvantifikacije kompromisnog rešenja, VIKOR metoda se oslanja na jasno definisanu osnovu. Nakon definisanja kriterijuma, alternativa i njihovih vrednosti, neophodno je uvesti mere odstupanja alternativa od idealnog rešenja. U tom kontekstu, u matematičkoj formulaciji VIKOR metode primenjuje se opšta metrika Minkovskog, koja omogućava objedinjeno sagledavanje ukupnog odstupanja po svim kriterijumima i maksimalnog pojedinačnog odstupanja. Na ovaj način postiže se ravnoteža između kriterijuma kolektivne koristi i individualnog žaljenja, što predstavlja suštinu kompromisnog rangiranja u okviru VIKOR metode.

Metrika Minkovskog predstavlja opštu meru rastojanja u višedimenzionalnom prostoru i uvedena je od strane *Hermann Minkowskog* krajem XIX veka. Ova metrika obuhvata čitavu porodicu rastojanja, u zavisnosti od vrednosti parametara reda, gde se kao posebni slučajevi izdvajaju Euklidsko rastojanje (L_2), *Manhattan* ili „taksi“ rastojanje (L_1), kao i Čebiševljevo rastojanje (L_∞). U slučaju Manhattan metrike, rastojanje između dve tačke definiše se kao suma apsolutnih vrednosti razlika njihovih Dekartovih koordinata, što odgovara kretanju po pravougaonoj mreži gradskih blokova [122].

U okviru VIKOR metode, Minkovski metrika omogućava fleksibilno merenje odstupanja alternativa od idealnog rešenja, istovremeno uzimaju se u obzir ukupno odstupanje po svim kriterijumima i maksimalno pojedinačno odstupanje.

Ovakav pristup je posebno pogodan za probleme sa konfliktnim kriterijumima, jer obezbeđuje kompromis između grupne korisnosti i individualnog žaljenja. Primena Minkovskog rastojanja predstavlja matematičku osnovu kompromisnog rangiranja koje u središtu VIKOR metode. Metoda se bazira na matrici Minkovskog (L_p), gde se primenjuje normalizacija koja može biti linearna ili primenom Minmax metode.

Metrika Minkovskog glasi:

$$L_{p,i} = \left\{ \sum_{j=1}^n w_j^p \left| \frac{x_j^* - x_{ij}}{x_j^* - x_j^-} \right|^p \right\}^{\frac{1}{p}} \quad (4.55)$$

gde x_{ij} predstavlja performansu i -te alternative u odnosu na j -ti kriterijum, gde x_j^* i x_j^- predstavljaju najpoželjniju i najnepoželjniju performansu alternativa u odnosu na j -ti kriterijum, a w_j je težina j -tog kriterijuma, dok je p parametar metrike. Kada je vrednost $p = 1$, dobija se sledeći oblik:

$$L_{1,i} = \sum_{j=1}^n w_j \left| \frac{x_j^* - x_{ij}}{x_j^* - x_j^-} \right| \quad (4.56)$$

Kada $p \rightarrow \infty$ tada metrika izgleda:

$$L_{\infty,i} = \max_j w_j \left| \frac{x_j^* - x_{ij}}{x_j^* - x_j^-} \right| \quad (4.57)$$

Matrica odlučivanja je data sledećom jednačinom:

$$M = \begin{matrix} & \begin{matrix} C_1 & C_2 & \cdots & C_m \\ w_1 & w_2 & \cdots & w_m \end{matrix} \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (4.58)$$

gde je x_{ij} rang i -te alternative prema j -tom kriterijumu, A_i su alternative, a C_i su kriterijumi i w_i predstavlja značaj (težinu) kriterijuma, (za $i = 1, 2 \dots m, j = 1, 2 \dots n$).

Određuje se najveća i najmanja vrednost datog kriterijuma:

$$x_i^* = \max_j x_{ij} \quad (4.59)$$

$$x_i^- = \min_j x_{ij} \quad (4.60)$$

Vrednosti pesimističkog rešenja S_j i očekivanog rešenja R_j :

$$S_j = \sum_{i=1}^n w_i (x_i^* - x_{ij}) / (x_i^* - x_i^-) \quad (4.61)$$

$$R_j = \max_i [w_i (x_i^* - x_{ij}) / (x_i^* - x_i^-)] \quad (4.62)$$

gde je w_i – težina kriterijuma.

Vrednosti za kompromisno rešenje Q_j :

$$Q_j = \frac{v(s_j - s^-)}{(s^* - s^-)} + \frac{(1 - v)(R_j - R^-)}{(R^* - R^-)} \quad (4.63)$$

gde su:

$$S^- = \min_j S_j; S^* = \max_j S_j \quad (4.64)$$

$$R^- = \min_j R_j; R^* = \max_j R_j \quad (4.65)$$

Rangiranje se vrši sortiranjem alternativa R_j , S_j i Q_j . Najbolja alternativa ima najmanju vrednost Q , a alternativa koja je najbolje rangirana na Q listi predstavlja kompromisno rešenje ako je ispunjeno sledeće: $Q(A'') - Q(A') \geq 1/(m-1)$, gde je A' – prvoplasirana alternativa, a A'' – drugoplasirana alternativa na listi, a m predstavlja broj alternativa. Kompromisno rešenje, odnosno najpoželjnija alternativa treba da bude prvoplasirana i na S i R listi [93], [121].

VIKOR metoda omogućava dobijanje kompromisnog rešenja u problemima višekriterijumskog odlučivanja sa konfliktnim kriterijumima, polazeći od pretpostavke da nijedna alternativa ne može istovremeno biti optimalna po svim kriterijumima. Suština metode ogleda se u balansiranju između ukupne korisnosti rešenja (grupnog interesa) i maksimalnog individualnog odstupanja (žaljenja) po pojedinačnim kriterijumima. VIKOR metoda posebno izdvaja u situacijama kada donosilac odluke nema jasno definisane preferencije ili kada je neophodno postići kompromis prihvatljiv za većinu zainteresovanih strana. Fleksibilnost metode, mogućnost podešavanja parametara kompromisa i jasna interpretacija rezultata čine VIKOR pogodnom za primenu u složenim inženjerskim i rudarskim problemima, gde su tehnički, ekonomski, eksploatacioni i bezbednosni kriterijumi često međusobno suprotstavljeni.

Poređenje metoda AHP – PROMETHEE – TOPSIS – VIKOR

Metode AHP, PROMETHEE, TOPSIS i VIKOR predstavljaju najčešće korišćene alate višekriterijumskog odlučivanja, ali se međusobno razlikuju po konceptualnom pristupu, matematičkoj osnovi i načinu interpretacije rezultata. AHP metoda se zasniva na hijerarhijskoj dekompoziciji problema i poređenju elemenata u parovima, posebno je pogodna za struktuiranje problema i uključivanje subjektivnih procena donosilaca odluka. PROMETHEE pripada metodama nadređenosti i omogućava parcijalno ili potpuno rangiranje alternativa na osnovu preferencijskih funkcija, jasno se uvažavaju razlike između alternativa po pojedinim kriterijumima.

TOPSIS metoda koristi geometrijski pristup i Euklidsko rastojanje za određivanje bliskosti alternativa idealnom i anti-idealnom rešenju, što je čini jednostavnom i intuitivnom za primenu. Za razliku od nje, VIKOR metoda uvodi kompromisno rangiranje zasnovano na metrici Minkovskog, uz istovremeno razmatranje grupne koristi i individualnog žaljenja, tako da je naročito pogodna za odlučivanje u uslovima izraženih konflikata kriterijuma. Izbor odgovarajuće metode zavisi od prirode problema, raspoloživih informacija i uloge subjektivnih procena u procesu odlučivanja. U tabeli 4.3 dato je poređenje metoda višekriterijumskog odlučivanja.

Tabela 4.3. Poređenje metoda AHP-PROMETHEE-TOPSIS-VIKOR

Metoda	AHP	PROMETHEE	TOPSIS	VIKOR
Tip metode	MADM - diskretna	Metoda nadređenosti	MADM - diskretna	MADM - diskretna
Matematička osnova	Linearna algebra, sopstvene vrednosti	Funkcije preferencije	Euklidska geometrija	Metrika Minkovskog
Rangiranje	Potpuno	Parcijalno/potpuno	Potpuno	Potpuno (kompromisno)
Subjektivnost	Visoka	Srednja	Niska - srednja	Srednja
Prednosti	Jasna struktura problema, rad sa kvalitativnim kriterijumima	Fleksibilno poređenje alternativa	Jednostavna primena i interpretacija	Balans grupne koristi i individualnog žaljenja
Ograničenja	Moguća nekonzistentnost, rang reverzija	Zavisi od izbora preferencijskih funkcija	Ne razmatra kompromis	Osetljivost na parametar kompromisa

5. MATEMATIČKO MODELIRANJE VIŠEKRI TERIJUMSKIH METODA ZA IZBOR ROTORNIH BAGERA

5.1. Analizirani rotorni bageri sa površinskih kopova RB-a Kolubara

U okviru površinskih kopova Elektroprivrede Srbije rade 32 rotorna bagera, od kojih je izabrano 9 rotornih bagera (tabela 5.1), koji rade na površinskim kopovima RB-a Kolubara. Predmet analize je rangiranje rotornih bagera za procese revitalizacije i modernizacije stoga su izdvojeni rotorni bageri stariji od 35 godina. Izdvojeni su bageri srednjih dimenzija, klase B, sa C-ram konstrukcijom, kapaciteta do 6.600 m³/h i prosečnim radnim kapacitetom oko 4.000 m³/h. Analiziran je period eksploatacije od 11 godina. Od navedenih 9 rotornih bagera, neki su radili na uglju a neki i na uglju i otkrivci. Projektovani vek upotrebe rotornog bagera iznosi 35-40 godina; međutim, u praksi se teži produženju radnog veka za dodatnih 20 godina primenom postupaka revitalizacije i modernizacije.

Tabela 5.1. Analizirani rotorni bageri sa površinskih kopova RB Kolubara

Rotorni bageri	Interna oznaka	Početak rada	Kapacitet, [m ³ /h]	Proizvođač	VKO oznaka
SRs 1200/22.2	G-1	1967.	3.465	TAKRAF	RB1
SRs 1200/24.4	G-3	1968.	3.465	TAKRAF	RB2
SRs 1200/24.4	G-4	1975.	3.465	TAKRAF	RB3
SRs 1200/24.4	G-5	1976.	3.465	TAKRAF	RB4
SRs 1200/24.4	G-6	1976.	3.465	TAKRAF	RB5
SchRs 630/25.6	G-7	1977.	4.100/6.100	O&K	RB6
SRs 1300/26.5	G-8	1987.	4.500/5.100	TAKRAF	RB7
SchRs 630/25.6	G-2	1980.	4.100/6.100	O&K	RB8
SchRs 900/25.6	G-1	1978.	4.100	O&K	RB9

*(svi rotorni bageri su Nemačke proizvodnje)

U okviru razvijenog matematičkog modela, izbor rotornih bagera za procese revitalizacije i modernizacije zasniva se na višekriterijumskoj evaluaciji koja obuhvata tehničke, eksploatacione, parametre održavanja i ekonomske parametre. Polaznu osnovu čini skup od devet rotornih bagera iz sistema RB-a Kolubara, izabranih kao reprezentativna grupa starije mehanizacije (starosti preko 35 godina), kod kojih je neophodno izvršiti analizu trenutnog stanja i preostalih mogućnosti, kao i proceniti realnu mogućnost produženja životnog veka primenom revitalizacije i modernizacije. Posmatrani period obuhvata jedanaest godina eksploatacije, što omogućava dovoljno dugu vremensku seriju za pouzdanu statističku i inženjersku analizu.

Ulazni podaci za model organizovani su u hijerarhijsku strukturu kriterijuma i podkriterijuma, u skladu sa zahtevima višekriterijumskog odlučivanja. Tehnički parametri opisuju konstrukcione i projektne karakteristike bagera, radni (eksploatacioni) parametri kvantifikuju ostvarene proizvodne rezultate, parametri održavanja karakterišu pouzdanost i raspoloživost, dok ekonomski parametri reflektuju troškove i efikasnost korišćenja kapitala. Zbog različitih režima rada bagera (ugalj i/ili otkrivka), podaci su prethodno normirani primenom koeficijenta rastresitosti, čime je obezbeđena uporedivost alternativa. Tako definisan skup podataka predstavlja osnovu za dalju primenu višekriterijumskih metoda odlučivanja u okviru hibridnih modela.

5.2. Ulazni podaci za matematički model

Ulazni podaci za model predstavljaju parametre rotornog bagera koji su podeljeni u četiri grupe: tehnički, radni-eksploatacioni, parametri održavanja i ekonomski parametri.

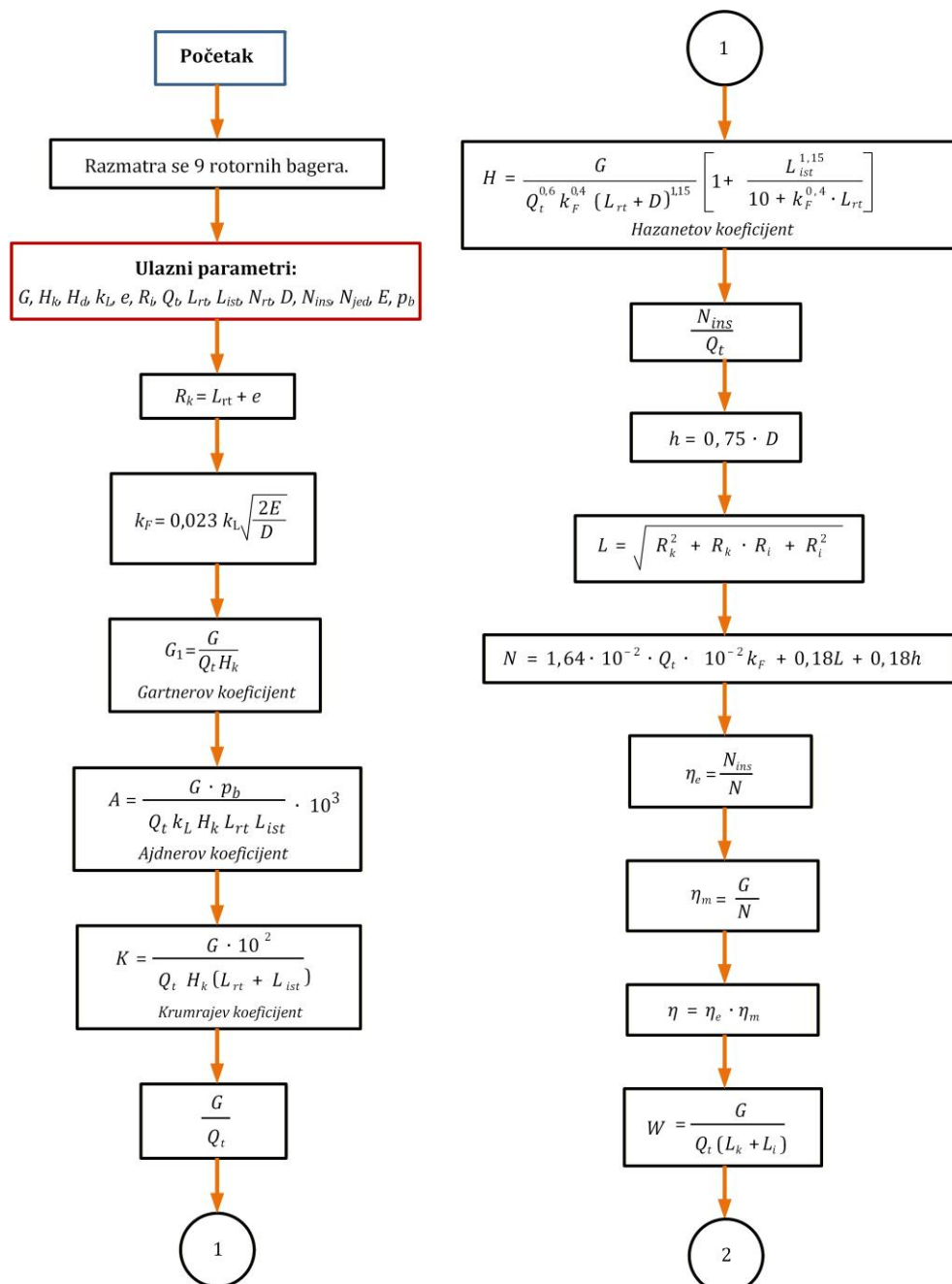
5.2.1. Tehnički parametri rotornog bagera

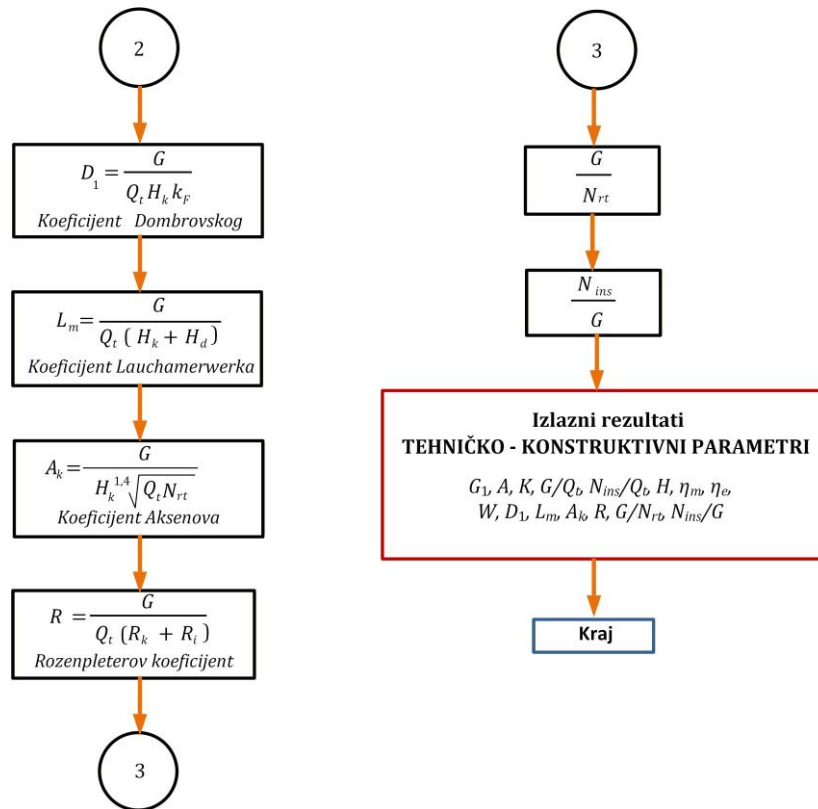
Tehnički parametri (TP) su izabrani iz konstrukcionih pokazatelja tehničkog nivoa rotornih bagera.

Slede respektivno: Gertner-ov koeficijent, koeficijent Dombrovskog, Lauchemerwerk-ov koeficijent, Miler-ov koeficijent, Ajdner-ov koeficijent, Krumraj-ev koeficijent, Aksenov-ljev koeficijent, Hazanet-ov koeficijent i Rozenpleter-ov koeficijent.

U navedenim koeficijentima se javljaju sledeći parametri: G – masa bagera, [t]; Q_t – teoretski kapacitet, [m³/h]; H_k – visina kopanja, [m]; ΣH_k – visina i dubina kopanja, [m]; p_b – specifični pritisak, [N/m²]; k_L – specifična sila kopanja, [N/m²]; L_k – dužina katarke (strele) nosača rotora, [m]; L_i – dužina istovarne konzole, [m]; N_o – snaga pogona rotora, [W]; k_F – specifična sila kopanja, [N/m²]; D – prečnik rotora, [m].

Za odnose specifičnih pokazatelja rotornih bagera korišteni su sledeći parametri: teoretski kapacitet, [m³/h]; kapacitet vedrice, [l]; broj vedrica, komad; prečnik rotora, [m]; snaga pogonskog točka, [kW]; dužina strele radnog točka, [m]; dužina istovarne strele, [m]; visina kopanja, [m]; instalirana snaga, [kW]; i masa bagera, [Mg]. Na slici 5.1 je dat algoritam na osnovu koga su dobijeni tehnički parametri rotornog bagera, a kao ulazni podaci su korišćeni konstruktivni pokazatelji tehničkog nivoa rotornih bagera i odnosi specifičnih pokazatelja rotornih bagera.





Slika 5.1. Algoritam za proračun tehničkih parametara [7], [123]

Konstruktivni pokazatelji tehničkog nivoa rotornih bagera i odnosi specifičnih pokazatelja rotornih bagera prikazani su u tabeli 5.2 i predstavljaju tehničke parametre rotornog bagera.

Tabela 5.2. Tehnički parametri (TP) rotornih bagera za period 2008-2018 [123]

Koeficijent – autora Gartnera 1	TP1	Koeficijent relativne ekonomičnosti
Koeficijent – autora Gartnera 3	TP2	Komparativni indeks W
Koeficijent – autora Dombrovskog	TP3	Koeficijent relativne ekonomičnosti
Koeficijent – autora Lauchamerwerka	TP4	Koeficijent relativne ekonomičnosti
Koeficijent – autora Ajdnera	TP5	Koeficijent za bagere bliskih dimenzija
Koeficijent – autora Krumraja	TP6	Koeficijent za rotorne bagere
Koeficijent – autora Aksenova	TP7	
Koeficijent – autora Rozenpletera	TP8	
Odnos težine i kapaciteta	TP9	
Odnos težine i snage radnog točka	TP10	
Odnos snage i kapaciteta	TP11	
Odnos snage i težine	TP12	
Koeficijent vremenskog iskorištenja _e	TP13	
Koeficijent kapacitetnog iskorištenja _m	TP14	
Koeficijent – autora Hazaneta	TP15	

Tehnički parametri su izabrani iz konstrukcionih pokazatelja tehničkog nivoa rotornih bagera i razmatrano je 15 parametara. Kod tehničkih parametara izabrani kriterijum je maksimalni parametar od navedenih, dok za TP5, TP6 i TP9 važi kriterijum minimuma. Parametri TP1, TP3, TP4, TP5, TP6, TP7, TP8 i TP15 su preuzeti od autora [7], a parametar TP2 – komparativni indeks, od autora radova [124] i [125].

5.2.2. Radni parametri i parametri održavanja rotornog bagera

Radni (eksploatacioni) parametri (RP) rotornog bagera, su svrstani u drugu grupu parametara. Od razmatranih 9 rotornih bagera, neki su radili na uglju, a neki i na uglju i na otkrivci. Da bi podaci bili uporedivi, korišćen je koeficijent rastresitosti. Parametri su dati u tabeli 5.3.

Kod eksploatacionih-radnih parametara, je primenjen kriterijum da je najbolji maksimalni parametar od navedenih.

Tabela 5.3. Radni parametri (RP) rotornih bagera za period 2008-2018 [123]

<i>Ukupna proizvodnja</i>	RP1
<i>Prosečna ukupna proizvodnja</i>	RP2
<i>Trend ukupne proizvodnje</i>	RP3
<i>Ukupno vreme rada</i>	RP4
<i>Prosečno vreme rada</i>	RP5
<i>Trend vremena rada</i>	RP6
<i>Koeficijent vremenskog iskorištenja</i>	RP7
<i>Prosečni koeficijent vremenskog iskorištenja</i>	RP8
<i>Trend koeficijenta vremenskog iskorištenja</i>	RP9
<i>Koeficijent kapacitetnog iskorištenja</i>	RP10
<i>Prosečni koeficijent kapacitetnog iskorištenja</i>	RP11
<i>Trend koeficijenta kapacitetnog iskorištenja</i>	RP12

Parametri održavanja (PO) rotornog bagera čine treću grupu parametara. Razmatrano je 5 parametara. Prikazani su u tabeli 5.4 a kao kriterijum izbora je najmanji parametar od navedenih, ukoliko su zastoji, a za raspoloživost je kriterijum izbora najveći od navedenih. Za parametre PO1, PO2 i PO3 se uvodi kriterijum minimuma, a za PO4 i PO5 kriterijum maksimuma.

Tabela 5.4. Parametri održavanja (PO) rotornih bagera za period 2008-2018 [123]

<i>Mašinski-elektro-vulkanizerski zastoji</i>	PO1
<i>Prosečan broj mašinskih-elektro-vulkanizerskih zastoja</i>	PO2
<i>Trend mašinskih-elektro-vulkanizerskih zastoja</i>	PO3
<i>Tehnička raspoloživost</i>	PO4
<i>Trend tehničke raspoloživosti</i>	PO5

5.2.3. Ekonomski parametri rotornog bagera

Ekonomski parametri (EP) rotornog bagera predstavljaju završnu grupu parametara i imaju značajnu ulogu u oceni ukupne efikasnosti rada rotornih bagera, prikazani su u tabeli 5.5. U ovom delu analizirani su parametri koji kvantifikuju troškove i efekte rada mehanizacije tokom posmatranog perioda. Kod ekonomskih parametara kriterijum minimuma primenjen je na parametre EP1 i EP2, koji se odnose na troškovne pokazatelje, dok je kriterijum maksimuma primenjen za parametre EP3, EP4 i EP5, koji izražavaju ekonomske efekte i efikasnost rada bagera.

Tabela 5.5. Ekonomski parametri (EP) rotornih bagera za period 2008-2018 [123]

<i>Prosečni troškovi</i>	EP1
<i>Trend prosečnih troškova</i>	EP2
<i>Efikasnost proizvodnje EP</i>	EP3
<i>Trend efikasnosti proizvodnje EP</i>	EP4
<i>Efektivnost rudarske mehanizacije</i>	
<i>MPI= f(raspoloživosti, efikasnosti proizvodnje, upotrebljivosti)</i>	EP5

Parametar EP5 je modifikovan parametar autora [126], odnosno prilagođen uslovima radne sredine. Zapravo predstavlja indeks proizvodnje u rudniku, koji meri efektivnost rudarske mehanizacije.

Specifična potrošnja električne energije:

$$SPECIFIČNA POTROŠNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE = \frac{N_{jed} \cdot VREME}{PROIZVODNJA} \quad (5.1)$$

gde je N_{jed} – jedinična snaga rotornog bagera.

Efektivnost rudarske mehanizacije:

$$PE = \left| \left(\frac{PROIZVODNJA}{VREME - UKUPNI ZASTOJI} \right) / Q_t \right| \cdot 100 \quad (5.2)$$

gde je Q_t – kapacitet rotornog bagera.

Upotrebljivost – korisnost K se računa:

$$K = KOEFICIJENT \ VREMENSKOG \ ISKORIŠTENJA \cdot KOEFICIJENT \ KAPACITETNOG \ ISKORIŠTENJA \quad (5.3)$$

$$MP_i^* = f(TEHNIČKA \ RASPOLOŽIVOST, PE, K) = TEHNIČKA \ RASPOLOŽIVOST^a \cdot PE^b \cdot K^c \quad (5.4)$$

Parametar MP_i meri efektivnost rudarske mehanizacije, odnosno predstavlja indeks proizvodnje u rudniku.

5.3. Matematička formulacija problema višekriterijumskog izbora

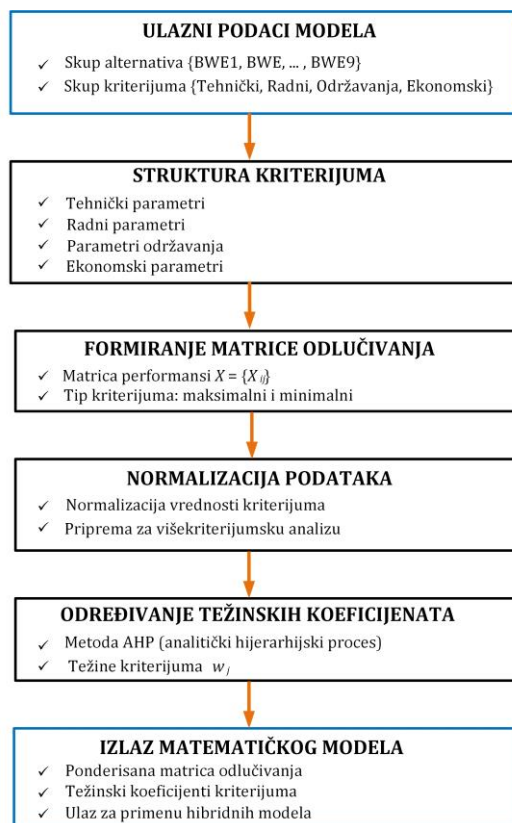
Problem izbora rotornih bagera za procese revitalizacije i modernizacije u ovom radu formuliše se kao problem višekriterijumskog odlučivanja u kome se razmatra konačan skup alternativa i skup međusobno različitih kriterijuma. Neka je: $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ konačan skup alternativa, gde svaka alternativa A_i predstavlja jedan rotorni bager uključen u analizu. U konkretnom slučaju, razmatrano je 9 rotornih bagera, tako da je $n = 9$. Skup kriterijuma koji opisuje stanje i performanse rotornih bagera definisan je kao: $C = \{C_1, C_2, \dots, C_m\}$, gde svaki kriterijum C_j predstavlja jedan tehnički, radni-eksploatacioni, parametar održavanja ili ekonomski parametar.

Ukupan broj kriterijuma formiran je integracijom svih podkriterijuma u okviru četiri osnovne grupe tehničkih, radnih, parametara održavanja i ekonomskih parametara. Vrednosti alternativa po kriterijumima čine matricu odlučivanja: $X = [x_{ij}]$, $i = 1, \dots, n$, $j = 1, \dots, m$ gde element x_{ij} predstavlja vrednost kriterijuma C_j za alternativu A_i .

Vrednosti u matrici X dobijene su iz realnih podataka o radu i održavanju rotornih bagera u periodu 2008-2018. godine, kao i iz tehničke dokumentacije i ekonomske evidencije. Kako kriterijumi imaju različite merne jedinice i različite smerove optimizacije (kriterijumi maksimuma i minimuma), neophodno je izvršiti njihovu normalizaciju i ponderisanje. Težinski koeficijenti kriterijuma označeni su sa: $W = \{W_1, W_2, \dots, W_m\}$, $\sum_{j=1}^m w_j = 1$ gde je w_j relativni značaj kriterijuma C_j . Vrednosti težinskih koeficijenata određuju se primenom AHP metode, na osnovu eksperatskih poređenja kriterijuma i podkriterijuma.

Na osnovu matrice odlučivanja X i vektora težine W , problem izbora rotornih bagera se svodi na rangiranje alternativa prema njihovoj ukupnoj pogodnosti za procese revitalizacije i modernizacije. Ova rangiranja se vrše primenom različitih višekriterijumskih metoda (PROMETHEE, TOPSIS i VIKOR), čime se formiraju tri parcijalna hibridna modela: AHP-PROMETHEE, AHP-TOPSIS i AHP-VIKOR. Matematički model iz poglavlja 5 se direktno transformiše u operativni sistem za donošenje odluka, čiji su rezultati rang liste rotornih bagera.

Na slici 5.2 prikazan je konceptualni matematički model izbora kapitalnih rudarskih mašina, rotornih bagera kojim se definišu elementi modela, način obrade podataka i izlazni parametri koji predstavljaju osnovu za razvoj hibridnih višekriterijumskih modela u glavi 6.



Slika 5.2. Konceptualni prikaz matematičkog modela izbora rotornih bagera

Razvijeni matematički model zasniva se na određenim pretpostavkama i ima svoja ograničenja, koja je neophodno jasno definisati radi pravilnog tumačenja dobijenih rezultata. Osnovna pretpostavka modela jeste da su podaci reprezentativni za posmatrani period eksploatacije i da verno odražavaju stvarno tehničko i radno stanje analiziranih rotornih bagera. Takođe, pretpostavlja se da su definisani kriterijumi međusobno nezavisni u meri koja omogućava njihovu primenu u okviru višekriterijumskih metoda odlučivanja.

Ograničenja modela odnose se prvenstveno na statički karakter analize, budući da su ulazni podaci posmatrani za određeni vremenski interval i ne obuhvataju dinamičke promene u radu mehanizacije u realnom vremenu. Dodatno, iako je subjektivnost ekspertskih procena smanjena primenom struktuiranih metoda, ona ne može biti u potpunosti eliminisana i predstavlja kontrolisani deo sistema odlučivanja. Uprkos navedenim ograničenjima, razvijeni matematički model pruža pouzdanu i racionalnu osnovu za donošenje odluka o izboru rotornih bagera za revitalizaciju i modernizaciju, uz mogućnost njegove dalje nadogradnje i prilagođavanja specifičnim uslovima eksploatacije. Primenjene su različite višekriterijumske metode odlučivanja. Kombinovanjem metoda postignut je najbolji efekat kod izbora rotornih bagera za proces modernizacije i revitalizacije. Primenjene su sledeće metode: AHP, TOPSIS, VIKOR i PROMETHEE.

Na osnovu formulisane strukture problema, definisanog skupa alternativa, kriterijuma i matrice odlučivanja, u ovom poglavlju uspostavljen je matematički okvir koji omogućava formalnu evaluaciju rotornih bagera kao složenih tehničkih sistema. Ovaj okvir predstavlja teorijsku i numeričku osnovu za primenu višekriterijumskih metoda odlučivanja u procesu izbora bagera za revitalizaciju i modernizaciju.

Predloženi hibridni matematički okvir integriše AHP metodu za određivanje prioriteta kriterijuma i tri komplementarne višekriterijumske metode PROMETHEE, TOPSIS i VIKOR, za rangiranje alternativa. Time je obezbeđen sistematičan, transparentan i fleksibilan model koji omogućava istovremeno uvažavanje tehničkih aspekata, radnih aspekata, aspekata održavanja i ekonomskih aspekata rada rotornih bagera. Predstavljena metodologija za ocenjivanje i rangiranje rotornih bagera, da bi se odredilo koja od mašina će ići u proces revitalizacije i modernizacije, data je na slici 5.3.

AHP RANGIRANJE PREFERENCIJA KRITERIJUMA	TEHNIČKI PARAMETRI	RADNI- EKSPLOATACIONI PARAMETRI	PARAMETRI ODRŽAVANJA	EKONOMSKI PARAMETRI
AHP RANGIRANJE PREFERENCIJA PODKRITERIJUMA	TP1 TP2 TP3 TP4 TP5 TP6 TP7 TP8 TP9 TP10 TP11 TP12 TP13 TP14 TP15	RP1 RP2 RP3 RP4 RP5 RP6 RP7 RP8 RP9 RP10 RP11 RP12	PO1 PO2 PO3 PO4 PO5	EP1 EP2 EP3 EP4 EP5
TOPSIS VIKOR PROMETHEE RANGIRANJE ALTERNATIVA	RB1 RB2 RB3 RB4 RB5 RB6 RB7 RB8 RB9			

Slika 5.3. Model izbora i ocene rotornih bagera višekriterijumskim metodama

Matematička formulacija omogućava doslednu obradu kvantitativnih i kvalitativnih podataka i kontrolisano uključivanje ekspertskih procena u proces odlučivanja. Uspostavljena je čvrsta teorijska i numerička osnova za prelazak sa apstraktnog modeliranja na praktičnu evaluaciju stvarnih sistema, što predstavlja osnov za empirijsku primenu modela u realnim uslovima površinske eksploatacije.

6. RAZVOJ, PRIMENA I VERIFIKACIJA HIBRIDNIH MODELA

Na osnovu razvijenog matematičkog modela u skladu sa opisom iz glave 5, u ovoj glavi sprovedena je praktična primena na realnom sistemu rotornih bagera u okviru površinskih kopova RB-a Kolubara. Cilj empirijske analize je da se izvrši kvantitativna i kvalitativna evaluacija izabranih bagera i da se proverí pouzdanost, stabilnost i operativna primenljivost hibridnih višekriterijumskih modela u uslovima rudarske eksploatacije. Teorijski i numerički definisan model se prevodi u funkcionalni alat za podršku investicionom i operativnom odlučivanju u procesima revitalizacije i modernizacije kapitalne rudarske mehanizacije.

U literaturi se mogu identifikovati različiti tipovi hibridnih modela odlučivanja. Autor [127] klasifikuje hibridne modele u tri osnovne grupe: hibridne rešavače, pseudohibride i prave hibridne modele. Prema mišljenju pomenutog autora, pravi hibridni model mora obuhvatiti najmanje dve različite metode odlučivanja. Za upotrebu hibridnih modela nije lako pronaći *“neke fundamentalne teorijske razloge”*. Metode odabrane za formiranje hibrida vođene su uglavnom praktičnim ciljem. Međutim, njihova vrsta, opseg i broj su – *“donekle – subjektivan izbor u zavisnosti od iskustva, intuicije i sklonosti autora”* [127]. U svom radu postavlja značajna pitanja: *“Zašto su nam potrebni hibridni modeli i kako treba formirati razuman hibridni model?”* Kao osnovnu preporuku navodi da je težnja ka boljoj aproksimaciji realnih sistema glavni razlog za primenu hibridnih modela, uz napomenu da je neophodno pažljivo održavati suptilnu ravnotežu između složenosti hibridnog modela i njegove sposobnosti da efikasno rešava konkretan problem.

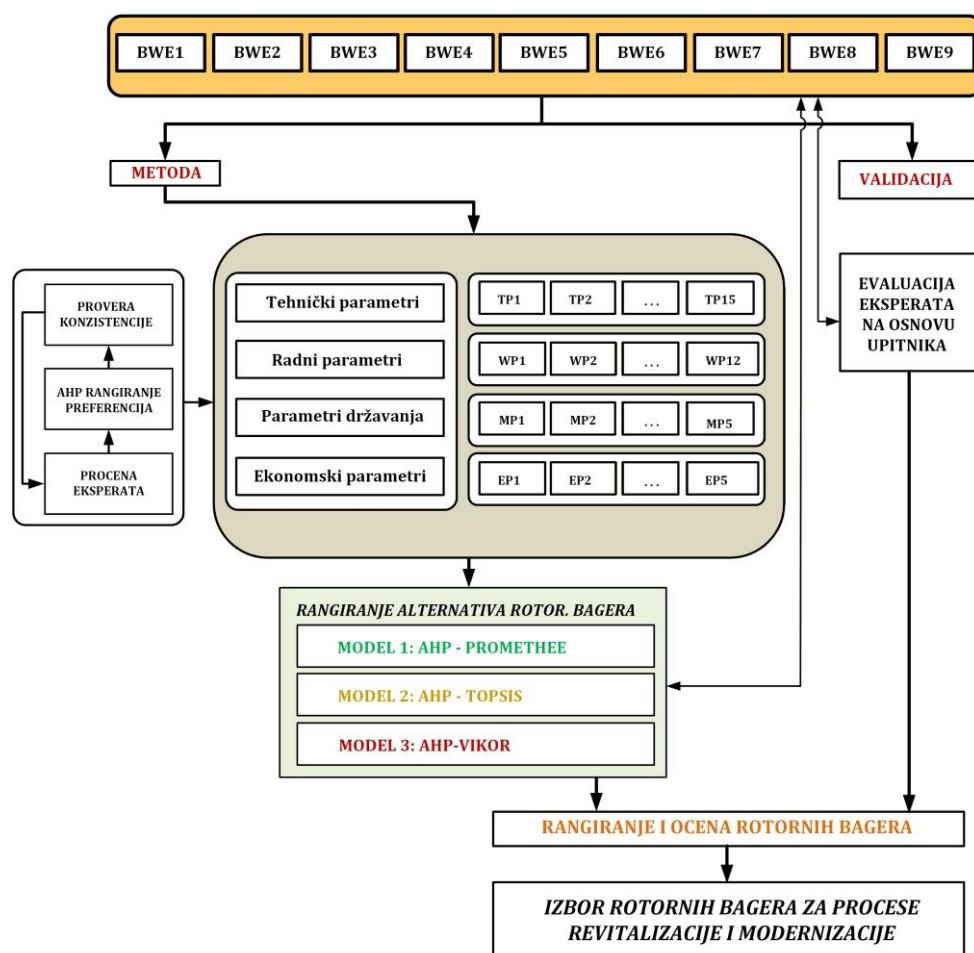
U oblasti rudarstva, gde se odluke donose na osnovu velikog broja međusobno konfliktnih tehničkih, eksploatacionih, ekonomskih i bezbednosnih kriterijuma, primena hibridnih modela odlučivanja omogućava realističniji i pouzdaniji pristup evaluaciji alternativa u poređenju sa primenom pojedinačnih metoda. U ovom radu razvijeni su hibridni modeli zasnovani na metodama višekriterijumskog odlučivanja, koji su primenjeni za procenu osnovnih indikatora rada rotornih bagera. Hibridni modeli formirani su kombinovanjem četiri različite višekriterijumske metode (AHP, PROMETHEE, TOPSIS i VIKOR), čime je omogućena sveobuhvatna evaluacija performansi rotornih bagera sa više aspekata.

Metode višekriterijumskog odlučivanja primenjene su na svim grupama parametara, grupama podparametara i alternativama izbora. Predloženi modeli su koncipirani kao dvostepeni. U prvom delu definisani su vektori prioriteta parametara primenom AHP metode, čime su određene relativne težine kriterijuma i podkriterijuma. U drugom delu izvršena je evaluacija alternativa korišćenjem ostalih višekriterijumskih metoda, u skladu sa prethodno definisanim parametrima i njihovim težinama. Formirana su tri parcijalna hibridna modela AHP-PROMETHEE, AHP-TOPSIS i AHP-VIKOR.

Radi verifikacije dobijenih rezultata sprovedeno je anketno istraživanje inženjersko-tehničkog osoblja koje radi više godina u eksploataciji i na održavanju rotornih bagera. Cilj ankete je bio da se proverí usklađenost rezultata dobijenih primenom VKO modela sa praktičnim iskustvom i profesionalnim procenama stručnjaka iz realnog radnog okruženja. Obezbeđena je dodatna potvrda relevantnosti i primenljivosti razvijenih modela i smanjenje rizika od isključivo teorijskog pristupa u procesu odlučivanja. Uključivanje ekspertske validacije doprinosi kredibilitetu rezultata i pokazuje da predloženi modeli mogu predstavljati pouzdan alat za podršku odlučivanja u realnim uslovima površinske eksploatacije.

Primena dvostepene strukture hibridnog modela zasniva se na potrebi da se jasno razdvoje proces određivanja relativne važnosti kriterijuma i proces evaluacije alternativa. AHP metoda je u prvom koraku korišćena zbog svoje sposobnosti da na sistematičan i konzistentan način integriše objektivne podatke i subjektivne ekspertske procene u određivanju težinskih koeficijenata kriterijuma.

U drugom koraku primenjene su metode PROMETHEE, TOPSIS i VIKOR, koje omogućavaju rangiranje alternativa na osnovu prethodno definisanih težina, ali koriste različite matematičke i logičke osnove. Na ovaj način iskorišćene su prednosti svake pojedinačne metode, dok su istovremeno ublaženi njihovi pojedinačni nedostaci, čime je postignuta robusnija i realnija evaluacija performansi rotornog bagera. Slika 6.1 prikazuje konceptualni okvir izbora i ocene rotornih bagera, u kojem je naglašena iterativna priroda procesa odlučivanja i veza između matematičkog modela i ekspertskog znanja. Model integriše objektivne tehničke, radne, podatke održavanja i ekonomske podatke sa subjektivnim procenama eksperata, čime se obezbeđuje realna i primenljiva evaluacija.



Slika 6.1. Konceptualni model izbora i ocene rotornih bagera višekriterijumskim metodama odlučivanja

Za potrebe ovog istraživanja izdvojena je ciljna grupa od devet rotornih bagera, koji su prikazani u tabeli 5.1, glava 5. Formiran je reprezentativni uzorak za analizu performansi, sa posebnim naglaskom na uticaj dugotrajnog rada, uslova eksploatacije i primenjenih postupaka održavanja, revitalizacije i modernizacije. S obzirom na činjenicu da su analizirani rotorni bageri u posmatranom periodu (od 2008. do 2018. godine) radili u različitim eksploatacionim uslovima, odnosno na otkopavanju uglja i/ili otkrivke, bilo je neophodno izvršiti homogenizaciju ulaznih podataka kako bi se obezbedila njihova međusobna uporedivost. U tu svrhu primenjen je koeficijent rastresitosti, kojim se ostvareni kapaciteti i količine materijala prevode na jedinstvenu referentnu osnovu. Omogućeno je uklanjanje uticaja razlika u zapreminskoj masi i strukturi materijala, čim se obezbeđuje da analizirani pokazatelji rada rotornih bagera odražavaju stvarne performanse mehanizacije, a ne posledice geoloških i litoloških razlika. Primenom homogenizovanih podataka stvoreni su uslovi za objektivnu evaluaciju alternativa u okviru razvijenih hibridnih modela i za pouzdano poređenje rada rotornih bagera u dugom vremenskom periodu, nezavisno od materijala koji je otkopavan.

Ulazni podaci za formiranje hibridnog modela predstavljeni su parametrima rada rotornih bagera, koji su sistematizovani u četiri osnovne grupe: tehničke, radne (eksploatacione), parametre održavanja i ekonomske parametre. Detaljan prikaz podataka za tehničke parametre, radne parametre, parametre održavanja i ekonomske parametre da je u prilogu broj 2. Tehnički parametri odabrani su na osnovu konstrukcionih pokazatelja tehničkog nivoa rotornih bagera, razmatrano je ukupno 15 parametara. Za većinu tehničkih parametara usvojen je kriterijum maksimuma, odnosno kao povoljnija vrednost posmatra se viša vrednost parametra, dok je za parametre (TP5, TP6 i TP9) kriterijum minimuma, odnosno povoljnija vrednost je niža vrednost. Parametri TP1, TP3, TP4, TP5, TP6, TP7, TP8 i TP15 su preuzeti od autora [7], a parametar TP2 – komparativni indeks iz radova autora [124] i [125].

Drugu grupu čine radni, odnosno eksploatacioni parametri RP1 – RP12, posmatrani u periodu od 11 godina. S obzirom na to da su odabrani rotorni bageri radili u različitim uslovima eksploatacije, odnosno na uglju i/ili uglju i otkrivci, podaci su homogenizovani primenom koeficijenta rastresitosti kako bi se obezbedila njihova međusobna uporedivost. Kod ove grupe parametara usvojen je kriterijum maksimuma, jer veće vrednosti ukazuju na bolje radne performanse mehanizacije.

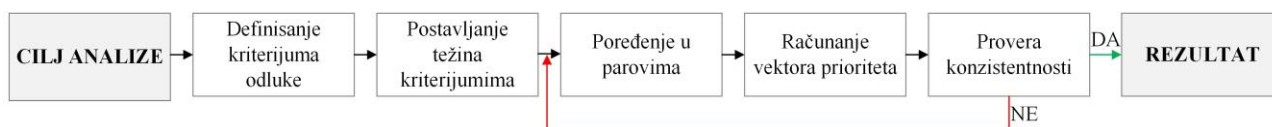
Treću grupu čine parametri održavanja, u okviru kojih je razmatrano ukupno pet parametara. Kao kriterijum izbora kod parametara koji se odnose na zastoje (PO1, PO2 i PO3) usvojen je kriterijum minimuma, dok je kod parametara raspoloživosti (PO4 i PO5) kriterijum izbora maksimum, jer veća raspoloživost ukazuje na viši nivo pouzdanosti i efikasnosti rada rotornih bagera.

Četvrtu grupu čine ekonomski parametri i obuhvataju ukupno pet pokazatelja, koji kvantifikuju troškove i efekte rada mehanizacije tokom posmatranog perioda. Kod prva dva ekonomska parametra (EP1, EP2) troškovnih pokazatelja, primenjen je kriterijum minimuma, dok je kod parametara (EP3, EP4 i EP5) koji izražavaju ekonomske efekte i efikasnost rada bagera kriterijum izbora maksimum. Parametar EP5 predstavlja modifikovani parametar autora [126], prilagođen uslovima rada na površinskim kopovima u Srbiji. Ovaj parametar definiše indeks proizvodnje u rudniku i koristi se kao pokazatelj efektivnosti rada rudarske mehanizacije.

6.1. Model AHP-PROMETHEE

Primenom AHP metode definiše se hijerarhijska struktura problema kako bi se izvršilo poređenje elemenata u parovima i dodelile odgovarajuće preferencije, odnosno težinski koeficijenti. Problem se hijerarhijski razlaže na cilj, kriterijume, podkriterijume i alternative, jedino se cilj ne poredi, ni sa jednim od navedenih elemenata. Poređenje elemenata unutar hijerarhije vrši se primenom Saaty-jeve skale vrednovanja (tabela 4.1). Rezultati dobijeni poređenjem parova služe za formiranje matrica poređenja. Matrica sadrži međusobni odnos preferencija kriterijuma. Potom se odredi vektor sopstvenih vrednosti matrice poređenja. Na osnovu vektora sopstvenih vrednosti dodeljuju se težinski koeficijenti kriterijumima, čime se određuje njihova relativna važnost u odnosu na postavljeni cilj. Na kraju se ispituje konzistentnost donetih procena primenom stepena konzistentnosti CR (4.5) i Saaty-jeve tabele slučajnih indeksa (tabela 4.2). Za računanje stepena konzistentnosti prethodno se mora izračunati indeks konzistentnosti CI (4.6). Reprezentativni primer proračuna za AHP metodu dat je u prilogu broj 3.

Dobijeni težinski koeficijenti kriterijuma, određeni primenom AHP metode, predstavljaju ulazne parametre za dalju fazu modeliranja. U nastavku postupka, ovi težinski koeficijenti integrišu se u PROMETHEE metodu, koja omogućava rangiranje alternativa na osnovu parcijalnog i potpunog poređenja. Koraci AHP metode su prikazani na slici 6.2.



Slika 6.2. Koraci AHP metode [1]

U PROMETHEE metodi razmatra se višekriterijumski problem u kome su alternative i kriterijumi predstavljeni u matrici odlučivanja. Za svaki kriterijum i svaku kombinaciju dveju alternativa se definiše funkcija preferencije alternative a u odnosu na alternativu b . Neophodno je definisati kriterijume i odgovarajuće težinske koeficijente, svakom se kriterijumu dodeljuje težina W_j . Postupak se zasniva na poređenju svakog para alternativa u odnosu na izabrane kriterijume, nakon čega se određuju preferencije.

Donosilac odluke za svaki kriterijum pojedinačno bira odgovarajuću funkciju preferencije u skladu sa prirodom kriterijuma i sopstvenim stavovima. Funkcije preferencije su date jednačinama (4.33) do (4.38). Na osnovu toga izračunavaju se indeksi preferencije i ukupni indeks preferencije formule (4.39)-(4.40). Višekriterijumski indeks preferencije (4.39) pokazuje koliko je jedna alternativa bolja od druge uzevši u obzir sve kriterijume. Pozitivni, negativni i neto tokovi alternativa se računaju na osnovu formula (4.41)-(4.43), gde neto tok predstavlja razliku između izlaznog i ulaznog toka za svaku alternativu. Alternativa sa većim neto tokom je bolje rangirana.

Matematičke osnove AHP i PROMETHEE metoda su date u podpoglavljima 4.4.1. i 4.4.2, dok se u ovom delu metode primenjuju u okviru razvijenog hibridnog modela AHP-PROMETHEE na konkretne grupe parametara rotornih bagera. Proračuni su realizovani u programskom okruženju Microsoft Excel, uz primenu standardnih algoritama.

6.1.1. Tehnički parametri

U okviru AHP-PROMETHEE modela, tehnički parametri su razmatrani kao posebna grupa kriterijuma. Na osnovu AHP metode određeni su težinski koeficijenti tehničkih parametara, dok je rangiranje alternativa izvršeno primenom PROMETHEE metode. Kod tehničkih parametara, većina parametara ima karakter maksimuma, jer više vrednosti odgovaraju povoljnijim tehničkim karakteristikama. Izuzetak predstavljaju parametri TP5, TP6 i TP9, kod kojih su niže vrednosti poželjnije, te su oni razmatrani kao kriterijumi minimuma.

U tabelama 6.1, 6.2 i 6.3 prikazani su ulazni podaci za primenu AHP-PROMETHEE modela na tehničke parametre, uključujući podkriterijume tehničkih parametara, izračunate težinske koeficijente W_i i vrednosti indeksa konzistentnosti AHP matrice poređenja.

Tabela 6.1. Podkriterijumi tehničkih parametara u odnosu na razmatrane alternative

Rotorni bageri	TP1	TP2	TP3	TP4	TP5	TP6	TP7	TP8
RB1	18,78526	5,02543	0,0001373	34,43963	9,5507343	0,214077	12,79468	4,630539
RB2	18,37422	4,75246	0,0002463	15,74933	15,935456	0,198019	15,16862	4,676861
RB3	18,37422	4,75246	0,0002463	15,74933	15,935456	0,198019	15,16862	4,676861
RB4	18,37422	4,75246	0,0002463	15,74933	15,935456	0,198019	15,16862	4,676861
RB5	18,37422	4,75246	0,0002463	15,74933	15,935456	0,198019	15,16862	4,676861
RB6	19,68376	3,96420	0,0001503	16,50896	6,6486164	0,273006	11,95649	3,888889
RB7	14,62439	5,07087	0,0001992	11,79386	15,014389	0,202835	9,43546	4,982756
RB8	14,62439	5,07087	0,0001992	11,79386	15,014389	0,202835	9,43546	4,982756
RB9	14,54634	5,04381	0,0001715	11,73092	15,320490	0,201752	9,38510	4,956164
	TP9	TP10	TP11	TP12	TP13	TP14	TP15	
RB1	0,413276	2,273016	0,588745	1,424581	2,336682	1,640259	3,832764	
RB2	0,440981	3,820000	0,522367	1,184555	1,989575	1,679597	3,341684	
RB3	0,440981	3,820000	0,522367	1,184555	1,989575	1,679597	3,341684	
RB4	0,440981	3,820000	0,522367	1,184555	1,989575	1,679597	3,341684	
RB5	0,440981	3,820000	0,522367	1,184555	1,989575	1,679597	3,341684	
RB6	0,511778	2,558889	0,711111	1,389492	1,932219	1,390594	2,686931	
RB7	0,365610	1,998667	0,453659	1,240827	2,150757	1,733325	3,727960	
RB8	0,365610	1,998667	0,453659	1,240827	2,150757	1,733325	3,727960	
RB9	0,363659	1,988000	0,453659	1,247485	2,148852	1,722548	3,701500	

Tabela 6.2. AHP - Matrica poređenja u parovima tehničkih parametara i vrednosti težinskog koeficijenta W_i

	TP1	TP2	TP3	TP4	TP5	TP6	TP7	TP8	TP9	TP10	TP11	TP12	TP13	TP14	TP15
AHP METODA PODKRITERIJUMI	Gartner 1	Gartner 3	Dombrovski 1	Lauchmeverk	Ajdner	Krumraj	Aksenov	Rozenpleter	G/ Q_t	G/ N_{RT}	N_{inst}/Q_t	N_{inst}/G	η_e	η_m	Hazanet
Gartner 1	1,00														
Gartner 3	1,00	1,00													
Dombrovski 1	1,00	1,00	1,00												
Lauchmeverk	0,50	0,50	0,50	1,00											
Ajdner	2,00	2,00	2,00	3,00	1,00										
Krumraj	2,00	2,00	2,00	3,00	1,00	1,00									
Aksenov	0,50	0,50	0,50	1,00	0,33	0,33	1,00								
Rozenpleter	0,50	0,50	0,50	1,00	0,33	0,33	1,00	1,00							
G/ Q_t	2,00	2,00	2,00	3,00	1,00	1,00	3,00	3,00	1,00						
G/ N_{RT}	0,50	0,50	0,50	1,00	0,33	0,33	1,00	1,00	0,33	1,00					
N_{inst}/Q_t	3,00	3,00	3,00	4,00	2,00	2,00	4,00	4,00	2,00	4,00	1,00				
N_{inst}/G	3,00	3,00	3,00	4,00	2,00	2,00	4,00	4,00	2,00	4,00	1,00	1,00			
η_e	3,00	3,00	3,00	4,00	2,00	2,00	4,00	4,00	2,00	4,00	1,00	1,00	1,00		
η_m	3,00	3,00	3,00	4,00	2,00	2,00	4,00	4,00	2,00	4,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
Hazanet	2,00	2,00	2,00	3,00	1,00	1,00	3,00	3,00	1,00	3,00	0,50	0,50	0,50	0,50	1,00
Sopstvena vrednost λ	25,00	25,00	25,00	38,00	14,83	14,83	38,00	38,00	14,83	38,00	8,00	8,00	8,00	8,00	14,83
Vrednosti težinskog koeficijenta W_i	0,042	0,042	0,042	0,025	0,072	0,072	0,025	0,025	0,072	0,025	0,122	0,122	0,122	0,122	0,072

Tabela 6.3. AHP – Konzistentnost (tehnički parametri)

Konzistentnost		
Sopstvena vrednost λ	15,117672	15,08699815
Broj podkriterijuma n	15	15
Slučajni indeks RI	1,59	1,59
Indeks konzistencije CI	0,0084051	0,006214154
Indeks CR	0,0052862	0,003908273
%	0,5286242	0,390827284

U tabeli 6.4 dato je rangiranje alternativa u odnosu na tehničke parametre, dok je konačan poredak rotornih bagera kada se razmatraju tehnički parametri, primenom AHP-PROMETHEE modela, prikazan u tabeli 6.5.

Tabela 6.4. PROMETHEE – Rangiranje alternativa u odnosu na tehničke parametre

PROMETHEE METODA PODKRITERIJUMI	TP1	TP2	TP3	TP4	TP5	TP6	TP7	TP8	TP9	TP10	TP11	TP12	TP13	TP14	TP15
	Gartner 1	Gartner 3	Dombrovski 1	Lauchmeverk	Ajdner	Krumraj	Aksenov	Rozenpleter	G/Q _i	G/N _{Kr}	N _{im} /Q _i	N _{im} /G	η_e	η_m	Hazanet
Preferencije W _i	0,042	0,042	0,042	0,025	0,072	0,072	0,025	0,025	0,072	0,025	0,122	0,122	0,122	0,122	0,072
SRs 1200/22.2 (G1) RB1	18,78526	5,02543	0,00014	34,43963	9,55073	0,21408	12,79468	4,63054	0,41328	2,27302	0,58875	1,42458	2,33668	1,64026	122,7911
SRs 1200/24.4 (G3) RB2	18,37422	4,75247	0,00025	15,74933	15,93546	0,19802	15,16862	4,67686	0,44098	3,82000	0,52237	1,18456	1,98958	1,67960	150,78060
SRs 1200/24.4 (G4) RB3	18,37422	4,75247	0,00025	15,74933	15,93546	0,19802	15,16862	4,67686	0,44098	3,82000	0,52237	1,18456	1,98958	1,67960	150,78060
SRs 1200/24.4 (G5) RB4	18,37422	4,75247	0,00025	15,74933	15,93546	0,19802	15,16862	4,67686	0,44098	3,82000	0,52237	1,18456	1,98958	1,67960	150,7806
SRs 1200/24.4 (G6) RB5	18,37422	4,75247	0,00025	15,74933	15,93546	0,19802	15,16862	4,67686	0,44098	3,82000	0,52237	1,18456	1,98958	1,67960	150,7806
SchRs 630/25.6 (G7) RB6	19,68376	3,96420	0,00015	16,50896	6,64862	0,27301	11,95649	3,88889	0,51178	2,55889	0,71111	1,38949	1,93222	1,39059	176,6301
SRs 1300/26.5 (G8) RB7	14,62439	5,07087	0,00020	11,79386	15,01439	0,20284	9,43546	4,98276	0,36561	1,99867	0,45366	1,24083	2,15076	1,73333	99,07069
SchRs 630/25.6 (G2) RB8	14,62439	5,07087	0,00020	11,79386	15,01439	0,20284	9,43546	4,98276	0,36561	1,99867	0,45366	1,24083	2,15076	1,73333	99,07069
SchRs 900/25.6 (G1) RB9	14,54634	5,04381	0,00017	11,73092	15,32049	0,20175	9,38510	4,95616	0,36366	1,98800	0,45366	1,24749	2,14885	1,72255	91,05841
Kriterijum izbora	MAX	MAX	MAX	MAX	MIN	MIN	MAX	MAX	MIN	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX

Tabela 6.5. AHP – PROMETHEE Tehnički parametri–rangiranje rotornih bagera

J broj alternativa	Rotorni bageri	Poredak
0,24390	SRs 1200/22.2 (G1) RB1	1
-0,07508	SRs 1200/24.4 (G3) RB2	5
-0,07508	SRs 1200/24.4 (G4) RB3	5
-0,07508	SRs 1200/24.4 (G5) RB4	5
-0,07508	SRs 1200/24.4 (G6) RB5	5
-0,07423	SchRs 630/25.6 (G7) RB6	4
0,08691	SRs 1300/26.5 (G8) RB7	2
0,08691	SchRs 630/25.6 (G2) RB8	2
-0,04317	SchRs 900/25.6 (G1) RB9	3

6.1.2. Radni parametri

Radni (eksploatacioni) parametri predstavljaju ključne pokazatelje stvarnih uslova rada rotornih bagera i njihove proizvodne efikasnosti u dugoročnom periodu eksploatacije.

U tabeli 6.6, su prikazani ulazni podaci – podkriterijumi radnih parametara, u tabeli 6.7 AHP matrica poređenja u parovima sa izračunatim težinskim koeficijentima W_i .

Tabela 6.6. Podkriterijumi radnih parametara u odnosu na razmatrane alternative

Rotorni bageri	RP1	RP2	RP3	RP4	RP5	RP6
RB1	34.695.818	3.154.165	2.838.749	24.608	2237,1	2013,3
RB2	42.316.093	3.846.917	3.462.226	40.066	3642,4	3278,1
RB3	44.122.403	4.011.127	3.610.015	46.780	4252,7	3827,5
RB4	33.930.887	3.084.626	2.776.163	40.998	3727,1	3354,4
RB5	34.834.802	3.483.480	3.135.132	41.222	3747,5	3372,7
RB6	27.071.704	2.461.064	2.461.064	44.767	4069,7	4476,7
RB7	43.673.667	3.970.393	3.573.354	34.502	3136,6	2822,9
RB8	39.457.632	3.587.057	3.228.352	27.816	2528,7	3375,9
RB9	39.937.214	3.630.655	3.267.590	33.177	3016,1	2714,5
	RP7	RP8	RP9	RP10	RP11	RP12
RB1	4,53	0,41182	0,45300	3,65	0,33182	0,29864
RB2	5,08	0,46182	0,41564	4,38	0,39818	0,35836
RB3	5,41	0,49180	0,44262	3,54	0,32100	0,32100
RB4	4,70	0,42700	0,38430	3,01	0,27300	0,24570
RB5	4,70	0,42700	0,38430	3,18	0,28900	0,26010
RB6	5,55	0,50455	0,55501	4,76	0,43273	0,38946
RB7	4,15	0,37727	0,37727	3,96	0,36000	0,32400
RB8	3,47	0,31545	0,38391	3,57	0,32455	0,29210
RB9	5,42	0,49273	0,44346	4,25	0,38636	0,34772

Tabela 6.7. AHP – Matrica poređenja u parovima radnih parametara i vrednosti težinskog koeficijenta W_i

AHP METODA PODKRITERIJUMI	RP1	RP2	RP3	RP4	RP5	RP6	RP7	RP8	RP9	RP10	RP11	RP12
	Ukupna proizvodnja za 11 godina	Prosečna proizvodnja za 11 godina	Trend proizvodnje za 11 godina	Vreme rada za 11 godina	Prosečno vreme rada za 11 godina	Trend vremena rada za 11 godina	Koeficijent vremenskog iskorišćenja 11 god.	Prosečni koeficijent vremenskog iskorišćenja za 11 godina	Trend koeficijenta vremenskog iskorišćenja za 11 godina	Koeficijent kapacitnog iskorišćenja 11 godina	Prosečni koeficijent kapacitnog iskorišćenja za 11 godina	Trend koeficijenta kapacitnog iskorišćenja za 11 godina
Ukupna proizvodnja za 11 godina	1,00											
Prosečna proizvodnja za 11 godina	0,50	1,00										
Trend proizvodnje za 11 godina	0,33	0,50	1,00									
Vreme rada za 11 godina	1,00	2,00	3,00	1,00								
Prosečno vreme rada za 11 godina	0,50	1,00	2,00	0,50	1,00							
Trend vremena rada za 11 godina	0,33	0,50	1,00	0,33	0,50	1,00						
Koef.vremenskog iskorišćenja za 11 god.	1,00	2,00	3,00	1,00	2,00	3,00	1,00					
Prosečni koeficijent vremen. iskor. 11 god.	0,50	1,00	2,00	0,50	1,00	2,00	0,50	1,00				
Trend koeficijenta vremen. iskor. 11 god.	0,33	0,50	1,00	0,33	0,50	1,00	0,33	0,50	1,00			
Koeficijent kapacit. iskorišćenja za 11 g.	1,00	2,00	3,00	1,00	2,00	3,00	1,00	2,00	3,00	1,00		
Prosečni koeficijent kapacit. iskor. 11 god.	0,50	1,00	2,00	0,50	1,00	2,00	0,50	1,00	2,00	0,50	1,00	
Trend koeficijenta kapacit. iskor. 11 g.	0,33	0,50	1,00	0,33	0,50	1,00	0,33	0,50	1,00	0,33	0,50	1,00
Sopstvena vred. λ	7,33	14,00	24,00	7,33	14,00	24,00	7,33	14,00	24,00	7,33	14,00	24,00
Vrednosti tež. koef. W_i	0,135	0,074	0,041	0,135	0,074	0,041	0,135	0,074	0,041	0,135	0,074	0,041

U ovom delu primenjen je hibridni AHP-PROMETHEE model, primenom AHP metode su određeni težinski koeficijenti radnih parametara, dok je PROMETHEE metodom izvršeno rangiranje alternativa u odnosu na ove parametre. Kod radnih (eksploatacionih) parametara svi kriterijumi imaju karakter maksimuma i kod njih su veće vrednosti kriterijuma poželjnije.

U tabeli 6.8 prikazana je provera konzistentnosti dobijenih rezultata. U tabelama 6.9a) i 6.9b), dato je rangiranje alternativa u odnosu na radne parametre primenom PROMETHEE metode, dok je konačan poredak rotornih bagera u odnosu na radne parametre prikazan u tabeli 6.10.

Tabela 6.8. AHP – Konzistentnost (radni parametri)

Konzistentnost		
Sopstvena vrednost λ	10,99	12,03681
Broj podkriterijuma n	12	12
Slučajni indeks RI	1,48	1,48
Indeks konzistencije CI	0,091625548	0,00334636
Indeks CR	0,061909154	0,00226106
%	6,19	0,23

Tabela 6.9. PROMETHEE – Rangiranje alternativa u odnosu na radne parametre a)

PROMETHEE METODA PODKRITERIJUMI	RP1	RP2	RP3	RP4	RP5	RP6	RP7	RP8	RP9	RP10	RP11	RP12
	Ukupna proizvodnja za 11 godina	Prosečna proizvodnja za 11 godina	Trend proizvodnje za 11 godina	Vreme rada za 11 godina	Prosečno vreme rada za 11 godina	Trend vremena rada za 11 godina	Koeficijent vremenskog iskorištenja za 11 godina	Prosečni koeficijent vremenskog iskorištenja za 11 godina	Trend koeficijenta vremenskog iskorištenja za 11 godina	Koeficijent kapacitetskog iskorištenja za 11 godina	Prosečni koeficijent kapacitetskog iskorištenja za 11 godina	Trend koeficijenta kapacitetskog iskorištenja za 11 godina
Preferencije W_i	0,135	0,074	0,041	0,135	0,074	0,041	0,135	0,074	0,041	0,135	0,074	0,041
SRs 1200/22.2 (G1) RB1	3,469.5818	3,154.165,3	2.838.748,8	24.608	2.237,1	2.013,3	4,53	0,41182	0,45300	3,65	0,33182	0,29864
SRs 1200/24.4 (G3) RB2	42.316.093	3.846.917	3.462.226	40.066	3.642,4	32.78,1	5,08	0,46182	0,41564	4,38	0,39818	0,35836
SRs 1200/24.4 (G4) RB3	44.122.403	4.011.127	3.610.015	46.780	4.252,7	3.827,5	5,41	0,49180	0,44262	3,54	0,32100	0,32100
SRs 1200/24.4 (G5) RB4	33.930.887	3.084.626	2.776.163	40.998	3.727,1	3.354,4	4,70	0,42700	0,38430	3,01	0,27300	0,24570
SRs 1200/24.4 (G6) RB5	34.834.802	3.483.480	3.135.132	41.222	3.747,5	3.372,7	4,70	0,42700	0,38430	3,18	0,28900	0,26010
SchRs 630/25.6 (G7) RB6	27.071.704	2.461.064	2.461.064	44.767	4.069,7	4.476,7	5,55	0,50455	0,55501	4,76	0,43273	0,38946
Kriterijum izbora	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX

Tabela 6.9. PROMETHEE – Rangiranje alternativa u odnosu na radne parametre b)

PROMETHEE METODA PODKRITERIJUMI	RP1	RP2	RP3	RP4	RP5	RP6	RP7	RP8	RP9	RP10	RP11	RP12
	Ukupna proizvodnja za 11 godina	Prosečna proizvodnja za 11 godina	Trend proizvodnje za 11 godina	Vreme rada za 11 godina	Prosečno vreme rada za 11 godina	Trend vremena rada za 11 godina	Koeficijent vremenskog iskorištenja za 11 godina	Prosečni vremenski iskorištenja za 11 godina	Trend vremenskog iskorištenja za 11 godina	Koeficijent kapacitetskog iskorištenja za 11 godina	Prosečni kapacitetnog iskorištenja za 11 godina	Trend kapacitetnog iskorištenja za 11 godina
Preferencije W_i	0,135	0,074	0,041	0,135	0,074	0,041	0,135	0,074	0,041	0,135	0,074	0,041
SRs 1300/26.5 (G8) RB 7	43.673.667	3.970.393	3.573.354	345.02	3.136,6	2.822,9	4,15	0,37727	0,37727	3,96	0,36000	0,32400
SchRs 630/25.6 (G2) RB 8	39.457.632	3.587.057	3.228.352	3.228.352	2.528,7	3.375,9	3,47	0,31545	0,38391	3,57	0,32455	0,29210
SchRs 900/25.6 (G1) RB 9	39.937.214	3.630.655	3.267.590	33.177	3.016,1	2.714,5	5,42	0,49273	0,44346	4,25	0,38636	0,34772
Kriterijum izbora	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX

Tabela 6.10. AHP – PROMETHEE Radni parametri–rangiranje rotornih bagera

J broj alternativa	Rotorni bageri	Poredak
0,45923	SRs 1200/22.2 (G1) RB 1	9
0,35461	SRs 1200/24.4 (G3) RB 2	3
0,49491	SRs 1200/24.4 (G4) RB 3	1
0,43664	SRs 1200/24.4 (G5) RB 4	8
0,17664	SRs 1200/24.4 (G6) RB 5	5
0,44769	SchRs 630/25.6 (G7) RB 6	2
0,02039	SRs 1300/26.5 (G8) RB 7	4
0,43216	SchRs 630/25.6 (G2) RB 8	7
0,21784	SchRs 900/25.6 (G1) RB 9	6

6.1.3. Parametri održavanja

Parametri održavanja predstavljaju ključne pokazatelje pouzdanosti, raspoloživosti i efikasnosti sistema održavanja rotornih bagera tokom eksploatacije. U ovom delu primenjen je hibridni AHP-PROMETHEE model, težinski koeficijenti parametara održavanja određeni su primenom AHP metode, dok je rangiranje alternativa izvršeno primenom PROMETHEE metode. Kod parametara održavanja kriterijum minimuma je primenjen za parametre PO1, PO2 i PO3 (zastoji i vreme neoperativnosti), dok je za parametre PO4 i PO5, koji se odnose na raspoloživost sistema, primenjen kriterijum maksimuma. U tabeli 6.11, prikazani su podkriterijumi parametara održavanja.

Tabela 6.11. Podkriterijumi parametara održavanja u odnosu na razmatrane alternative

Rotorni bageri	PO1	PO2	PO3	PO4	PO5
RB 1	8.737	794	714,8	0,73540	0,66186
RB 2	9.868	897	896,9	0,75802	0,68222
RB 3	11.813	1.074	1.181,3	0,77763	0,69987
RB 4	13.376	1.216	1.337,6	0,72745	0,65471
RB 5	6.545	595	654,5	0,83825	0,75443
RB 6	5.656	514	565,6	0,85139	0,76625
RB 7	5.485	499	548,5	0,82200	0,82200
RB 8	3.328	303	272,3	0,85664	0,77098
RB 9	6.958	635	698,5	0,81516	0,81516

U tabelama 6.12 i 6.13 prikazani su ulazi podaci – podkriterijumi parametara održavanja, AHP matrica poređenja u parovima sa izračunatim težinskim koeficijentima W_i i provera konzistentnosti dobijenih rezultata. U tabelama 6.14a) i 6.14b), dato je rangiranje alternativa u odnosu na parametre održavanja primenom PROMETHEE metode, dok je konačno rangiranje rotornih bagera koje se odnosi na parametre održavanja prikazano u tabeli 6.15.

Tabela 6.12. AHP – Matrica poređenja u parovima parametara održavanja i vrednosti težinskog koef. W_i

AHP METODA PODKRITERIJUMI	PO1	PO2	PO3	PO4	PO5
	Mehaničko-elektro--vulkanizerski zastoji	Prosečni mehaničko-elektro-vulkanizerski zastoji	Trend mehaničko-elektro-vulkanizerskih zastoja	Tehnička raspoloživost	Trend tehničke raspoloživosti
Mehaničko-elektro-vulkanizerski zastoji	1,00				
Prosečni mehaničko-elektro-vulkanizerski zastoji	2,00	1,00			
Trend mehaničko-elektro-vulkanizerskih zastoja	0,50	0,33	1,00		
Tehnička raspoloživost	2,00	1,00	3,00	1,00	
Trend tehničke raspoloživosti	1,00	0,50	2,00	0,50	1,00
Sopstvena vrednost λ	6,50	3,33	11,00	3,33	6,50
Vrednosti težinskog koeficijenta W_i	0,158	0,298	0,089	0,298	0,158

Tabela 6.13. AHP – Konzistentnost (parametri održavanja)

Konzistentnost		
Sopstvena vrednost λ	5,010799136	5,01326
Broj podkriterijuma n	5	5
Slučajni indeks RI	1,11	1,11
Indeks konzistencije CI	0,002699784	0,003315
Indeks CR	0,002432238	0,002986486
%	0,24	0,30

Tabela 6.14. PROMETHEE – Rangiranje alternativa u odnosu na parametre održavanja a)

PROMETHEE METODA PODKRITERIJUMI	PO1	PO2	PO3	PO4	PO5
	Mehaničko-elektro-vulkanizerski zastoji	Prosečni mehaničko-elektro-vulkanizerski zastoji	Trend mehaničko-elektro-vulkanizerskih zastoja	Tehnička raspoloživost	Trend tehničke raspoloživosti
Preferencije W_i	0,158	0,298	0,089	0,298	0,158
SRs 1200/22.2 (G1) RB1	8.737	794	714,8	0,73540	0,66186
SRs 1200/24.4 (G3) RB2	9.868	897	896,9	0,75802	0,68222
SRs 1200/24.4 (G4) RB3	11.813	1.074	1.181,3	0,77763	0,69987
SRs 1200/24.4 (G5) RB4	13.376	1.216	1.337,6	0,72745	0,65471
Kriterijum izbora	MIN	MIN	MIN	MAX	MAX

Tabela 6.14. PROMETHEE – Rangiranje alternativa u odnosu na parametre održavanja b)

PROMETHEE METODA PODKRITERIJUMI	PO1	PO2	PO3	PO4	PO5
	Mehaničko- elektro- -vulkanizerski zastoji	Prosečni mehaničko- -elektro- -vulkanizerski zastoji	Trend mehaničko- -elektro- -vulkanizerskih zastoja	Tehnička raspoloživost	Trend tehničke raspoloživosti
Preferencije W_i	0,158	0,298	0,089	0,298	0,158
SRs 1200/24.4 (G6) RB 5	6.545	595	654,5	0,83825	0,75443
SchRs 630/25.6 (G7) RB 6	5.656	514	565,6	0,85139	0,76625
SRs 1300/26.5 (G8) RB 7	5.485	499	548,5	0,82200	0,82200
SchRs 630/25.6 (G2) RB 8	3.328	303	272,3	0,85664	0,77098
SchRs 900/25.6 (G1) RB 9	6.958	635	698,5	0,81516	0,81516
Kriterijum izbora	MIN	MIN	MIN	MAX	MAX

Tabela 6.15. AHP – PROMETHEE Parametri održavanja–rangiranje rotornih bagera

J broj alternativa	Rotorni bageri	Poredak
-0,47786	SRs 1200/22.2 (G1) RB1	6
-0,50000	SRs 1200/24.4 (G3) RB2	7
-0,52214	SRs 1200/24.4 (G4) RB3	8
-1,00000	SRs 1200/24.4 (G5) RB4	9
0,28510	SRs 1200/24.4 (G6) RB5	4
0,53510	SchRs 630/25.6 (G7) RB6	3
0,64039	SRs 1300/26.5 (G8) RB7	2
0,92117	SchRs 630/25.6 (G2) RB8	1
0,11825	SchRs 900/25.6 (G1) RB9	5

6.1.4. Ekonomski parametri

Ekonomski parametri predstavljaju završnu grupu ulaznih podataka u hibridnom AHP-PROMETHEE modelu i imaju značajnu ulogu u oceni ukupne efikasnosti rada rotornih bagera. U ovom delu analizirani su parametri koji kvantifikuju troškove i efekte rada mehanizacije tokom posmatranog perioda. Kod ekonomskih parametara kriterijum minimuma primenjen je na parametre EP1 i EP2, koji se odnose na troškovne pokazatelje, dok je kriterijum maksimuma primenjen za parametre EP3, EP4 i EP5, koji izražavaju ekonomske efekte i efikasnost rada bagera. U tabeli 6.16, su dati podkriterijumi ekonomskih parametara.

Tabela 6.16. Podkriterijumi ekonomskih parametara u odnosu na razmatrane alternative

Rotorni bageri	EP1	EP2	EP3	EP4	EP5
RB 1	299.879	269.891	1,10364	1,21401	1,95731
RB2	449.242	449.242	1,10133	1,21146	2,44588
RB3	324.183	356.601	1,34332	1,20898	3,11405
RB4	284.486	256.037	1,46573	1,61230	2,65779
RB5	282.347	254.112	1,39889	1,53878	3,54601
RB6	324.055	356.460	1,76959	1,94655	1,99022
RB7	293.575	239.575	2,14974	2,36471	4,00488
RB8	166.070	149.463	0,91644	1,00809	1,58311
RB9	184.347	202.782	1,06761	1,06761	1,78333

U tabelama 6.17 i 6.18 prikazani su podkriterijumi ekonomskih parametara, AHP matrica poređenja u parovima sa izračunatim težinskim koeficijentima W_i i provera konzistentnosti dobijenih rezultata. Rangiranje alternativa u odnosu na ekonomske parametre primenom PROMETHEE metode dato je u tabelama 6.19a) i 6.19b), dok je konačno rangiranje rotornih bagera na osnovu ekonomskih parametara prikazano u tabeli 6.20.

Tabela 6.17. AHP – Matrica poređenja u parovima ekonomskih parametara i vrednosti težinskog koef. W_i

AHP METODA PODKRITERIJUMI	EP1	EP2	EP3	EP4	EP5
	Prosečni troškovi	Trend prosečnih troškova	Efikasnost proizvodnje EP	Trend efikasnosti proizvodnje EP	Efektivnost rudarske mehanizacije MPI = $f(\text{raspoloživosti, efikasnosti proizvodnje, upotrebljivosti})$
Prosečni troškovi	1,00				
Trend prosečnih troškova	0,33	1,00			
Efikasnost proizvodnje EP	1,00	3,00	1,00		
Trend efikasnosti proizvodnje EP	0,33	1,00	0,33	1,00	
Efektivnost rudarske mehanizacije MPI = $f(\text{raspoloživosti, efikasnosti proizvodnje, upotrebljivosti})$	0,50	2,00	0,50	2,00	1,00
Sopstvena vrednost λ	3,17	10,00	3,17	10,00	6,00
Vrednosti težinskog koeficijenta W_i	0,314	0,098	0,314	0,098	0,176

Tabela 6.18. AHP – Konzistentnost (ekonomski parametri)

Konzistentnost		
Sopstvena vrednost λ	5,013	5,0
Broj podkriterijuma n	5	5
Slučajni indeks RI	1,11	1,11
Indeks konzistencije CI	0,0033	0,002547
Indeks CR	0,002973	0,002295
%	0,297297	0,229503

Tabela 6.19. PROMETHEE – Rangiranje alternativa u odnosu na ekonomske parametre a)

PROMETHEE METODA PODKRITERIJUMI	EP1	EP2	EP3	EP4	EP5
	Prosečni troškovi	Trend prosečnih troškova	Efikasnost proizvodnje EP	Trend efikasnosti proizvodnje EP	Efektivnost rudarske mehanizacije MPI = $f(\text{raspoloživosti, efikasnosti upotrebljivosti})$
Preferencije W_i	0,314	0,098	0,314	0,098	0,158
SRs 1200/22.2 (G1) RB 1	299.879	269.891	1,10364	1,21401	1,95731
SRs 1200/24.4 (G3) RB 2	449.242	449.242	1,10133	1,21146	2,44588
SRs 1200/24.4 (G4) RB 3	324.183	356.601	1,34332	1,20898	3,11405
Kriterijum izbora	MIN	MIN	MAX	MAX	MAX

Tabela 6.19. PROMETHEE – Rangiranje alternativa u odnosu na ekonomske parametre b)

PROMETHEE METODA PODKRITERIJUMI	EP1	EP2	EP3	EP4	EP5
	Prosečni troškovi	Trend prosečnih troškova	Efikasnost proizvodnje EP	Trend efikasnosti proizvodnje EP	Efektivnost rudarske mehanizacije $MPI = f(\text{raspoloživosti, efikasnosti upotrebljivosti})$
Preferencije W_i	0,314	0,098	0,314	0,098	0,158
SRs 1200/24.4 (G5) RB 4	284.486	256.037	1,46573	1,61230	2,65779
SRs 1200/24.4 (G6) RB 5	282.347	254.112	1,39889	1,53878	3,54601
SchRs 630/25.6 (G7) RB 6	324.055	356.460	1,76959	1,94655	1,99022
SRs 1300/26.5 (G8) RB 7	293.575	239.575	2,14974	2,36471	4,00488
SchRs 630/25.6 (G2) RB 8	166.070	149.463	0,91644	1,00809	1,58311
SchRs 900/25.6 (G1) RB 9	184.347	202.782	1,06761	1,06761	1,78333
Kriterijum izbora	MIN	MIN	MAX	MAX	MAX

Tabela 6.20. AHP-PROMETHEE Ekonomski parametri–rangiranje rotornih bagera

J broj alternativa	Rotorni bageri	Poredak
-0,11270	SRs 1200/22.2 (G1) RB 1	5
-0,23059	SRs 1200/24.4 (G3) RB 2	8
-0,17170	SRs 1200/24.4 (G4) RB 3	6
-0,08348	SRs 1200/24.4 (G5) RB 4	4
0,21058	SRs 1200/24.4 (G6) RB 5	3
-0,55891	SchRs 630/25.6 (G7) RB 6	9
-0,18649	SRs 1300/26.5 (G8) RB 7	7
0,64759	SchRs 630/25.6 (G2) RB 8	1
0,48569	SchRs 900/25.6 (G1) RB 9	2

6.1.5. Zbirno model AHP-PROMETHEE

U okviru hibridnog modela AHP-PROMETHEE, AHP metoda primenjena je za međusobno rangiranje osnovnih kriterijuma i podkriterijuma, dok je PROMETHEE metoda korišćena za rangiranje alternativa u skladu sa definisanim kriterijumima i pripadajućim težinskim koeficijentima dobijenim primenom AHP metode. AHP metoda je primenjena na sledeće grupe parametara: tehničke, eksploatacione-radne, parametre održavanja i ekonomske parametre. Na osnovu dobijenih rezultata izračunati su težinski koeficijenti kriterijuma, koji predstavljaju ulazne podatke za PROMETHEE metodu.

U tabeli 6.21 prikazani su zbirni rezultati sa preferencijama i težinskim koeficijentima W_i , dok su u tabeli 6.22 dati parcijalni rangovi po grupama parametara i konačni rang rotornih bagera. Primenom hibridnog AHP-PROMETHEE modela omogućena je sistematična i sveobuhvatna evaluacija rotornih bagera na osnovu više međusobno konfliktnih kriterijuma.

Dobijeni rezultati rezultati kombinovanjem AHP metode i PROMETHEE metode ukazuju na jasne razlike u performansama analiziranih rotornih bagera po pojedinim grupama parametara (tehničkim, eksploatacionim-radnim, parametrima održavanja i ekonomskim), ali i na konačni rang koji predstavlja kompromisno rešenje zasnovano na ukupnom uticaju svih kriterijuma.

Tabela 6.21. AHP – PROMETHEE Zbirni rezultat sa preferencijama W_i

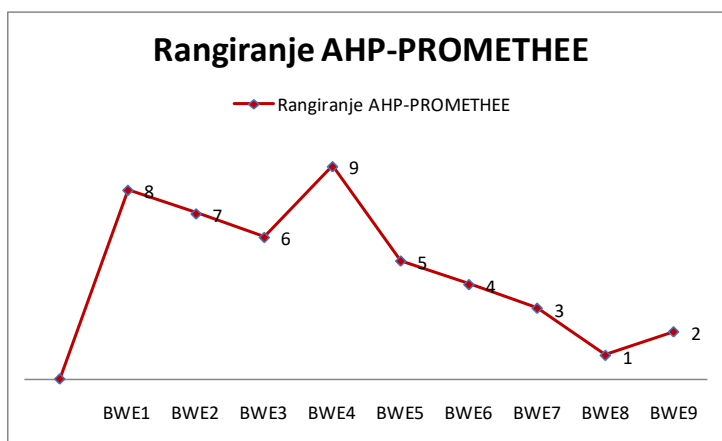
Model AHP-PROMETHEE	Tehnički parametri TP	Radni parametri RP	Parametri održavanja PO	Ekonomski parametri EP	Ukupno
SRs1200/22.2 (G1) RB 1	0,24390	-0,1148	-0,1195	-0,0282	-0,2015
SRs1200/24.4 (G3) RB 2	-0,07508	0,0887	-0,1250	-0,0576	-0,1128
SRs1200/24.4 (G4) RB 3	-0,07508	0,1237	-0,1305	-0,0429	-0,0685
SRs1200/24.4 (G5) RB 4	-0,07508	-0,1067	-0,2500	-0,0209	-0,3963
SRs1200/24.4 (G6) RB 5	-0,07508	-0,0442	0,0713	0,0526	0,0610
Sch630/5.6 (G7) RB 6	-0,07423	0,1119	0,1338	-0,1397	0,0874
SRs1300/26.5 (G8) RB 7	0,08691	-0,0051	0,1601	-0,0466	0,1301
SchRs630/25.6 (G2) RB 8	0,08691	-0,1080	0,2303	0,1619	0,3059
SchRs900/25.6 (G1) RB 9	-0,04317	0,0545	0,0296	0,1214	0,1947

Tabela 6.22. AHP – PROMETHEE Prikaz parcijalnih rangova i konačnog ranga

Model AHP- PROMETHEE	Tehnički parametri TP	Radni parametri RP	Parametri održavanja PO	Ekonomski parametri EP	Srednja vrednost	Koeficijenti	Rang
SRs1200/22.2 (G1) RB 1	1	9	6	5	5,25	-0,2015	8
SRs1200/24.4 (G3) RB 2	5	3	7	8	5,75	-0,1128	7
SRs1200/24.4 (G4) RB 3	5	1	8	6	5,00	-0,0685	6
SRs1200/24.4 (G5) RB 4	5	8	9	4	6,50	-0,3963	9
SRs1200/24.4 (G6) RB 5	5	5	4	3	4,25	0,0610	5
SchRs630/25.6 (G7) RB 6	4	2	3	9	4,50	0,0874	4
SRs1300/26.5 (G8) RB 7	2	4	2	7	3,75	0,1301	3
SchRs630/25.6 (G2) RB 8	2	7	1	1	2,75	0,3059	1
SchRs900/25.6 (G1) RB 9	3	6	5	2	4,00	0,1947	2

Model AHP-PROMETHEE se pokazao kao pouzdan alat za podršku odlučivanju u procesu upravljanja životnim vekom rotornih bagera, naročito u kontekstu planiranja revitalizacije, modernizacije i prioritizacije investicionih odluka. Dobijeni rezultati predstavljaju osnovu za poređenje sa ostalim razvijenim hibridnim modelima u nastavku rada, čime se dodatno ispituje stabilnost i robusnost predloženog pristupa.

Grafički prikaz konačnog rangiranja rotornih bagera na osnovu hibridnog AHP-PROMETHEE modela dat je na slici 6.3.

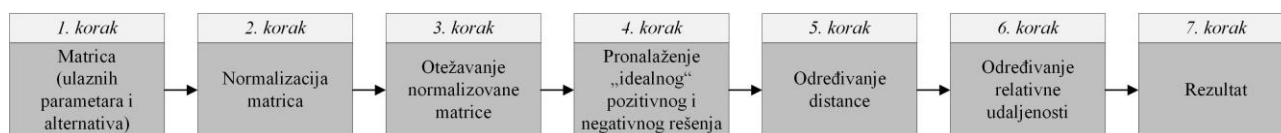


Slika 6.3. Rangiranje rotornih bagera model AHP-PROMETHEE

6.2. Model AHP-TOPSIS

U okviru ovog istraživanja razvijen je hibridni model AHP-TOPSIS za rangiranje rotornih bagera na osnovu definisanih kriterijuma i podkriterijuma. AHP metoda korišćena je isključivo za određivanje težinskih koeficijenata kriterijuma i podkriterijuma, koji su već izračunati i prikazani u okviru modela AHP-PROMETHEE, te se u ovom modelu isti težinski koeficijenti preuzimaju iz odgovarajućih tabela bez ponovnog sprovođenja AHP procedure. Obezbeđena je konzistentnost težinskog sistema kriterijuma u svim hibridnim modelima.

Metoda TOPSIS je primenjena u drugom delu modela za rangiranje alternativa, na osnovu koncepta idealnog i anti-idealnog rešenja, jednačine (4.51) do (4.53). Rangiranje rotornih bagera vrši se određivanjem Euklidskog rastojanja svake alternative od pozitivnog idealnog i negativnog idealnog rešenja jednačine (4.44) do (4.46), kao optimalna bira se ona alternativa koja ima najmanje rastojanje od idealnog i najveće rastojanje od anti-idealnog rešenja. Rang vrednosti RC_i poredanih u opadajući niz odgovara rangu alternative A_i (od najbolje do najgore), gde je RC_i relativna bliskost alternative idealnom rešenju (4.54), što predstavlja poslednji korak u metodi. Koraci TOPSIS metode su dati na slici 6.4. Reprezentativni primer proračuna za TOPSIS metodu je dat u prilogu broj 3.



Slika 6.4. Koraci TOPSIS metode [1]

Na ovaj način omogućeno je vrednovanje i rangiranje rotornih bagera u odnosu na tehničke, radne, parametre održavanja i ekonomske parametre, uz korišćenje jedinstvenog sistema težina definisanog AHP metodom. Matematičke osnove AHP i TOPSIS metoda su date u podpoglavljima 4.4.1. i 4.4.3, dok se u ovom poglavlju metode primenjuju u okviru razvijenog hibridnog modela AHP-TOPSIS na konkretne grupe parametara rotornih bagera. Proračuni su realizovani u programskom okruženju Microsoft Excel, uz primenu standardnih algoritama.

6.2.1. Tehnički parametri

U okviru hibridnog AHP-TOPSIS modela, tehnički parametri su razmatrani kao posebna grupa kriterijuma za evaluaciju rotornih bagera. Težinski koeficijenti tehničkih parametara određeni su primenom AHP metode i preuzeti iz prethodno definisanog modela AHP-PROMETHEE (tabele 6.1, 6.2 i 6.3) dok je rangiranje izvršeno primenom TOPSIS metode. Tehnički parametri su razmatrani na isti način kao i u modelu AHP-PROMETHEE.

Tehnički parametri rotornog bagera prikazani su u tabeli 6.23. U tabeli 6.24 dati su rezultati odstupanja S_i^+ od idealnog pozitivnog rešenja A_i^+ , dok su u tabeli 6.25 dati rezultati odstupanja S_i^- od idealnog negativnog rešenja A_i^- , za tehničke parametre rotornog bagera. U tabeli 6.26 prikazano je rangiranje rotornih bagera za tehničke parametre.

Tabela 6.23. TOPSIS – Tehnički parametri

TOPSIS METODA PODKRITE- RIJUMI	TP1	TP2	TP3	TP4	TP5	TP6	TP7	TP8	TP9	TP10	TP11	TP12	TP13	TP14	TP15
	Gartner 1	Gartner 3	Dombrovski 1	Lauchmewerk	Ajdner	Krumraj	Aksenov	Rozenpleter	G/Q_t	G/N_{kr}	N_{lim}/Q_t	N_{lim}/G	η_e	η_m	Hazanet
Preferencije W_i	0,042	0,042	0,042	0,025	0,072	0,072	0,025	0,025	0,072	0,025	0,122	0,122	0,122	0,122	0,072
SRs 1200/22.2 (G1) RB 1	18,78526	5,02543	0,00014	34,43963	9,55073	0,21408	12,79468	4,63054	0,41328	2,27302	0,58875	1,42458	2,33668	1,64026	122,7911
SRs 1200/24.4 (G3) RB 2	18,37422	4,75247	0,00025	15,74933	15,93546	0,19802	15,16862	4,67686	0,44098	3,82000	0,52237	1,18456	1,98958	1,67960	150,78060
SRs 1200/24.4 (G4) RB 3	18,37422	4,75247	0,00025	15,74933	15,93546	0,19802	15,16862	4,67686	0,44098	3,82000	0,52237	1,18456	1,98958	1,67960	150,78060
SRs 1200/24.4 (G5) RB 4	18,37422	4,75247	0,00025	15,74933	15,93546	0,19802	15,16862	4,67686	0,44098	3,82000	0,52237	1,18456	1,98958	1,67960	150,7806
SRs 1200/24.4 (G6) RB 5	18,37422	4,75247	0,00025	15,74933	15,93546	0,19802	15,16862	4,67686	0,44098	3,82000	0,52237	1,18456	1,98958	1,67960	150,7806
SchRs 630/25.6 (G7) RB 6	19,68376	3,96420	0,00015	16,50896	6,64862	0,27301	11,95649	3,88889	0,51178	2,55889	0,71111	1,38949	1,93222	1,39059	176,6301
SRs 1300/26.5 (G8) RB 7	14,62439	5,07087	0,00020	11,79386	15,01439	0,20284	9,43546	4,98276	0,36561	1,99867	0,45366	1,24083	2,15076	1,73333	99,07069
SchRs 630/25.6 (G2) RB 8	14,62439	5,07087	0,00020	11,79386	15,01439	0,20284	9,43546	4,98276	0,36561	1,99867	0,45366	1,24083	2,15076	1,73333	99,07069
SchRs 900/25.6 (G1) RB 9	14,54634	5,04381	0,00017	11,73092	15,32049	0,20175	9,38510	4,95616	0,36366	1,98800	0,45366	1,24749	2,14885	1,72255	91,05841
Kriterijum izbora	MAX	MAX	MAX	MAX	MIN	MIN	MAX	MAX	MIN	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX
Idealno rešenje A_i^+	0,0156912	0,014639	0,016367	0,01608	0,0111408	0,022479	0,0098131	0,008846	0,020581	0,010544	0,054186	0,046088	0,04569	0,042373	0,03121442
Idealno negativno rešenje A_i^-	0,0115959	0,011444	0,009125	0,0054772	0,0267024	0,030992	0,0060715	0,006904	0,028964	0,005487	0,034569	0,038323	0,037781	0,033995	0,01609202

Tabela 6.24. TOPSIS – Tehnički parametri - Odstupanja S_i^+ od idealnog pozitivnog rešenja A_i^+

Rotorni bageri	TP1	TP2	TP3	TP4	TP5	TP6	TP7	TP8
RB 1	5,13E-07	1,72E-08	5,24E-05	0	2,365E-05	3,32E-06	2,359E-06	3,91E-07
RB 2	1,09E-06	8,45E-07	0	7,615E-05	0,0002422	0	0	2,95E-07
RB 3	1,09E-06	8,45E-07	0	7,615E-05	0,0002422	0	0	2,95E-07
RB 4	1,09E-06	8,45E-07	0	7,615E-05	0,0002422	0	0	2,95E-07
RB 5	1,09E-06	8,45E-07	0	7,615E-05	0,0002422	0	0	2,95E-07
RB 6	0	1,02E-05	4,07E-05	7,009E-05	0	7,25E-05	4,318E-06	3,77E-06
RB 7	1,627E-05	0	9,78E-06	0,0001118	0,0001965	2,99E-07	1,376E-05	0
RB 8	1,627E-05	0	9,78E-06	0,0001118	0,0001965	2,99E-07	1,376E-05	0
RB 9	1,627E-05	6,1E-09	2,47E-05	0,0001124	0,0002112	1,8E-07	1,4E-05	2,23E-09
TP9	TP10	TP11	TP12	TP13	TP14	TP15		
RB 1	7,89E-05	1,82E-05	8,69E-05	0	0	5,18E-06	9,0526E-05	
RB 2	1,91E-05	0	0,000207	6,03E-05	4,61E-05	1,73E-06	2,0868E-05	
RB 3	1,91E-05	0	0,000207	6,03E-05	4,61E-05	1,73E-06	2,0868E-05	
RB 4	1,91E-05	0	0,000207	6,03E-05	4,61E-05	1,73E-06	2,0868E-05	
RB 5	1,91E-05	0	0,000207	6,03E-05	4,61E-05	1,73E-06	2,0868E-05	
RB 6	7,03E-05	1,21E-05	0	1,29E-06	6,25E-05	7,02E-05	0	
RB 7	1,22E-08	2,53E-05	0,000385	3,53E-05	1,32E-05	0	0,00018787	
RB 8	1,22E-08	2,53E-05	0,000385	3,53E-05	1,32E-05	0	0,00018787	
RB 9	0	2,56E-05	0,000385	3,28E-05	1,35E-05	6,94E-08	0,00022869	

Tabela 6.25. TOPSIS – Tehnički parametri - Odstupanja S_i^- od idealnog negativnog rešenja A_i^-

Rotorni bageri	TP1	TP2	TP3	TP4	TP5	TP6	TP7	TP8
RB 1	1,142E-05	9,39E-06	0	0,0001124	0,0001145	4,48E-05	4,865E-06	1,73E-06
RB 2	9,311E-06	5,18E-06	5,24E-05	3,52E-06	0	7,25E-05	1,4E-05	1,96E-06
RB 3	9,311E-06	5,18E-06	5,24E-05	3,52E-06	0	7,25E-05	1,4E-05	1,96E-06
RB 4	9,311E-06	5,18E-06	5,24E-05	3,52E-06	0	7,25E-05	1,4E-05	1,96E-06
RB 5	9,311E-06	5,18E-06	5,24E-05	3,52E-06	0	7,25E-05	1,4E-05	1,96E-06
RB 6	1,677E-05	0	7,39E-07	4,977E-06	0,0002422	0	2,767E-06	0
RB 7	3,871E-09	1,02E-05	1,69E-05	8,636E-10	2,382E-06	6,35E-05	1,61E-06	3,77E-06
RB 8	3,871E-09	1,02E-05	1,69E-05	8,636E-10	2,382E-06	6,35E-05	1,61E-06	0
RB 9	0	9,71E-06	5,17E-06	0	1,062E-06	6,54E-05	0	3,59E-06
TP9	TP10	TP11	TP12	TP13	TP14	TP15		
RB 1	3,11E-05	6,19E-07	0,000106	6,03E-05	6,25E-05	3,73 E-05	3,1448E-05	
RB 2	1,61E-05	2,56E-05	2,74E-05	0	1,26E-06	4,99E-05	0,00011139	
RB 3	1,61E-05	2,56E-05	2,74E-05	0	1,26E-06	4,99E-05	0,00011139	
RB 4	1,61E-05	2,56E-05	2,74E-05	0	1,26E-06	4,99E-05	0,00011139	
RB 5	1,61E-05	2,56E-05	2,74E-05	0	1,26E-06	4,99E-05	0,00011139	
RB 6	0	2,48E-06	0,000385	4,4E-05	0	0	0,00022869	
RB 7	6,84E-05	8,67E-10	0	3,31E-06	1,83E-05	7,02E-05	2,0049E-06	
RB 8	6,84E-05	8,67E-10	0	3,31E-06	1,83E-05	7,02E-05	2,0049E-06	
RB 9	7,03E-05	0	0	4,14E-06	1,79E-05	6,59E-05	0	

Tabela 6.26. AHP – TOPSIS Tehnički parametri– rangiranje rotornih bagera

C_i relativno rastojanje	Rotorni bageri	Poredak
0,59484	SRs 1200/22.2 (G1) RB 1	1
0,43191	SRs 1200/24.4 (G3) RB 2	3
0,43191	SRs 1200/24.4 (G4) RB 3	3
0,43191	SRs 1200/24.4 (G5) RB 4	3
0,43191	SRs 1200/24.4 (G6) RB 5	3
0,59832	SchRs 630/25.6 (G7) RB 6	2
0,33782	SRs 1300/26.5 (G8) RB 7	4
0,33782	SchRs 630/25.6 (G2) RB 8	4
0,32337	SchRs 900/25.6 (G1) RB 9	5

6.2.2. Radni parametri

U okviru hibridnog AHP-TOPSIS modela, radni parametri su razmatrani kao posebna grupa kriterijuma za evaluaciju rotornih bagera. Težinski koeficijenti radnih parametara određeni su primenom AHP metode i preuzeti iz prethodno definisanog modela AHP-PROMETHEE (tabele 6.6, 6.7 i 6.8), a primenom TOPSIS metode je izvršeno rangiranje.

Tabela 6.27. TOPSIS – Radni parametri

TOPSIS METODA PODKRITERIJUMI	RP1	RP2	RP3	RP4	RP5	RP6	RP7	RP8	RP9	RP10	RP11	RP12
	Ukupna proizvodnja za 11 godina	Prosečna proizvodnja za 11 godina	Trend proizvodnje za 11 godina	Vreme rada za 11 godina	Prosečno vreme rada za 11 godina	Trend vremena rada za 11 godina	Koeficijent vremenskog iskorišćenja	Prosečni koeficijent vremenskog iskorišćenja	Trend koeficijenta vremenskog iskorišćenja za 11 god	Koeficijent kapacitetskog iskorišćenja za 11 god	Prosečni koeficijent kapacitetskog iskorišćenja za 11 god	Trend koeficijenta kapacitetskog iskorišćenja za 11 god
Preferencije W_i	0,135	0,074	0,041	0,135	0,074	0,041	0,135	0,074	0,041	0,135	0,074	0,041
SRs 1200/22.2 (G1) RB 1	39,937,214	3,630,655	3,267,590	33,177	3,016,1	2,714,5	5,42	0,49273	0,44346	4,25	0,38636	0,34772
SRs 1200/24.4 (G3) RB 2	34,695,818	3,154,165,3	2,838,748,8	24,608	2,237,1	2,013,3	4,53	0,41182	0,45300	3,65	0,33182	0,29864
SRs 1200/24.4 (G4) RB 3	44,122,403	4,011,127	3,610,015	46,780	4,252,7	3,827,5	5,41	0,49180	0,44262	3,54	0,32100	0,32100
SRs 1200/24.4 (G5) RB 4	33,930,887	3,084,626	2,776,163	40,998	3,727,1	3,354,4	4,70	0,42700	0,38430	3,01	0,27300	0,24570
SRs 1200/24.4 (G6) RB 5	34,834,802	3,483,480	3,135,132	41,222	3,747,5	3,372,7	4,70	0,42700	0,38430	3,18	0,28900	0,26010
SchRs 630/25.6 (G7) RB 6	27,071,704	2,461,064	2,461,064	44,767	4,069,7	4,476,7	5,55	0,50455	0,55501	4,76	0,43273	0,38946
SRs 1300/26.5 (G8) RB 7	43,673,667	3,970,393	3,573,354	34,502	3,136,6	2,822,9	4,15	0,37727	0,37727	3,96	0,36000	0,32400
SchRs 630/25.6 (G2) RB 8	39,457,632	3,587,057	3,228,352	32,283,52	2,528,7	3,375,9	3,47	0,31545	0,38391	3,57	0,32455	0,29210
SchRs 900/25.6 (G1) RB 9	27,071,704	2,461,064	2,461,064	44,767	4,069,7	4,476,7	5,55	0,50455	0,55501	4,76	0,43273	0,38946
Kriterijum izbora	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX
Idealno rešenje A_i^+	0,0520408	0,02834705	0,01547003	0,05570902	0,03063926	0,01835961	0,05179373	0,02849027	0,01754517	0,05563886	0,03061412	0,01663224
Idealno negativno rešenje A_i^-	0,03193011	0,01739259	0,01054642	0,02904995	0,01611736	0,00825684	0,03238275	0,01781242	0,0119265	0,0351834	0,01931379	0,01049306

Radni (eksploatacioni) parametri predstavljaju ključne pokazatelje stvarnih uslova rada rotornih bagera i njihove proizvodne efikasnosti u dugoročnom periodu eksploatacije, primenjeni su na isti način kao u modelu AHP-PROMETHEE.

U drugoj iteraciji modela se primenjuje TOPSIS metoda. Radni parametri za rotorne bagere prikazani su u tabeli 6.27. U tabeli 6.28 dati su rezultati odstupanja S_i^+ od idealnog pozitivnog rešenja A_i^+ , dok su u tabeli 6.29 prikazani rezultati odstupanja S_i^- od idealnog negativnog rešenja A_i^- , za radne parametre rotornog bagera. U tabeli 6.30 prikazano je rangiranje rotornih bagera za radne parametre.

Tabela 6.28. TOPSIS – Radni parametri - Odstupanja S_i^+ od idealnog pozitivnog rešenja A_i^+

Rotorni bageri	RP1	RP2	RP3	RP4	RP5	RP6
RB1	0,00012362	3,6678E-05	1,0924E-05	0,000697173	0,00021089	0,00010207
RB2	4,5389E-06	1,3467E-06	4,011E-07	6,39283E-05	1,9338E-05	2,463E-05
RB3	0	0	0	0	0	7,0887E-05
RB4	0,00014449	4,2872E-05	1,2769E-05	4,74118E-05	1,4342E-05	2,1185E-05
RB5	0,00012	1,3905E-05	4,1413E-06	4,38094E05	1,3252E-05	2,05E-05
RB6	0,00040444	0,00012	2,4242E-05	5,7467E-06	1,7385E-06	0
RB7	2,8012E-05	8,287E-08	2,4681E-08	0,000213789	6,4668E-05	4,6002E-05
RB8	3,0271E-05	8,981E-06	2,6785E-06	0,000510024	0,00015428	2,0381E-05
RB9	2,4367E-05	7,2298E-06	2,1532E-06	0,000262422	7,9379E-05	5,223E-05
	RP7	RP8	RP9	RP10	RP11	RP12
RB1	9,0608E-05	2,7417E-05	1,0398E-05	0,00016834	5,0966E-05	1,5043E-05
RB2	1,9238E-05	5,8217E-06	1,9411E-05	1,9729E-05	5,9746E-06	1,7635E-06
RB3	1,707E-06	5,1833E-07	1,2622E-05	0,00020336	6,2481E-06	8,5473E-06
RB4	6,2923E-05	1,9176E-05	2,9122E-05	0,00041843	0,0001277	3,7692E-05
RB5	6,2923E-05	1,9176E-05	2,9122E-05	0,00034108	0,0001034	3,0519E-05
RB6	0	0	0	0	0	0
RB7	0,0001707	5,1654E-05	3,1569E-05	8,7442E-05	2,6475E-05	7,7146E-06
RB8	0,00037679	0,00011402	2,9256E-05	0,00019348	5,8574E-05	1,7389E-05
RB9	1,4718E-0	4,4547E-07	1,2435E-05	3,5537E-05	1,0762E-05	3,1765E-06

Tabela 6.29. TOPSIS – Radni parametri - Odstupanja S_i^- od idealnog negativnog rešenja A_i^-

Rotorni bageri	RP1	RP2	RP3	RP4	RP5	RP6
RB1	8,0863E-05	2,3993E-05	2,6195E-06	0	0	0
RB2	0,00032329	9,5922E-05	1,8407E-05	0,000338873	0,0001025	2,6906E-05
RB3	0,00040444	0,00012	2,4242E-05	0,000697173	0,00021089	5,5358E-05
RB4	6,5451E-05	1,942E-05	1,8233E-06	0,000380968	0,00011524	3,0251E-05
RB5	8,3838E-05	5,2208E-05	8,344E-06	0,000391453	0,00011841	3,1082E-05
RB6	0	0	0	0,000576327	0,00017433	0,00010207
RB7	0,00038343	0,00011378	2,272E-05	0,000138827	4,1994E-05	1,1024E-05
RB8	0,00021342	6,3322E-05	1,0811E-05	1,45948E-05	4,4145E-06	3,1228E-05
RB9	0,00023026	6,8321E-05	1,1945E-05	0,000104134	3,1499E-05	8,2698E-06
	RP7	RP8	RP9	RP10	RP11	RP12
RB1	9,7854E-05	2,9612E-05	5,7317E-06	5,5963E-05	1,7316E-05	5,1113E-06
RB2	0,00022575	6,8311E-05	1,4712E-06	0,00025644	7,843E-05	2,315E-05
RB3	0,00032777	9,916E-05	4,2679E-06	3,8379E-05	1,1532E-05	1,0342E-05
RB4	0,00013176	3,9676E-05	4,9389E-08	0	0	0
RB5	0,00013176	3,9676E-05	4,9389E-08	3,9486E-06	1,2813E-06	3,782E-07
RB6	0,00037679	0,00011402	3,1569E-05	0,00041843	0,0001277	3,7692E-05
RB7	4,027E-05	1,2185E-05	0	0,00012331	3,7883E-05	1,1182E-05
RB8	0	0	4,3995E-08	4,2847E-05	1,33E-05	3,9259E-06
RB9	0,00033116	0,00010021	4,3779E-06	0,00021008	6,4318E-05	1,8984E-05

Tabela 6.30. AHP – TOPSIS Radni parametri–rangiranje rotornih bagera

C_i relativno rastojanje	Rotorni bageri	Poredak
0,31251	SRs 1200/22.2 (G1) RB 1	9
0,74347	SRs 1200/24.4 (G3) RB 2	1
0,72224	SRs 1200/24.4 (G4) RB 3	2
0,47248	SRs 1200/24.4 (G5) RB 4	7
0,50911	SRs 1200/24.4 (G6) RB 5	6
0,65238	SchRs 630/25.6 (G7) RB 6	3
0,53624	SRs 1300/26.5 (G8) RB 7	5
0,33876	SchRs 630/25.6 (G2) RB 8	8
0,60809	SchRs 900/25.6 (G1) RB 9	4

6.2.3. Parametri održavanja

U okviru hibridnog AHP-TOPSIS modela, parametri održavanja su razmatrani kao posebna grupa kriterijuma za evaluaciju rotornih bagera. Težinski koeficijenti parametara održavanja određeni su primenom AHP metode i preuzeti iz prethodno definisanog modela AHP-PROMETHEE (tabele 6.11, 6.12 i 6.13), dok je rangiranje izvršeno primenom TOPSIS metode. Parametri održavanja primenjeni su na isti način kao u modelu AHP-PROMETHEE. U prilogu broj 3 je dat detaljan proračun parametara održavanja za model AHP-TOPSIS.

Tabela 6.31. TOPSIS – Parametri održavanja

TOPSIS METODA	PO1	PO2	PO3	PO4	PO5
PODKRITERIJUMI	Mehaničko- -elektro- -vulkanizerski zastoji	Prosečni mehaničko- elektro- -vulkanizerski zastoji	Trend mehaničko- -elektro- -vulkanizerskih zastoka	Tehnička raspoloživost	Trend tehničke raspoloživosti
Preferencije W_i	0,158	0,298	0,089	0,298	0,158
SRs 1200/22.2 (G1) RB 1	8.737	794	714,8	0,73540	0,66186
SRs 1200/24.4 (G3) RB 2	9.868	897	896,9	0,75802	0,68222
SRs 1200/24.4 (G4) RB 3	11.813	1.074	1.181,3	0,77763	0,69987
SRs 1200/24.4 (G5) RB 4	13.376	1.216	1.337,6	0,72745	0,65471
SRs 1200/24.4 (G6) RB 5	6.545	595	654,5	0,83825	0,75443
SchRs 630/25.6 (G7) RB 6	5.656	514	565,6	0,85139	0,76625
SRs 1300/26.5 (G8) RB 7	5.485	499	548,5	0,82200	0,82200
SchRs 630/25.6 (G2) RB 8	3.328	303	272,3	0,85664	0,77098
SchRs 900/25.6 (G1) RB 9	6.958	635	698,5	0,81516	0,81516
Kriterijum izbora	MIN	MIN	MIN	MAX	MAX
Idealno rešenje A_i^+	0,0204777	0,0387582	0,0097541	0,1064710	0,0584720
Idealno negativno rešenje A_i^-	0,0823047	0,1555444	0,0479144	0,0904141	0,0465720

Tabela 6.32. TOPSIS – Parametri održavanja - Odstupanja S_i^+ od idealnog pozitivnog rešenja A_i^+

Rotorni bageri	PO1	PO2	PO3	PO4	PO5
RB 1	0,00110772	0,00394462	0,00025125	0,00022707	0,000129763
RB 2	0,00161939	0,00577317	0,00050059	0,00015024	9,88649E-05
RB 3	0,00272584	0,00972636	0,00106025	9,6434E-05	7,54739E-05
RB 4	0,00382258	0,01363902	0,00145621	0,00025782	0,000141609
RB 5	0,00039183	0,00139511	0,00018744	5,2243E-06	2,31025E-05
RB 6	0,00020519	0,00072846	0,00011038	4,2578E-07	1,57269E-05
RB 7	0,00017616	0,00062857	9,7888E-05	1,8536E-05	0
RB 8	0	0	0	0	1,31714E-05
RB 9	0,0004989	0,00180351	0,00023308	2,6579E-05	2,36736E-07

Tabela 6.33. TOPSIS – Parametri održavanja - Odstupanja S_i^- od idealnog negativnog rešenja A_i^-

Rotorni bageri	PO1	PO2	PO3	PO4	PO5
RB 1	0,00081479	0,00291385	0,00049771	9,7634E-07	2,58681E-07
RB 2	0,00046592	0,00166503	0,00024921	1,4436E-05	3,82942E-06
RB 3	9,2494E-05	0,00032993	3,1347E-05	3,8898E-05	1,03195E-05
RB 4	0	0	0	0	0
RB 5	0,00176671	0,00630994	0,00059875	0,00018965	5,03172E-05
RB 6	0,00225648	0,00806336	0,00076474	0,0002373	6,29525E-05
RB 7	0,00235755	0,00841163	0,00079900	0,0001381	0,000141609
RB 8	0,00382258	0,01363902	0,00145621	0,00025782	6,84049E-05
RB 9	0,00155954	0,00552324	0,00052410	0,00011884	0,000130266

Tabela 6.34. AHP – TOPSIS Parametri održavanja–rangiranje rotornih bagera

C_i relativno rastojanje	Rotorni bageri	Poredak
0,46358	SRs 1200/22.2 (G1) RB 1	6
0,35180	SRs 1200/24.4 (G3) RB 2	7
0,16088	SRs 1200/24.4 (G4) RB 3	8
0,00000	SRs 1200/24.4 (G5) RB 4	9
0,67845	SRs 1200/24.4 (G6) RB 5	4
0,76619	SchRs 630/25.6 (G7) RB 6	3
0,78196	SRs 1300/26.5 (G8) RB 7	2
0,97451	SchRs 630/25.6 (G2) RB 8	1
0,63650	SchRs 900/25.6 (G1) RB 9	5

6.2.4. Ekonomski parametri

U okviru hibridnog AHP-TOPSIS modela, ekonomski parametri su razmatrani kao posebna grupa kriterijuma za evaluaciju rotornih bagera. Težinski koeficijenti ekonomskih parametara određeni su primenom AHP metode i preuzeti iz prethodno definisanog modela AHP-PROMETHEE (tabele 6.16, 6.17 i 6.18), dok je rangiranje izvršeno primenom TOPSIS metode.

Ekonomski parametri predstavljaju završnu grupu ulaznih podataka u hibridnom AHP-TOPSIS modelu i imaju značajnu ulogu u oceni ukupne efikasnosti rada rotornih bagera. Primena ekonomskih parametara je ista kao i u modelu AHP-PROMETHEE.

Ekonomski parametri rotornih bagera prikazani su u tabeli 6.35. U tabeli 6.36 dati su rezultati odstupanja S_i^+ od idealnog rešenja A_i^+ , dok su u tabeli 6.37 dati rezultati odstupanja S_i^- od idealnog negativnog rešenja A_i^- . U tabeli 6.38 prikazano rangiranje za ekonomske parametre rotornog bagera.

Tabela 6.35. TOPSIS – Ekonomski parametri

TOPSIS METODA PODKRITERIJUMI	EP1	EP2	EP3	EP4	EP5
	Prosečni troškovi	Trend prosečnih troškova	Efikasnost proizvodnje EP	Trend efikasnosti proizvodnje EP	Efektivnost rudarske mehanizacije MPI = $f(\text{raspoloživosti, efikasnosti, upotrebljivosti})$
Preferencije W_i	0,314	0,098	0,314	0,098	0,158
SRs 1200/22.2 (G1) RB 1	299.879	269.891	1,10364	1,21401	1,95731
SRs 1200/24.4 (G3) RB 2	449.242	449.242	1,10133	1,21146	2,44588
SRs 1200/24.4 (G4) RB 3	324.183	356.601	1,34332	1,20898	3,11405
SRs 1200/24.4 (G5) RB 4	284.486	256.037	1,46573	1,61230	2,65779
SRs 1200/24.4 (G6) RB 5	282.347	254.112	1,39889	1,53878	3,54601
SchRs 630/25.6 (G7) RB 6	324.055	356.460	1,76959	1,94655	1,99022
SRs 1300/26.5 (G8) RB 7	293.575	239.575	2,14974	2,36471	4,00488
SchRs 630/25.6 (G2) RB 8	166.070	149.463	0,91644	1,00809	1,58311
SchRs 900/25.6 (G1) RB 9	184.347	202.782	1,06761	1,06761	1,78333
Kriterijum izbora	MIN	MIN	MAX	MAX	MAX
Idealno rešenje A_i^+	0,0096085	0,002487	0,006194	0,002185	0,035099
Idealno negativno rešenje A_i^-	0,0703131	0,022472	0,034085	0,012023	0,005484

Tabela 6.36. TOPSIS – Ekonomski parametri - Odstupanja S_i^+ od idealnog pozitivnog rešenja A_i^+

Rotorni bageri	EP1	EP2	EP3	EP4	EP5
RB 1	0,0004718	3,16E-05	7,78E-06	9,68E-07	0,000714
RB 2	0,003685	0,000399	7,57E-06	9,42E-07	0,000484
RB 3	0,0007293	0,000136	5,06E-05	9,17E-07	0,000193
RB 4	0,0003455	2,32E-05	9,31E-05	1,16E-05	0,000386
RB 5	0,00033	2,21E-05	6,79E-05	8,44E-06	5,75E-05
RB 6	0,0007278	0,000136	0,000286	3,55E-05	0,000699
RB 7	0,0004169	1,52E-05	0,000778	9,68E-05	0
RB 8	0	0	0	0	0,000877
RB 9	4,979E-06	4,37E-06	4,89E-06	7,06E-08	0,000792

Tabela 6.37. TOPSIS – Ekonomski parametri - Odstupanja S_i^- od idealnog negativnog rešenja A_i^-

Rotorni bageri	EP1	EP2	EP3	EP4	EP5
RB 1	0,0015196	0,000206	0,00063	7,84E-05	8,41E-06
RB 2	0	0	0,000632	7,86E-05	5,79E-05
RB 3	0,0011356	6,91E-05	0,000432	7,89E-05	0,000248
RB 4	0,0017738	0,00023	0,000333	4,14E-05	9,95E-05
RB 5	0,0018096	0,000234	0,000386	4,8E-05	0,000485
RB 6	0,0011375	6,93E-05	0,000121	1,5E-05	1,01E-05
RB 7	0,001623	0,000259	0	0	0,000877
RB 8	0,003685	0,000399	0,000778	9,68E-05	0
RB 9	0,0034191	0,00032	0,000659	9,16E-05	2,18E-06

Tabela 6.38. AHP – TOPSIS Ekonomski parametri–rangiranje rotornih bagera

C_i relativno rastojanje	Rotorni bageri	Poredak
0,58534	SRs 1200/22.2 (G1) RB 1	6
0,29065	SRs 1200/24.4 (G3) RB 2	9
0,57081	SRs 1200/24.4 (G4) RB 3	7
0,62938	SRs 1200/24.4 (G5) RB 4	4
0,71175	SRs 1200/24.4 (G6) RB 5	1
0,45872	SchRs 630/25.6 (G7) RB 6	8
0,59232	SRs 1300/26.5 (G8) RB 7	5
0,70396	SchRs 630/25.6 (G2) RB 8	2
0,70244	SchRs 900/25.6 (G1) RB 9	3

6.2.5. Zbirno model AHP-TOPSIS

Na osnovu primene hibridnog modela AHP-TOPSIS izvršena je sveobuhvatna evaluacija i rangiranje rotornih bagera prema definisanim grupama kriterijuma: tehničkim, eksploataciono-radnim, parametrima održavanja i ekonomskim parametrima.

Tabela 6.39. AHP – TOPSIS Zbirni rezultat sa preferencijama W_i

Model AHP-TOPSIS	Tehnički parametri TP	Radni parametri RP	Parametri održavanja PO	Ekonomski parametri EP
SRs 1200/22.2 (G1) RB 1	0,1159	0,1487	0,0781	0,1463
SRs 1200/24.4 (G3) RB 2	0,0880	0,1080	0,1859	0,0727
SRs 1200/24.4 (G4) RB 3	0,0402	0,1080	0,1806	0,1427
SRs 1200/24.4 (G5) RB 4	0,0000	0,1080	0,1181	0,1573
SRs 1200/24.4 (G6) RB 5	0,1696	0,1080	0,1273	0,1779
SchRs 630/25.6 (G7) RB 6	0,1915	0,1496	0,1631	0,1147
SRs 1300/26.5 (G8) RB 7	0,1955	0,0845	0,1341	0,1481
SchRs 630/25.6 (G2) RB 8	0,2436	0,0845	0,0847	0,1760
SchRs 900/25.6 (G1) RB 9	0,1591	0,0808	0,1520	0,1756

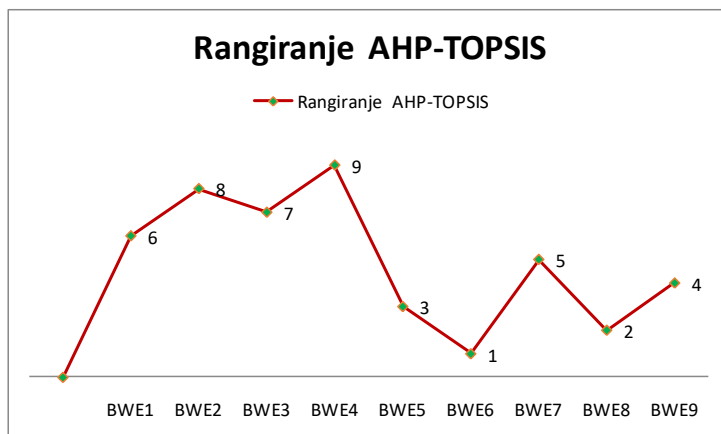
Tabela 6.40. AHP – TOPSIS Prikaz parcijalnih rangova i konačnog ranga

Model AHP-TOPSIS	Tehnički parametri TP	Radni parametri RP	Parametri održavanja PO	Ekonomski parametri EP	Srednja vrednost	Rang
SRs 1200/22.2 (G1) RB 1	1	9	6	6	5,50	6
SRs 1200/24.4 (G3) RB 2	3	1	7	9	5,00	8
SRs 1200/24.4 (G4) RB 3	3	2	8	7	5,00	7
SRs 1200/24.4 (G5) RB 4	3	7	9	4	5,75	9
SRs 1200/24.4 (G6) RB 5	3	6	4	1	3,50	3
SchRs 630/25.6 (G7) RB 6	2	3	3	8	4,00	1
SRs 1300/26.5 (G8) RB 7	4	5	2	5	4,00	5
SchRs 630/25.6 (G2) RB 8	4	8	1	2	3,75	2
SchRs 900/25.6 (G1) RB 9	5	4	5	3	4,25	4

AHP metoda je korišćena za određivanje relativne važnosti kriterijuma i podkriterijuma, čime je obezbeđena strukturirana i konzistentna dodela težinskih koeficijenata, dok je TOPSIS metoda omogućila rangiranje alternativa na osnovu njihove udaljenosti od idealnog i anti-idealnog rešenja.

Dobijeni rezultati jasno ukazuju na sposobnost AHP-TOPSIS modela da diferencira performanse rotornih bagera u uslovima prisustva konfliktnih kriterijuma, kao i da obezbedi intuitivno i matematički utemeljeno kompromisno rešenje.

Time je potvrđena pogodnost ovog hibridnog pristupa za podršku odlučivanju u složenim inženjerskim sistemima, kakvi su sistemi površinske eksploatacije uglja. U tabeli 6.39 je prikazan zbirni rezultat sa preferencijama W_i . Dok tabela 6.40 daje prikaz parcijalnih rangova i konačnog ranga rotornih bagera, dobijenog na osnovu modela AHP-TOPSIS. Na slici 6.5 je prikazano rangiranje rotornih bagera na osnovu AHP-TOPSIS modela.



Slika 6.5. Rangiranje rotornih bagera model AHP-TOPSIS

Hibridni modeli AHP-PROMETHEE i AHP-TOPSIS zasnivaju se na istoj početnoj fazi određivanja težinskih koeficijenata kriterijuma primenom AHP metode, čime se obezbeđuje konzistentna i hijerarhijski utemeljena struktura odlučivanja. Razlika između ova dva modela nastaje u drugoj fazi, u kojoj se primenjuju različite višekriterijumske metode za rangiranje alternativa.

U kontekstu analize rada rotornih bagera, model AHP-PROMETHEE omogućava finiju diferencijaciju alternativa i bolji uvid u strukturu preferencija, dok model AHP-TOPSIS pruža stabilno i pregledno rangiranje zasnovano na ukupnoj efikasnosti alternativa. Primena oba modela doprinosi povećanju pouzdanosti donetih zaključaka i omogućava uporednu validaciju rezultata, što dodatno jača verodostojnost predloženog metodološkog pristupa.

6.3. Model AHP-VIKOR

Model AHP-VIKOR predstavlja hibridni višekriterijumski model odlučivanja u kojem se prednosti hijerarhijskog struktuiranja problema i određivanje težinskih koeficijenata kriterijuma primenom AHP metode kombinuje sa kompromisnim rangiranjem alternativa koje obezbeđuje VIKOR metoda. AHP metoda se koristi u prvoj fazi modela za definisanje relativne važnosti kriterijuma i podkriterijuma, dok se u drugoj fazi VIKOR metoda primenjuje za rangiranje alternativa na osnovu njihove bliskosti idealnom rešenju, uz istovremeno uvažavanje grupne koristi i individualnog žaljenja.

U ovom radu, model AHP-VIKOR se primenjuje na grupe parametara, kao i prethodni modeli, čime se omogućava uporedivost rezultata i sveobuhvatna analiza rangiranja rotornih bagera. Matematičke osnove AHP i VIKOR metoda su date u podpoglavljima 4.4.1. i 4.4.4, dok se u ovom delu metode primenjuju u okviru razvijenog hibridnog modela AHP-VIKOR na konkretne grupe parametara rotornih bagera. Proračuni su realizovani u programskom okruženju Microsoft Excel, uz primenu standardnih algoritama. Formira se matrica odlučivanja, koja se potom normalizuje i težinski normalizuje – obrazac (4.58), zatim se određuju maksimalna i minimalna vrednosti kriterijuma na osnovu formula (4.59) i (4.60). Na osnovu obrazaca (4.61) i (4.62) se određuju pesimističko i očekivano rešenje, redom. Najbolja alternativa je ona sa minimalnom vrednošću Q_j .

Na osnovu izračunatih vrednosti formiraju se tri rang liste sortiranjem alternativa od najmanje ka najvećoj vrednosti. Alternativa sa najmanjom vrednosti zauzima prvo mesto i predlaže se kao kompromisno rešenje, koje je dato obrascem (4.63).

6.3.1. Tehnički parametri

U okviru hibridnog AHP-VIKOR modela, tehnički parametri su razmatrani kao posebna grupa kriterijuma za evaluaciju rotornih bagera. Težinski koeficijenti tehničkih parametara određeni su primenom AHP metode i preuzeti iz prethodno definisanog modela AHP-PROMETHEE (tabele 6.1, 6.2 i 6.3), dok je rangiranje izvršeno primenom VIKOR metode. Tehnički parametri korišćeni su na isti način kao u modelu AHP-PROMETHEE. Tehnički parametri rotornog bagera prikazani su u tabeli 6.41. U tabeli 6.42 dati su rezultati pesimističkog rešenja S_j , očekivanog rešenja R_j i međuvrednosti, dok je u tabeli 6.43 rangiranje kompromisnog rešenja za tehničke parametre rotornog prikazano bagera.

Tabela 6.41. VIKOR – Tehnički parametri

VIKOR	TP1	TP2	TP3	TP4	TP5	TP6	TP7	TP8	TP9	TP10	TP11	TP12	TP13	TP14	TP15
METODA															
PODKRITE- RIJUMI															
Preferencije W_i															
SRs 1200/22.2 (G1) RB 1	18,78526	5,02543	0,00014	34,43963	9,55073	0,21408	12,79468	4,63054	0,41328	2,27302	0,58875	1,42458	2,33668	1,64026	122,7911
SRs 1200/24.4 (G3) RB 2	18,37422	4,75247	0,00025	15,74933	15,93546	0,19802	15,16862	4,67686	0,44098	3,82000	0,52237	1,18456	1,98958	1,67960	150,78060
SRs 1200/24.4 (G4) RB 3	18,37422	4,75247	0,00025	15,74933	15,93546	0,19802	15,16862	4,67686	0,44098	3,82000	0,52237	1,18456	1,98958	1,67960	150,78060
SRs 1200/24.4 (G5) RB 4	18,37422	4,75247	0,00025	15,74933	15,93546	0,19802	15,16862	4,67686	0,44098	3,82000	0,52237	1,18456	1,98958	1,67960	150,78060
SRs 1200/24.4 (G6) RB 5	18,37422	4,75247	0,00025	15,74933	15,93546	0,19802	15,16862	4,67686	0,44098	3,82000	0,52237	1,18456	1,98958	1,67960	150,78060
SchRs 630/25.6 (G7) RB 6	19,68376	3,96420	0,00015	16,50896	6,64862	0,27301	11,95649	3,88889	0,51178	2,55889	0,71111	1,38949	1,93222	1,39059	176,6301
SRs 1300/26.5 (G8) RB 7	14,62439	5,07087	0,00020	11,79386	15,01439	0,20284	9,43546	4,98276	0,36561	1,99867	0,45366	1,24083	2,15076	1,73333	99,07069
SchRs 630/25.6 (G2) RB 8	14,62439	5,07087	0,00020	11,79386	15,01439	0,20284	9,43546	4,98276	0,36561	1,99867	0,45366	1,24083	2,15076	1,73333	99,07069
SchRs 900/25.6 (G1) RB 9	14,54634	5,04381	0,00017	11,73092	15,32049	0,20175	9,38510	4,95616	0,36366	1,98800	0,45366	1,24749	2,14885	1,72255	91,05841
Kriterijum izbora	MAX	MAX	MAX	MAX	MIN	MIN	MAX	MAX	MIN	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX

Tabela 6.42. VIKOR – Pesimističko rešenje S_j , očekivano rešenje R_j i međuvrednosti

Izračunate vrednosti	S_j	R_j	QS_j	QR_j
SRs 1200/22.2 (G1) RB 1	0,28820	0,05796	0,00000	0,00000
SRs 1200/24.4 (G3) RB 2	0,51629	0,12195	0,83400	1,00000
SRs 1200/24.4 (G4) RB 3	0,51629	0,12195	0,83400	1,00000
SRs 1200/24.4 (G5) RB 4	0,51629	0,12195	0,83400	1,00000
SRs 1200/24.4 (G6) RB 5	0,51629	0,12195	0,83400	1,00000
SchRs 630/25.6 (G7) RB 6	0,55954	0,12195	0,99216	1,00000
SRs 1300/26.5 (G8) RB 7	0,54027	0,12195	0,92170	1,00000
SchRs 630/25.6 (G2) RB 8	0,54027	0,12195	0,92170	1,00000
SchRs 900/25.6 (G1) RB 9	0,56169	0,12195	1,00000	1,00000

Tabela 6.43. AHP-VIKOR – Rangiranje kompromisnog rešenja

Rotorni bageri	Rang Q_j	Poredak
SRs 1200/22.2 (G1) RB 1	0,58534	6
SRs 1200/24.4 (G3) RB 2	0,29065	9
SRs 1200/24.4 (G4) RB 3	0,57081	7
SRs 1200/24.4 (G5) RB 4	0,62938	4
SRs 1200/24.4 (G6) RB 5	0,71175	1
SchRs 630/25.6 (G7) RB 6	0,45872	8
SRs 1300/26.5 (G8) RB 7	0,59232	5
SchRs 630/25.6 (G2) RB 8	0,70396	2
SchRs 900/25.6 (G1) RB 9	0,70244	3

6.3.2. Radni parametri

U okviru hibridnog AHP-VIKOR modela, radni parametri su razmatrani kao posebna grupa kriterijuma za evaluaciju rotornih bagera. Težinski koeficijenti radnih parametara određeni su primenom AHP metode i preuzeti iz prethodno definisanog modela AHP-PROMETHEE (tabele 6.6, 6.7 i 6.8), dok je rangiranje izvršeno primenom VIKOR metode.

Radni (eksploatacioni) parametri su primenjeni na isti način kao u modelu AHP-PROMETHEE. Radni parametri rotornih bagera prikazani su u tabeli 6.44a) i 6.44b). U tabeli 6.45 dati su rezultati pesimističkog rešenja S_j , očekivanog rešenja R_j i međuvrednosti, dok je u tabeli 6.46 prikazano rangiranje kompromisnog rešenja za radne parametre rotornog bagera.

Tabela 6.44. VIKOR – Radni parametri a)

VIKOR METODA PODKRITERIJUMI	RP1 Ukupna proizvodnja za 11 godina	RP2 Prosečna proizvodnja za 11 godina	RP3 Trend proizvodnje za 11 godina	RP4 Vreme rada za 11 godina	RP5 Prosečno vreme rada za 11 godina	RP6 Trend vremena rada za 11 godina	RP7 Koeficijent vremenskog iskorišćenja za 11 godina	RP8 Prosečni koeficijent vremenskog iskorišćenja za 11 godina	RP9 Trend koeficijenta vremenskog iskorišćenja za 11 godina	RP10 Koeficijent kapacitnog iskorišćenja za 11 god	RP11 Prosečni koeficijent kapacitnog iskorišćenja za 11 god	RP12 Trend koeficijenta kapacitnog iskorišćenja za 11 god
Preferencije W_i	0,135	0,074	0,041	0,135	0,074	0,041	0,135	0,074	0,041	0,135	0,074	0,041
SRs 1200/22.2 (G1) RB 1	33.93088	3.084626	2.776163	40.998	3.7271	3.3544	4,70	0,42700	0,38430	3,01	0,27300	0,24570
SRs 1200/24.4 (G3) RB 2	44.122.403.42.316.093.34.695.81	4.011.127 3.846.917 3.154.165	3.462.226 2.838.748	24.608	2.237,1	2.013,3	4,53	0,41182	0,45300	3,65	0,33182	0,29864
SRs 1200/24.4 (G4) RB 3	44.122.403.42.316.093.34.695.81	4.011.127 3.846.917 3.154.165	3.462.226 2.838.748	40.066	3.642,4	3.278,1	5,08	0,46182	0,41564	4,38	0,39818	0,35836
SRs 1200/24.4 (G5) RB 4	33.93088	3.084626	2.776163	46.780	4.252,7	3.827,5	5,41	0,49180	0,44262	3,54	0,32100	0,32100
Kriterijum izbora	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX

Tabela 6.44. VIKOR – Radni parametri b)

VIKOR METODA PODKRITERIJUMI	RP1	RP2	RP3	RP4	RP5	RP6	RP7	RP8	RP9	RP10	RP11	RP12
	Ukupna proizvodnja za 11 godina	Prosečna proizvodnja za 11 godina	Trend proizvodnje za 11 godina	Vreme rada za 11 godina	Prosečno vreme rada za 11 godina	Trend vremena rada za 11 godina	Koeficijent vremenskog iskorištenja za 11 godina	Prosečni koeficijent vremenskog iskorištenja za 11 godina	Trend koeficijenta vremenskog iskorištenja za 11 godina	Koeficijent kapacitetskog iskorištenja za 11 godina	Prosečni koeficijent kapacitetskog iskorištenja za 11 godina	Trend koeficijenta kapacitetskog iskorištenja za 11 godina
Preferencije W_i	0,135	0,074	0,041	0,135	0,074	0,041	0,135	0,074	0,041	0,135	0,074	0,041
SRs 1200/24.4 (G6) RB 5	39937,480	3.483,480	3.135,132	41,222	3.747,5	3.372,7	4,70	0,42700	0,38430	3,18	0,28900	0,26010
SchRs 630/25.6 (G7) RB 6	2.707,170	2.461,064	2.461,064	44,767	4.069,7	4.476,7	5,55	0,50455	0,55501	4,76	0,43273	0,38940
SRs 1300/26.5 (G8) RB 7	34.367,366	3.970,393	3.573,354	34,502	3.136,6	2.822,9	4,15	0,37727	0,37727	3,96	0,36000	0,32400
SchRs 630/25.6 (G2) RB 8	3.945,76	3.587,057	3.228,352	32,283	2.528,7	3.375,9	3,47	0,3154	0,3839	3,57	0,3245	0,2921
SchRs 900/25.6 (G1) RB 9	39937,214	3.630,655	3.267,590	33,177	3.016,1	2.714,5	5,42	0,49273	0,44346	4,25	0,38636	0,34772
Kriterijum izbora	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX

Tabela 6.45. VIKOR – Pesimističko rešenje S_j , očekivano rešenje R_j i međuvrednosti

Izračunate vrednosti	S_j	R_j	QS_j	QR_j
SRs 1200/22.2 (G1) RB 1	0,67732	0,13499	0,9813	1,0000
SRs 1200/24.4 (G3) RB2	0,24404	0,04088	0,0595	0,0000
SRs 1200/24.4 (G4) RB3	0,21607	0,09410	0,0000	0,5656
SRs 1200/24.4 (G5) RB4	0,60256	0,13498	0,8222	1,0000
SRs 1200/24.4 (G6) RB5	0,53651	0,12187	0,6817	0,8606
SchRs 630/25.6 (G7) RB6	0,26900	0,13499	0,1126	1,0000
SRs 1300/26.5 (G8) RB7	0,44572	0,09085	0,4886	0,5311
SchRs 630/25.6 (G2) RB8	0,68612	0,13498	1,0000	1,0000
SchRs 900/25.6 (G1) RB9	0,33244	0,08282	0,2476	0,4457

Tabela 6.46. AHP-VIKOR – Rangiranje kompromisnog rešenja

Rotorni bageri	Rang Q_i	Poredak
SRs 1200/22.2 (G1) RB 1	0,9906	2
SRs 1200/24.4 (G3) RB2	0,0298	9
SRs 1200/24.4 (G4) RB3	0,2828	8
SRs 1200/24.4 (G5) RB4	0,9111	3
SRs 1200/24.4 (G6) RB5	0,7712	4
SchRs 630/25.6 (G7) RB6	0,5563	5
SRs 1300/26.5 (G8) RB7	0,5098	6
SchRs 630/25.6 (G2) RB8	1,0000	1
SchRs 900/25.6 (G1) RB9	0,3466	7

6.3.3. Parametri održavanja

U okviru hibridnog AHP-VIKOR modela, parametri održavanja su razmatrani kao posebna grupa kriterijuma za evaluaciju rotornih bagera. Težinski koeficijenti parametara održavanja određeni su primenom AHP metode i preuzeti iz prethodno definisanog modela AHP-PROMETHEE (tabele 6.11, 6.12 i 6.13), dok je rangiranje izvršeno primenom VIKOR metode.

Parametri održavanja predstavljaju ključne pokazatelje pouzdanosti, raspoloživosti i efikasnosti sistema održavanja rotornih bagera tokom eksploatacije. Parametri održavanja su korišćeni na isti način kao u modelu AHP-PROMETHEE.

Parametri održavanja rotornih bagera prikazani su u tabeli 6.47. U tabeli 6.48 dati su rezultati pesimističkog rešenja S_j , očekivanog rešenja R_j i međuvrednosti, dok je u tabeli 6.49 prikazano rangiranje kompromisnog rešenja za parametre održavanja rotornog bagera.

Tabela 6.47. VIKOR – Parametri održavanja

VIKOR	PO1	PO2	PO3	PO4	PO5
METODA	Mehaničko- -elektro- -vulkanizerski zastoji	Prosečni mehaničko- -elektro-vulkanizerski zastoji	Trend mehaničko- -elektro- -vulkanizerskih zastoja	Tehnička raspoloživost	Trend tehničke raspoloživosti
PODKRITERIJUMI					
Preferencije W_i	0,158	0,298	0,089	0,298	0,158
SRs 1200/22.2 (G1) RB 1	8.737	794	714,8	0,73540	0,66186
SRs 1200/24.4 (G3) RB2	9.868	897	896,9	0,75802	0,68222
SRs 1200/24.4 (G4) RB3	11.813	1.074	1.181,3	0,77763	0,69987
SRs 1200/24.4 (G5) RB 4	13.376	1.216	1.337,6	0,72745	0,65471
SRs 1200/24.4 (G6) RB 5	6.545	595	654,5	0,83825	0,75443
SchRs 630/25.6 (G7) RB 6	5.656	514	565,6	0,85139	0,76625
SRs 1300/26.5 (G8) RB 7	5.485	499	548,5	0,82200	0,82200
SchRs 630/25.6 (G2) RB 8	3.328	303	272,3	0,85664	0,77098
SchRs 900/25.6 (G1) RB 9	6.958	635	698,5	0,81516	0,81516
Kriterijum izbora	MIN	MIN	MIN	MAX	MAX

Tabela 6.48. VIKOR – Pesimističko rešenje S_j , očekivano rešenje R_j i međuvrednosti

Izračunate vrednosti	S_j	R_j	QS_j	QR_j
SRs 1200/22.2 (G1) RB 1	0,71259	0,27971	0,69807	0,92663
SRs 1200/24.4 (G3) RB 2	0,70773	0,22753	0,69296	0,71785
SRs 1200/24.4 (G4) RB 3	0,75779	0,25170	0,74556	0,81455
SRs 1200/24.4 (G5) RB 4	1,00000	0,29806	1,00000	1,00000
SRs 1200/24.4 (G6) RB 5	0,28369	0,09533	0,24750	0,18898
SchRs 630/25.6 (G7) RB 6	0,19445	0,06888	0,15376	0,08320
SRs 1300/26.5 (G8) RB 7	0,20071	0,07992	0,16033	0,12735
SchRs 630/25.6 (G2) RB 8	0,04809	0,04809	0,00000	0,00000
SchRs 900/25.6 (G1) RB 9	0,30292	0,10838	0,26770	0,24122

Tabela 6.49. AHP-VIKOR – Rangiranje kompromisnog rešenja

Rotorni bageri	Rang Q_i	Poredak
SRs 1200/22.2 (G1) RB 1	0,81235	8
SRs 1200/24.4 (G3) RB 2	0,70541	6
SRs 1200/24.4 (G4) RB 3	0,78005	7
SRs 1200/24.4 (G5) RB 4	1,00000	9
SRs 1200/24.4 (G6) RB 5	0,21824	4
SchRs 630/25.6 (G7) RB 6	0,11848	2
SRs 1300/26.5 (G8) RB 7	0,14384	3
SchRs 630/25.6 (G2) RB 8	0,00000	1
SchRs 900/25.6 (G1) RB 9	0,25446	5

6.3.4. Ekonomski parametri

U okviru hibridnog AHP-VIKOR modela, ekonomski parametri su razmatrani kao posebna grupa kriterijuma za evaluaciju rotornih bagera. Težinski koeficijenti ekonomskih parametara određeni su primenom AHP metode i preuzeti iz prethodno definisanog modela AHP-PROMETHEE (tabele 6.16, 6.17 i 6.18), dok je rangiranje izvršeno primenom VIKOR metode. Ekonomski parametri predstavljaju završnu grupu ulaznih podataka u hibridnom AHP-VIKOR modelu i imaju značajnu ulogu u oceni ukupne efikasnosti rada rotornih bagera.

U ovom delu analizirani su parametri koji kvantifikuju troškove i efekte rada mehanizacije tokom posmatranog perioda. Ekonomski parametri su primenjeni na isti način kao u modelu AHP-PROMETHEE.

Ekonomski parametri rotornih bagera prikazani su u tabeli 6.50. U tabeli 6.51 dati su rezultati pesimističkog rešenja S_j , očekivanog rešenja R_j i međuvrednosti, dok je u tabeli 6.52 prikazano rangiranje kompromisnog rešenja za ekonomske parametre rotornog bagera.

Tabela 6.50. VIKOR – Ekonomski parametri

VIKOR METODA PODKRITERIJUMI	EP1	EP2	EP3	EP4	EP5
	Prosečni troškovi	Trend prosečnih troškova	Efikasnost proizvodnje EP	Trend efikasnosti proizvodnje EP	Efektivnost rudarske mehanizacije $MPI = f(\text{raspoloživosti, efikasnosti upotrebljivosti})$
Preferencije W_i	0,314	0,098	0,314	0,098	0,158
SRs 1200/22.2 (G1) RB 1	299.879	269.891	1,10364	1,21401	1,95731
SRs 1200/24.4 (G3) RB 2	449.242	449.242	1,10133	1,21146	2,44588
SRs 1200/24.4 (G4) RB 3	324.183	356.601	1,34332	1,20898	3,11405
SRs 1200/24.4 (G5) RB4	284.486	256.037	1,46573	1,61230	2,65779
SRs 1200/24.4 (G6) RB 5	282.347	254.112	1,39889	1,53878	3,54601
SchRs 630/25.6 (G7) RB 6	324.055	356.460	1,76959	1,94655	1,99022
SRs 1300/26.5 (G8) RB7	293.575	239.575	2,14974	2,36471	4,00488
SchRs 630/25.6 (G2) RB 8	166.070	149.463	0,91644	1,00809	1,58311
SchRs 900/25.6 (G1) RB 9	184.347	202.782	1,06761	1,06761	1,78333
Kriterijum izbora	MIN	MIN	MAX	MAX	MAX

Tabela 6.51. VIKOR – Pesimističko rešenje S_j , očekivano rešenje R_j i međuvrednosti

Izračunate vrednosti	S_j	R_j	QS_j	QR_j
SRs 1200/22.2 (G1) RB 1	0,33333	0,14819	0,45970	0,25963
SRs 1200/24.4 (G3) RB 2	0,53697	0,31361	0,85802	1,00000
SRs 1200/24.4 (G4) RB 3	0,40230	0,17511	0,59460	0,38011
SRs 1200/24.4 (G5) RB 4	0,40422	0,13965	0,59836	0,22140
SRs 1200/24.4 (G6) RB 5	0,34284	0,12877	0,47830	0,17273
SchRs 630/25.6 (G7) RB 6	0,60955	0,21690	1,00000	0,56717
SRs 1300/26.5 (G8) RB 7	0,58262	0,31355	0,94733	0,99974
SchRs 630/25.6 (G2) RB 8	0,09831	0,09831	0,00000	0,03638
SchRs 900/25.6 (G1) RB 9	0,17066	0,09018	0,14151	0,00000

Tabela 6.52. AHP-VIKOR – Rangiranje kompromisnog rešenja

Rotorni bageri	Rang Q_j	Poredak
SRs 1200/22.2 (G1) RB 1	0,3597	6
SRs 1200/24.4 (G3) RB 2	0,9290	2
SRs 1200/24.4 (G4) RB 3	0,4874	4
SRs 1200/24.4 (G5) RB 4	0,4099	5
SRs 1200/24.4 (G6) RB 5	0,3255	7
SchRs 630/25.6 (G7) RB 6	0,7836	3
SRs 1300/26.5 (G8) RB 7	0,9735	1
SchRs 630/25.6 (G2) RB 8	0,0182	9
SchRs 900/25.6 (G1) RB 9	0,0708	8

6.3.5. Zbirno model AHP-VIKOR

U okviru hibridnog modela AHP-VIKOR izvršena je sinteza parcijalnih rezultata dobijenih za tehničke, radne, parametre održavanja i ekonomske parametre rotornih bagera. Težinski koeficijenti osnovnih grupa parametara određeni su primenom AHP metode, dok je rangiranje alternativa sprovedeno primenom VIKOR metode, uzimajući u obzir kompromisno rešenje kao osnovu za donošenje odluke.

Tabela 6.53. AHP – VIKOR Zbirni rezultat sa preferencijama W_i

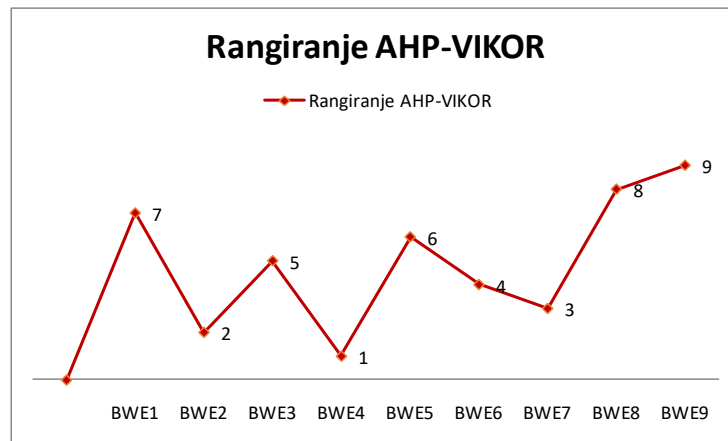
Model AHP-VIKOR	Tehnički parametri TP	Radni parametri RP	Parametri održavanja PO	Ekonomski parametri EP
SRs 1200/22.2 (G1) RB 1	0,2031	0,0000	0,2477	0,0899
SRs 1200/24.4 (G3) RB 2	0,1764	0,2292	0,0074	0,2323
SRs 1200/24.4 (G4) RB 3	0,1950	0,2292	0,0707	0,1218
SRs 1200/24.4 (G5) RB 4	0,2500	0,2292	0,2278	0,1025
SRs 1200/24.4 (G6) RB 5	0,0546	0,2292	0,1928	0,0814
SchRs 630/25.6 (G7) RB 6	0,0296	0,2490	0,1391	0,1959
SRs 1300/26.5 (G8) RB 7	0,0360	0,2402	0,1275	0,2434
SchRs 630/25.6 (G2) RB 8	0,0000	0,2402	0,2500	0,0045
SchRs 900/25.6 (G1) RB 9	0,0636	0,2500	0,0867	0,0177

Tabela 6.54. AHP – VIKOR Prikaz parcijalnih rangova i konačnog ranga

Model AHP-VIKOR	Tehnički parametri TP	Radni parametri RP	Parametri održavanja PO	Ekonomski parametri EP	Srednja vrednost	Rang
SRs 1200/22.2 (G1) RB 1	8	5	2	6	5,25	7
SRs 1200/24.4 (G3) RB2	6	3	9	2	5,00	2
SRs 1200/24.4 (G4) RB3	7	3	8	4	5,50	5
SRs 1200/24.4 (G5) RB4	9	3	3	5	5,00	1
SRs 1200/24.4 (G6) RB5	4	3	4	7	4,50	6
SchRs 630/25.6 (G7) RB6	2	1	5	3	2,75	4
SRs 1300/26.5 (G8) RB7	3	4	6	1	3,50	3
SchRs 630/25.6 (G2) RB8	1	4	1	9	3,75	8
SchRs 900/25.6 (G1) RB9	5	2	7	8	5,50	9

Na ovaj način omogućena je integracija svih relevantnih aspekata rada rotornih bagera u jedinstveni model, čime je dobijeno jedinstveno rangiranje alternativa koje predstavljaju optimalan kompromis između maksimalne ukupne koristi i minimalnog individualnog žaljenja. U tabeli 6.53 je prikazan zbirni rezultat sa preferencijama W_i . Dok tabela 6.54 daje prikaz parcijalnih rangova i konačnog ranga rotornih bagera, dobijenog na osnovu modela AHP-VIKOR. Rezultati dobijeni primenom hibridnog modela AHP-VIKOR pokazuju da je moguće postići stabilno i metodološki utemeljeno rangiranje rotornih bagera integracijom relevantnih grupa kriterijuma. Kompromisno rešenje dobijeno VIKOR metodom omogućava istovremeno sagledavanje ukupne efikasnosti alternativa i pojedinačnih odstupanja po kriterijumima, čime se obezbeđuje balans između maksimalne kolektivne koristi i minimalnog individualnog žaljenja.

Dobijeni rang potvrđuje konzistentnost parcijalnih rangiranja i ukazuje na robusnost primenjenog hibridnog pristupa u uslovima konflikta kriterijuma, što je naročito značajno za donošenje odluka u složenim rudarskim sistemima. Sva tri hibridna modela koriste AHP metodu za određivanje težinskih koeficijenata kriterijuma, dok se razlikuju u načinu rangiranja alternativa. Na slici 6.6 je prikazano rangiranje rotornih bagera na osnovu AHP-VIKOR modela.



Slika 6.6. Rangiranje rotornih bagera model AHP-VIKOR

Model AHP-PROMETHEE omogućava detaljno parcijalno i potpuno rangiranje alternativa kroz tokove preferencija, što ga čini pogodnim za analizu relativnih prednosti i slabosti alternativa. Model AHP-TOPSIS se zasniva na geometrijskom pristupu i jasno definiše idealno i anti-idealno rešenje, pružajući intuitivno i lako interpretabilno rangiranje. Model AHP-VIKOR, za razliku od prethodna dva, eksplicitno uvodi koncept kompromisnog rešenja, te je naročito pogodan za situacije sa izraženim konfliktnim kriterijumima i neizvesnošću u preferencijama donosilaca odluka. Uporedna analiza pokazuje da se rezultati u određenoj meri poklapaju, dok AHP-VIKOR daje dodatnu vrednost kroz formalizovano upravljanje kompromisom i rizikom.

6.4. Diskusija rezultata i poređenje hibridnih modela

Hibridni modeli su razvijeni primenom višekriterijumskih metoda odlučivanja sa ciljem da se procene osnovni indikatori rada rotornih bagera. Metode su primenjene na svim grupama parametara, podparametrima i alternativama izbora. Modeli su definisani na osnovu dva međusobno povezana dela. U prvom delu su, primenom AHP metode, određeni vektori prioriteta kriterijuma i podkriterijuma. U drugom delu su preostale višekriterijumske metode korišćene za evaluaciju i rangiranje alternativa u skladu sa prethodno definisanim težinskim koeficijentima primenom AHP metode. Formirana su tri parcijalna hibridna modela, AHP-PROMETHEE, AHP-TOPSIS i AHP-VIKOR. Osnovni kriterijumi koji su obuhvaćeni analizom su:

- ✓ Tehnički parametri,
- ✓ Radni parametri,
- ✓ Parametri održavanja i
- ✓ Ekonomski parametri.

U tabeli 6.55 je prikazano uporedno rangiranje metodama AHP-PROMETHEE, AHP-TOPSIS i AHP-VIKOR.

Tabela 6.55. Uporedno rangiranje metodama AHP-PROMETHEE, AHP-TOPSIS i AHP-VIKOR

Pozicija u rangiranju	Model AHP-TOPSIS	Model AHP-VIKOR	Model AHP-PROMETHEE
1	RB 6	RB 9	RB8
2	RB 8	RB 8	RB9
3	RB 5	RB 1	RB7
4	RB 9	RB 5	RB6
5	RB 7	RB 3	RB5
6	RB 1	RB 6	RB3
7	RB 3	RB 7	RB2
8	RB 2	RB 2	RB1
9	RB 4	RB 4	RB4

Druga iteracija u okviru predloženog postupka odnosi se na rangiranje prema usvojenim kriterijumima i podkriterijumima. Sve primenjene metode, u kombinaciji sa AHP metodom, daju parcijalne i međusobno nezavisne rezultate rangiranja, koji se zatim upoređuju sa ekspertskim ocenama. Rotorni bageri predstavljaju izuzetno složene i kapitalno intenzivne mašine; te je, radi produženja njihovog životnog veka i očuvanja postojećih performansi, odnosno njihovog unapređenja, neophodno sprovesti procese revitalizacije i modernizacije.

Kada bi se umesto klasičnih metoda primenile višekriterijumske metode odlučivanja (MCDM), postigle bi se velike uštede finansijskih sredstava. Ovakav pristup je u potpunosti opravdan imajući u vidu ključnu ulogu rotornih bagera u proizvodnom procesu, velika početna ulaganja i visoke troškove eksploatacije i održavanja. Na osnovu definisanog cilja rada, postavljenog istraživačkog okvira i analiziranih podataka; koji su delimično kvalitativne prirode, može se zaključiti da je AHP-PROMETHEE model najpogodniji za primenu pri izboru rotornog bagera za procese modernizacije i revitalizacije. Prednost AHP-PROMETHEE modela u odnosu na modele AHP-TOPSIS i AHP-VIKOR ogleda se u mogućnosti PROMETHEE metode da na adekvatan i matematički konzistentan način obradi kvalitativne podatke i da omogući jasno vrednovanje alternativa koje ispunjavaju definisane kriterijume.

Dobijena rešenja nisu optimalna u strogo matematičkom smislu, već predstavljaju kompromisna rešenja koja u najvećoj meri zadovoljavaju postavljene kriterijume. Hibridni model AHP-PROMETHEE omogućava potpunije, prilagodljivije i realnije modeliranje u poređenju sa modelima AHP-TOPSIS i AHP-VIKOR, pre svega zbog mogućnosti uključivanja kvalitativnih podataka u matricu odlučivanja i u postupak određivanja težinskih koeficijenata. Predloženi model obezbeđuje donosiocu odluka preciznije i relevantnije rezultate, uz jasniji uvid u međusobne odnose kriterijuma i alternativa. Osnovni cilj istraživanja jeste identifikacija grupe rotornih bagera koji ispunjavaju uslove za procese revitalizacije i modernizacije.

Ekspertske rangiranje rotornih bagera koristi se kao referentni okvir za procenu tačnosti i pouzdanosti primenjenih hibridnih metoda, te je sprovedeno je anketno istraživanje inženjersko-tehničkog osoblja koje radi više godina u eksploataciji i na održavanju analiziranih rotornih bagera. Validacija i selekcija optimalne metode izvršena je na osnovu upitnika koje su pripremili eksperti. Izabrani hibridni model ima za cilj da podrži donošenje odluke o izboru rotornih bagera koji će biti uključeni u proces revitalizacije i modernizacije. Anketa je definisana na osnovu dekompozicije rotornog bagera. Osnovna podela je izvršena prema grupama gradnje i glavnim celinama rotornog bagera. Svako od ovih celina dodeljen je ponder koji definiše stepen njihove značajnosti u ukupnom funkcionisanju mašine. Ponderi su određeni na osnovu ekspertskih procena inženjersko-tehničkog osoblja koje ima višegodišnje iskustvo. U sledećoj iteraciji grupe gradnje su dalje razložene na glavne elemente koji detaljno opisuju svaku grupu gradnje. I za ove elemente eksperti su definisali pondere, u zavisnosti od njihovog značaja u okviru pripadajuće grupe gradnje i uticaja na pouzdanost, raspoloživost i radne performanse rotornog bagera.

Ponderi glavnih celina rotornog bagera definisani su na osnovu sledećih parametara, gde je ukupni zbir pondera 1:

- ✓ Prvi parametar predstavlja *srednju vrednost*, gde su sve celine ocenjene istim težinskim faktorom. Na osnovu ovog kriterijuma autor je želeo da dobije prosečnu, referentnu ocenu stanja rotornog bagera, nezavisno od specifičnih tehničkih i eksploatacionih razlika između pojedinih celina.
- ✓ Drugi parametar je *vek trajanja mehanizacije*, celine su ocenjene u odnosu na pretpostavljeni vek trajanja pojedinačnih sistema u odnosu na projektovani životni vek rotornog bagera. Ovaj kriterijum omogućava sagledavanje dugoročne pouzdanosti i potrebe za revitalizacijom ključnih sistema.
- ✓ Treći parametar odnosi se na *dužinu otklanjanja kvara*, odnosno *pogodnost za održavanje*, i predstavlja ocenu mogućnosti da se odgovarajuća celina iz stanja otkaza u što kraćem vremenu prevede u radno stanje, uz raspoložive tehničke i organizacione resurse.

- ✓ Četvrti parametar je *kompatibilnost sa radnom sredinom*, gde je ocenjena sposobnost rotornog bagera da se prilagodi promenjenim uslovima rada. Ovaj kriterijum razmatra mogućnost osposobljavanja bagera za otkopavanje različitih materijala, što podrazumeva rekonstrukciju ili zamenu pojedinih sklopova i sistema.

Ocenjivanje rotornih bagera je sprovedeno tako da svaki element bagera dobija ocenu, koja se kreće u rasponu od 1 do 10. Ocene elemenata na najnižem hijerarhijskom nivou dodeljuju eksperti na osnovu svoje stručne procene za konkretan rotorni bager. Tako dobijena zbirna ocena elemenata množi se sa ponderom odgovarajuće glavne celine. Na taj način se dobija ocena pojedinačne celine, odnosno grupe gradnje.

Ocenjivanje je izvršeno na osnovu anketnih upitnika/listova, koji su definisani u skladu sa hijerarhijskom dekompozicijom rotornog bagera (slika 6.7). Način unosa i obrade ocena u anketnim upitnicima prikazan je u tabeli 6.56. Svaka grupa gradnje razmatra se kao jedinstvena celina. Ukupna ocena rotornog bagera dobija se sabiranjem ocena svih grupa gradnje, pojedinačne ocene pomnožene su odgovarajućim koeficijentima.

Tabela 6.56. Ocene na osnovu upitnika

A	B	C	D
Dobar rad ocena 8-10	Popravka ocena 5-7	Rekonstrukcija ocena 2-4	Zamena ocena 1

6.57. Rotorni bageri – ekspertske rangiranje

Rotorni bageri	Ukupno	Rangiranje
SRs 1200/22.2 (G1) BW1	5,96	8
SRs 1200/24.4 (G3) BW2	5,42	9
SRs 1200/24.4 (G4) BW3	6,27	7
SRs 1200/24.4 (G5) BW4	6,50	5
SRs 1200/24.4 (G6) BW5	6,35	6
SchRs 630/25.6 (G7) BW6	8,53	1
SRs 1300/26.5 (G8) BW7	7,97	3
SchRs 630/25.6 (G2) BW8	8,38	2
SchRs 900/25.6 (G1) BW9	7,89	4

U tabelama 6.57, 6.58 i 6.59 je prikazano rangiranje rotornih bagera - ekspertske rangiranje, rangiranje modela i rotornih bagera i rangiranje dobijeno poređenjem rezultata dobijenih višekriterijumskim metodama i na osnovu ekspertske mišljenja, respektivno.

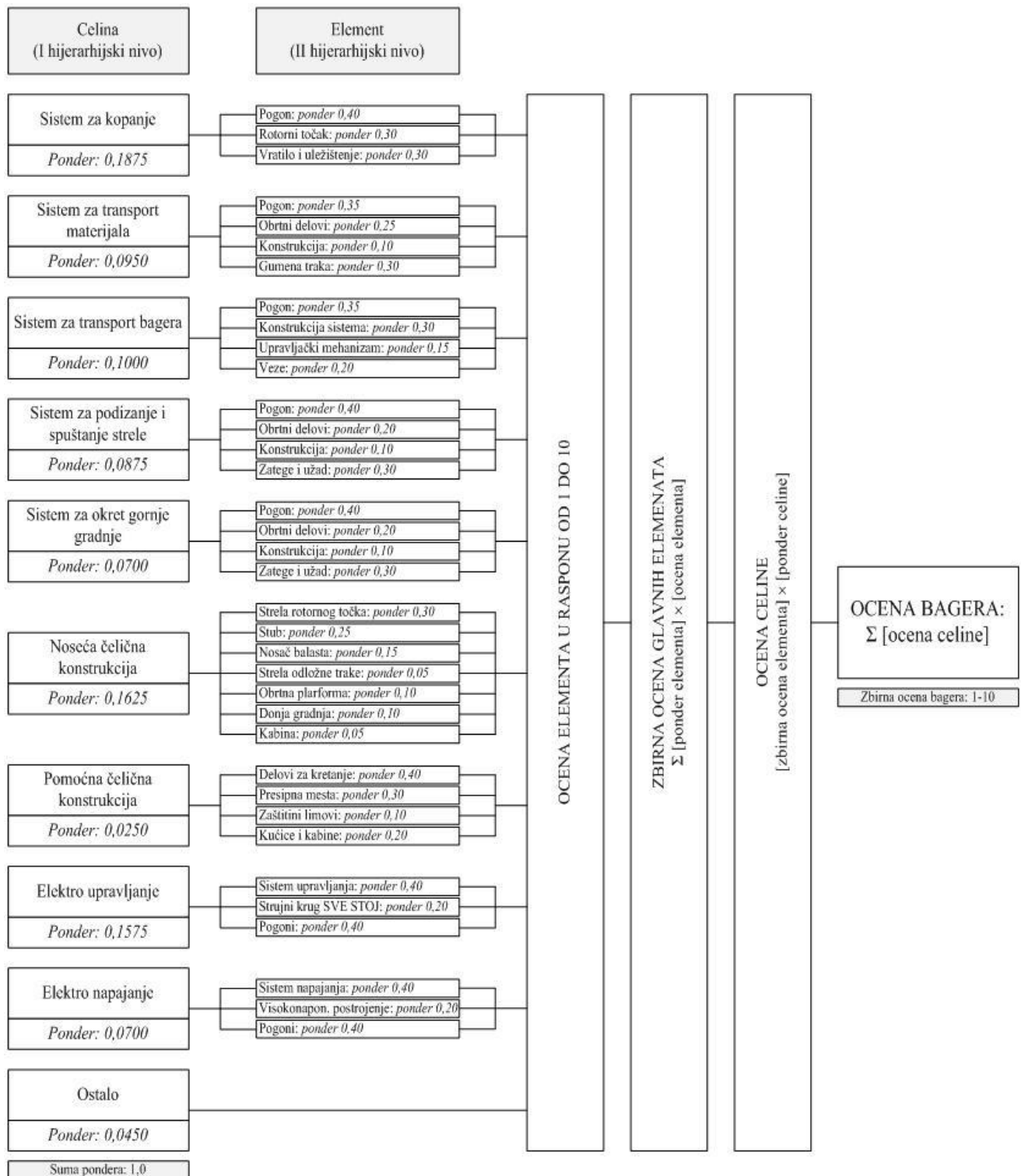
Tabela 6.58. Rangiranje modela i rotornih bagera

Modeli- Rotorni bageri	BWE1	BWE2	BWE3	BWE4	BWE5	BWE6	BWE7	BWE8	BWE9
AHP-TOPSIS	6	8	7	9	3	1	5	2	4
AHP-VIKOR	3	8	5	9	4	6	7	2	1
AHP- PROMETHEE	8	7	6	9	5	4	3	1	2

Tabela 6.59. Poređenje rezultata dobijenih višekriterijumskim metodama i na osnovu ekspertske mišljenja

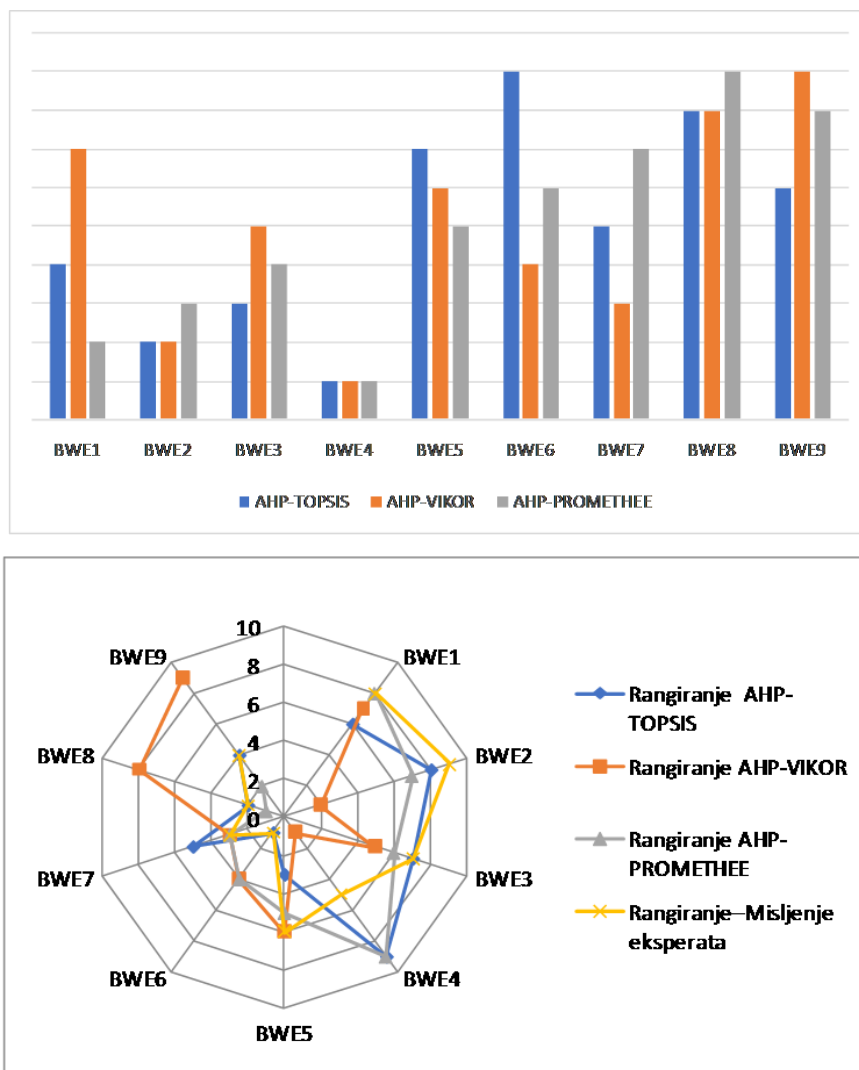
BWE Rotorni bager – Interna oznaka	Oznaka u radu	Rang AHP-TOPSIS	Rang AHP-VIKOR	Rang AHP- PROMETHEE	Rang – Na osnovu ekspertske mišljenja
SRs 1200/22.2 (G1)	BWE1	6	7	8	8
SRs 1200/24.4 (G3)	BWE2	8	2	7	9
SRs 1200/24.4 (G4)	BWE3	7	5	6	7
SRs 1200/24.4 (G5)	BWE4	9	1	9	5
SRs 1200/24.4 (G6)	BWE5	3	6	5	6
SchRs 630/25.6 (G7)	BWE6	1	4	4	1
SRs 1300/26.5 (G8)	BWE7	5	3	3	3
SchRs 630/25.6 (G2)	BWE8	2	8	1	2
SchRs 900/25.6 (G1)	BWE9	4	9	2	4

Na slici 6.7 prikazan je model dekompozicije rotornog bagera sa pripadajućim ponderima, koji čini osnovu za formiranje anketnog lista i sprovođenje validacije rezultata hibridnih modela i dodatno potvrđuje opravdanost predloženog hibridnog modela.



Slika6.7. Dekompozicija rotornog bagera za ocenu sa ponderima

Na slici 6.8 a) je data relacija uspostavljena između primenjenih modela i rotornih bagera, a na slici 6.8 b) rangiranje rotornih bagera.

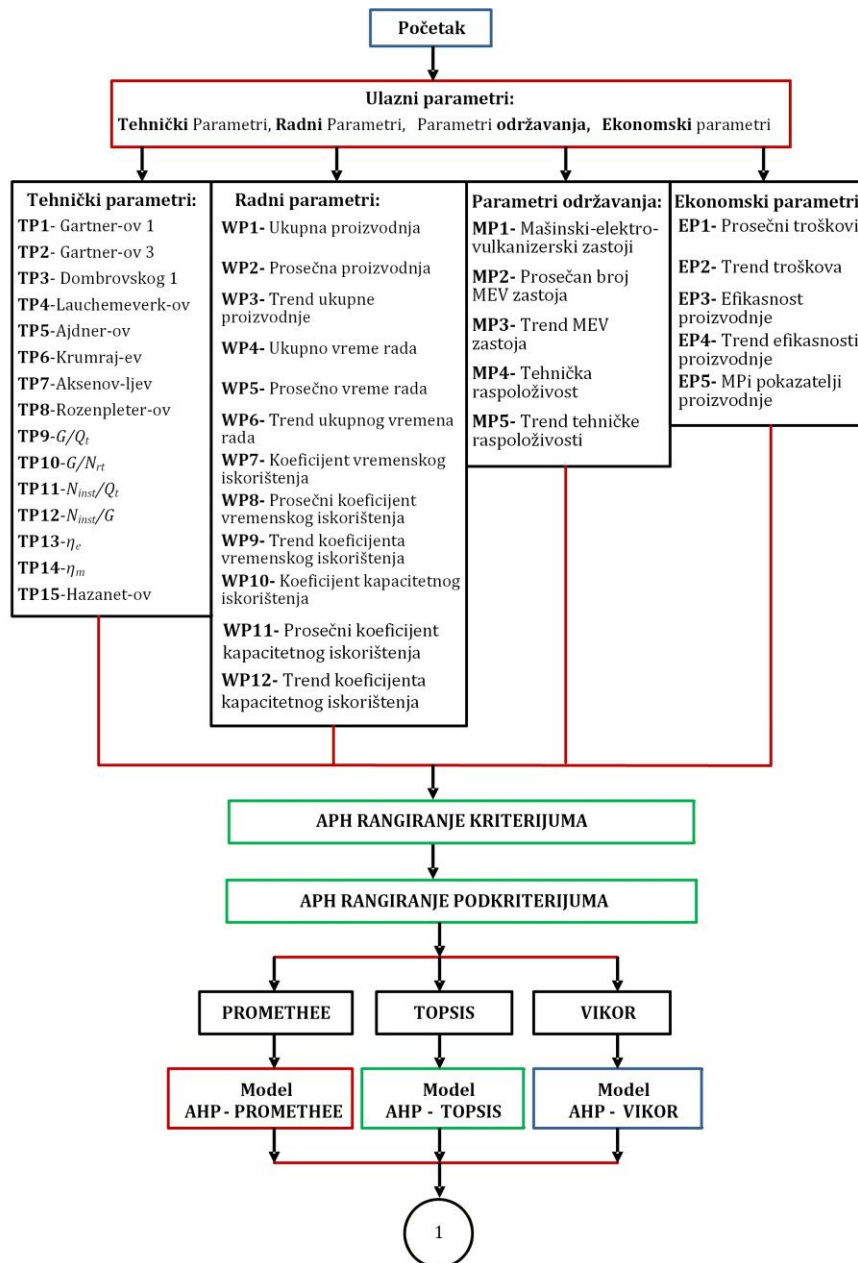


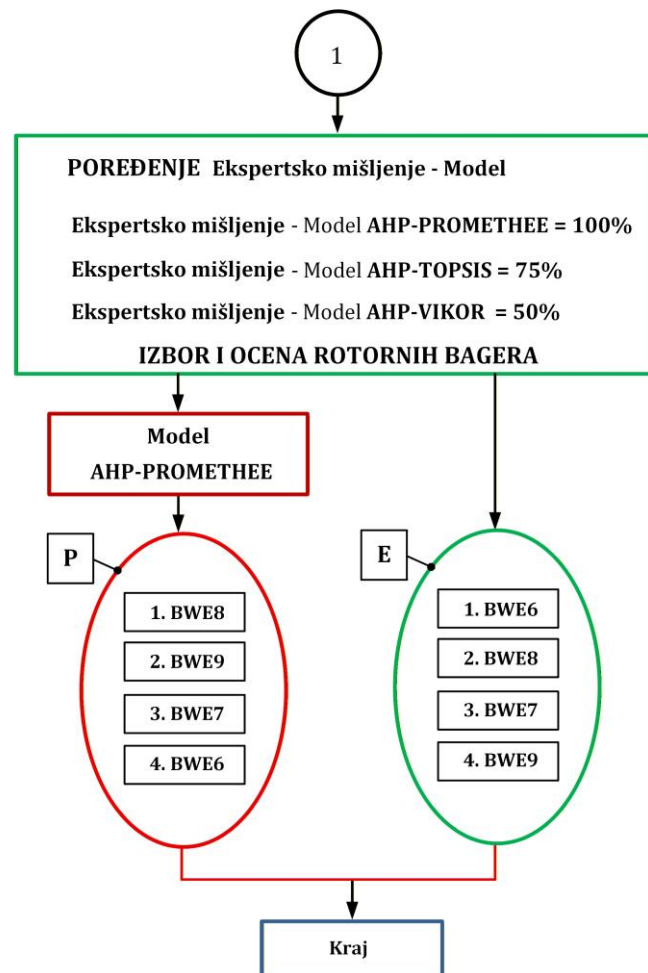
Slika 6.8. Relacija između primenjenih modela i rotornih bagera a), Rangiranje rotornih bagera b)

Poseban značaj modela ogleda se u mogućnosti poređenja rezultata dobijenih različitim hibridnim metodama sa ekspertskim rangiranjem, što predstavlja osnovu za validaciju i izbor optimalnog modela za donošenje odluka za procese revitalizacije i modernizacije rotornih bagera. U ovom poglavlju razvijeni su i primenjeni hibridni modeli višekriterijumskog odlučivanja u cilju evaluacije i rangiranja rotornih bagera kao kandidata za procese revitalizacije i modernizacije. Polazeći od složenosti tehničkih sistema, heterogenosti kriterijuma i neizvesnosti uslova eksploatacije, primenjen je integrisani pristup koji kombinuje AHP metodu za određivanje značaja kriterijuma i podkriterijuma sa metodama PROMETHEE, TOPSIS i VIKOR za rangiranje alternativa.

Na slici 6.9 je prikazan konceptualni okvir matematičkog modela izbora rotornih bagera sa višekriterijumskim metodama odlučivanja.

Dijagram ilustruje tok podataka od ulaznih parametara, preko njihove strukturalne organizacije i ponderisanja primenom AHP metode, do evaluacije i rangiranja alternativa korišćenjem metoda PROMETHEE, TOPSIS i VIKOR. Ovakav pristup omogućava sistematsku obradu velikog broja heterogenih parametara i jasno razdvajanje faze određivanja značaja kriterijuma od faze rangiranja alternativa.





Slika 6.9. Konceptualni okvir matematičkog modela izbora rotornih bagera sa višekriterijumskim metodama odlučivanja (*P* je skup bagera na osnovu AHP-PROMETHEE modela, a *E* je skup na osnovu ekspertskog mišljenja)

Skup i njegovi članovi (elementi) predstavljaju osnovne pojmove u matematici. Skup je određen ukoliko su poznati svi njegovi članovi odnosno svojstva koja ti članovi zadovoljavaju. Skup se može zadati analitički, tako što se navedu njegovi elementi $A = \{x, y, z, \dots\}$ ili na drugi način sintetički, navođenjem osobina koje zadovoljavaju elementi skupa $A = \{x|P(x)\}$.

Ako je A neki skup, tada $x \in A$ zapravo znači sledeće:

- ✓ x je element skupa A ,
- ✓ x pripada skupu A i
- ✓ x je u skupu A .

Ako x ne pripada skupu A , onda važi $x \notin A$. Skupovi A i B su jednaki⁶ ukoliko važi: $A=B$ ako i samo ako $(\forall x)(x \in A \Leftrightarrow x \in B)$ [128].

Neka je skup P rezultat primene AHP-PROMETHEE modela, a skup E na je nastao na osnovu ekspertskog mišljenja: $P = \{x|x \text{ je rezultat primene modela AHP-PROMETHEE}\}$ i $E = \{x|x \text{ je nastao na osnovu ekspertskog mišljenja}\}$, odnosno $P = \{BWE8, BWE9, BWE7, BWE6\}$ i $E = \{BWE6, BWE8, BWE7, BWE9\}$. Ukoliko se umesto rotornih bagera navedu njihovi rangovi skupovi će izgledati ovako: $P = \{4, 3, 1, 2\}$ i $E = \{1, 3, 2, 4\}$. Neka je skup T nastao primenom modela AHP-TOPSIS, a skup V primenom modela AHP-VIKOR, gde su rotorni bageri predstavljeni svojim rangovima: $T = \{1, 5, 2, 4\}$ i $V = \{4, 3, 8, 9\}$.

⁶Skupovi A i B su jednaki ukoliko su elementi jednog skupa ujedno i elementi drugog skupai obrnuto, svi elementi drugog skupa su elementi prvog skupa.

Ako se rezultati primenjenih hibridnih modela uporede sa ekspertskim rangiranjem na osnovu teorije skupova i relacije „biti element skupa- $\in$ “, može se izvršiti kvantitativna procena stepena saglasnosti modela sa realnim inženjerskim stavom.

Analizom preseka skupova u odnosu na ekspertski skup E, može se uočiti da u modelu AHP-VIKOR, samo dva elementa skupa $\{4,3\} \in (\text{pripadaju})$ skupu rešenja ekspertske ocene $\{1,3,2,4\}$, dok elementi $\{8,9\} \notin (\text{ne pripadaju})$ skupu ekspertske ocene $\{1,3,2,4\}$. Tako pomenuti metod ima poklapanje od samo 50%. Kod AHP-TOPSIS modela, tri elementa skupa $\{1,2,4\} \in (\text{pripadaju})$ skupu rešenja ekspertske ocene $\{1,3,2,4\}$, dok $\{5\} \notin (\text{ne pripada})$ skupu ekspertske analize $\{1,3,2,4\}$. Postoji 75% poklapanje sa ekspertskim mišljenjem.

Konačno, kod AHP-PROMETHEE modela dolazi do potpunog poklapanja elemenata skupa, jer su skupovi $\{4,3,1,2\}$ i $\{1,3,2,4\}$ jednaki, što ukazuje na 100% saglasnost sa ekspertskim rangiranjem. Na osnovu sprovedene analize može se zaključiti da AHP-PROMETHEE model pokazuje najveći stepen usklađenosti sa ekspertskim mišljenjem, zatim sledi AHP-TOPSIS model, dok AHP-VIKOR model pokazuje najmanji stepen poklapanja. Ovakav rezultat dodatno potvrđuje pogodnost AHP-PROMETHEE modela za primenu u procesu izbora rotornih bagera za revitalizaciju i modernizaciju u realnim uslovima površinske eksploatacije.

Svi modeli su teorijski utemeljeni i omogućavaju obradu većeg broja konfliktnih kriterijuma, međutim; dobijeni rezultati ukazuju na različit stepen usaglašenosti sa ekspertskim procenama, koje predstavljaju referentnu osnovu za donošenje odluka. Razvijeni hibridni modeli AHP-PROMETHEE, AHP-TOPSIS i AHP-VIKOR omogućili su sistematsku analizu tehničkih, radnih, parametara održavanja i ekonomskih parametara rotornih bagera. Obezbeđena je objektivna i transparentna osnova za donošenje odluka, uz istovremeno uvažavanje ekspertskog znanja i iskustva inženjersko-tehničkog osoblja.

Validacija rezultata sprovedena je poređenjem rangiranja dobijenih primenom hibridnih modela sa ekspertskim rangiranjem zasnovanim na anketnom istraživanju. Upoređivanjem rezultata dobijenih primenom teorije skupova i relacije „biti element skupa“, utvrđeno je da model AHP-PROMETHEE pokazuje potpuno poklapanje 100% sa rangiranjem dobijenim na osnovu ekspertskog mišljenja, dok modeli AHP-TOPSIS i AHP-VIKOR ostvaruju delimično poklapanje od 75%, odnosno 50%.

Ovakvi rezultati ukazuju na veću pouzdanost AHP-PROMETHEE modela u uslovima kada su pored kvantitativnih, prisutni i kvalitativni kriterijumi, kao i kada je neophodno uvažiti iskustvo inženjersko-tehničkog osoblja u procesu odlučivanja. Dobijeni rezultati potvrđuju da primena višekriterijumskih metoda odlučivanja, naročito u hibridnoj formi, predstavlja efikasan alat za podršku odlučivanja u rudarstvu, posebno u procesima koji podrazumevaju velika finansijska ulaganja i dugoročne posledice, kao što su revitalizacija i modernizacija rotornih bagera. Predloženi pristup omogućava identifikaciju grupe rotornih bagera koji ispunjavaju postavljene tehničke, eksploatacione i ekonomske zahteve, čime se smanjuje rizik od donošenja odluka zasnovanih isključivo na parcijalnim i subjektivnim procenama.

Prednosti hibridnog modela AHP-PROMETHEE u odnosu na AHP-TOPSIS i AHP-VIKOR modele

Prednost AHP-PROMETHEE modela ogleda se u njegovoj fleksibilnosti i prilagodljivosti realnim rudarskim uslovima, naročito u mogućnosti obrade kvalitativnih podataka i parcijalnog rangiranja alternativa. Takav pristup omogućava donošenje kompromisnih, ali inženjerski opravdanih odluka, što je od posebno značaja u procesu selekcije rotornih bagera za revitalizaciju i modernizaciju, gde je cilj identifikacija grupe mašina koje ispunjavaju definisane tehničke, eksploatacione i ekonomske zahteve. Njegova osnovna prednost u odnosu na modele AHP-TOPSIS i AHP-VIKOR ogleda se u mogućnosti obrade kako kvantitativnih, tako i kvalitativnih kriterijuma, uz fleksibilno definisanje funkcija preferencije koje omogućavanju realističnije modeliranje odnosa između alternativa.

Za razliku od TOPSIS metode, koja se zasniva isključivo na geometrijskom rastojanju od idealnog i anti-idealnog rešenja, PROMETHEE metoda omogućava parcijalno i potpuno rangiranje alternativa na osnovu intenziteta preferencija po svakom kriterijumu. Izbegava se gubitak informacija koji može nastati usled agregacije podataka u jednu meru udaljenosti, što je naročito značajno kod tehničkih sistema sa izraženom heterogenošću parametara, kao što su rotorni bageri.

U poređenju sa VIKOR metodom, koja teži kompromisnom rešenju zasnovanom na minimizaciji individualnog i grupnog žaljenja (nezadovoljstva), AHP-PROMETHEE model pruža veću transparentnost u procesu odlučivanja. Donosilac odluke ima jasan uvid u doprinos svakog kriterijuma i podkriterijuma konačnom rangi alternative i razloge zbog kojih je određena alternativa preferirana u odnosu na druge.

Dodatna prednost AHP-PROMETHEE modela ogleda se u njegovoj većoj saglasnosti sa ekspertskim mišljenjem, što je potvrđeno analizom skupova dobijenih rangiranja. Potpuno poklapanje rezultata AHP-PROMETHEE modela za ekspertskim rangiranjem ukazuje na visok stepen prilagodljivosti ovog modela realnim uslovima eksploatacije i održavanja rotornih bagera. Potvrđuje se da model ne samo da ima dobru matematičku osnovu, već i uspešno inkorporira znanja i iskustva stručnjaka iz prakse.

Na osnovu navedenog, može se zaključiti da AHP-PROMETHEE model predstavlja pouzdan i primenljiv alat za podršku odlučivanju u procesu izbora rotornih bagera za revitalizaciju i modernizaciju, uz smanjenje rizika donošenja odluka i povećanje efikasnosti upravljanja složenim sistemima u rudarstvu.

7. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

U ovoj doktorskoj disertaciji razvijena je sveobuhvatna metodologija za izbor kapitalnih rudarskih mašina za procese revitalizacije i modernizacije u cilju produženja životnog veka, zasnovana na integraciji višekriterijumskih metoda odlučivanja. S obzirom na prirodu odluka u rudarstvu, predloženi pristup omogućava sistematično, transparentno i kvantitativno utemeljeno vrednovanje alternativnih rešenja. Uspostavljen je metodološki okvir koji prevazilazi ograničenja tradicionalnih, parcijalnih i iskustveno zasnovanih pristupa odlučivanju.

Razvijen je, implementiran i verifikovan višekriterijumski hibridni model, kao odgovor na jedan od najsloženijih problema upravljanja kapitalnom rudarskom mehanizacijom. Problem izbora mašina za produženje životnog veka sagledan je kao višedimenzionalni inženjerski zadatak u uslovima izražene neizvesnosti i rizika. Kod kapitalnih i dugovečnih mašina, kao što su rotorni bageri, pogrešna odluka o revitalizaciji ili zameni može imati značajne tehničke i finansijske posledice.

Predmet ove doktorske disertacije je razvoj metodologije za izbor kapitalnih rudarskih mašina za procese revitalizacije i modernizacije u sistemima površinske eksploatacije.

Istraživanje je bilo orijentisano ka:

- ✓ kapitalnim rudarskim mašinama (rotornim bagerima) kao ključnim elementima kontinualnog BTO i BTD sistema,
- ✓ sistematskoj identifikaciji i struktuiranju kriterijuma relevantnih za procenu tehničkog stanja i preostalog potencijala kapitalnih rudarskih mašina (rotornih bagera),
- ✓ razvoju i implementaciji sveobuhvatnih, objektivnih i primenljivih hibridnih modela za podršku odlučivanju u procesu izbora rotornih bagera, zasnovanih na višekriterijumskim metodama, njihovoj uporednoj analizi i validaciji na realnim podacima, kao i
- ✓ izboru metodološki i praktično najpouzdanijeg modela za potrebe rudarske prakse.

Metodologija primenjena u radu:

- ✓ razvijeni su hibridni modeli zasnovani na integraciji nekoliko višekriterijumskih metoda odlučivanja,
- ✓ primenjene metode AHP, PROMETHEE, TOPSIS i VIKOR su kombinovane u tri parcijalna hibridna modela,
- ✓ struktuiran je skup tehničkih, eksploatacionih, kriterijuma održavanja i ekonomskih kriterijuma i
- ✓ vrednovanje i izbor optimalnog modela izvršeni su na osnovu eksperatskih procena.

Model je verifikovan na realnom skupu od devet rotornih bagera sa površinskih kopova RB-a Kolubara, starijih od 35 godina, čime je potvrđena njegova primenljivost, robusnost i konzistentnost u uslovima stvarne rudarske prakse. Dobijeni rezultati omogućili su jasno razdvajanje mašina prema prioritetima za revitalizaciju i modernizaciju i identifikaciju onih kod kojih dalje investicije nisu tehnički i ekonomski opravdane.

Uporedna analiza hibridnih modela pokazala je da model AHP-PROMETHEE ostvaruje najviši stepen saglasnosti sa eksperatskim procenama i realnim tehničkim stanjem mašina i najveću diskriminativnost u rangiranju alternativa. Ovaj model se pokazao naročito pogodnim za probleme u kojima se istovremeno razmatraju kvantitativni i kvalitativni kriterijumi, kao i za situacije u kojima subjektivne procene nije moguće, niti poželjno u potpunosti eliminisati.

Osnovni naučni doprinos disertacije se ogleda u razvoju integrisanog hibridnog modela višekriterijumskog odlučivanja, prilagođenog specifičnostima složenih rudarskih sistema i dugovečne kapitalne mehanizacije.

Metodološki doprinos se sastoji u definisanju struktuiranog skupa kriterijuma i postupaka koji omogućava kontrolisano i kvantitativno uvođenje subjektivnosti u proces odlučivanja. Postiže se uravnotežen odnos između objektivnih podataka o radu i održavanju i ekspertskog znanja stečenog na osnovu dugogodišnjeg iskustva u eksploataciji i na održavanju kapitalnih rudarskih mašina (rotornih bagera).

Praktični doprinos rada se ogleda u mogućnosti neposredne primene predložene metodologije u rudarskim kompanijama, u cilju racionalnog upravljanja održavanjem, smanjenja rizika, optimizacije investicionih odluka i produženja životnog veka kapitalne rudarske mehanizacije.

Poseban doprinos disertacije ogleda se u formalizaciji pojma izbora kapitalnih rudarskih mašina (rotornih bagera) za revitalizaciju kao višekriterijumskog problema odlučivanja. Umesto intuitivnog i parcijalnog pristupa, predložen je sistematski postupak koji omogućava da se tehničko stanje, pouzdanost, eksploatacioni efekti i ekonomska opravdanost razmatraju simultano i kvantitativno. Time je izbor kapitalnih rudarskih mašina kojima je moguće produžiti životni vek pretvoren u transparentan, ponovljiv i naučno utemeljen proces.

Disertacija daje doprinos kako teoriji višekriterijumskog odlučivanja u inženjerskim sistemima, tako i praksi upravljanja održavanjem, revitalizacijom i modernizacijom kapitalnih rudarskih mašina. Razvijeni pristup omogućava racionalnije korišćenje postojećih resursa, smanjenje operativnih i indirektnih troškova usled zastoja i povećanje dugoročne održivosti proizvodnih sistema u površinskoj eksploataciji.

Na osnovu rezultata dobijenih verifikacijom modela i definisanjem naučnih, metodoloških i praktičnih doprinosa kroz unapređenje postojećih pristupa analizi može se zaključiti da su osnovne postavke doktorske disertacije nedvosmisleno potvrđene. Predloženi hibridni model predstavlja pouzdanu metodološku osnovu za donošenje investicionih i operativnih odluka u oblasti upravljanja kapitalnom rudarskom mehanizacijom.

Kritički osvrt na primenjenu metodologiju

Prilikom razmatranja naučne vrednosti ovog rada, opravdano se može postaviti pitanje u kojoj meri je primena ekspertskog mišljenja, kombinovanog sa klasičnim višekriterijumskim metodama odlučivanja, adekvatan i dovoljno snažan pristup za rešavanje složenog i tehnički zahtevnog problema kao što je izbor kapitalnih rudarskih mašina za procese revitalizacije i modernizacije. Ovakvo pitanje proizilazi iz činjenice da su primenjene metode u osnovi linearne, delimično subjektivne i metodološki zrele, te se mogu smatrati „nekonvencionalnim“ u odnosu na savremene metode, u kojima je prisutno procesiranje velikog broja podataka, kao i algoritamski složeni pristupi.

Međutim, upravo specifičnost problema koji je u ovom radu razmatran predstavlja ključni argument u prilog izabranoj metodologiji. Odluke koje se odnose na kapitalnu, dugovečnu i jedinstvenu rudarsku mehanizaciju donose se u uslovima ograničene količine podataka, visokog stepena tehničke i eksploatacione raznolikosti, kao i izražene neizvesnosti u pogledu budućih uslova rada. U takvom okruženju ne postoji mogućnost klasične statističke evaluacije niti validacije zasnovane na velikim skupovima podataka, a fizičko eksperimentisanje nije izvodljivo.

Stoga je neizbežno u proces odlučivanja uključiti i inženjersku procenu, odnosno ekspertsko znanje stečeno kroz dugogodišnju praksu. U ovom radu ekspertsko mišljenje nije tretirano kao intuitivni ili nestruktuirani ulaz, već kao kontrolisan i kvantitativno obrađen element modela. Subjektivnost je svedena na unapred definisani okvir kroz primenu AHP metode, proveru konzistentnosti uparenih poređenja i verifikaciju rezultata primenom više nezavisnih višekriterijumskih metoda. Na taj način subjektivnost ne predstavlja slabost modela, već postaje njegov eksplicitno identifikovan i upravljiv segment.

Linearnost primenjenih višekriterijumskih metoda u ovom kontekstu ne predstavlja modelsku redukciju realnosti, već svesno prihvaćenu projekcionu aproksimaciju čiji je cilj transparentnost i interpretabilnost rezultata.

Cilj modela nije simulacija fizičkih procesa, već podrška racionalnom izboru između konačnog broja alternativa na osnovu više međusobno konfliktnih kriterijuma. U modelu se kombinuju različiti podaci koji se po prirodi ne mogu porediti. U tom smislu, jednostavnost matematičke strukture predstavlja vrednost, jer omogućava razumevanje rezultata, njihovu verifikaciju i primenu u realnom inženjerskom okruženju.

Naučna vrednost ovog rada ne proizilazi iz novine pojedinačnih metoda, već iz njihove integracije u hibridni model, sistematizacije kriterijuma, kao i povezivanja teorijskih koncepata višekriterijumskog odlučivanja sa realnim eksploatacionim podacima i praksom u rudarskoj industriji. Razvijeni model ne teži da ponudi apsolutno optimalno rešenje, već da obezbedi naučno utemeljen, ponovljiv i transparentan okvir za donošenje složenih inženjerskih odluka.

U tom kontekstu, primena klasičnih višekriterijumskih metoda odlučivanja udruženih sa ekspertskim mišljenjem ne predstavlja metodološki nedovoljan, već upravo adekvatan i naučno opravdan pristup problemu izbora kapitalnih rudarskih mašina u uslovima realnih ograničenja tehničkih sistema i industrijske prakse.

Predložena metodologija ima univerzalni karakter i, uz određene adaptacije, može se primeniti i u drugim oblastima industrije u kojima se javlja potreba za vrednovanjem i izborom složenih tehničkih sistema u uslovima više međusobno konfliktnih kriterijuma.

Buduća istraživanja treba usmeriti ka integraciji modela sa sistemima kontinuiranog (online) praćenja rada mašina, čime bi se dodatno smanjila zavisnost od periodičnih ekspertskih procena; kao i ka uključivanju uticaja radne sredine, tehnologije eksploatacije i organizacionih faktora, čime bi se stvorila osnova za adaptivne i inteligentne sisteme podrške odlučivanju u rudarstvu.

LITERATURA

- [1] S. Đenadić, “Razvoj sinteznog modela upravljanja rizikom kod rotornih bagera”, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, pp. 1, 21, 27, 2022.
- [2] Elektroprivreda Srbije, <https://www.eps.rs>, www.eps.rs/cir/Pages/tehnicki_izvestaji.aspx TEH_Godisnjak2025_web_cir, 2025.
- [3] S. Bošnjak, M. Pantelić, M. Misita, N. Gnjatović & A. Stefanović, “Minimizacija rizika u eksploataciji i održavanju rotornih bagera”, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, pp. 7-10, 12-15, 40-45, 2020.
- [4] M. Hudej, “Multivarijabilni modeli upravljanja u rudarstvu”, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, pp. 1, 2013.
- [5] F. Sitorus, J.J. Cilliers, R. Pablo, & R. Brito-Parada, “Multi-criteria decision making for the choice problem in mining and mineral processing: Applications and trends”, *Expert Systems with Applications*, 121, pp. 393-417, 2019.
- [6] S. Ivković, “Potrebe za revitalizacijom i modernizacijom rudarske opreme”, Rudarski Institut 2(29), pp. 11, 12, 14, 1990.
- [7] N. Popović, “Naučne osnove projektovanja površinskih kopova”, Niro Zajednica Sarajevo, pp. 65, 298, 389, 391, 392, 393, 397, 400, 401, 417, 566-568, 905, 1984.
- [8] B. Samanta, B. Sarkar, & S. K. Mukherjee, “Selection of opencast mining equipment by a multi-criteria decision-making process”, *Mining Technology*, 111, pp. 136–142, 2002, doi:10.1179/mnt.2002.111.2.136.
- [9] A. Bascetin, “Technical note: An application of the analytic hierarchy process in equipment selection at Orhaneli open pit coal mine”, *Mining Technology*, 113, pp. 192–199, 2004, doi: 10.1179/037178404225004968.
- [10] A. Bascetin, “The study of decision making tools for equipment selection in mining engineering operations”, *Gospodarka Surowcami Mineralnymi - Mineral Resources Management*, 25, pp. 37–56, 2009.
- [11] A.A. Bazzazi, M. Osanloo, H. & Soltanmohammadi, “Loading-haulage equipment selection in open pit mines based on fuzzy-TOPSIS method”, *Gospodarka Surowcami Mineralnymi - Mineral Resources Management*, 24, pp. 87–102, 2008.
- [12] A.A. Bazzazi, M. Osanloo, & B. Karimi, “Optimal Open Pit Mining Equipment Selection Using Fuzzy Multiple Attribute Decision Making Approach”, *Arch.Min.Sci*, 54, pp. 301–320, 2009.
- [13] A.A.Bazzazi, M. Osanloo, & B. Karimi, “Deriving preference order of openpit mines equipment through MADM methods: Application of modified VIKOR method”, *Expert Systems with Applications*, 38(3): pp. 2550-2556, 2011a,doi:10.1016/j.eswa.2010.08.043.
- [14] A.A. Bazzazi, M. Osanloo, & B. Karimi, “A New Fuzzy Multi Criteria Decision Making Model for Openpit mines Equipment Selection”, *Asia Pacific Journal of Operational Research* 28(3): pp. 279-300, 2011b,doi:[10.1142/S0217595911003247](https://doi.org/10.1142/S0217595911003247).
- [15] A.Lashgari, Yazdani-Chamzini, M.M. Fouladgar, E.K. Zavadskas, S. Shafiee, & N. Abbate, “Equipment Selection Using Fuzzy Multi Criteria Decision Making Model: Key Study of Gole Gohar Iron Mine”, *Engineering Economics*, 23, pp. 125–136, 2012, doi:10.5755/j01.ee.23.2.1544.
- [16] R.A. Adebimpe, J.M. Akande, & C.Arum, “Mine Equipment Selection for Ajabanoko Iron Ore Deposit, Kogi State, Nigeria”, *Science Research*, 1, pp. 25–30,2013, doi:10.11648/j.sr.20130102.13.

- [17] A. Yazdani-Chamzini, “An integrated fuzzy multi criteria group decision making model for handling equipment selection”, *Journal of Civil Engineering and Management*, 20, pp. 660–673, 2014, doi:10.3846/13923730.2013.802714.
- [18] M. Yavuz, “An equipment Selection Application using AHP method”, *SME Annual Meeting*, Denver, 2007, CO1, Copyright ©20 07 by SME Preprint 07-091.
- [19] M. Yavuz, “Equipment selection based on the AHP and Yagers method”, *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 115, pp. 425-433, 2015a.
- [20] P. Bodziony, M. Patyk, & Z. Kasztelewicz, “Multi-criteria Decision-making for the choice of equipment in mining using the AHP method”, *New Trend in Production Engineering*, volume 2, Issue 1, pp. 404-415, 2019, doi:10.2478/ntpe-2019-0043.
- [21] M. Patyk, P. Bodziony & K. Zbigniew, “A Multiple Criteria Decision Making Method to Weight the Sustainability Criteria of Equipment Selection for Surface Mining”, *Energies* 14 (11): 3066, pp. 1-14, 2021, doi: [10.3390/en14113066](https://doi.org/10.3390/en14113066).
- [22] M. Patyk, & P. Bodziony, “Application of the Analytical Hierarchy Process to Select the Most appropriate Mining Equipment for the Exploitation of Secondary Deposits”, *Energies*, 15, 5979, pp. 1–16, 2020, <https://doi.org/10.3390/en15165979>.
- [23] P. Bodziony, M. Patyk, & Z. Kasztelewicz, “A multiple criteria decision making method to weight the sustainability criteria of equipment selection for surface mining”, *Energies*, 14(11), pp. 30-36, 2021, <https://doi.org/10.3390/en14113066>.
- [24] A.Z. Abulkishik & R. Al-majed, “Hybrid multi-criteria decision making model creation for bucket wheel excavator evaluation and selection”, *American University of Emirates*, pp. 72-82, 2022, doi: [10.54216/AJBOR.060106](https://doi.org/10.54216/AJBOR.060106).
- [25] B. Elevli, & A. Demirci, A. “Multicriteria choice of ore transport system for an underground mine: Application of PROMETHEE methods”, *Journal –South African institute of Mining and Metallurgy* 104 (5): pp. 251-256, 2004.
- [26] Z. Despodov, S. Mitić, & D. Peltečki, “Application of the AHP method for selection of a transportation system in mine planning”, *Underground Mining Engineering* 19, [26] Faculty of Mining and Geology, Belgrade, YU ISSN 03542904, pp. 93-99, 2011.
- [27] Z. Despodov, D. Mirakovski, & S. Mijalkovski, “Methodology for selection of the most convenient ore transportation system in regard to the environmental protection”, *The International Journal of TRANSPORT & LOGISTICS, Medzinárodný časopis DOPRAVA A LOGISTIKA*, ISSN 1451-107X, pp. 1-10, 2013.
- [28] W.T. de Sousa Junior, M.J.F. Souza, I.E. Cabral, & M.E. Diniz, “Multi-Criteria Decision Aid methodology applied to highway truck selection at a mining company”, *REM Revista Escola de Minas*, 67, pp. 285–290, 2014.
- [29] P. Bodziony, P.Z. Kasztelewicz, & P. Sawicki, “The problem of multiple criteria selection of the surface mining haul trucks”, *Arch. Min. Sci.*, 61, No 2, pp. 223–243, 2016, doi:10.1515/amsc-2016-0017.
- [30] A. Rakhmangulov, K. Burmistrov, N. Osintsev, “Multi-Criteria System's Design Methodology for Selecting Open Pits Dump Trucks”, *Sustainability*, 16(2), pp. 863, 2024, <https://doi.org/10.3390/su16020863>.
- [31] O. Acaroglu, H. Ergin, & S. Eskikaya, “Analytical hierarchy process for selection of road headers”, *The Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy*, 106, pp. 569-575, 2006a.

- [32] O. Acaroglu, C. Feridunoglu, & D. Tumac, "Selection of roadheaders by fuzzy multiple attribute decision making method", *Mining Technology*, 115, pp. 91-98, 2006b.
- [33] A. Ebrahimabadi, "A Fuzzy AHP Approach to Select the Proper Roadheader in Tabas Coal Mine Project of Iran", *Bulletin of the Earth Sciences Application and Research Centre of Hacettepe University*, 35, pp. 271-282, 2014.
- [34] P.M. Ozfirat, M.K. Ozfirat, T. Malli, & B. Kahraman, "Integration of fuzzy analytic hierarchy process and multi- objective fuzzy goal programming for selection problems: An application on roadheader selection", *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 29, pp. 53–62, 2015, doi:10.3233/ifs-151569.
- [35] N. Kursunoglu & M. Onder, "Selection of an appropriate fan for an underground coal mine using Analytic Hierarchy Process", *Tunnelling and Underground Space Technology* 48, pp. 101–109, 2015.
- [36] M.S. Kizil, S. Abdalla, & I.Canbulat, "Uderground coal mine layout selection using analytical hierarchy process", *Mining Technology*, 123, pp. 20–29, 2014. doi:10.1179/1743286313y.0000000053.
- [37] M. Yavuz, "The application of the analytic hierarchy process (AHP) and Yagers method in underground mining method selection problem", *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 29, pp. 453–475, 2015b,doi: 10.1080/17480930. 2014.895218.
- [38] M. Ataei, H. Shahsavany, & R. Mikaeil, "Monte Carlo Analytic Hierarchy Process (MAHP) approach to selection of optimum mining method", *International Journal of Mining Science and Technology*, 23, pp. 573–578, 2013, doi:10.1016/j.ijmst.2013.07.017.
- [39] N.F. Samimi, K. Shahriar, M. Ataee-pour, & H. Dehghani, "A new model for mining method selection of mineral deposit based on fuzzy decision making", *The Journal of TheSouthern African Institute of Mining and Metallurgy*, 108, pp. 385-395, 2008.
- [40] R. Mikaeil, M.Z. Naghadehi, M. Ataei, & R. Khalokakaie, "A Decision Support System Using Fuzzy Analytica Hierarchy Process (FAHP) and TOPSIS Approaches for Selection of the Optimum Underground Mining Method", *Arch.Min.Sci.*,54, pp. 349–368, 2009.
- [41] M. Ataei, M. Jamshidi, M., F. Sereshki, & S. Jalali, "Mining method selection by AHP approach", *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 108, pp. 741-749, 2008a.
- [42] M. Ataei, F. Sereshki, M. Jamshidi, & S.M.E. Jalali, "Suitable mining method for Golbini No. 8 deposit in Jajarm (Iran) using TOPSIS method", *Mining Technology*, 117, pp. 1-5,2008b, doi:10.1179/174328608x343650.
- [43] A. Azadeh, M. Osanloo, & M. Ataei, "A new approach to mining method selection based on modifying the Nicholas technique", *Applied Soft Computing*, 10, pp. 1040–1061, 2010, doi:10.1016/j.asoc.2009.09.002.
- [44] N.F. Samimi, K. Shahriar, K. A. Basetin, & S.H. Ghodsypour, "Practical applications from decision-making techniques for selection of suitable mining method in Iran", *Gospodarka Surowcami Mineralnymi - Mineral Resources Management*, 25, pp. 57–77, 2009.
- [45] H. Dehghani, A. Siامي, & P. Haghi, "A new model for mining method selection based on grey and TODIM methods", *Journal of Mining & Environment*, 8, pp. 49–60, 2017, doi:10.22044/jme.2016.626.
- [46] F.S. Namin, K. Shahriar, M. Ataee-pour, & H. Dehghani, "A new model for mining method selection of minera deposit based on fuzzy decision making", *The Journal of TheSouthern African Institute of Mining and Metallurgy*, 108, pp. 385–395, 2008.

- [47] A.R. Ghazikalayeh, A. Ebrahimabadi, & I. Alavi, “Selecting Proper Mining Method Using Fuzzy AHP Approach (Case study: Qaleh-Zari Copper Mine of Iran)”, *Journal of Applied Science and Agriculture*, 9, pp. 1-10, 2014.
- [48] S. Shariati, A. Yazdani-Chamzini, & B.P.Bashari, “Mining method selection by using an integrated model”, *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*, 6, pp. 199–214, 2013.
- [49] M. Hayati, R. Rajabzadeh & M. Darabi, “Determination of Optimal Block Size in Angouran Mine Using VIKOR Method”, *J.Mater. Environ. Sci.* 6, pp. 3236–3244, 2015.
- [50] M. Yavuz, & S. Alpay, S, “Underground Mining Technique Selection by Multicriterion Optimization Methods”, *Journal of Mining Science*, 44, pp. 391–401, 2008.
- [51] P. Kluge, D. Malan, “The application of the analytical hierarchical process in complex mining engineering design problems”, *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 111, pp. 847–855, 2011.
- [52] C. Musingwini, “A Review of the Theory and Application of Multi-Criteria Decision Analysis Techniques in Mine Planning”, *MINE PLANNING AND EQUIPMENT SELECTION (MPES) CONFERENCE*, pp. 129-139, 2010.
- [53] P.J. Petit, “Business optimization for platinum mining projects and operations”, *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 116, pp.123-130, 2016.
doi:10.17159/2411-9717/2016/v116n2a3.
- [54] H. Karimnia, & H. Bagloo, “Optimum mining method selection using fuzzy analytical hierarchy process Qapiliq salt mine, Iran”, *International Journal of Mining Science and Technology*, 25, pp. 225–230, 2015, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmst.2015.02.010.
- [55] M. Yavuz & S. Alpay, “Reclamation project selection in an open pit mine by using fuzzy AHP”, *Environmental Earth Sciences*, 73(10): pp. 6167-6179, 2014, doi:[10.1007/s12665-014-3842-0](https://doi.org/10.1007/s12665-014-3842-0).
- [56] S. Dessureault & M.J. Scoble, “Capital investment appraisal for the integration of new technology into mining systems”, *Mining Technology*, 109, pp. 30-40, 2000, doi:10.1179/mnt.2000.109.1.30.
- [57] P. Petit & P. Fraser, “What is the best energy-delivery system for hand-held stope drilling and associated equipment in narrow-reef hard rock mines?”, *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 113, pp. 243–249, 2013.
- [58] S. Vujic, M. Hudej & I. Miljanovic, “Results of the Promethee Method Application in Selecting the Technological System at the Majdan I Open Pit Mine”, *Archives of Mining Sciences*, 58, pp. 1229-1240, 2013, doi:10.2478/amsc-2013-0084.
- [59] C.Stojanović, D. Bogdanović & S. Urosević, “Selection of the optimal technology for surface mining by multi-criteria analysis”, *Kuwait J. Sci*, 42, pp. 170-190, 2015.
- [60] A. Bouhedja, A. Idres, A. Boutrid, M. Bounouala, A. Benselhoub & K. Talhi, “Application of PROMETHEE Mathematical Model for Choosing a Secondary Breakage Process of the Oversized Blocks in Limestone Quarries”, *Mining Science and Technology*, 23, pp. 121–135, 2016, doi:10.5277/msc162310.
- [61] P.K. Dey, E.K. Ramcharan, “Analytic hierarchy process helps select site for limestone quarry expansion in Barbados”, *J Environmental Manage*, 88, pp. 1348-1395, 2008, doi:10.1016/j.jenvman.2007.07.011.

- [62] M. Golestanifar & A.A. Bazzazi, "TISS: a decision framework for tailing impoundment site selection", *Environmental Earth Science*, 61, pp. 1505–1513, 2010, doi:10.1007/s12665-010-0466-x.
- [63] M. Straka, P. Bindzr, & A. Kadukov, "Utilization of the multicriteria decision-making methods for the needs of mining industry", *Acta Montanistica Slovaca*, 19, pp. 199–206, 2014.
- [64] A. Hekmat, M. Osanloo, & A.M. Shirazi, "New approach for selection of waste dump sites in open pit mines", *Mining Technology*, 117, pp. 24–31, 2008, doi:10.1179/174328608x343768.
- [65] M. Hudej, S. Vujic, M. Radosavlevic, & S. Ilic, "Multi-Variable Selection of the Main Mine Shaft Location", *Journal of Mining Science*, 49, pp. 950-954, 2013.
- [66] A.W. Dawotola, P.H.A.J.M. van Gelder, & J.K. Vrijling, "Decision Analysis Framework for Risk Management of Crude Oil Pipeline System", *Hindawi Publishing Corporation Advances in Decision Sciences*, 2011, Article ID 456824, pp. 17, 2011, doi:10.1155/2011/456824.
- [67] Z. Yan, X. Wang, & Y. Yingchun Fu, "Study on Early warning model of Coal mining engineering with Fuzzy AHP", *International Symposium on Engineering Emergency Management 2011, Systems Engineering Procedia* 5, pp. 113 – 118, 2012.
- [68] J. Todorović, "Inženjerstvo održavanja tehničkih sistema", Jugoslovensko društvo za motore i vozila, Beograd, 1993.
- [69] S. Ivković, "Otkazi elemenata rudarskih mašina", Rudarsko-geološki fakultet Beograd, pp. 5-10, 15-17, 1997.
- [70] V. Vukotić, R. Tanasijević, "Revitalizacija i pouzdanost rotornog bagera ER-1250 17/1,5". *Tehnika –rudarstvo, geologija i metalurgija* 65 (1), pp. 43-48, 2014.
- [71] S. Savković, "Upravljanje životnim vekom rudarske mehanizacije na površinskim kopovima", Magistarski rad, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, pp. 31-42, 43-53, 2008.
- [[72] T. Tanasković, "Održavanje rudarskih mašina", Rudarsko-geološkifakultet, Beograd, 1998.
- [73] Reliability Analysis Center, Reliability Toolkit: *Commercial Practices Editions*, Rome Laboratory, 2000.
- [74] J. Ćosić, "Ojlerovi integrali", master rad, Matematički fakultet, Beograd, pp. 17, 2012.
- [75] P. Jovančić, "Održavanje rudarskih mašina", Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, pp. 82, 122-123, 2014.
- [76] Ž. Lazarević, "Procena integriteta i veka čelične konstrukcije velikih rudarskih mašina", doktorska disertacija, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka, pp. 13, 14, 20, 34, 35, 38, 40, 55, 58, 2023.
- [77] K. Damjanović, I. Janković, "Normative and Descriptive Theories of Decision Making under Risk, *Theoria*, 2014,4, BIBLID 0351-2274:57, pp. 25-50, 2014, doi: 10.2298/THEO1404025D.
- [78] S. Sando, "Razvoj modela kvantifikovanja rizika u inženjerskom odlučivanju", doktorska disertacija, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, pp. 16-20, 24-54, 105-107, 2016.
- [79] H.A. Simon, "Administrative behavior", New York, 1976.
- [80] J. Babić, "Subjectivity does not Necessarily Entail Arbitrariness" *Theoria*, 2021, 1, pp. 5-21, 2021, doi: 10.2298/THEO2101005B.
- [81] M. Dekić, "Sevidžova teorija odlučivanja", master rad, Univerzitet u Nišu, Matematički fakultet, Niš, pp. 17-19, 30, 2017.

- [82] A. Kostić, „Kognitivna psihologija”, Treće izdanje, Textbook Institute, Belgrade, pp. 317-368, 2014, ISBN 978-86-17-18621-8.
- [83] M. Čupić, V.M.R. Tummala, „*Modern decision making (Methods and applications)*”, Univerzitet Braća Karić, Beograd, pp. 16, 218, 1994.
- [84] H.R. Kerzner, „Project management: A System Approach to planning, scheduling, and controlling”, John Wiley & Sons, 2013.
- [85] Y.Y. Haimes, „Sustainable development: A holistic approach to natural resource management”, *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, 22(3), pp. 413-417, 1992.
- [86] P.N. Kodikara, „*Multi-objective optimal Operation of urban Water Supply Systems*”, doctoral dissertation, Faculty of Health, Engineering and Science, Victoria University, Australia, 2008.
- [87] J-Ch. Pomerol, S. Barba-Romero, „*Multi-criteria Decision Making in Business*”, Kluwer, New York, 2000.
- [88] P. Vincke, „*Multi Criteria Decision Aid*”, J. Wiley, New York, 1992.
- [89] C.L. Hwang, K. Yoon, „*Multiple Attribute Decision Making: A State of the Art Survey*”, Lecture Notes in Economic and Mathematical Systems 186, Springer – Verlag, Berlin, 1981.
- [90] C.L. Hwang, J. Lai, T.Y. Liu, „A New Approach for multiple objective Decision Making”, *Computer and Operational Research* 20, pp. 889-899, 1983.
- [91] G.R. Johanshahloo, F.H. Lotfi, A.R. Davodi, „Extension of TOPSIS for decision – making problems with interval data: Interval efficiency”, *Mathematical and Computer Modelling*, 49(5-6), pp. 1137-1142, 2009.
- [92] P.D. Liu, „Multi-attribut decision – making method”, *Technological and Economic Development of Economy*, 15(3), pp. 453-463, 2009.
- [93] S. Stojanović, „*Razvoj modela za evaluaciju internet informacionih resursa primenom metoda višekriterijumskog odlučivanja*”, doktorska disertacija, Univerzitet Džon Nezbīt, Beograd, pp. 1, 16-17, 28-33, 2016.
- [94] S.O. Hansson, „*Decision Theory. A brief Introduction*”, Department of Philosophy and the History of Technology, Royal Institute of Technology (KT-H), Stockholm, pp. 1-82, 2005.
- [95] V.R. Tummala, M. Čupić, M. „*Savremeno odlučivanje*”, Naučna knjiga, Beograd, 1991.
- [96] D. Lukić, „*Metode višekriterijumskog vrednovanja proizvoda*”, Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu, Tehnološka logistika i preduzetništvo, Novi Sad, pp. 17-26, 27-30, 2024.
- [97] T.L. Saaty, „*The Analytic Hierarchy Process*”, McGraw Hill, New York, 1980.
- [98] T.L. Saaty, „Axiomatic Foundation of the Analytic Hierarchy Process”, *Management Science*, volume 32, issue 7, pp. 841-855, 1986.
- [99] C. Cheong, L. Jie, M. Meng, L. Hui, „Design and Development of Decision Making System Using Fuzzy Hierarchy Process”, *American Journal of Applied Sciences*, 5(7), pp. 783-787, 2008.
- [100] F.A. Lootsma, „*Multi-Criteria Decision Analysis via Ratio and Difference Judgement – Applied Optimization*”, Volume 29, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht/Boston/London, 1999.
- [101] M. Doumpos, C. Zopounidis, „*Multicriteria Decision Aid Classification Methods (Applied Optimization)*”, Kluwer Academic Publisher, New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow, 2004.
- [102] C.B. Alphonse, „Application of the Analytic Hierarchy Process in agriculture in developing countries”, *Agricultural Systems*, volume 53, issue 1, pp. 97-111, 1997.

- [103] T.P. Harker, G.L. Vargas, „The Theory of Ratio Scale Estimation: Saaty's Analytical Hierarchy Process“, *Management Science*, volume 33, issue 11, pp. 1383-1403, 1987.
- [104] I. Janković, „Optimizacija koncepta životnog veka pomoćne mehanizacije na površinskim kopovima“, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, 2019.
- [105] S. Đenadić, M. Tanasijević, P. Jovančić, D. Ignjatović, D. Petrović & U. Bugarić, “Risk evaluation: Brief Review and Innovation Model Based on Fuzzy Logic and MCDM”, *Mathematics*, 10(5), pp. 811, 2022, doi: 10.3390/math10050811.
- [106] S. Đenadić, P. Jovančić, D. Ignjatović, M. Tanasijević, and F. Miletić, “Effectiveness analysis of different bucket-wheel excavators,” in *8th International Conference Mining and Environmental Protection*, Sep. 2021, pp. 239–248.
- [107] S. Đenadić, P. Jovančić, D. Ignjatović, F. Miletić, and I. Janković, “Analysis of the application of multi-criteria methods in optimizing the selection of hydraulic excavators on open-cast coal mining,” *Tehnika*, vol. 74, no. 3, pp. 369–377, 2019, doi: 10.5937/tehnika1903369D.
- [108] M. Benković, D. Keček, D. Mundar, „Matematičke osnove AHP metoda odlučivanja“, *math.e*, *Hrvatski matematički elektronski časopis*, ISSN 1334 – 6083, 2009.
- [109] K. Horvatić, „Linarna algebra II dio, Matematičke osnove AHP Metode odlučivanja“, Prirodoslovno-matematički fakultet, Matematički odjel, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, pp. 1-12, 1999.
- [110] Č. Pejdić, „Matematika za ekonomiste“, Beograd, pp. 14-16, 2004.
- [111] T. Shiraishi, M. Obata, M. Daigo, „Properties of a positive reciprocal matrix and their application to AHP“, *Journal of the Operations Research* 41, pp. 161-169, 1998.
- [112] J.P. Barns, „L'ingénierie de la Décision. Elaboration d'instruments d'aide à la Décision. La Méthode PROMETHEE. u: Nadeau R., Landry M. [ur] Aide à la Décision, Nature, Instruments et Perspectives d'Avenir“, Quebec: Press de L'Université Laval, pp. 183-213, 1982.
- [113] J.P. Barns & B. Mareschal, “Promethee V-MCDM problems with segmentatnion constraints”, *INFOR*, 30(2), pp. 85-96, 1992.
- [114] J.P. Barns & B. Mareschal, “PROMETHEE VI procedure. How to differentiate hard from soft multicriteria problems”, *Journal of Decision Systems* 4, pp. 213-223, 1995.
- [115] S. Prvulović, D. Tolmač & Đ. Nikolić, “Primena PROMETHEE II metode u dijagnostici uspešnosti proizvoda od gume”, *Tehnička dijagnostika*, 3, pp. 23-28, 2008.
- [116] Z. Pavić, V. Novoselac, „Notes of TOPSIS“, Method, *International Journal of Research in Engineering and Science*, Volume 1, Issue 2, ISSN: 2320-9364, pp. 5-12, 2013.
- [117] R. Jovanović, „Tri stanovišta po pitanju epistemološkog statusa geometrije“, *Theoria* 4 BIBILD 0351-2274:55, DOI: 10.2298/Theo1204021, originalni naučni rad, pp. 21-38, 2012.
- [118] Euklid, „Elementi“, Srpska akademija nauka i umetnosti, Beograd, pp. 3, 1957.
- [119] https://sh.wikipedia.org/wiki/Euklidska_udaljenost (Leksikon matematike, Univerzitet Rostock, Univerzitet Wuppertal, Nemačka).
- [120] E.K. Zavadaskas, E.A. Kaklauskas, Z. Turskis, J. Tamosaitiene, „Selection of the effective dwellinghouse walls by applying attributes values determined at intervals“, *Journal of Civil Engineering and Management*, 14(2), pp. 85-93, 2008.
- [121] S. Opricović, G.H. Tzeng, „Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS“, *European Journal of Operational Research* 156(2), pp. 445-455, 2004.

- [122] D. Drobnjak, „*Primeri metričkih prostora*“, maturalski rad, Matematička Gimnazija, Beograd, pp. 11-12, 2014.
- [123] S. Savković, P. Jovančić, S. Đenadić, M. Tanasijević, F. Miletić, “Development of the hybrid MCDM model for evaluating and selecting bucket wheel excavators for the modernization process”, *Expert Systems with Applications*, Vol 201, September, 1, 117199, pp. 1-11, 2022.
- [124] A. Bajcar, “Selected Aspects of the Selection of bucket and ladder excavators used in open castmining”, *Porozumienia, G`ornictwo odkrywkowe*, pp. 69-73, 2005.
- [125] M. Waroch, “Metoda wyboru pomiędzy modernizacją obecnie użytkowanych z zakupem nowych koparek wielonaczyniowych w kopalniach węgla brunatnego”, *Brown Coal, (Wegiel Brunatny, in Polish)1(50)*: pp. 21, 2005.
- [126] A.Lanke, H. Hadi & B. Ghodrati, “Mine production Index (MPI): New method to evaluateeffectiveness of mining machinery”, *International Journal of Geological and EnvironmentalEngineering*, 8, pp. 714–718, 2014.
- [127] J. Michnik, „What kinds of hybrid models are used in multiple criteria decision analysis and why?“, *Multiple Criteria Decision Making 12, International Scientific Journal*, University of Economics in Katowice, ISSN: 2084-1531, pp. 162-165, 2012.
- [128]<https://neramat.com/logika+skupovi/skupovi/>

SPISAK PRILOGA

Prilog broj 1 – Analizirani rotorni bageri sa površinskih kopova RB-a Kolubara

Prilog broj 2 – Ulazni podaci za modele višekriterijumskih metoda

Prilog broj 3 – Model AHP-TOPSIS – Proračun parametara održavanja (PO)

PRILOZI

Prilog broj 1 – Analizirani rotorni bageri sa površinskih kopova RB-a Kolubara

*Rotorni bager SRs 1200.24/4 (G-6) **RB5***



SRs 1200.24/4 (G-6) RB 5 Tehničke karakteristike

Teoretski kapacitet (m ³ /h)	3.465
Specifična rezna sila (N/cm)	600
Visina kopanja (m)	24
Dubina kopanja (m)	4
Rastojanje ose bagera od rotora u planumu (m)	34,79
Rastojanje ose bagera od ose utovarnog levka (m)	58
Prečnik rotora (m)	8,2
Broj obrtaja rotora (m ⁻¹)	6
Broj istresanja vedrica (m ⁻¹)	48
Broj vedrica	8
Nominalna zapremina vedrica (m ³)	0,8
Instalisana snaga pogona RT (kW)	400
Visina utovara (m)	7,5
Masa bagera u radu (t)	1.528
Srednji pritisak na tlo (N/cm ²)	10,3
Maksimalni dozvoljeni nagib u radu (%)	3
Maksimalni dozvoljeni nagib u transportu (%)	5
Minimalni radijus krivine (m)	60
Slobodan ugao rezanja, levi/desni (°)	40/42
Klirens (m)	2,5
Godina puštanja u rad	1.976

*Rotorni bager SRs 1200.24/4 (G-5) **RB 4***



SRs 1200.24/4 (G-5) RB 4 Tehničke karakteristike

Teoretski kapacitet (m ³ /h)	3.465
Specifična rezna sila (N/cm)	600
Visina kopanja (m)	24
Dubina kopanja (m)	4
Rastojanje ose bagera od rotora u planumu (m)	34,79
Rastojanje ose bagera od ose utovarnog levka (m)	58
Prečnik rotora (m)	8,2
Broj obrtaja rotora (m ⁻¹)	6
Broj istresanja vedrica (m ⁻¹)	48
Broj vedrica	8
Nominalna zapremina vedrica (m ³)	0,8
Instalisana snaga pogona RT (kW)	400
Visina utovara (m)	7,5
Masa bagera u radu (t)	1.528
Srednji pritisak na tlo (N/cm ²)	10,3
Maksimalni dozvoljeni nagib u radu (%)	3
Maksimalni dozvoljeni nagib u transportu (%)	5
Minimalni radijus krivine (m)	60
Slobodan ugao rezanja, levi/desni (°)	40/42
Klirens (m)	2,5
Godina puštanja u rad	1.976

Rotorni bager SRs 1200.22/2 (G-1) **RB1**



SRs 1200.22/2 (G-1) RB 1 Tehničke karakteristike

Teoretski kapacitet (m ³ /h)	3.465
Specifična rezna sila (N/cm)	1.100
Visina kopanja (m)	22
Dubina kopanja (m)	2
Rastojanje ose bagera od rotora u planumu (m)	29,75
Rastojanje ose bagera od ose utovarnog levka (m)	58
Prečnik rotora (m)	8,2
Broj obrtaja rotora (m ⁻¹)	6
Broj istresanja vedrica (m ⁻¹)	48
Broj vedrica	8
Nominalna zapremina vedrica (m ³)	0,8
Instalisana snaga pogona RT (kW)	630
Visina utovara (m)	7,5
Masa bagera u radu (t)	1.432
Srednji pritisak na tlo (N/cm ²)	9,65
Maksimalni dozvoljeni nagib u radu (%)	3
Maksimalni dozvoljeni nagib u transportu (%)	5
Minimalni radijus krivine (m)	60
Slobodan ugao rezanja, levi/desni (°)	40/42
Klirens (m)	2,5
Godina puštanja u rad	1.967

*Rotorni bager SRs 1200.24/4 (G-4) **RB 3***



SRs 1200.24/4 (G-4) RB 3 Tehničke karakteristike

Teoretski kapacitet (m ³ /h)	3.465
Specifična rezna sila (N/cm)	600
Visina kopanja (m)	24
Dubina kopanja (m)	4
Rastojanje ose bagera od rotora u planumu (m)	34,79
Rastojanje ose bagera od ose utovarnog levka (m)	58
Prečnik rotora (m)	8,2
Broj obrtaja rotora (m ⁻¹)	6
Broj istresanja vedrica (m ⁻¹)	48
Broj vedrica	8
Nominalna zapremina vedrica (m ³)	0,8
Instalisana snaga pogona RT (kW)	400
Visina utovara (m)	7,5
Masa bagera u radu (t)	1.528
Srednji pritisak na tlo (N/cm ²)	10,3
Maksimalni dozvoljeni nagib u radu (%)	3
Maksimalni dozvoljeni nagib u transportu (%)	5
Minimalni radijus krivine (m)	60
Slobodan ugao rezanja, levi/desni (°)	40/42
Klirens (m)	2,5
Godina puštanja u rad	1.975

*Rotorni bager SRs 1200.24/4 (G-3) **RB 2***



SRs 1200.24/4 (G-3) RB 2 Tehničke karakteristike

Teoretski kapacitet (m ³ /h)	3.465
Specifična rezna sila (N/cm)	600
Visina kopanja (m)	24
Dubina kopanja (m)	4
Rastojanje ose bagera od rotora u planumu (m)	34,79
Rastojanje ose bagera od ose utovarnog levka (m)	58
Prečnik rotora (m)	8,2
Broj obrtaja rotora (m ⁻¹)	6
Broj istresanja vedrica (m ⁻¹)	48
Broj vedrica	8
Nominalna zapremina vedrica (m ³)	0,8
Instalisana snaga pogona RT (kW)	400
Visina utovara (m)	7,5
Masa bagera u radu (t)	1.528
Srednji pritisak na tlo (N/cm ²)	10,3
Maksimalni dozvoljeni nagib u radu (%)	3
Maksimalni dozvoljeni nagib u transportu (%)	5
Minimalni radijus krivine (m)	60
Slobodan ugao rezanja, levi/desni (°)	40/42
Klirens (m)	2,5
Godina puštanja u rad	1.969

Rotorni bager SRs 1300.26/5 (G-8) **RB 7**



SRs 1300.26/5 (G-8) RB 7 Tehničke karakteristike

Teoretski kapacitet (m ³ /h)	4.500/5.100
Specifična rezna sila (N/cm)	1060/960
Visina kopanja (m)	26
Dubina kopanja (m)	5
Rastojanje ose bagera od rotora u planumu (m)	36
Rastojanje ose bagera od ose utovarnog levka (m)	93,1
Prečnik rotora (m)	9
Broj obrtaja rotora (m ⁻¹)	5,85/7,1
Broj istresanja vedrica (m ⁻¹)	134,7/164
Broj vedrica	23
Nominalna zapremina vedrica (m ³)	0,4
Instalisana snaga pogona RT (kW)	900
Visina utovara (m)	7,5
Masa bagera u radu (t)	2.303
Srednji pritisak na tlo (N/cm ²)	11
Maksimalni dozvoljeni nagib u radu (%)	3
Maksimalni dozvoljeni nagib u transportu (%)	5
Minimalni radijus krivine (m)	60
Slobodan ugao rezanja, levi/desni (°)	46,5/42
Klirens (m)	4,2
Godina puštanja u rad	1.987

*Rotorni bager SchRs 630.25/6 (G-7) **RB 6***



SchRs 630.25/6 (G-7) RB 6 Tehničke karakteristike

Teoretski kapacitet (m ³ /h)	4.100/6.100
Specifična rezna sila (N/cm)	900
Visina kopanja (m)	25
Dubina kopanja (m)	6
Rastojanje ose bagera od rotora u planumu (m)	35,1
Rastojanje ose bagera od ose utovarnog levka (m)	37
Prečnik rotora (m)	10
Broj obrtaja rotora (m ⁻¹)	5,4/8,1
Broj istresanja vedrica (m ⁻¹)	108/162
Broj vedrica	20
Nominalna zapremina vedrica (m ³)	0,63
Instalisana snaga pogona RT (kW)	2*375
Visina utovara (m)	18
Masa bagera u radu (t)	1.499
Srednji pritisak na tlo (N/cm ²)	12
Maksimalni dozvoljeni nagib u radu (%)	5
Maksimalni dozvoljeni nagib u transportu (%)	10
Minimalni radijus krivine (m)	50
Slobodan ugao rezanja, levi/desni (°)	38/41,5
Klirens (m)	4
Godina puštanja u rad	1.977

*Rotorni bager SchRs 630.25/6 (G-2) **RB8***



SchRs 630.25/6 (G-2) RB 8 Tehničke karakteristike

Teoretski kapacitet (m ³ /h)	4.100/6.100
Specifična rezna sila (N/cm)	900
Visina kopanja (m)	25
Dubina kopanja (m)	6
Rastojanje ose bagera od rotora u planumu (m)	35,1
Rastojanje ose bagera od ose utovarnog levka (m)	37
Prečnik rotora (m)	10
Broj obrtaja rotora (m ⁻¹)	5,4/8,1
Broj istresanja vedrica (m ⁻¹)	108/162
Broj vedrica	20
Nominalna zapremina vedrica (m ³)	0,63
Instalisana snaga pogona RT (kW)	2*375
Visina utovara (m)	18
Masa bagera u radu (t)	1.499
Srednji pritisak na tlo (N/cm ²)	12
Maksimalni dozvoljeni nagib u radu (%)	5
Maksimalni dozvoljeni nagib u transportu (%)	10
Minimalni radijus krivine (m)	50
Slobodan ugao rezanja, levi/desni (°)	38/41,5
Klirens (m)	4
Godina puštanja u rad	1.980

Rotorni bager SchRs 900.26/5 (G-1) **RB 9**



SchRs 900.26/5 (G-1) RB 9 Tehničke karakteristike

Teoretski kapacitet (m ³ /h)	4.100
Specifična rezna sila (N/cm)	870
Visina kopanja (m)	25
Dubina kopanja (m)	6
Rastojanje ose bagera od rotora u planumu (m)	35,1
Rastojanje ose bagera od ose utovarnog levka (m)	37
Prečnik rotora (m)	10
Broj obrtaja rotora (m ⁻¹)	5,42
Broj istresanja vedrica (m ⁻¹)	76
Broj vedrica	14
Nominalna zapremina vedrica (m ³)	0,9
Instalisana snaga pogona RT (kW)	2*375
Visina utovara (m)	18
Masa bagera u radu (t)	1.491
Srednji pritisak na tlo (N/cm ²)	11,9
Maksimalni dozvoljeni nagib u radu (%)	5
Maksimalni dozvoljeni nagib u transportu (%)	10
Minimalni radijus krivine (m)	50
Slobodan ugao rezanja, levi/desni (°)	38/41,5
Klirens (m)	4
Godina puštanja u rad	1.978

Prilog broj 2 – Ulazni podaci za modele višekriterijumskih metoda

SchRs 630.25/6 (G7) RB 6

Godina	Proizvodnja ugalj	Efektivna vrednost ugalj	Vremensko iskorištenje ugalj	Kapacitetno iskorištenje ugalj	Vreme rada
2008	7.099.854	4.285	0,49	0,47	4.285
2009	5.843.466	3.665	0,42	0,45	3.665
2010	5.934.700	3.720	0,42	0,45	3.720
2011	5.268.458	3.338	0,38	0,45	3.338
2012	4.561.093	3.826	0,44	0,34	3.826
2013	5.065.776	4.221	0,48	0,34	4.221
2014	4.967.005	3.657	0,42	0,39	3.657
2015	6.489.929	4.211	0,48	0,44	4.211
2016	6.301.171	4.578	0,52	0,38	4.578
2017	6.001.015	4.150	0,52	0,42	4.462
2018	6.010.101	4.804	0,55	0,35	4.804

Godina	Ukupni zastoji	Mašinski zastoji	Elektro zastoji	Vulkanizerski zastoji	Servisi
2008	4.499	219	144	72	228
2009	5.095	208	168	32	266
2010	5.040	121	85	36	226
2011	5.422	160	62	26	184
2012	4.958	276	190	19	188
2013	4.539	281	139	58	181
2014	5.103	511	164	90	230
2015	4.549	291	173	58	209
2016	4.206	327	196	208	202
2017	4.298	385	135	186	199
2018	3.956	305	180	128	127

SRs 1300.26/5 (G8) RB 7

Godina	Proizvodnja ugalj	Efektivna vrednost ugalj	Vremensko iskorištenje ugalj	Kapacitetno iskorištenje ugalj	Vreme rada
2008	6.874.745	3.954	0,45	0,45	3.954
2009	6.807.887	3.878	0,44	0,45	3.878
2010	3.430.054	2.168	0,25	0,41	2.168
2011	3.102.156	2.481	0,28	0,32	2.481
2012	2.279.833	2.466	0,28	0,24	2.466
2013	3.577.695	3.329	0,38	0,28	3.329
2014	5.647.800	4.058	0,46	0,36	4.058
2015	1.696.915	1.337	0,31	0,33	1.898
2016	4.088.973	3.878	0,44	0,32	3.878
2017	2.738.158	2.797	0,32	0,26	2.797
2018	2.772.328	3.595	0,41	0,2	3.595

Godina	Ukupni zastoji	Mašinski zastoji	Elektro zastoji	Vulkanizerski zastoji	Servisi
2008	4.882	168	205	41	174
2009	6.592	163	169	107	216
2010	6.279	136	138	119	237
2011	6.318	150	194	100	166
2012	5.431	208	153	139	217
2013	4.702	272	182	64	203
2014	6.838	190	124	482	108
2015	4.906	271	115	190	164
2016	5.963	156	115	142	90
2017	5.165	266	126	114	141
2018	4.882	168	205	41	174

*G7 i G8 su interne oznake, dok su RB 6 i RB 7 oznake korištene za modele nastale na osnovu višekriterijumskih metoda odlučivanja

Metodologija izbora kapitalnih rudarskih mašina za procese revitalizacije i modernizacije

SchRs 630.25/6 (G2) RB 8

Godina	Proizvodnja ugalj	Efektivna vrednost ugalj	Vremensko iskorištenje ugalj	Kapacitetno iskorištenje ugalj	Vreme rada
2008	5.029.341	2.990	0,34	0,48	2.990
2009	4.860.991	2.609	0,3	0,53	1.840
2010	4.842.099	3.767	0,43	0,36	769
2011	4.777.145	3.483	0,4	0,39	3.767
2012	5.312.594	3.646	0,42	0,41	3.483
2013	4.431.167	3.135	0,36	0,4	3.646
2014	5.082.308	3.470	0,4	0,42	3.135
2015	3.673.013	2.886	0,46	0,36	3.470
2016	1.448.974	1.830	0,36	0,22	2.886
2017	0	0	0	0	0
2018	0	0	0	0	0

Godina	Ukupni zastoji	Mašinski zastoji	Elektro zastoji	Vulkanizerski zastoji	Servisi
2008	5.794	204	120	9	184
2009	5.336	136	83	45	154
2010	815	77	80	0	41
2011	4.993	304	172	65	189
2012	5.277	105	76	23	191
2013	5.137	152	142	62	188
2014	5.625	200	85	84	194
2015	5.290	253	141	22	69
2016	3.381	183	102	20	44
2017	0	0	0	0	0
2018	0	0	0	0	0

SchRs 900.25/6 (G1) RB 9

Godina	Proizvodnja ugalj	Efektivna vrednost ugalj	Vremensko iskorištenje ugalj	Kapacitetno iskorištenje ugalj	Vreme rada
2008	5.631.414	4.038	0,61	0,44	4.038
2009	5.246.817	3.904	0,47	0,43	3.904
2010	2.240.318	1.989	0,23	0,36	1.989
2011	3.057.681	2.742	0,31	0,35	2.742
2012	4.622.581	3.036	0,35	0,48	3.036
2013	4.104.310	3.262	0,39	0,4	954
2014	1.368.906	1.528	0,18	0,28	2.308
2015	1.680.376	1.645	0,19	0,32	1.907
2016	5.226.926	5.111	0,51	0,35	1.645
2017	6.094.739	4.645	0,53	0,42	5.111
2018	0	0	0	0	0

Godina	Ukupni zastoji	Mašinski zastoji	Elektro zastoji	Vulkanizerski zastoji	Servisi
2008	2.537	527	204	37	38
2009	4.440	280	185	67	75
2010	6.771	175	126	22	21
2011	6.018	411	232	115	27
2012	5.747	318	234	33	59
2013	2.669	199	59	10	4
2014	2.448	284	239	39	64
2015	6.852	150	61	0	47
2016	7.114	309	266	79	0
2017	4.100	941	299	103	19
2018	0	0	0	0	0

*G2 i G1 su interne oznake, dok su RB 8 i RB 9 oznake korištene za modele nastale na osnovu višekriterijumskih metoda odlučivanja

Metodologija izbora kapitalnih rudarskih mašina za procese revitalizacije i modernizacije

Odabrana grupa bagera sa površinskih kopova RB-a Kolubara za analizu

Rotorni bager	Interna oznaka Oznaka u modelu	Ukupna proizvodnja od momenta puštanja u rad	Ukupno vreme rada od momenta puštanja u rad	Proizvodnja za 11 godina rada	Vreme rada u periodu od 11 godina
SRs 1200.22	(G1) RB 1	196.671.803	82.617	34.695.818	26.815
SRs 1200.24	(G3) RB 2	266.916.827	95.997	42.316.093	36.783
SRs 1200.24	(G4) RB 3	252.334.917	108.808	44.122.403	46.780
SRs 1200.24	(G5) RB 4	22.4340.426	103.949	33.930.887	39.253
SRs 1200.24	(G6) RB 5	225.048.326	103.518	34.834.802	38.461
SRs 1300.26	(G8) RB 6	138.893.502	87.229	43.673.667	34.502
SchRs 630.25	(G7) RB 7	178.305.752	95.987	27.971.704	44.767
SchRs 630.25	(G2) RB 8	189.068.639	71.921	39.457.632	27.816
SchRs 900.25	(G1) RB 9	179.196.315	86.132	39.937.214	32.798

Rotorni bager	Interna oznaka Oznaka u modelu	Ukupni zastoji od momenta puštanja u rad	Zastoji u periodu od 11 godina	Koeficijent vremenskog iskorištenja od momenta puštanja u rad	Koeficijent vremenskog iskorištenja za 11 godina rada
SRs 1200.22	(G1) RB 1	103.239	37.106	0,35667	0,22416
SRs 1200.24	(G3) RB 2	105.165	42.656	0,51320	0,46182
SRs 1200.24	(G4) RB 3	108.649	39.179	0,51000	0,49181
SRs 1200.24	(G5) RB 4	106.854	40.042	0,49883	0,42727
SRs 1200.24	(G6) RB 5	106.240	40.426	0,49279	0,42727
SRs 1300.26	(G8) RB 6	131.811	61.906	0,41719	0,37727
SchRs 630.25	(G7) RB 7	113.293	51.665	0,42785	0,50454
SchRs 630.25	(G2) RB 8	123.642	44.963	0,49098	0,49273
SchRs 900.25	(G1) RB 9	119.344	52.908	0,36051	0,31545

Rotorni bager	Interna oznaka Oznaka u modelu	Koeficijent kapacitetnog iskorištenja od momenta puštanja u rad	Koeficijent kapacitetnog iskorištenja za 11 godina rada	Mehanički-elektro- -vulkanizerski zastoji	Raspoloživost
SRs 1200.22	(G1) RB 1	0,44637	0,37181	8.737	0,7354
SRs 1200.24	(G3) RB 2	0,47800	0,39818	9.868	0,7580
SRs 1200.24	(G4) RB 3	0,46614	0,32182	11.813	0,7776
SRs 1200.24	(G5) RB 4	0,42744	0,27364	13.376	0,7274
SRs 1200.24	(G6) RB 5	0,43093	0,28909	6.545	0,8382
SRs 1300.26	(G8) RB 6	0,37688	0,36000	5.656	0,8513
SchRs 630.25	(G7) RB 7	0,39690	0,43273	5.485	0,8220
SchRs 630.25	(G2) RB 8	0,45731	0,38636	3.328	0,8566
SchRs 900.25	(G1) RB 9	0,37641	0,32455	6.958	0,8151

Prilog broj 3 – Model AHP-TOPSIS – Proračun parametara održavanja (PO)

U modelu AHP-TOPSIS kao treća grupa parametara, razmatrana je grupa parametara održavanja. U prvoj interakciji se koristi AHP metoda za definisanje međusobnog odnosa podkriterijuma gde se formira matrica. Matrica prikazuje međusobni odnos 5 podkriterijuma. Vrednosti težina podkriterijuma dobijaju se rešavanjem matrice.

Parametri podkriterijuma PO u odnosu na razmatrane alternative

Rotorni bageri	PO1– Mehaničko- elektro– vulkanizerski zastoji	PO2–Prosečni mehaničko- elektro- vulkanizerski zastoji	PO3-Trend mehaničko- elektro- vulkanizerskih zastoja	PO4-Tehnička raspoloživost	PO5-Trend tehničke raspoloživosti
RB 1	8.737	794	7.14.8	0,73540	0,66186
RB 2	9.868	897	8.96.9	0,75802	0,68222
RB 3	11.813	1.074	11.81.3	0,77763	0,69987
RB 4	13.376	1.216	13.37.6	0,72745	0,65471
RB 5	6.545	595	6.54.5	0,83825	0,75443
RB 6	5.656	514	5.65.6	0,85139	0,76625
RB 7	5.485	499	5.48.5	0,82200	0,82200
RB 8	3.328	303	2.72.3	0,85664	0,77098
RB 9	6.958	635	6.98.5	0,81516	0,81516

$$M_{PO} = \begin{bmatrix} 1,00 & 0,50 & 2,00 & 0,50 & 1,00 \\ 2,00 & 1,00 & 3,00 & 1,00 & 2,00 \\ 0,50 & 0,33 & 1,00 & 0,33 & 0,50 \\ 2,00 & 1,00 & 3,00 & 1,00 & 2,00 \\ 1,00 & 0,50 & 2,00 & 0,50 & 1,00 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1,00 & 0,50 & 2,00 & 0,50 & 1,00 \\ 2,00 & 1,00 & 3,00 & 1,00 & 2,00 \\ 0,50 & 0,33 & 1,00 & 0,33 & 0,50 \\ 2,00 & 1,00 & 3,00 & 1,00 & 2,00 \\ 1,00 & 0,50 & 2,00 & 0,50 & 1,00 \end{bmatrix}$$

$$M_{PO} = \begin{bmatrix} 5,00 & 2,67 & 9,00 & 2,67 & 5,00 \\ 9,50 & 5,00 & 17,00 & 5,00 & 9,50 \\ 2,83 & 1,50 & 5,00 & 1,50 & 2,83 \\ 9,50 & 5,00 & 17,00 & 5,00 & 9,50 \\ 5,00 & 2,67 & 9,00 & 2,67 & 5,00 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 24,33 \\ 46,00 \\ 13,67 \\ 46,00 \\ 24,33 \end{bmatrix}$$

$$W_j = 24,33 + 46,00 + 13,67 + 46,00 + 24,33 = 154,33$$

$$W_{PO1} = \frac{24,33}{154,33} = 0,158$$

$$W_{PO2} = \frac{46,00}{154,33} = 0,298$$

$$W_{PO3} = \frac{13,67}{154,33} = 0,089$$

$$W_{PO4} = \frac{46,00}{154,33} = 0,298$$

$$W_{PO5} = \frac{24,33}{154,33} = 0,158$$

Potrebno je da se izračunaju sledeće vrednosti: $\lambda_{\max}$ najveća svojstvena vrednost matrice upoređivanja, ponderisana srednja vrednost koeficijenta λ_i i indeks konzistencije CI . Na osnovu ovih vrednosti se računa stepen konzistencije CR . Stepen konzistencije se računa na osnovu vrednosti slučajnog indeksa RI , na osnovu tabele. U proračunu su primenjene formule (4.5) do (4.8), glava 4 za AHP metodu.

$$\lambda_1 = \frac{(1,0 \cdot 0,58) + (0,5 \cdot 0,298) + (2,0 \cdot 0,089) + (0,5 \cdot 0,298) + (1,0 \cdot 0,158)}{0,158}$$

$$\lambda_1 = 5,01370$$

$$\lambda_2 = \frac{(2,0 \cdot 0,58) + (1,0 \cdot 0,298) + (3,0 \cdot 0,089) + (1,0 \cdot 0,298) + (2,0 \cdot 0,158)}{0,158}$$

$$\lambda_2 = 5,00725$$

$$\lambda_3 = \frac{(0,5 \cdot 0,58) + (0,33 \cdot 0,298) + (1,0 \cdot 0,089) + (0,33 \cdot 0,298) + (0,5 \cdot 0,158)}{0,158}$$

$$\lambda_3 = 5,02439$$

$$\lambda_4 = \frac{(2,0 \cdot 0,58) + (1,0 \cdot 0,298) + (3,0 \cdot 0,089) + (1,0 \cdot 0,298) + (2,0 \cdot 0,158)}{0,158}$$

$$\lambda_4 = 5,00725$$

$$\lambda_5 = \frac{(1,0 \cdot 0,58) + (0,5 \cdot 0,298) + (2,0 \cdot 0,089) + (0,5 \cdot 0,298) + (1,0 \cdot 0,158)}{0,158}$$

$$\lambda_5 = 5,01370$$

$$\lambda_{max} = \frac{(5,01370 + 5,00725 + 5,02439 + 5,00725 + 5,01370)}{5} = 5,01326$$

$$CI = \frac{(5,01326 - 5)}{5 - 1} = 0,00332$$

$$CR = \frac{0,00332}{1,11} = 0,00298$$

U drugom delu je primenjena TOPSIS metoda za rangiranje alternativa. U sledećim tabelama su prikazane ulazne vrednosti alternativa – rotornih bagera RB 1 do RB 9 u odnosu na podkriterijume PO1 – PO5 i normalizovane vrednosti prethodne tabele. U proračunu su primenjene formule (4.47) do (4.54) glava 4, za TOPSIS metodu redom.

Matrica odlučivanja za parametre održavanja

Podkriterijumi	PO1	PO2	PO3	PO4	PO5
Preferencije	Min	Min	Min	Max	Max
RB 1	8.737	794	7.14.8	0,73540	0,66186
RB 2	9.868	897	8.96.9	0,75802	0,68222
RB 3	11.813	1.074	11.81.3	0,77763	0,69987
RB 4	13.376	1.216	13.37.6	0,72745	0,65471
RB 5	6.545	595	6.54.5	0,83825	0,75443
RB 6	5.656	514	5.65.6	0,85139	0,76625
RB 7	5.485	499	5.48.5	0,82200	0,82200
RB 8	3.328	303	2.72.3	0,85664	0,77098
RB 9	6.958	635	6.98.5	0,81516	0,81516

Na normalizovane vrednosti su primenjene vrednosti dobijene AHP metodom, kojima se normalizovane vrednosti ponderišu. Izračunate su vrednosti idealnog i anti-idealnog rešenja i udaljenosti vrednosti alternativa za razmatrane podkriterijume od idealnih i anti-idealnih rešenja.

Metodologija izbora kapitalnih rudarskih mašina za procese revitalizacije i modernizacije

Konačne vrednosti i rang alternativa su dati na kraju. Kao kriterijum izbora kod parametara održavanja koji se odnose na zastoje PO1, PO2 i PO3, usvojen je kriterijum minimuma, a kod parametara raspoloživosti PO4 i PO5 kriterijum maksimuma.

Normalizovana matrica odlučivanja za parametre održavanja

	PO1	PO2	PO3	PO4	PO5
RB 1	0,3409721	0,3407558	0,2891490	0,3066609	0,2986072
RB 2	0,3851108	0,3849596	0,3628116	0,3160934	0,3077929
RB 3	0,4610168	0,4609216	0,4778564	0,3242707	0,3157559
RB 4	0,5220148	0,5218628	0,5410825	0,3033457	0,2953814
RB 5	0,2554266	0,2553523	0,2647566	0,3495492	0,3403714
RB 6	0,2207323	0,2205900	0,2287950	0,3550286	0,3457042
RB 7	0,2140588	0,2141526	0,2218778	0,3427730	0,3708566
RB 8	0,1298793	0,1300365	0,1101501	0,3572178	0,3478382
RB 9	0,2715445	0,2725188	0,2825554	0,3399207	0,3677706

Ponderisana normalizovana matrica za parametre održavanja

	PO1	PO2	PO3	PO4	PO5
RB 1	0,0537602	0,1015644	0,0256050	0,0914022	0,0470806
RB 2	0,0607194	0,1147396	0,0321280	0,0942136	0,0485289
RB 3	0,0726873	0,1373805	0,0423156	0,0966509	0,0497844
RB 4	0,0823047	0,1555444	0,0479144	0,0904141	0,0465720
RB 5	0,0402725	0,0761093	0,0234450	0,1041853	0,0536655
RB 6	0,0348023	0,0657482	0,0202605	0,1058185	0,0545063
RB 7	0,0337501	0,0638295	0,0196479	0,1021656	0,0584720
RB 8	0,0204777	0,0387582	0,0097541	0,1064710	0,0548427
RB 9	0,0428137	0,0812259	0,0250211	0,1013155	0,0579854

Idealno i anti-idealno rešenje

	PO1	PO2	PO3	PO4	PO5
A ⁺	0,0204777	0,0387582	0,0097541	0,1064710	0,0584720
A ⁻	0,0823047	0,1555444	0,0479144	0,0904141	0,0465720

Udaljenost alternativa od idealnog i anti-idealnog rešenja

	Si ⁺	Si ⁻
RB 1	0,07524	0,06502
RB 2	0,09023	0,04897
RB 3	0,11698	0,02243
RB 4	0,13899	0,00000
RB 5	0,04475	0,09442
RB 6	0,03256	0,10670
RB 7	0,03035	0,10885
RB 8	0,00363	0,13872
RB 9	0,05062	0,08863

Poslednja se računa relativna bliskost idealnom rešenju C_i . Rang vrednosti C_i sortiranih u opadajući niz odgovara rangu alternativa A_i od najbolje do najgore.

Metodologija izbora kapitalnih rudarskih mašina za procese revitalizacije i modernizacije

Rangiranje alternativa u odnosu na parametre održavanja

Rotorni bageri	C_i	Rang
RB 1	0,46358	6
RB 2	0,35180	7
RB 3	0,16088	8
RB 4	0,00000	9
RB 5	0,67845	4
RB 6	0,76619	3
RB 7	0,78196	2
RB 8	0,97451	1
RB 9	0,63650	5

BIOGRAFIJA

Snežana Savković, magistar tehničkih nauka u rudarstvu, rođena je u Sankoviću, Mionica 13.01.1966. godine. Gimnaziju Meša Selimović – matematički smer, završila je u Tuzli, gde je studirala Rudarsko-geološki fakultet – opšti smer i položila sve ispite. Zbog građanskog rata diplomirala na Rudarsko-metalurškom fakultetu u Kosovskoj Mitrovici.

Doktorske akademske studije na Rudarsko-geološkom fakultetu u Beogradu, na studijskom programu Rudarsko inženjerstvo upisala 2002. godine. Magistrirala na istom fakultetu, na smeru Transport i izvoz u rudarstvu 2008. godine. Studirala Prirodno-matematički fakultet u Beogradu.

U toku svog radnog veka radila na Tehnološkom fakultetu u Zvorniku, Tehnološkom fakultetu u Banjaluci, Rudarski odsjek Prijedor, i u osnovnoj školi u Beogradu. Na Univerzitetu je predavala Nacrtnu geometriju, Procese površinske eksploatacije i Tehnologiju i mehanizaciju na površinskim kopovima. U osnovnoj školi je predavala Matematiku.

Učestvovala u pisanju i priređivanju jedne od najstarijih knjiga iz oblasti rudarstva, “De re metallica”, Georgiusa Agricole. Saradnja sa profesorima dr Nemanjom Popovićem i dr Mladenom Stjepanovićem dugi niz godina na pisanju knjiga. Autor brojnih naučnih radova, prezentovanih na konferencijama i u časopisima. Objavila je 28 naučnih radova. Još od osnovnih studija učestvovala u brojnim projektima i studijama.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Снежана Савковић

Број индекса Р701/22

Изјављујем

да једокторска дисертација под насловом

Методологија избора капиталних рударских машина за процесе ревитализације и модернизације

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

Потпис аутора

У Београду, _____

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Снежана Савковић

Број индекса P701/2022

Студијски програм Рударско инжењерство

Наслов рада Методологија избора капиталних рударских машина за процесе ревитализације и модернизације

Ментор др Драган Игњатовић, редовни професор

др Стеван Ђенадић, доцент

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

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

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

Потпис аутора

У Београду, _____

Изјава о коришћењу

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

Методологија избора капиталних рударских машина за процесе ревитализације и модернизације

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 јесаставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, _____
