

UNIVERZITET U BEOGRADU
RUDARSKO-GEOLOŠKI FAKULTET

Stevan P. Đenadić

**RAZVOJ SINTEZNOG MODELA UPRAVLJANJA
RIZIKOM KOD ROTORNIH BAGERA**

Doktorska disertacija

Beograd, 2022.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MINING AND GEOLOGY

Stevan P. Đenadić

**DEVELOPMENT OF A SYNTHESIS RISK
MANAGEMENT MODEL FOR BUCKET-WHEEL
EXCAVATORS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2022

KOMISIJA

Mentori:

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

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

Članovi komisije:

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

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

dr Vladimir Milisavljević, vanredni profesor
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet
Uža naučna oblast: Mehanizacija u rudarstvu i energetici

Datum odbrane: _____

RAZVOJ SINTEZNOG MODELA UPRAVLJANJA RIZIKOM KOD ROTORNIH BAGERA

Sažetak

Procena rizika tehničkih sistema predstavlja neizostavni segment upotrebnog kvaliteta i upravljanja imovinom. Neželjeni događaji sa rizikom od velikih posledica su havarije i zastoji. Havarije bagera mogu da ugroze živote i zdravlje ljudi i stvore ekonomske posledice. Otkazi elemenata stvaraju dugotrajne zastoje odnosno gubitak planirane proizvodnje.

U postojećim metodama za ocenu rizika prisutno je više nedostataka, koji su koncentrisani u postavkama jednakosti elemenata rizika i načinu kalkulacije rizika. Pored toga, predvidljivost rezultata je izražena, a preciznost modela nije razmatrana. Dizajn modela koji se prezentuje u disertaciji, usmeren je ka smanjenju uticaja nedostataka na analize rizika.

Inovativni model bazira se na fazi logici i ekspertnim sistemima gde su implementirane dve višekriterijumske metode. Fazi ekspertni sistemi kao domen veštačke inteligencije, su optimalni za analize fenomena gde dominira neodređenost, višeznačnost, neizvesnost i subjektivnost. Algoritamska struktura modela treba da umanjí uticaj subjektivnosti, doprinese vrednovanju parcijalnih indikatora u odnosu na okolnosti, ukloni predvidljivost ishoda, poveća preciznost rezultata i unapredi sisteme održavanja.

Univerzalnost fazi ekspertskog modela ogleda se kroz mogućnost korišćenja različitih tipova podataka: lingvističkih, numeričkih ili funkcija. Ulazne veličine se mapiraju na fazi skupove. Metoda AHP je primenjena za definisanje koeficijenata značajnosti parcijalnih indikatora. TOPSIS metoda koristi se u propoziciji modela kao deo fazi zaključivanja. Rezultati modela iskazan su kao procentualni odnos intenziteta rizika uz lingvistički opis. Koncizan oblik krajnjeg rezultata daje jednu numeričku vrednost u odnosu na različite skale. Primenom programskog jezika *Python* i softverskog okvira *Streamlit*, model je dizajniran u aplikativnoj i vizuelnoj formi.

Prezentovani model je verifikovan na rotornom bageru SRs2000. Analizirane su dve forme rizika: po strukturnu stabilnost mašine i po prekid proizvodnog procesa. Rezultati prvog modela su prikazani kao rang slabih mesta bagera sa preporukama aktivnosti održavanja. Rezultati drugog model definišu trenutno stanje čitavog bagera. U obe forme rizika modela disperzija je manja u odnosu na najčešće korišćene modela. Ostvareni doprinosi su i smanjenje subjektivnosti i predvidljivosti ishoda, pomeranje težišta u skladu sa okolnostima analize.

Ključne reči: rudarstvo, rizik, rotorni bager, fazi logika, održavanje prema riziku.

Naučna oblast: Rudarsko inženjerstvo

Uža naučna oblast: Mehanizacija u rudarstvu i energetici

UDK broj: 621.879.3:622.23.05:004.413.4(043.3)

DEVELOPMENT OF A SYNTHESIS RISK MANAGEMENT MODEL FOR BUCKET-WHEEL EXCAVATORS

Abstract

Risk assessment of technical systems is an indispensable part of the quality of service and asset management. Adverse events with the risk of major consequences are breakdowns and downtime. Excavator breakdowns can endanger people's lives and health and have great economic consequences. Failures of excavator elements cause long-term downtime i.e. a loss from the planned production.

There are several shortcomings in the existing methods used for risk assessment. They are concentrated in the settings of the equality of risk elements and the method of risk calculation. In addition, the predictability of results is pronounced, whereas the accuracy of the model has not been considered. The design of the synthetic model presented in the dissertation is aimed at reducing the impact of the shortcomings on risk analyses.

The innovative model is based on fuzzy logic and expert systems where two multi-criteria methods are implemented. Fuzzy expert systems, as a domain of artificial intelligence, are optimal for the analyses of the phenomena in which uncertainty, ambiguity, and subjectivity dominate. The algorithmic structure of the model should reduce the impact of subjectivity, contribute to the aggravation of partial indicators in relation to the circumstances, remove predictability of outcomes, increase the accuracy of results, and improve the existing maintenance systems.

The universality of the fuzzy expert model is reflected in the possibility of using different types of data: linguistic, numerical, or functions. The input values are mapped to fuzzy sets. The AHP method has been applied to define the weight coefficients of partial indicators in risk. The TOPSIS method is used in the model composition as part of the fuzzy screening. The results of the model are expressed as a percentage of risk intensity with a linguistic description. The concise shape of the final result is defined through a single numerical value concerning different scales. By applying the *Python* programming language and the *Streamlit* framework, the model is designed in the application and visual form.

The presented model was verified on a bucket-wheel excavator with the label SRs2000. Two forms of risk were analysed: risk of the machine structural stability and risk of the production process interruption. The results of the first model are presented through the ranking of excavator weak points with recommendations for maintenance activities. The results of the second model define the current state of the entire excavator. In both forms of risk, the model proved to be more precise (less dispersion) than the most used other models. The achieved contributions are also the reduction of subjectivity and predictability of outcomes, shifting the model center of gravity according to the analysis circumstances.

Keywords: mining, risk, bucket-wheel excavator, fuzzy logic, risk-based maintenance.

Scientific field: Mining engineering

Scientific subfield: Mechanization in mining and energy

UDC: 621.879.3:622.23.05:004.413.4(043.3)

Sadržaj:

1. UVOD.....	1
1.1 Predmet i cilj istraživanja.....	3
1.2 Naučne hipoteze istraživanja.....	4
1.3 Struktura disertacije sa kratkim pregledom poglavlja.....	5
2. ANALIZA DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA	6
2.1 Analiza konstruktivnih i strukturnih problema rotornih bagera.....	6
2.2 Analiza primenjenih osnovnih metoda procena rizika kod rudarske mehanizacije	8
2.3 Analiza hibridnih modifikacija metoda procene rizika i metoda predikcije	9
2.4 Analiza koncepta upravljanja životnim vekom i održavanje prema riziku	12
3. PREDMET ANALIZE	15
3.1 Rizik kao segment upravljanja imovinom.....	15
3.1.1 Osnovne metode procene rizika.....	16
3.2 Upotrebnost kvaliteta tehničkog sistema	18
3.3 Rotorni bageri.....	20
3.4 Sistemi održavanja rudarskih mašina	26
4. TEORIJSKE OSNOVE METODA	28
4.1 Osnove teorije fazi logike.....	28
4.1.1. Osnovni pojmovi fazi teorije	28
4.1.2. Fazi broj	30
4.1.3. Lingvističke promenljive	31
4.1.4. Fazi propozicija i fazifikacija	33
4.1.5. Fazi relacije i fazi kompozicija.....	33
4.1.6. Defazifikacija.....	35
4.2 Osnove teorije višekriterijumskih metoda.....	36
4.2.1. AHP metoda.....	38
4.2.2. TOPSIS metoda	40
4.3 Statistička obrada podataka	40
4.3.1. Eksponencijalna raspodela.....	43
5. RAZVOJ FAZI EKSPERTSKOG MODELA PROCENE RIZIKA	44
5.1 Modul 1 – Definisane ulaznih parametara i obrada podataka.....	46
5.1.1. Definisane ulaznih podataka.....	46
5.1.2. AHP metoda – Rangiranje parcijalnih indikatora.....	49
5.2 Modul 2 – Izračunavanje rizika.....	50

5.2.1. Fazi propozicija	50
5.2.2. Fazifikacija ulaznih vrednosti.....	51
5.2.3. TOPSIS metoda – kompozicija fazi modela.....	51
5.2.4. Identifikacija.....	53
5.3 Modul 3 – Prikaz rezultata	53
5.3.1. Defazifikacija i standardna devijacija.....	53
6. FAZI EKSPERTSKI MODEL PROCENE RIZIKA KOD ROTORNOG BAGERA	55
6.1 Model procene rizika po strukturnu stabilnost rotornog bagera (Model 1)	55
6.1.1. Definisane slabih mesta i ulaznih podataka rizika po strukturnu stabilnost bagera	55
6.1.2. Izračunavanje rizika po strukturnu stabilnost bagera	60
6.1.3. Prikaz rezultata rizika po strukturnu stabilnost bagera.....	65
6.2 Model procene rizika po prekid proizvodnog procesa rotornog bagera (Model 2).....	66
6.2.1. Definisane ulaznih podataka rizika po prekid proizvodnog procesa.....	66
6.2.2. Izračunavanje rizika po prekid proizvodnog procesa	73
6.2.3. Prikaz rezultata rizika po prekid proizvodnog procesa.....	76
7. ANALIZA REZULTATA I DISKUSIJA	77
7.1 Analiza rezultata iz studije slučaja	77
7.2 Analiza disperzije rezultata	80
7.3 Unapređenja postojećih sistema održavanja.....	82
8. APLIKATIVNI I VIZUELNI PRIKAZ MODEL	86
9. ZAKLJUČAK.....	89
LITERATURA	91
SPISAK PRILOGA.....	I
Prilog broj 1 – Anketni list za model procene rizika po strukturnu stabilnost bagera	II
Prilog broj 2 – Anketni list za model procene rizika po prekid proizvodnog procesa	III
Prilog broj 3 – Ulazni podaci za procenu raspoloživosti i vreme u zastoju bagera	IV
Prilog broj 4 – Datoteka sa kodom za aplikativnu formu modela procene rizika	IX
Prilog broj 5 – Datoteka sa kodom za vizuelizaciju modela procene rizika	XIV

Spisak slika:

Slika 3.1.	Grafički prikaz FMECA metode	16
Slika 3.2.	Vremenska slika stanja tehničkog sistema [63, 65]	19
Slika 3.3.	Prikaz različitih kategorija bagera [73, 74]	21
Slika 3.4.	Osnovna kretanja bagera u radu	22
Slika 3.5.	Transporteri i presipna mesta na rotornom bageru [73]	23
Slika 3.6.	Prvi nivo funkcionalno-konstruktivne dekompozicije rotornih bagera	23
Slika 3.7.	Podsklopovi i komponente sistema za kopanje	24
Slika 3.8.	Podsklopovi i komponente sistema za transport materijala	24
Slika 3.9.	Podsklopovi i komponente sistema za transport bagera	24
Slika 3.10.	Podsklopovi i komponente sistema za podizanje i spuštanje strele rotornog točka	24
Slika 3.11.	Podsklopovi i komponente sistema za obrtanje gornje gradnje bagera	25
Slika 3.12.	Podsklopovi i komponente noseće čelične konstrukcije	25
Slika 3.13.	Podsklopovi i komponente pomoćne čelične konstrukcije	25
Slika 3.14.	Podsklopovi i komponente elektro upravljanja	25
Slika 3.15.	Podsklopovi i komponente elektro napajanja	26
Slika 4.1.	Trougaona funkcija pripadnosti [84]	29
Slika 4.2.	Trapezoidna funkcija pripadnosti [84]	29
Slika 4.3.	Pravolinijska funkcija pripadnosti [84]	30
Slika 4.4.	Zvonasta funkcija pripadnosti [84]	30
Slika 4.5.	Primer fazi skupova koji jesu (A i B) i koji nisu fazi brojevi (C i D) [84, 89]	30
Slika 4.6.	Funkcija pripadnosti trouglastog i trapeznog fazi broja A	31
Slika 4.7.	Koraci u primeni metoda višekriterijumskog odlučivanja	37
Slika 4.8.	Hijerarhijska postavka AHP metode [113, 118]	39
Slika 4.9.	Tok AHP metode	39
Slika 4.10.	Tok TOPSIS metode	40
Slika 5.1.	Strukturni algoritam modela procene rizika	46
Slika 5.2.	Primer određivanja funkcije pripadnosti za parcijalne indikatore (A) i (T)	48
Slika 5.3.	Raspodela sistema održavanja kao polazna osnova za određivanje detektabilnosti	48
Slika 5.4.	Generalni oblik raspodele lingvističkih promenljivih u odnosu na funkcije pripadnosti [50, 65] ..	51
Slika 6.1.	Slaba mesta rizika po strukturnu stabilnost bagera [50]	56
Slika 6.2.	Raspodela izlaznih vrednosti kompozicije prema j -skali	63
Slika 6.3.	Izlazne vrednosti nakon identifikacije sa označenim težištem	65
Slika 6.4.	Histogram apsolutne učestalosti za vremena u radu i vremena u otkazu	68
Slika 6.5.	Definisanje ulazne vrednosti za parcijalni indikator (A)	72
Slika 6.6.	Definisanje ulazne vrednosti za parcijalni indikator (T)	72
Slika 6.7.	Raspodela izlaznih vrednosti kompozicije prema j -skali	74
Slika 6.8.	Izlazne vrednosti nakon identifikacije sa označenim težištem	76
Slika 7.1.	Prikaz rezultata analize slabih mesta po strukturnu stabilnost bagera	77
Slika 7.2.	Prikaz rezultata slabih mesta u skladu sa RPN_{FMECA} skalom	78
Slika 7.3.	Prikaz rezultata slabih mesta u skladu sa RPN_{FMEA} skalom i vrednostima matrice rizika	79
Slika 7.4.	Prikaz rezultata rizika po prekid proizvodnog procesa	79
Slika 7.5.	Prikaz rezultata rizika po prekid proizvodnog procesa u skladu sa RPN_{FMECA} skalom	79
Slika 7.6.	Grafički prikaz disperzije rezultata za rizik po prekid proizvodnog procesa	82
Slika 8.1.	Vizuelni prikaz odeljka za uvoz dokumenata i rezultati AHP metode sa proverom konzistentnosti ..	87
Slika 8.2.	Vizuelni prikaz rezultata za prvo slabo mesto analize rizika po strukturnu stabilnost bagera	88

Spisak tabela:

Tabela 3.1.	Karakteristike različitih kategorija rotornih bagera [73-75]	22
Tabela 4.1.	Razlike između dve grupe metoda [112]	37
Tabela 4.2.	Metode VKO [108]	38
Tabela 4.3.	Preporučeni broj intervala u funkciji broja podataka u skupu N [70]	41
Tabela 4.4.	Kritične vrednosti za χ^2 test u odnosu na broj stepena slobode (ν) i nivo značajnosti (α) [62, 125]	42
Tabela 5.1.	Lingvistički opis ocena parcijalnih indikatora rizika [50]	47
Tabela 5.2.	Lingvistički opis ocena mogućnosti detekcije za Model 2	49
Tabela 5.3.	AHP skala značajnosti [114]	49
Tabela 5.4.	Vrednosti koeficijenta (R_I) u zavisnosti od broja elemenata (n) [114, 119, 124]	50
Tabela 6.1.	Ekspertske ocene međusobnog odnosa parcijalnih indikatora za slabo mesto P1	57
Tabela 6.2.	Prosečne ocene međusobnog odnosa parcijalnih indikatora za sva slaba mesta	57
Tabela 6.3.	Rangiranje parcijalnih indikatora rizika prema slabom mestu P1	57
Tabela 6.4.	Rezultati AHP metode rangiranja parcijalnih indikatora svih slabih mesta bagera	58
Tabela 6.5.	Ulazne ocene analitičara za parcijalne indikatore rizika za P1	58
Tabela 6.6.	Ulazne ocene analitičara za parcijalne indikatore rizika svih slabih mesta analize	59
Tabela 6.7.	Postupak fazifikacije slabog mesta P1 prema parcijalnom indikatoru O	60
Tabela 6.8.	Fazifikovane vrednosti svih parcijalnih indikatora i slabih mesta	60
Tabela 6.9.	Ulazne vrednosti za formiranje fazi TOPSIS kompozicije Modela 1	61
Tabela 6.10.	Normalizovane i ponderisane vrednosti za P1	61
Tabela 6.11.	Definisanje idealnih i anti-idealnih ishoda kompozicije modela	62
Tabela 6.12.	Suma distanci ishoda od idealnog i anti-idealnog ishoda i rezultati rizika (R)	62
Tabela 6.13.	Rezultati kompozicije modela za sva slaba mesta	63
Tabela 6.14.	Izračunata relativna rastojanja za sva analizirana slaba mesta	64
Tabela 6.15.	Raspodela vrednosti nakon procesa identifikacije za sva analizirana slaba mesta	64
Tabela 6.16.	Defazifikovane vrednosti i mera rasipanja za sva slaba mesta	65
Tabela 6.17.	Različiti oblici interpretacije rezultata rizika	65
Tabela 6.18.	Ekspertske ocene međusobnog odnosa parcijalnih indikatora za Model 2	66
Tabela 6.19.	Proračun AHP metode za Model 2	66
Tabela 6.20.	Podaci o vremenu rada i vremenu zastoja iz prve grupe podataka	67
Tabela 6.21.	Apsolutna i relativna učestalost intervala vremena rada i vremena u otkazu iz prve grupe podataka	68
Tabela 6.22.	Vrednosti (p_i) za oba skupa podataka iz prve grupe	69
Tabela 6.23.	Vrednosti teorijske učestalosti	70
Tabela 6.24.	Vrednosti kriterijuma testa (χ_{sr}^2)	70
Tabela 6.25.	Rezultati χ^2 testa za sve grupe podataka	71
Tabela 6.26.	Rezultati parametara raspoloživosti za sve grupe podataka	71
Tabela 6.27.	Ulazne vrednosti parcijalnog indikatora verovatnoća pojavljivanja za model procene rizika	71
Tabela 6.28.	Ulazne ocene analitičara za parcijalni indikator (D)	73
Tabela 6.29.	Fazifikovane vrednosti svih parcijalnih indikatora	73
Tabela 6.30.	Ulazne vrednosti za formiranje fazi TOPSIS kompozicije Modela 2	73
Tabela 6.31.	Normalizovane i ponderisane vrednosti	74
Tabela 6.32.	Definisanje idealnih i anti-idealnih ishoda kompozicije	74
Tabela 6.33.	Suma distanci ishoda od idealnog i anti-idealnog ishoda i rezultati rizika (R)	74
Tabela 7.1.	Rezultati primene modela sa tri različite kompozicije za prvu analizu	81
Tabela 7.2.	Rezultati primene modela sa tri različite kompozicije za drugu analizu	82
Tabela 8.1.	Izgled prvog ulaznog csv dokumenta sa postavkom AHP matrice	86
Tabela 8.2.	Izgled drugog ulaznog csv dokumenta sa prosečnim ekspertskim ocenama ili obrađenim podacima	86
Tabela 8.3.	Pregled funkcija sadržanih u datoteci <i>Risk_evaluation.py</i>	86

1. UVOD

Prirodni resurs (energetska sirovina) koji ima dominantnu ulogu u proizvodnji električne energije na našim prostorima je uglj. Eksploatacija uglja zahteva primenu složenih i specifičnih rudarskih mašina u kompleksnim tehnološkim procesima. Složenost mašina, tehnologije i procesa ukazuje na značaj analize rizika u oblasti rudarstva. U zavisnosti od nivoa predvidljivosti događaja, postoje rizici na koje se može uticati, i oni na koje uticaj nije moguć (prirodne nepogode: poplave, zemljotresi, i sl.). Izuzimajući nepredvidljive događaje, katastrofalne posledice u najvećoj meri su rezultat grešaka u projektovanju, izradi, transportu, montaži, eksploataciji i održavanju. U oblasti rudarstva, prisutan je značajan prostor da se adekvatnim analizama rizika, formiraju preventivne aktivnosti koje će sprečiti nepoželjne situacije ili im u najvećoj mogućoj meri ublažiti posledice. Preduslov za to je posmatranje i analiziranje rizika sistema i procesa u svim fazama eksploatacionog ciklusa.

Različitošć površinske i podzemne eksploatacije uglja, ukazuje i na razlike u nivou i percepciji rizika. Sa aspekta zaštite života i zdravlja ljudi može se reći da je rizik veći u podzemnoj eksploataciji, dok je sa aspekta materijalnih šteta koje se stvaraju rizik veći pri površinskoj eksploataciji. Razlika je definisana u odnosu na uslove rada i primenjenu mehanizacijom.

Pri površinskoj eksploataciji lignita uglavnom se koriste mašine kontinualnog sistema rada. Tu se prvenstveno misli na rotorne bagere, transportere sa gumenom trakom i odlagače/drobnice/deponijske mašine. Zastoj jedne od mašina iz sistema indukuje zastoj čitavog sistema. Početni i najodgovorniji činilac sistema je rotorni bager koji se direktno koristi u otkopavanju otkrivke i/ili uglja. Izložen je različitim, u funkciji vremena, promenljivim geološkim i klimatskim uslovima. Na osnovu konstruktivne i tehnološke kompleksnosti, može se smatrati jednom od najsloženijih mašina (tehničkih sistema) u industriji. Rotorni bager je mašina velikog kapaciteta (do 250000 m³/dan), velike investicione vrednosti (preko 50 miliona evra) koja usled zastoja generiše visoke direktne i indirektno troškove. Preostale mogućnosti kao i iznenadni otkazi u početnoj fazi životnog veka velika su nepoznanica. Treba naglasiti i da je svakodnevno veliki broj ljudi angažovan u radu i održavanju mašine.

Jedan od zadataka upravljanja rudarskom mehanizacijom, kao imovinom, je razvoj modela za predviđanje i izračunavanje rizika. Procenama i analizama rizika u osnovi se mogu umanjiti šanse za događaj sa ozbiljnim ili katastrofalnim posledicama. Analize rizika mogu da ukažu na slaba mesta nekog tehničkog sistema. Slaba mesta se mogu ogledati kroz: pomenuti događaj visokog rizika, negativan efekat na radno okruženje, prekid proizvodnog procesa usled otkaza, degradativan uticaj na životnu sredinu, i sl. Svaka procena rizika analizira trenutno stanje nekog sistema, ali ima i prediktivni karakter. Neadekvatnim tretiranjem i održavanjem povećavaju se šanse da se nivo rizika u funkciji vremena poveća.

Nabavka rudarske mehanizacije, zbog svoje izuzetne specifičnosti i kompleksnosti zahteva ozbiljno planiranje velika finansijska ulaganja. Treba naglasiti da je potrebno vreme nabavke i montaže bagera oko 3 godine. Rudarski tehnički sistemi posmatraju se kao deo imovine kojom se mora adekvatno upravljati u funkciji vremena. Osnovni ciljevi koji moraju biti ostvareni pri eksploataciji su bezbednosni i finansijski. Naime, neophodno je minimiziranje rizika koji ugrožavaju živote i zdravlje ljudi i bezbednost opreme, ali i minimiziranje mogućeg stvaranja direktnih i indirektnih troškova. Pored toga, od izuzetne važnosti je obezbeđivanje visoke funkcionalnosti i efikasnosti u radu, postizanje maksimalne moguće raspoloživosti. Generalno posmatrano, svi navedeni ciljevi se mogu podvesti pod rizik i kao takvi analizirati, pri čemu učestvuju kao ukupni rizik od nekog događaja ili stanja, ili kao deo nekog rizika kroz jedan od njegovih elemenata. Međunarodni standardi koji prepoznaju rizik i daju osnovne smernice su iz oblasti: upravljanja imovinom (ISO 55000:2014) i upravljanja rizikom (ISO 31000:2018).

Aktuelnost značaja analize i procene rizika prisutna je već više od 50 godina. Međunarodni standardi prepoznaju dve osnovne (tradicionalne) metode za procenu rizika - metodu FMEA (engl. *Failure Mode and Effects Analysis*) i metodu FMECA (engl. *Failure Mode Effects and Criticality Analysis*). Obe metode koriste sličan pristup pri izračunavanju rizika. Tačnije RPN (engl. *Risk Priority Number*) u obe metode, računa se množenjem tri parcijalna indikatora rizika: 1) verovatnoće pojavljivanja (engl. *Occurrence*); 2) ozbiljnosti posledica (engl. *Severity*); 3) i mogućnosti detekcije (engl. *Detectability*). Svaki od parcijalnih indikatora se najpre ekspertski ocenjuju od 1 do 5 ili od 1 do 10. Pregled postojeće literature ukazuje da u ovakvom pristupu dominira subjektivnost. Pored toga što postojeći modeli nisu u dovoljnoj meri usmereni ka umanjenu subjektivnosti ekspertskega tima, ukazuje se i na brojne druge nedostatke, pa čak i da je ovakav pristup prevaziđen. Naime, kroz ekspertske vrednovanje moguće je predvideti ishod procene rizika, ali je i međusobni značaj parcijalnih indikatora u postojećim radovima isti. S obzirom da su u direktnoj vezi sa konkretnim okolnostima analize, odluka o njihovom istom ili različitom uticaju (težini) na ukupni rizik treba da bude usklađena. U postojećim radovima nije razmatrana mera disperzije rezultata, a u oblasti kao što je rizik, preciznost i svođenje disperzije rezultata na minimalnu moguću vrednost je značajan cilj. Izbor matematičke osnove za izračunavanje treba da bude takav da se disperzija rezultata svede na minimalnu moguću vrednost.

Pored tradicionalnog pristupa, koriste se i različite „izmenjene“ metode tradicionalnog pristupa a upravo njihova analiza otvorila je prostor za proširenje metode sa još nekoliko značajnih aspekata i mogućnosti za poboljšanja modela dodatnim izmenama.

Osnovni zadatak u disertaciji definisan je adekvatnim upravljanjem rizikom, a to se postiže:

- definisanjem algoritma i razvojem modela procene i analize rizika;
- unapređenjem postojećih sistema održavanja na osnovu smernica dobijenih iz analize rizika.

Inovativni sintezni model koji se predlaže u disertaciji, formira se na osnovu četiri cilja: umanjene subjektivnosti i predvidljivosti ishoda; stvaranje mogućnosti istog ili različitog vrednovanja elemenata rizika; smanjenje disperzije vrednosti rezultata; i razmatranje implementiranja segmenata održavanja prema riziku. Prva tri cilja su naučnog karaktera i postižu se primenom adekvatnog fazi ekspertnog sistema. Sistem je dizajniran tako da umanjiti predvidljivost konačne ocene korišćenjem višeslojnog ocenjivanja. Sistem mora biti potpuno adaptivan u svim dimenzijama i mora imati optimizacioni karakter. Konačno, rezultat mora biti što je više moguće precizan. Za razliku od prethodnih, četvrti cilj je stručnog karaktera. Na osnovu sprovedene analize rizika koja po prirodi ima i indirektan prediktivni karakter, u postojećim sistemima održavanja može se izvršiti korekcija aktivnosti i obratiti pažnja na mesta sa povećanim rizikom. Na taj način se može umanjiti neizvesnost od ozbiljnih kvarova, zastoja ili događaja sa havarijom.

Formiranje sveobuhvatnog sinteznog modela koji će uzeti u obzir pomenute elemente poboljšanja predstavlja osnovno usmerenje disertacije. Analiza je sprovedena na rotornom bageru SRs2000 nemačke kompanije Takraf, koji se koristi na površinskom kopu lignita. Izbor rotornog bagera za testiranje modela motivisan je značajnim karakteristikama, kao što su: konstruktivna i tehnološka kompleksnost, veliki broj angažovanih ljudi, značaj za postizanje energetske sigurnosti snabdevanja, ekonomska vrednost, uticaj na radno okruženje i dr. Konkretan tip bagera koji se analizira kvalifikuje se u grupu najvećih i najkompleksnijih bagera na ovim prostorima. Pri tome je razmatrana mašina velike investicione vrednosti i spada u najbrojnije rotorne bagere kako u Srbiji tako i u svetu.

Analiza se sprovodi kroz dve forme rizika. Prva forma je rizik po strukturnu stabilnost bagera (rizik od havarije) čime se formira Model 1, dok druga analizira rizik po prekid proizvodnog procesa (rizik od zastoja) čime se formira Model 2. Rezultati analize rizika treba da ukažu i na dalje smernice u postupcima održavanja. Na taj način se u postojeće sisteme organizovanja održavanja implementira element održavanja prema riziku (engl. *Risk Based Maintenance*).

Primenom savremenih programskih alata algoritam modela se preslikava u softversku aplikativnu formu i vizuelni oblik. Na taj način se ostvaruje jednostavnija i brža analiza rizika. Posebna pogodnost ovakvog pristupa je za analizu rizika od zastoja, jer se sistematičnim prikupljanjem podataka može ostvariti redovno, gotovo „online“ praćenje.

1.1 Predmet i cilj istraživanja

Predmet istraživanja definisan je razvojem sinteznog modela upravljanja rizikom kod rotornih bagera. Ključni pojmovi koji predstavljaju predmet istraživanja u disertaciji su: fazi logika i ekspertni sistemi koji formiraju model; rizik kao sveobuhvatni pojam koji će se analizirati; i rotorni bager na kome treba da se verifikuje i testira inovativni model.

Model koji se formira treba da ima algoritamsku i hibridnu strukturu. Osnovu čini fazi logika i ekspertni sistemi kao deo veštačke inteligencije. Konceptijski fazi model bazira se na analizi fenomena u kojima dominira neizvesnost i neodređenost. Model treba da izvrši sintezu (kompoziciju) i optimizaciju navedenih fenomena, odnosno parcijalnih pokazatelja. To se postiže kroz hibridni karakter modela koncipiran od više povezanih metoda. Elementi fazi logike i ekspertnih sistema sadržani su u čitavom algoritmu modela, od unosa podataka do prikaza rezultata. Pored fazi logike, model sadrži dve višekriterijumske metode. Integrisanje ovih metoda u fazi ekspertni model izvršeno je kako bi se doprinelo korekciji rezultata prema značaju fenomena rizika odnosno njihovoj preciznijoj sintezi (kompoziciji).

Rizik predstavlja pojam čijom se analizom i ocenom može ukazati na trenutno stanje nekog tehničkog sistema, ali i na preostale mogućnosti u odnosu na dati trenutak i okolnosti. Koncept održavanja složenih tehničkih sistema može biti direktno povezan sa analizom rizika. Smanjenje rizika može predstavljati značajan cilj postupaka održavanja. To je posebno izraženo kod tehničkih sistema velike investicione vrednosti, koji pri tome rade u skupim tehnološkim procesima. Naime, svaki nepredviđeni događaj na kompleksnim sistemima nosi veliki rizik. Prvenstveno treba naglasiti rizik po bezbednost i zdravlje ljudi. Potom po strukturu tehničkih sistema, što može biti veliki finansijski izdatak. Na kraju, zastoj koji stvara prekid proizvodnog procesa odnosno usporava ili zaustavlja realizaciju planirane proizvodnje. Blagovremena detekcija rizika i definisanje slabih mesta je od velikog značaja za menadžment kompanija koji su vlasnici tehničkih sistema.

Rotorni bageri su kompleksni tehnički sistemi angažovani u eksploataciji mineralnih sirovina. Od velikog su značaja za eksploataciju lignita koji učestvuje u proizvodnji oko 70% električne energije Republike Srbije [1]. Predstavljaju rudarske mašine koje u najvećoj meri doprinose ostvarivanju potrebnih kapaciteta od 37 do 42 miliona tona uglja i otkrivke čija je količina oko 3 puta veća uglja. Uz transportere sa gumenom trakom i mašine za odlaganje ili drobljenje, čine kontinualne sisteme rada. Konstruktivno su u grupi najvećih samohodnih mašina u industriji. Sačinjeni su od velikog broja parcijalnih elemenata i pogona. Za njihovo projektovanje i izradu potrebno je i do nekoliko godina. Koriste se u promenljivim rudarsko-geološkim i klimatskim uslovima. U takvim okolnostima, česta je pojava neplaniranih zastoja zbog kvarova, a mogu se dogoditi i neočekivane havarije. Strukturna dekompozicija i uočavanje slabih mesta doprinos je koji se ostvaruje analizom rizika. Na taj način se pruža mogućnost blagovremenog organizovanja aktivnosti održavanja. Pristup održavanju može biti značajno unapređen kroz primenu koncepta održavanja prema riziku. Trenutne aktivnosti na održavanju velike rudarske mehanizacije na ovim prostorima, kvalifikovane su u kategoriju „plansko preventivno održavanje“. Utvrđivanjem slabih mesta može se implementirati i „prediktivno“ i „proaktivno“ održavanje radi unapređenja sigurnosti funkcionisanja i produžetka životnog veka mašine. Dakle, pristup upravljanju i održavanju rotornim bagerima treba biti zasnovan na savremenim modelima za donošenje odluka, optimizaciji, rangiranju i predikciji. Na taj način se obezbeđuje i zaštita investicionog ulaganja.

Osnovni cilj disertacije je definisanje i verifikacija naprednijih metoda fazifikacije, kompozicije i identifikacije koje će učestvovati u formiranju modela za procenu rizika kompleksnih tehničkih sistema. Fazifikacija ulaznih veličina treba da ima mogućnost korišćenja ekspertske ocene, numeričkih vrednosti i funkcija dobijenih iz baze podataka. Kompozicija modela treba da ima dva nezavisna sloja. U prvom se vrši minimalizacija ishoda s obzirom na percepciju rizika. Drugi sloj je rangiranje elemenata (parcijalnih indikatora) rizika prema konkretnom uticaju na ukupni rizik. Na ovaj način se dobija model sa većom preciznošću. Identifikacija modela se odnosi na formiranje aplikativnog prikaza izlaza iz modela u obliku lingvističkog opisa stanja sistema po pitanju intenziteta rizika.

Rezultati analize pored ocena intenziteta otkaza, treba da budu prikazani i u svedenom obliku tako da su međusobno uporedivi i reprezentativni na različitim skalama. Tako formirani algoritam modela se može koristiti za efikasno upravljanje imovinom i procenu preostalih mogućnosti. Na taj način bi se stvorili preduslovi za blagovremeno donošenje odluka u postupcima održavanja. Kod kompleksnih tehničkih sistema visokim kvalitetom održavanja mogu se sprečiti nepredviđeni događaji sa havarijom ili neplanirani zastoji.

Očekivani doprinosi u disertaciji mogu da se svedu na:

- i. formiranje univerzalnog algoritma modela procene rizika koji će imati mogućnost integracije u druge tehničke sisteme;
- ii. definisanje modela koji sintezuje iste ili različite vrednosti uticaja parcijalnih indikatora na ukupni rizik;
- iii. korišćenje matematičkih metoda koje će kod fazi zaključivanja u propoziciji, dovesti do veće preciznosti odnosno smanjenja disperzije rezultata;
- iv. formiranje algoritma koji će intenzitet rizika prikazati u numeričkom i lingvističkom obliku;
- v. kreiranje integrisanog oblika prikaza rezultata rizika, koji će biti koncizni i konzistentni i u skladu sa različitim tradicionalnim skalama rizika;
- vi. stvaranje modela koji će kroz rekurzivnost pristupa doprineti optimizaciji postupaka održavanja;
- vii. dizajniranje aplikativne (softverske) forme i vizuelnog oblika modela radi jednostavnijeg, bržeg i intenzivnijeg sprovođenja analize rizika.

1.2 Naučne hipoteze istraživanja

Kreiranje matematičkog i konceptijskog algoritma sinteznog modela procene rizika kao i unapređenje postojećih sistema održavanja, predstavljaju osnovne ciljeve koji su definisani u doktorskoj disertaciji. Na osnovu toga, polazne naučne hipoteze istraživanja u disertaciji su:

- Metodološki, tradicionalni pristup izračunavanja rizika na osnovu FMEA i FMECA metoda, odnosno RPN vrednosti, poseduje brojne konceptijske nedostatke. Navedeni pristup nema univerzalnost pa je primena na rudarske mašine u određenoj meri ograničena;
- Pojava nepredviđenih otkaza i situacije sa havarijama izazivaju strukturne posledice po tehnički sistem, zastoj proizvodnje, ekonomske posledice i negativan uticaj na radno okruženje i životnu sredinu;
- Procena rizika je sastavni deo statističke obrade istorijskih podataka dobijenih na osnovu vremenske slike stanja tehničkog sistema, odnosno na osnovu analize slabih mesta na sistemu;
- Nivo rizika je u korelaciji sa raspoloživošću, pouzdanošću i pogodnošću održavanja mašine;
- Procena rizika je sveobuhvatni pokazatelj koji se inicijalno može koristiti u proceni upotrebnog kvaliteta i u proceni preostalih mogućnosti tehničkih sistema;
- Parcijalni pokazatelji koji definišu rizik predstavljaju fenomene;
- Procena nivoa rizika tehničkog sistema predstavlja značajnu veličinu koja pomaže u definisanju postupaka i dinamike održavanja tehničkog sistema;

- Rudarske mašine, a posebno rotorni bageri nose veliki rizik s obzirom na industriju čiji su neodvojivi segment;
- Rotorni bageri predstavljaju specifične tehničke sisteme, koji zahtevaju originalni model procene rizika;
- Razvoj modela upravljanja rizikom kroz sistematizaciju i analizu omogućava upravljanje održavanjem sistema.

1.3 Struktura disertacije sa kratkim pregledom poglavlja

U doktorskoj disertaciji je sadržano 9 tematskih celina (poglavljja) koje prate logičan sled uspostavljen kroz predmet i cilj analize, odnosno polazne hipoteze.

Prvo poglavlje je uvodno poglavlje u kome su prikazane osnovne postavke doktorske disertacije. Obrazložen je razmatrani predmet analize, postavljeni su ciljevi i doprinosi koji se očekuju. Prikazane su polazne naučne hipoteze i struktura disertacije.

Drugo poglavlje sadrži literaturni pregled strukturiran u skladu sa razmatranim problemima. Sadrži četiri sekcije u kojima je urađen pregled literature usmeren ka: problemima kod rotornih bagera, postojećim metodama procene rizika, matematičkim unapređenjima postojećih metoda analize rizika i mogućnostima implementiranja održavanja prema riziku.

U okviru **trećeg poglavlja** je dat pregled osnovnih pojmova vezanih za predmet analize. Date su definicije rizika i pojmova vezanih za rizik, objašnjene su i osnovne metode za procene rizika. U nastavku poglavlja su prikazani rotorni bageri kao predmet analize, urađena je njihova strukturalna dekompozicija, objašnjeni su osnovni pojmovi koji proizilaze iz upotrebnog kvaliteta, definisani su sigurnost funkcionisanja, raspoloživost i otkaz. Na kraju poglavlja su objašnjeni različiti pristupi u sistemima održavanja.

Četvrto poglavlje sadrži teorijske osnove metoda koje će biti korišćene. Objašnjeni su osnovni pojmovi vezani za fazi logiku, date su teorijske postavke višekriterijumskih metoda i prikazani su različiti pristupi u statističkoj obradi podataka.

Peto poglavlje predstavlja algoritam inovativnog sinteznog modela procene rizika koji se predlaže u disertaciji. Dat je sled aktivnosti u modelu za obe forme analiziranog rizika, kroz: prikupljanje podataka i formiranje parcijalnih indikatora; izračunavanje i analizu rizika; i prikaz rezultata analize rizika.

Studija slučaja urađena je u **šestom poglavlju**. Reprezentativna postupna kalkulacija prikazana je za prvu formu analiziranog rizika (Model 1), dok je za drugu formu (Model 2) dat skraćeni prikaz proračuna. Tok proračuna prati sled definisan u petom poglavlju.

U **sedmom poglavlju** je diskusija o rezultatima koji su dobijeni. Urađena je uporedna analiza sa drugim metodama. Rezultati su prikazani na različitim skalama na osnovu čega se locira rang slabih mesta na bageru. Date su smernice za unapređenje postojećih koncepta održavanja, na osnovu smernica dobijenih iz rezultata analize rizika.

Osmo poglavlje sadrži prikaz dizajnirane softverske aplikativne forme i vizuelnog oblika sinteznog modela koja se predlaže u disertaciji. Dato je objašnjenje načina dizajniranja, sadržaja kodova i principa rada modela kroz programski jezik i okvir za vizuelizaciju.

Zaključna razmatranja data su u **devetom poglavlju**.

Literatura koja je korišćena u disertaciji prikazana je nakon toga. Potom su dati prilozi koji sadrže anketni list, tabele o zabeleženom radu rotornih bagera i datoteka sa kodovima za softversku aplikativnu formu i vizuelni prikaz modela.

2. ANALIZA DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

Pregled dosadašnjih istraživanja usmeren je ka naučnim i stručnim radovima koji se odnose na:

- konstruktivne i strukturne probleme rotornih bagera;
- postojeće osnovne metode procene rizika;
- primenu veštačke inteligencije, fazi ekspertske sisteme, hibridne modifikovane metode procene rizika; i
- koncepte upravljanja životnim vekom i održavanje na osnovu rizika.

Ovakva kvalifikacija pregleda dosadašnjih radova, respektivno je definisana kroz naredne tematske celine.

2.1 Analiza konstruktivnih i strukturnih problema rotornih bagera

Rotorni bageri predstavljaju kompleksne tehničke sisteme odnosno rudarsku mehanizaciju sačinjenu od tehnološki uslovljenih grupa gradnji tj. velikog broja sklopova, podsklopova i komponenti. Vreme rada i vreme zastoja kod kompleksnih tehničkih sistema definisani su „vremenskom slikom stanja“. Vremenski zastoji su uglavnom rezultat preventivnih i/ili korektivnih aktivnosti održavanja. Preostali razlozi zastoja uzrokovani su tehnološkim, administrativnim ili organizacionim nedostacima. Mogu biti planski definisani ili stohastičke prirode.

Planske aktivnosti su deo preventivnih operacija održavanja i mogu se organizovati u funkciji vremena. Kada dođe do zastoja čitavog sistema, vreme se može uskladiti (iskoristiti) i na remonte, servise, prateće provere bagera i drugih elemenata BTO ili BTD sistema.

Korektivne aktivnosti koje su po prirodi stohastičke, što znači da se ne mogu predvideti u funkciji vremena. Rezultat su kvarova ili havarija koje prate direktni i indirektni troškovi. S obzirom na stohastičko pojavljivanje, može se reći da su tada indirektni troškovi usled zastoja tj. gubitka od planirane proizvodnje, često veći i značajniji od direktnih troškova popravke. Ukoliko je u pitanju ozbiljniji kvar ili havarija, tada mogu biti ugroženi i bezbednost ljudi i opreme.

Tehnološki zastoji javljaju se kada je mašina radno raspoloživa ali je potrebno uskladiti tehnologiju rada ili izvršiti promenu njenog položaja. Administrativni i organizacioni zastoji posebno su izraženi pri neplanskim aktivnostima održavanja kada je potrebna hitna reakcija, a upitno je da li postoji potreban alat, obučeno i raspoloživo ljudstvo, potrebna pomoćna mehanizacija, rezervni deo u magacinskom prostoru i sl.

U nastavku je dat pregled radova koji ukazuju na značaj rotornih bagera u sistemima eksploatacije lignita, situacije u kojima je došlo do havarija čime je potencijalno bila ugrožena i bezbednost i dr.

U radu „*Rizici pojave otkaza i štetnih događaja u složenim sistemima – primer BTO*“ [2] autor Ivković se bavi rizicima od nepredviđenih događaja. Isti predstavlja jedan od početnih radova koji ukazuje na značaj sagledavanja rizika kod rudarske mehanizacije. Beleži se postojanje događaja na koje se ne može uticati poput zemljotresa, uragana, poplava i sl. Akcenat se stavlja na događaje koji nastaju kao direktna posledica delovanja čoveka. Uz osnovna razmatranja autora o rizicima, dat je prikaz nivoa rizika u rudarstvu odnosno u površinskoj i podzemnoj eksploataciji mineralnih sirovina. Izvršena je statistička analiza havarijskih događaja sa lakim, teškim povredama i smrtnim ishodima tog vremena u svetu. Prikazani su najčešći uzročnici takvih događaja. Pored toga, uočeno je i postojanje profesionalnih oboljenja koja nastaju radom u nepovoljnim uslovima. Došlo se do zaključka da su rizici pri površinskoj i podzemnoj eksploataciji različitog nivoa u zavisnosti od percepcije posmatranja. Smrtnost ljudi i nivo povreda je manji, ali su pri tome materijalne štete veće usled primene skupe krupne mehanizacije.

Autori Ivković i drugi u radu „*Ponašanje rotornih bagera u eksploataciji na površinskim kopovima uglja u Srbiji i rizici*” [3] analiziraju ponašanje velikih rotornih bagera tokom životnog veka čije se trajanje poistovećuje sa životnim vekom njegove čelične konstrukcije. Procena je da je vek trajanja ovakvih mašina oko 50 godina. S obzirom da je rotorni bager mašina sačinjena od velikog broja različitih elemenata, dešava se da oni vremenom otkazuju, popravljaju se ili menjaju novim. To navodi autore da kroz analizu dođu do zaključka da dolazi do pojave ulaska sistema u stacionarno stanje otkaza, gde frekvencija otkaza postaje konstantna. Ipak, ono što dalje analiziraju, a ne može se poistovetiti sa prethodnim predviđanjima pojava otkaza su havarijske situacije do kojih je dolazilo. Ukazuje se da su havarijske situacije rezultat neadekvatnog sagledavanja kompletne situacije i greške ljudskog faktora.

Havarije rotornih bagera mogu ugroziti bezbednost ljudi i opreme. Urušavanje delova ili čitavih bagera dešavalo se kroz istoriju. Uglavnom su rezultat greške u upravljanju, održavanju mašine ili baznog inženjeringa pri projektovanju mašine. Autori Rusiński i drugi analizirali su pad rotornog bagera oznake KWK1400 na površinskom kopu uglja „Turów, Bogatynia“ (Poljska) [4]. Do havarije bagera došlo je usled pucanja uške lamele koja povezuje strelu protivtega sa gornjom gradnjom. Bager je otkopavao donju etažu otkrivke. Prethodno je u radu bio 28 godina. Kako bi identifikovali razloge havarije, izvršili su simulaciju havarije i ispitivanja materijala površine loma. Dobijeni su makroskopski i mikroskopski snimci područja unutar loma. Izvršena su merenja tvrdoće na mestu šava zavarivanja. Metodom konačnih elemenata pokazali su da koncentracija napona prelazi dozvoljeni nivo. Autori su zaključili da je uzrok pada bagera zamorni prelom lamele u blizini uške koja spaja sa protivtegom. Uočeno je da je element bio izložen uzdužnim opterećenjima i cikličnom savijanju.

Totalnu havariju bagera SchRs1760/5×32 na površinskom kopu lignita „Kolubara“ (Srbija) analizirali su autori Bošnjak i drugi [5]. Do havarije sa totalnom štetom došlo je 2007. godine, usled pucanja nosača desnog vitla pogona za dizanje radnog točka koji se nalazi na protivtegu. Autori su primenili metodu konačnih elemenata za simulaciju opterećenja. Uočena je izražena koncentracija napona pri čemu su naponi u zoni loma prevazilazili napon tečenja materijala. Primenom elektronskog mikroskopa uočena je poroznost i inkluzija u šavu zavarivanja. Debljina ploče na mestu loma se sa vremenom značajno smanjila. Zaključno razmatranje uzroka havarije svedeno je na posledice superpozicije negativnih efekata pri oblikovanju i dimenzionisanju sklopa nosača za date uslove opterećenja.

Pored grešaka u dizajnu ili upravljanju mašinom, do havarije je dolazilo i dejstvom rudarsko-geoloških faktora. Primer za to je havarija bagera SRs1200 na površinskom kopu uglja „Kolubara“ (Srbija). Tada je došlo do odrona kosine koju je bager otkopavao. Materijal je pao sa kosine i ošteti strelu radnog točka bagera. Usled dinamičkog opterećenja, došlo je i do totalne štete na pogonu i reduktoru radnog točka, a oštećeni su i aksijalnih ležaj i obrtna platforma na više mesta. U radu [6], Bošnjaka i drugih su analizirani sve inženjerske aktivnosti da bi se mašina posle havarije vratila u stanje radne sposobnosti.

Pored havarija sa velikom ili totalnom štetom, dešavale su se i situacije sa pukotinama i lomovima delova bagera koji nisu narušavali strukturnu stabilnost bagera. U takvim situacijama zastoje su dugi, ali nije ugrožena bezbednost ljudi i opreme. Na rotornom bageru SRs1200 na površinskom kopu uglja „Kolubara“ (Srbija), pojavile su se pukotine na konstrukciji obrtne platforme. Višegodišnji rad bagera u teškim uslovima uzrokovao je oštećenja. Pukotine su locirane u gornjim pločama i vertikalnim panelima. Ovaj deo je od vitalnog značaja jer nosi gornju gradnju bagera. Primenom metode konačnih elemenata autori Bošnjak i drugi [7] predlažu način popravke i rekonstrukcije. Rešenje su bazirali na uporednoj analizi naponskog i deformacionog stanja alternativnih rešenja, vodeći računa o mogućnostima remonta u terenskim uslovima.

Autori Rusiński i drugi su analizirali pukotine i oštećenja na osovini i glavi rotornog točka [8]. Cilj u radu je bio da se utvrdi razlog zbog kog je došlo do pukotina i loma. Urađen je model, primenjena numerička analiza metodom konačnih elemenata i analiza materijala makroskopskim i mikroskopskim slikama područja loma. Zaključeno je da su uzroci loma nemetalne inkluzije ispod površine osovine (rezultat procesa valjanja), kao i da element nije bio prethodno termički obrađen.

Analizu uzroka nastanka pukotina uradili su Bošnjak i drugi za obrtnu platformu rotornog bagera SchRs630 [9]. Bager radi na površinskom kopu uglja „Kolubara“ (Srbija). Uslovi rada i razlozi pojave pukotina slični su kao kod prethodno opisanih problema sa bagerom SRs1200 na istom površinskom kopu [7]. Pored analize uzroka, autori daju i projektno rešenje rekonstrukcije obrtne platforme, kao i numeričko-eksperimentalni model verifikacije projektnog rešenja.

Na kompaktnom rotornom bageru oznake SchRs800 koji radi na površinskom kopu uglja „Drmno“ (Srbija), autori Jovančić i drugi su uočili nekoliko potencijalnih problema vezanih prvenstveno za čeličnu konstrukciju [10]. Pukotine koje su se javljale na čeličnoj konstrukciji rezultat su nepovoljne koncentracije napona, neadekvatna geometrija i struktura materijala, kao i tehnologija upravljanja mašinom. Autori predlažu metodu dijagnostike u cilju prevencije većih oštećenja. Data su rešenja za popravke i rekonstrukcije postojećih problema i identifikovani uzroci radi prevencije budućih problema.

Na rotornom bageru ERs1250 koji radi na površinskom kopu „Granačica“, Gacko (Bosna i Hercegovina), došlo je do pojave pukotine na streli rotornog točka [11]. U ovom radu je locirana i analizirana pukotina koja je zahvatila gotovo 3/4 obima strele. Pukotina je rezultat konstantnog rada bagera u veoma teškim radnim uslovima, pri eksploataciji veoma čvrstog materijala. Numerička analiza urađena je metodom konačnih elemenata. Autori Djurdjević i drugi su na osnovu sprovedenih analiza, predložili rešenje sanacije pukotine uz dodavanje novog materijala po celom obimu pukotine sa spoljašnje i unutrašnje strane.

Početne postavke autora Bošnjak i drugi u radu [12] su da redizajn podsistema rotornog bagera treba imati sledeće ciljeve: bolja prilagođenost mašine radnim uslovima, lakše održavanje i rešavanje kvara elementa. U prvom slučaju prikazan je redizajn rotornog točka i pogona kopanja. Razmatran je rotorni bager SchRs350. Rezultati predloženih izmena doprineli bi boljem usklađivanju mašine radnim uslovima i lakšem održavanju. U drugom delu, kod bagera SRs1200 predložena su nova rešenja koja bi rešila postojeće probleme kod sistema za podizanje rotornog točka.

Optimizacija oblika i parametara kašike (vedrice) bagera takođe je značajna tema [13]. Adekvatnim oblikom kašike doprinosi se optimizaciji troškova eksploatacije. Autori Rusiński i drugi su u radu predstavili rezultate eksperimentalnih ispitivanja i numeričkih analiza. Analiza je sprovedena na dva bagera KWK1200 i KWK1500 na površinskom kopu lignita *Turów Bogatynia* (Poljska). Ispitivanja su sprovedena u realnim rudarskim uslovima. Korišćeni su savremeni numerički alati koji podržavaju procese projektovanja ovakvih konstrukcija. Pored tehnoloških i ekonomskih parametara, kao benefit analize uočeno je povećanje trajnosti konstrukcije i jednostavnija zamena delova podložnih habanju.

2.2 Analiza primenjenih osnovnih metoda procena rizika kod rudarske mehanizacije

Prva primena metode procene rizika FMECA datira iz 1949. godine kada je objašnjena i upotrebljena u vojne svrhe u Sjedinjenim Američkim Državama (MIL-P-1629) [14]. Dokument je unapređen i revidiran 1980. godine (MIL-STD-1629A) [15]. Metoda FMEA uz metodu FMECA se spominje u NASA (engl. *National Aeronautics and Space Administration*) dokumentima odnosno u spisima njihovih izvođača radova [16], [17]. Metoda FMEA korišćena je za najznačajnije NASA projekte kao što su Apolon, Viking, Galileo, Magelan i sl. Tokom 1967. i 1968. godine metode FMECA i FMECA počele su se primenjivati i u oblastima civilnog vazduhoplovstva i automobilske industrije.

Metode FMEA i FMECA omogućavaju analizu rizika odnosno ocenjivanje tehničkih sistema u različitim stadijumima životnog veka (konceptijsko i idejno rešenje; razvoj i projektovanje; proizvodnja, montaža i puštanje u rad; korišćenje i održavanje; rashodovanje ili revitalizacija [18]) pri pojavljivanju različitih problema (zastoja, kvarova, potencijalnih havarija i sl.) [19]. FMECA metoda usmerena je ka preventivnom pristupu problemu. Bazira se na optimizaciji dizajna, proizvodnih procesa i održavanja kroz re-inžinjerung. Cilj je da se poboljša trenutna situacija i uklone svi potencijalni problemi [19]. FMEA metoda je alat za identifikaciju potencijalnih uzroka kvarova. Bazira na pouzdanosti proizvoda ili procesa [20].

Detaljniji prikaz obe metode će biti dat u poglavlju 3.1. U oblasti rudarstva, pogotovu kod rudarske mehanizacije, rizik nije dovoljno analiziran u naučnoj i stručnoj literaturi. Prisutno je nekoliko radova koji će biti predstavljeni u nastavku.

Kvalitetno održavanje velikih tehničkih sistema podrazumeva ostvarivanje maksimalne moguće pouzdanosti opreme tj. postizanje što većeg vremena rada. Pri tome se obezbeđuje i produžetak životnog veka postrojenja. Autori Kumar & Srivastava [21] uočavaju pored proaktivnog vida održavanja i sveobuhvatniji pristup u vidu TPQM (engl. *Total Planned Quality Maintenance*) programa koji uključuje preventivne, prediktivne i planske aktivnosti održavanja. Razmatra se struktura održavanja zasnovana na programu Optimalnog održavanja (engl. *the Optimal Maintainability Program – OMP*) bagera prema uslovima. Program uključuje funkcionalne analize bagera, njegovih sklopova i podsklopova. Prikazan je okvir za novu metodologiju održavanja, otkrivanje kvarova na komponentama rudarskog bagera i kvarova vezanih za sistem. Metodologija se bazira na modelima FMECA, FMEA i CBM (engl. *Condition Based Maintenance*) koji predviđaju kvar ili pogoršanje komponenata bagera.

Mogućnost primene metoda FMEA i FMECA za analizu uzroka i posledica postupaka na bagerima prikazana je u radu [19] autora Kumar i Kumar. Dat je pregled osnovnih postulata metoda, a za studiju slučaja korišćene su obe metode na 5 različitih bagera iste kategorije. Na osnovu sprovedene analize autori su locirali mesta sa povećanim rizikom. Za sva mesta izračunat je RPN, definisan uzrok, posledice, preventivne i korektivne mere. Potom su ponovo izračunali performanse rizika RPN u slučaju da se ispoštuju sve preporuke dobijene analizom. Novi RPN ima značajno umanj enje u odnosu na početni. Metode su pokazale da se time rizik može svesti na prihvatljivu vrednost.

Problemi procene rizika rudarskih kontinualnih sistema su veoma retki u relevantnoj literaturi. Tehnički propisi, preporuke i standardi koji se bave procenom rizika mašina za površinsku eksploataciju takođe ne postoje. U radu autora Pantelića i drugih se postavlja pristup u kvantifikaciji rizika rotornih bagera uzimajući u obzir sve njihove strukturne i eksploatacione specifičnosti [22]. Koristi se S-FMECA (engl. *Service Failure Modes, Effects and Criticality Analysis*) model kao jedan od osnovnih analitičkih alata za formiranje optimalne koncepcije održavanja. U modelu se zadržavaju postojeći parcijalni indikatori rizika. Podaci za njihovo izračunavanje dobijeni su na osnovu praćenja rada mašine u definisanom vremenskom intervalu. Za parcijalne indikatore verovatnoća pojavljivanja i ozbiljnost posledica su definisane jednačine za numeričko izračunavanje. Mogućnost detekcije se vrednuje prema datom opisu. Na osnovu postavljenog modela autori su locirali najveći rizik zastoja sa mašinskog aspekta na guseničnom transportu bagera i povratnom bubnju transportera 3. Za elektro deo najveći rizik od zastoja je usled kvara na visokonaponskom kabl u napajanja. Tematika je dodatno proširena kroz doktorsku disertaciju autora Pantelića pod nazivom „Unapređenje koncepcije održavanja putem operativnog upravljanja sigurnošću bagerskih jedinica na površinskim kopovima“ [23]. Autor je na primeru rotornog bagera SRs1200 dokazao da visoka pouzdanost nije uvek u korelaciji sa malim rizikom i obrnuto. Neki sklopovi kao što su pogon dizanja strele rotornog točka i noseća čelična konstrukcija imaju visoku pouzdanost, ali i visoku kritičnost sa aspekta rizika.

2.3 Analiza hibridnih modifikacija metoda procene rizika i metoda predikcije

Postojeće metode ocene rizika na osnovu RPN koncepta u okviru FMEA i FMECA metoda imaju dosta ograničenja. Nedostaci su prikazani u uvodnom poglavlju i biće detaljno objašnjeni u poglavlju 3.1. Različiti autori su iz tih razloga predložili nekoliko rešenja u cilju prevazilaženja nedostataka. Osnovni nedostatak je lociran u subjektivnosti postojećih tradicionalnih metoda izračunavanja RPN. Predstavljeni su sintezni (hibridni) modeli, sačinjeni od različitih matematičkih metoda. Najveći broj radova izmene usmerava ka primeni fazi skupova, višekriterijumskih metoda, metoda simulacija i predikcija. U nastavku je data analiza literature u skladu za različitim predloženim izmenama. Predmet analize nisu samo rudarske mašine, već različiti tehnički sistemi i inženjerski problemi posmatrani kroz predložene metode autora.

Autori Wang i drugi [24] primenili su novu metodologiju na bazi fazi logike za analizu rizika (bezbednosti) složenih tehničkih sistema. Oni predlažu dekompoziciju složene strukture sistema na hijerarhijske nivoe. Fazi logika se koristi za opis svakog kvara. Za analizu kvara posmatraju se tri osnovna parametra: verovatnoća pojavljivanja, ozbiljnost i verovatnoća posledica kvara. Preko lingvističkih opisa parametri se preslikavaju u funkcije pripadnosti fazi skupova. Izlazne vrednosti iz fazi modela takođe su lingvistički opisane. Izlazni oblik, tj. bezbednosni izrazi preslikani su u funkcije pripadnosti skupova. Kako bi se umanjila nesigurnost u proceni bezbednosti, autori predlažu primenu metode ER (engl. *Evidential Reasoning*) što doprinosi oceni bezbednosti čitavog sistema. Studija slučaja je urađena u oblasti pomorske industrije na hidrauličnom sistemu dizalice u marini.

Model sa implementacijom fazi logike u FMECA metodu, opisali su i Bowles & Peláez [25]. Tri parcijalna indikatora rizika (verovatnoća pojavljivanja, ozbiljnost posledica i mogućnost detekcije) autori su lingvistički opisali. Na osnovu datih opisa, parcijalni indikator se preslikavaju na fazi skupove preko funkcije pripadnosti i kombinuju upoređivanjem sa pravilima iz bazi pravila. Potom, vrši se kalkulacija na osnovu MIN-MAX fazi zaključivanja. Na kraju se defazifikacijom procenjuje stepen rizika. Autori zaključuju da ovakav pristup donosi nekoliko prednosti: lingvistički opis pomaže analitičaru da bolje sagleda situaciju; mogu se na konzistentan način koristiti dvosmislene, kvalitativne ili neprecizne informacije ili kvantitativni podaci; doprinosi se fleksibilnosti modela. Studija slučaja je sprovedena na dva tipa podataka. Prvi je zasnovan na poznatim ulaznim podacima prikupljenim iz analize pouzdanosti. Drugi tip je zasnovan na ranoj fazi procesa projektovanja te nisu prisutni dovoljno detaljni podaci. Oba slučaja pokazuju da primena fazi logike u proceni rizika može biti značajan alat u fazi projektovanja ili detekcije opasnosti čime se stvara podloga za preventivne aktivnosti.

Predloženo je i kombinovanje FMECA i Monte Carlo simulacije kao metode za procenu rizika [26]. Autori Bevilacqua i drugi, predlažu novi pristup računanja RPN, sa proširenim brojem parcijalnih indikatora rizika. Zbir ponderisanih vrednosti 6 parcijalnih indikatora (bezbednost, značaj mašine u proizvodnom procesu, troškovi održavanja, učestalost otkaza, vreme zastoja i uslovi rada) pomnožen je sa sedmim indikatorom (stepen otežanosti pristupu mašini) čime je dobijena RPN vrednost. Studija slučaja je urađena na postrojenju za integrisanu gasifikaciju sa kombinovanim ciklusom, naftne rafinerije u Italiji.

Na osnovu rezultata primene metoda FMEA, cilj se usmerava ka osiguranju kvaliteta i poboljšanju pouzdanosti tehničkog sistema. Ako se do rezultata dolazi međuzavisnošću različitih načina kvara sa nesigurnim i nepreciznim informacijama, autori Xu i drugi smatraju da je validnost takve analize upitna. Kako bi se problem rešio, predlažu model zasnovan na fazi logici u okviru FMEA metode [27]. Fazi ekspertska procena je integrisana u model čime je omogućena razmena informacija među stručnjacima iz različitih disciplina. Studija slučaja je urađena na turbogeneratorima dizel motora. Autori navode nekoliko prednosti novog pristupa. Problemi otkaza u FMEA metodi su dati kao fazi promenljive što je realističnije i fleksibilnije. Može se uočiti međuzavisnost različitih kvarova i efekata kvarova. U ekspertske pristup modela u potpunosti su uključeni inženjersko znanje i iskustvo.

Za analizu i procenu rizika ozbiljan problem može biti primena podataka koji su neprecizni, nepouzđani ili nedovoljni. Ako bi ekspert na osnovu toga, dodeljivao ocene od 1 do 10 prema RPN metodi, rezultat ne bi prikazao realno stanje sistema. Na takvim podacima ne treba insistirati. Autori Pillay & Wang potvrđuju da je primena lingvističkih termina značajno poboljšanje [28]. Eksperti mogu dodeliti težinu razmatranim faktorima, tako da na osnovu RPN rezultata identifikovani događaji neće biti zanemareni. Predložena je upotreba fazi logičkih operatera i teorije nejasnih granica skupova kao poboljšanje FMEA metode. Autori pristup vide u dva procesa. Prvi proces podrazumevao bi formalne procene rizika (skrining opasnosti). Tada je potrebno samo relativno rangiranje, gde bi se ustanovile opasnosti sa visokim i opasnosti sa niskim rizikom. U ovom procesu se ne koriste težine lingvističkih promenljivih. U drugom delu (procena opasnosti) koristile bi se težine lingvističkih promenljivih. Na osnovu detaljne analize svake opasnosti proizvelo bi se precizno rangiranje rizika i alokacija resursa.

Metoda FMEA može biti zasnovana i na proceni rizika sa aspekta troškova životnog veka [29]. Rhee i Ishii navode da je cilj metode koju predlažu da se analiziraju alternativna rešenja u fazi dizajna sistema, čime bi se u kasnijim fazama redukovali troškovi. Simulacija u metodi je urađena primenom Monte Carlo metode, kako bi se uzele u obzir nesigurnosti u vremenu detekcije, pojavljivanja, kašnjenja, zastoja i sl. Studija slučaja urađena je na velikom akceleratoru čestica. Prikazane su prednosti predloženog pristupa prvenstveno u: predviđanju troškova kvarova tokom životnog ciklusa, merenju rizika, planiranju održavanja i postizanju većeg vremena rada sistema.

Metoda FMEA u kombinaciji sa fazi logikom, primenjena je za procenu rizika u nuklearnim reaktorima [30]. Postavka metode zadržala je tradicionalne FMEA parcijalne indikatore (O, S, D). Polazne vrednosti modela dobijaju se na osnovu mišljenja stručnjaka u skladu sa lingvističkim opisima. Rezultat je prikazan kao konceptualna konfrontacija između tradicionalnog RPN i FRPN (fazi RPN), gde se pokazalo da veći potencijal ima primena fazi koncepta. Guimarães i Lapa u analizi dolaze do nekoliko zaključaka i predloga budućim korisnicima. Smatra se da je broj fazi pravila u funkciji složenosti problema kako bi se sve potencijalne situacije preslikale na fazi skupove. Predloženi model je pogodan za podatke o problemima i bezbednosti koji su često nepotpuni, nepouzdati ili nedostupni. U slučaju promene nekog od parametara, primenom FIS (engl. *Fuzzy Inference System*) model je jednostavno prilagodljiv.

Autori Wang i drugi predlažu fazi FMEA metodu koja omogućava da se parcijalni indikatori rizika i njihova relativna težina procene na lingvistički način [31]. Parcijalni indikatori rizika tretiraju se kao nejasne promenljive i procenjuju se korišćenjem fazi lingvističkih promenljivih. Smatraju da kombinacije preciznih granica parcijalnih indikatora rizika i fazi RPN ili definisana IF-THEN fazi pravila nisu najbolja rešenja. Predloženi model uzima u obzir relativni značaj među parcijalnim indikatorima rizika, što čini fazi FMEA metodu realističnijom i fleksibilnijom za analitičara. Fazi RPN je definisan kao ponderisana geometrijska sredina fazi ocena za parcijalne indikatore i računaju se korišćenjem skupova alfa nivoa i modela linearnog programiranja. Kako bi se došlo do krajnjeg ranga, koristi se defazifikacija (metoda „centroid“) u kojoj je predložen novi izraz zasnovan na skupovima alfa nivoa.

U cilju smanjenja uticaja nedostataka tradicionalnog pristupa FMEA metode tj. RPN izračunavanja, Chin i drugi predlažu novi model [32]. Nedostatak u vidu uticaja različitosti mišljenja ekspertske grupe, može se korigovati primenom metoda za analizu višestrukih atributa. Razvijen je model rizika koristeći grupni pristup ER dokazanog rezonovanja koji uključuje procenu rizika. Faktori koji koriste strukture uverenja sintetišu pojedinačne strukture verovanja u strukture poverenja grupe i rangiraju očekivane rezultate rizika koristeći pristup minimalnog kajanja MRA (engl. *Minimax Regret Approach*). Studija slučaja i verifikacija modela je urađena na ribarskim plovilima.

Zammori i Gabrielli predlažu poboljšanje postojeće FMECA metode interakcijom sa višekriterijumskom metodom ANP (engl. *Analytic Network Process*) [33]. Parcijalni indikatori rizika su podeljeni na podkriterijume i raspoređeni u hibridnu (hijerarhijsku) strukturu odlučivanja koja na najnižem nivou sadrži uzroke neuspeha. Vrednost RPN se izračunava pravljenjem poređenja u parovima. Kvalitativne ocene i pouzdani kvantitativni podaci mogu biti uključeni u analizu bez upotrebe lingvističkih opisa. Autori smatraju da se poređenjem u parovima dobijaju relativne tj. komparativne, a ne apsolutne ocene, čime je jednostavnije doneti sud o važnosti rizika u fazi projektovanja/održavanja. Rezultate su verifikovali kroz studiju slučaja, a krajnji rezultat je prikazan i u grafičkom obliku.

U okviru FMEA metode primenjena je i kombinovana VIKOR-Fuzzy metoda za procenu rizika [34]. U tradicionalnom pristupu primene RPN koncepta, Liu i drugi su locirali dosta nedostataka. U metodi koju predlažu lingvističke promenljive prikazane su preko trapeznih ili trouglastih fazi brojeva i korišćene su za procenu ranga i težina parcijalnih indikatora rizika. Proširena VIKOR metoda je korišćena za određivanje prioriteta među rizicima. Model je verifikovan studijom slučaja u oblasti medicine.

Procena rizika od kvarova kod rudarskih mašina i opreme od velikog je značaja za uspostavljanje sistemskog održavanja. Model procene rizika od otkaza kod tehničkih sistema zasnovan na fazi logici i MIN-MAX kompoziciji predstavili su Petrović i drugi [35]. Parcijalni indikatori rizika zadržani su iz tradicionalnog RPN oblika, ali su iskazani u lingvističkom obliku. Studija slučaja je urađena na transporteru sa gumenom trakom u uslovima površinskog kopa uglja. Urađena je paralelna procena rizika tradicionalnim računanjem RPN vrednosti i primenom fazi logike. Na osnovu komparativne analize, definisane su sve prednosti predloženog modela.

Rizikom od sleganja zemljišta usled izgradnje metroa u urbanim gradskim područjima bavili su se Rafie i Namin [20]. Osnovna postavka FMEA metode, odnosno RPN je ista. Koriste tri parcijalna indikatora rizika (O, S, D). Umesto tradicionalnog pristupa, autori kao osnovu modela koriste FIS sistem. Parcijalne indikatore S i D dobijaju preko fazi skupova (pravila), dok se indikator O dobija preko neuronskih mreža. Na kraju se FMEA metoda razvija preko FRPN (engl. *Fuzzy Risk Priority Number*).

U radu pod nazivom „*Fuzzy-FMEA risk evaluation approach for LHD machine-A case study*“ [36] se naglašava potreba za povećanjem produktivnosti rudarske industrije u cilju ispunjavanja potrebne proizvodnje. Tokom rada oprema koja se koristi je sklona potencijalnim kvarovima. Navodi se tradicionalni pristup procene rizika na bazi FMEA metode koji je lak i jednostavan za upotrebu, ali sadrži i značajne nedostatke. Autori Balaraja i drugi predlažu pristup upravljanju rizikom primenom fazi logike odnosno fazi pravila. Fuzzy-FMEA model se koristi za lociranje povećane performanse rizika u cilju prevencije kvara. Studija slučaja se fokusira na podzemne rudnike, tj. mehanizaciju u njima. Locirano je 16 potencijalnih rizika od kvara na podsistemima. Najveća vrednost performanse rizika je na elektro podsistemu. Urađena je uporedna analiza izračunavanja tradicionalnog RPN i FRPN.

Da subjektivnost (greške) ljudskog faktora u FMEA metodi ima značajnu ulogu smatra dosta autora. Iz tog razloga Łapczyńska & Burduk preporučuju korišćenje nejasnih skupova tj. metode na bazi fazi logike - fuzzy FMEA (fFMEA) [37]. U radu je opisan primer upotrebe metode kroz studiju slučaja kontrole kvaliteta u automobilske industriji. Rizik sa aspekta kvaliteta automobila je posebno izražen s obzirom da je kvalitet usko povezan sa sigurnošću korisnika (npr. kočioni sistem, vazdušni jastuci i sl.). Korišćenjem lingvističkih promenljivih subjektivnost ljudskog faktora je umanjena. Prikazani model koristi MIN-MAX kompoziciju sa navođenjem da se na taj način dobijaju precizne procene rizika za razliku od drugih kompozicija. Prednosti prezentovanog modela su: manja podložnost greškama ljudskog faktora (pr. rizik može biti ocenjen u dve grupe – nizak i veoma nizak – sa većom ili manjom pripadnošću nekom od dva skupa); veća preciznost ako su fazi pravila adekvatno pripremljena; dodeljivanje težina parcijalnim indikatorima rizika.

U radu [38], Khodadadi-Karimvand i drugi su definisali FMEA model procene rizika na bazi fazi logike koji se pokazao kao značajno precizniji u odnosu na tradicionalne modele. Prezentovani model sadrži i Fuzzy TOPSIS deo za potrebe identifikacije, rangiranje i određivanje prioriteta grešaka i faktora rizika. U radu je korišćena FMEA metoda za identifikaciju rizika. Potom je ispitivana relevantnost prioriteta faktora kroz metode: RPN, FRPN i TOPSIS. Fazi kompozicije su trouglastog oblika uz rangiranje prioriteta primenom Fuzzy-TOPSIS metode. Tradicionalna FMEA metoda je poboljšana korišćenjem fazi skupova.

2.4 Analiza koncepta upravljanja životnim vekom i održavanje prema riziku

Održavanje kompleksnih tehničkih sistema teži ka usavršavanju koncepcije i organizacije postupaka i prevenciji potencijalnih ozbiljnih kvarova. Vreme zastoja potrebno je minimalizovati odnosno tehnički sistem treba biti u što dužem vremenskom intervalu radno sposoban. Različiti autori bavili su se ovom temom. U nastavku je dat pregled literature koja se tiče upravljanja održavanjem na bazi rizika.

Generalna svrha održavanja je da se smanji rizik poslovanja. Od velike je važnosti da pouzdanost i procena rizika budu sastavni deo procesa planiranja i kontrole održavanja. Kumar [39] smatra da se prilikom donošenja odluka o izboru strategije održavanja mora uzeti u obzir analiza tehničkih karakteristika sistema i ekonomske i bezbednosne posledice svakog alternativnog izbora. U radu [39] autor naglašava da je potrebna integracija metoda analize rizika u svim fazama životnog veka tehničkih sistema. Pri tome se faze životnog veka odnose na period od konceptijskog rešenja, preko projektovanja, dizajniranja i izrade, pa sve do procesa rada razmatranog tehničkog sistema. Zaključak je da procena rizika može biti korisna u velikom broju aktivnosti vezanih za održavanje. Na taj način se može doneti najbolja moguća odluka u skladu sa dostupnim alternativnima.

U radu „*Risk Based Maintenance Optimization: foundational issue*“ [40] Apeland i Aven predstavljaju osnovne smernice sistema održavanja na bazi lociranog rizika. Smatra se da optimizacija održavanja zasnovana na riziku treba biti integrisana u poslovno upravljanje i u održavanje komponenti sistema. Rad se bavi samo segmentima menadžmenta optimizacije održavanja. Definisane su osnovne organizacione preporuke. U radu nije formiran model lociranja i identifikacije rizika tj. kritičnih komponenti sistema koje izazivaju povećan rizik.

Koncept održavanja prema riziku treba da smanji rizik od kvarova tehničkih sistema. Koncept koji su Khan i Haddara predstavili [41] je zasnovan na analizi pouzdanosti sa pitanjima vezanim za bezbednost ljudi i opreme i životne sredine. Benefit se ogleda i u smanjenju ukupnih troškova životnog ciklusa. Metoda koju predlažu je sveobuhvatna i kvantitativna. Podeljena je u tri glavna modula. Prvi modul je generalna procena rizika koja identifikuje i locira rizik. Drugi modul je kalkulacija rizika, sa merom prihvatljivosti. Treći modul je planiranje održavanja na osnovu prethodna dva. Polazna pitanja koja se postavljaju su: Šta može dovesti do otkaza ? Kako to može dovesti do otkaza ? Kakve su posledice ? Kolika je verovatnoća nastanka otkaza ? Koliko često bi održavanje komponenti sprečilo otkaz ? Autori su metodologiju primenili u studiji slučaja na sistemima za grejanje, ventilaciju i klimatizaciju. Sistem je podeljen na 10 jedinica. Analiza je pokazala da je najveći rizik lociran na: motoru, jedinici za zaštitu od zamrzavanja, releju i ventilatoru za dovod vazduha. Za sve jedinice je napravljen raspored pregleda. Analitičkom analizom uočeno je da bi se ovakvim pristupom rizik redukovao na prihvatljiv nivo.

Isti autori formulišu metodologiju za definisanje optimalnog programa kontrole i održavanja tehničkih sistema [42]. Kao i u prethodnom radu, pristupa se analizi pouzdanosti u korelaciji sa procenom pouzdanosti kako bi se formulisalo optimalno održavanje. U prvom delu metodologije formiraju se scenariji verovatnoće kvara opreme. Na scenarije sa najvećom verovatnoćom radi se detaljna analiza posledica. Rizik se računa kombinovanjem posledica i verovatnoće pojavljivanja. Rezultati se upoređuju sa kriterijumima koji se usvajaju kao prihvatljivi. U cilju minimalizacije rizika dobija se učestalost održavanja. Studija slučaja je urađena na pogonu proizvodnje etilen oksida. Najveći rizik je lociran na cevovodu za transport. Na osnovu podataka o kvarovima i funkcije distribucije pouzdanosti računaju se faktori rizika po zdravlje ljudi. Primenom analize obrnutog stabla grešaka računa se interval održavanja. Cilj je da se nivo rizika svede na prihvatljiv, što su autori postigli. Pored toga autori su uradili i analizu osetljivosti na promenu ulaznih parametara modela.

Arunraj i Maiti ističu da je od velikog značaja za kvalitetno održavanje korišćenje znanja o kvarovima i nezgodama [43]. Na taj način se postiže maksimalna moguća sigurnost uz najniže moguće troškove. Istraživanjem visokorizičnih lokacija tehničkog sistema, usmerava se održavanje kako bi se rizik sveo na prihvatljiv nivo. Održavanje na osnovu rizika može postati alat za planiranje održavanja. Autori u preglednom radu prikazuju metode za identifikaciju i klasifikaciju rizika na osnovu čega se definiše njihovo održavanje. Pregled radova je pokazao da ne postoji jedinstveno usvojen način da se izvrši analiza rizika i održavanje usmeri na izračunatom riziku. Pristupe koje su analizirali kvalifikovali su u 3 grupe metoda: kvalitativne, kvantitativne i polu-kvantitativne. U svim metodama koje su analizirali uočili su nedostatke u analizi nesigurnosti i osetljivosti.

Danas se primena održavanja prema riziku smatra naprednim pristupom u cilju optimizacije upravljanja imovinom i formiranja adekvatnog sistema održavanja. Autori Jaderi i drugi u radu [44] daju prikaz tradicionalnog sistema održavanja prema riziku i novog pristupa koji sadrži fazi sistem u modelu. Analiza u studiji slučaja je usmerena ka hemijskoj industriji. Model sadrži četiri faktora posledica koji obuhvataju: operativni uticaj, operativu fleksibilnost, troškove održavanja i uticaj na bezbednost i životnu sredinu. Skala učestalosti i faktori rizika lokalizovani su za tradicionalni i fazi model. Najveći rizik kod inovativnog pristupa je izračunat na 10 lokacija od razmatranih 107. Na osnovu rezultata analize menadžmentu je predloženo da se aktivnosti održavanja u postrojenju usklade sa dobijenim rezultatima. Date su preporuke za adekvatno održavanje, čime bi se na razmatranim lokacijama umanjio rizik do mere prihvatljivog.

Yeter i drugi, za potrebe analize rada i održavanja vetro-elektrana na moru predlažu metodu na bazi rizika [45]. U prvoj interakciji se vrši procena optimalnog broja vetro-turbina sa ciljem minimalizacije troškova. U drugoj interakciji vrši se provera pouzdanosti dizajna na osnovu graničnog stanja zamora. Formira se analitički odnos troškova proizvodnje i sigurnosti konstrukcije tokom životnog veka. Elementi u sistemu se sa aspekta pouzdanosti posmatraju kao redna veza. Za očekivani trošak otkaza koristi se metoda stabla događaja. Na osnovu sprovedene analize optimalan broj instalacija je 60, a razvijen je i prikazan i novi pristup planiranja provere i održavanja kako bi se maksimizirale prednosti provera za sisteme sa više parcijalnih jedinica.

U radu [46] Leoni i drugi prikazuju tri različite metodologije održavanja zasnovanog na riziku. Studija slučaja je urađena na gasnom postrojenju odnosno regulaciono-mernoj stanici prirodnog gasa. Tri metode procene su uzete u obzir jer se ovakvo postrojenje u blizini urbanih područja smatra izuzetno rizičnim. Analiza u metodologijama je usmerena ka potencijalnim posledicama. Cilj je da se prikažu najkritičnije komponente, kao prioriteti za proces održavanja. Prva metoda uključuje analizu verovatnoće pojavljivanja i učestalosti pojavljivanja, koristeći *Bayesian Network* i FMEA metodu respektivno. U drugoj metodi je urađena kvantitativna analiza rizika primenom softvera *Safeti*. Treća metoda koristi softver *Synergi Plant* koji obezbeđuje plan održavanja na osnovu rizika, kroz semi-kvantitativnu analizu rizika. Autori su zaključili da je izbor najpogodnije metode u funkciji tipa dostupnih podataka i u skladu sa tim su i dali preporuke.

3. PREDMET ANALIZE

Istraživanje koje je obavljeno u disertaciji usmereno je ka strukturnom definisanju, razvoju matematičkog i konceptijskog modela i ka razvoju algoritma ocene rizika kod rudarske mehanizacije prevashodno rotornih bagera. Rizik se posmatra sa aspekta strukturne stabilnosti i neplaniranih zastoja odnosno prekida proizvodnog procesa. Izlazne informacije iz modela treba da ukažu na mogućnosti optimizacije postojećih sistema održavanja rudarskih mašina. Na taj način se politika održavanja kompanija usmerava ka naprednijim pristupima preventivnog održavanja. U nastavku su date definicije rizika i pratećih pojmova značajnih za razumevanje sveobuhvatnog pristupa upravljanju rizikom. Prikazane su osnovne informacije o rotornim bagerima koji su predmet analize i pregled teorijskih osnova različitih sistema održavanja.

3.1 Rizik kao segment upravljanja imovinom

Jedan od ciljeva upravljanja imovinom predstavlja sistemska analiza i procena rizika. Upravljanje imovinom kao i rizik definisani su ISO standardima. Smernice u oblasti upravljanja imovinom definisane su standardom ISO 55000:2014 (Upravljanje imovinom – Pregled, principi i terminologija) [47], dok su standardom ISO 31000:2018 (Upravljanje rizikom – Smernice) [48] definisane smernice u oblasti rizika. Prema oba standarda osnovna definicija rizika je „*efekat neizvesnosti na ciljeve*“ [47]–[50]. Svaki vid odstupanja od očekivanog smatra se efektom. To znači da efekat može biti pozitivan i/ili negativan. Neizvesnost predstavlja stanje koje je uzrokovano prvenstveno nedostatkom informacija [49]. Ciljevi mogu imati različite aspekte i kategorije i mogu biti primenjene na različite nivoe [47], [48].

Kako bi se u dovoljnoj meri uočila sveobuhvatnost rizika, potrebno je definisati pojmove koji učestalo idu uz njega, a to su: izvor rizika; potencijalni rizični događaji; posledice rizičnog događaja; i verovatnoće događaja [47], [48]. Izvor rizika je element koji samostalno ili u kombinaciji sa drugim može da ima potencijal da dovede do rizičnog događaja [48], [50]. Potencijalni rizični događaj je promena okolnosti koja može imati jednu ili više pojava, kao i uzroka i posledica. Može biti nešto što se očekuje a ne dešava se ili se ne očekuje a dešava se [48], [50]. Posledice rizičnog događaja definišu se kao ishodi koji utiču na ciljeve. Pri tome posledice mogu biti izvesne ili neizvesne sa pozitivnim ili negativnim i direktnim ili indirektnim efektima na postavljene ciljeve [48]. Izražene su kvantitativno ili kvalitativno i mogu imati kumulativni efekat. Verovatnoća događaja iskazuje mogućnost da se rizični događaj desi [48], [50].

Upravljanje rizikom sadrži međusobno povezane i zavisne aktivnosti u cilju usmeravanja organizacije ka kontroli rizika [48]. Osnovna svrha upravljanja rizikom je zaštita vrednosti dobra. Zakonom o smanjenju rizika od katastrofa i upravljanju vanrednim situacijama Republike Srbije (član 2, paragraf 5), upravljanje rizikom je definisano kao „*skup mera i aktivnosti koje se sprovode u cilju implementacije politike smanjenja rizika od katastrofa kao i administrativno operativnih i organizacionih veština i kapaciteta za njihovo sprovođenje*“ [51]. Proces upravljanja rizikom uključuje primenu procedura, praksi, aktivnosti komuniciranja i konsultovanja, tretmana, praćenja, evidentiranja i izveštavanja o riziku. Sastavni je deo upravljanja i donošenja odluka kroz integraciju u strukturu i politiku organizacije [48].

Procena rizika je sveobuhvatni proces identifikacije, analize i izračunavanja rizika [48], [50]. Prema prethodno pomenutom zakonu Republike Srbije (član 2, paragraf 13), procena rizika se definiše kao „*utvrđivanje prirode i stepena rizika potencijalne opasnosti, stanja ugroženosti i posledica, koje mogu da ugroze živote i zdravlje ljudi, posao, službu i životnu sredinu*“ [51].

Identifikacija rizika podrazumeva pronalaženje, prepoznavanje i opis rizika. Kvalitet i ažurnost informacija ima značajnu ulogu u identifikaciji [48]. Osnovna pitanja koja se postavljaju u ovom postupku su: šta, gde, kada, zašto i kako bi se nešto moglo dogoditi ? [50]. Proces pronalaženja i kategorizacije elemenata rizika (izvora ili opasnosti, događaja, posledice i verovatnoće) je uključen [48].

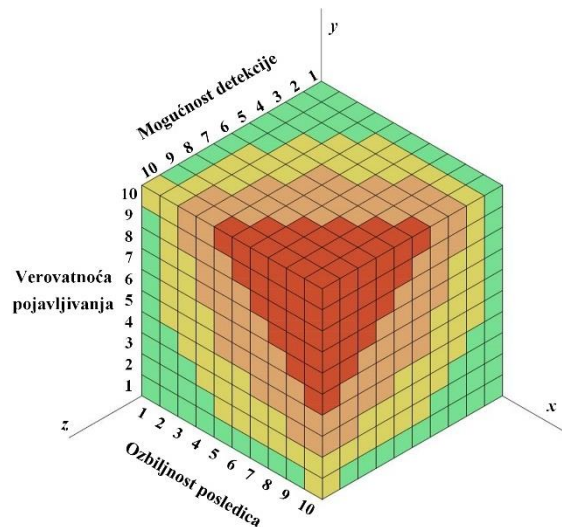
Analiza rizika je sistemski proces koji treba da doprinese shvatanju prirode rizika i njegovih karakteristika. U analizi je uključeno detaljno razmatranje neizvesnosti, izvora, posledica, verovatnoće događaja, različitih scenarija, mogućnosti kontrole. Koliko će analiza biti detaljna i složena zavisi od svrhe analize, dostupnosti i pouzdanosti podataka i raspoloživih resursa. Tehnike analize mogu biti kvalitativne, kvantitativne ili kombinovane u zavisnosti od namene i okolnosti. Treba naglasiti da se veoma neizvesni događaji i događaji sa teškim posledicama često teško identifikuju i analiziraju. Analiza rizika treba da doprinese formiranju ulaznih podataka za izračunavanje rizika, za odluke o tome da li treba i kako tretirati rizik i za dalju strategiju upravljanja rizikom [48], [50].

Izračunavanje rizika doprinosi dobijanju podrška u donošenju odluka i olakšava posao donosiocu odluke. U ovom delu se podrazumeva poređenje rezultata analize rizika sa utvrđenim kriterijumima rizika da bi se utvrdilo gde je potrebna dodatna aktivnost. Ovo može dovesti do odluke da se: ne radi ništa dalje; razmotre opcije tretmana rizika; preduzme dalja analiza radi boljeg razumevanja rizika; održava postojeća kontrola; preispitaju ciljevi; i sl. [48], [50].

3.1.1 Osnovne metode procene rizika

Kod kompleksnih tehničkih sistema osnovni alati za procenu i upravljanje rizikom su metode: FMEA i FMECA. Metode su definisane i opisane međunarodnim standardom ISO/IEC 31010 [52]. Obe metode su osmišljene 60-tih godina za potrebe vazduhoplovne industrije u Sjedinjenim Američkim Državama. Od tog perioda aktivno ih koristi NASA. Vremenom su metode dodatno unapređivane. Široku primenu pronalaze i danas. Baziraju se na dekompoziciji sistema ili elemenata na jednostavne činioce [50]. Pri analizi uzimaju u obzir način kvara, verovatnoću pojavljivanja i verovatnoću otkrivanja režima kvara [19]. Nivo rizika se kod obe metode dobija računanjem performanse rizika (RPN). U performansu rizika su integrisana tri parcijalna indikatora koja direktno opisuju rizik kao sveobuhvatni pojam. Prvi parcijalni indikator je verovatnoća pojavljivanja (O ili PF). Ovaj indikator iskazuje nivo neizvesnost tj. ukazuje na verovatnoću da će doći do neočekivanog događaja. Drugi parcijalni indikator je ozbiljnost posledica (S ili FDV). Predstavlja meru ozbiljnosti posledica događaja. Mogućnost detekcije (D ili PFR) je treći parcijalni indikator. Ukazuje na verovatnoću da kontrola može locirati i blagovremeno preventivno delovati u sprečavanju događaja [53].

Računanje performanse rizika postojećim (tradicionalnim) metodama postiže se kumulativnim množenjem tri parcijalna indikatora. U koraku koji prethodi formirani ekspertski tim u skladu sa opisom [54], ocenjuje parcijalne indikatore. Kod metode FMEA obično se primenjuje skala od 1 do 5, dok se kod metode FMECA koristi skala od 1 do 10. Pri tome manji broj označava manju verovatnoću pojavljivanja, ozbiljnost posledica ili nižu mogućnost detekcije. Množenjem sva tri se dobija vrednost RPN, pa se nivo rizika tumači u skladu sa veličinom dobijenog RPN. Opseg dobijenih vrednosti kod metode FMEA je od 1 do 125, dok je kod metode FMECA od 1 do 1000. Što je vrednost RPN veća, veća je ozbiljnost ukupnog rizika razmatranog objekta [55]. Ovakav pristup karakterističan je za tradicionalni pristup kod obe metode. Za metodu FMECA dat je grafički prikaz na slici 3.1.



Slika 3.1. Grafički prikaz FMECA metode

Metoda FMEA bazira na analizi oblika i posledica događaja (otkaza) na osnovu podataka koji su zabeleženi na listovima održavanja [50]. Usmerena je ka implementiranju pouzdanosti u fazu dizajniranja i projektovanja tehničkog sistema. U prvoj fazi je potrebno izvršiti dekompoziciju tehničkog sistema na sklopove, podsklopove i komponente [19]. Baza podataka se potom formira se na osnovu istraživanja i prikupljanja informacija o svim mogućim načinima otkaza, uzrocima i posledicama. U fazi dizajna i projektovanja, ovom metodom se mogu definisati: specifični zahtevi korisnika, načini otkaza, ozbiljnosti posledica otkaza; verovatnoća da će do otkaza doći [56]. Značajnu ulogu kod ove metode ima iskustvo stečeno na sličnim postojećim sistemima ili procesima.

Metoda FMECA bazira na analizi vrste, efekta i kritičnosti događaja (otkaza). Procena rizika razvija se na osnovu analize posledica po proizvodnju. Predstavlja sistemski proces koji omogućava definisanje aktivnosti usmerenih ka smanjenju rizika. Smatra se da predstavlja proširenu verziju FMEA metode. Pristup bazira na identifikovanju i opisivanju svake vrste potencijalnog otkaza. Analiza se sastoji od tabelarnog ili grafičkog prikaza određenih vrsta otkaza, njihovoj vezi sa posledicama i uzrocima, korektivnim merama, kritikama i drugim podacima vezanim za dizajn, proizvodni proces, održavanje i dr. [19]. Metoda je korisna ne samo u procesu dizajna (projektovanja) već i u postupcima proizvodnih procesa i planiranja preventivnog održavanja. Suština ove metode je da se identifikuju i spreče poznati i potencijalni problemi proizvodnje pre nego što se stvarno desi [19]. Za manje rizične i manje kompleksne tehničke sisteme, smatra se prikladnom i veoma isplativom metodom [54]. Metoda omogućuje ocenjivanje sistema u različitim stadijumima životnog veka (projektovanje, proizvodni proces, održavanje) pri pojavljivanju različitih problema (otkazi, greške, havarije, potencijalno ugroženi) [19], [50].

Osnovne postavke za procenu performanse rizika ove metode su [19]:

- Verovatnoća pojave otkaza (engl. *Probability of Failure* – PF);
- Težina vrste kvara (engl. *Failure Demerit Value* – FDV);
- Verovatnoća detekcije vrste otkaza (engl. *Probability of Failure Remedy* – PFR);
- Evaluacija na skali od 1 do 10;
- Procena rizika kroz performanse rizika RPN množenjem tri pokazatelja.

Treba naglasiti da je princip razlaganja parcijalnih indikatora rizika kod obe metode isti, sa razlikom u njihovom označavanju (FMEA: O, S, D; FMECA: PF, FDV, PFR). Postupak izračunavanja performanse rizika je kritikovan od velikog broja autora [28], [31], [32], [35], [50], [53]–[55], [57]–[59]. Svi autori dali su obrazloženja zašto ovakav tradicionalni pristup samo izračunavanja nije dobar. U nastavku je dat pregled uočenih nedostataka:

- Skala RPN nije kontinualna. Kod upotrebe skale 1-10 izračunavanjem se dobija samo 120 ishoda, a vrednost ocena se kreće u opsegu od 1 do 1000, što znači da nedostaje 88% ishoda. Kod upotrebe skale 1-5 dobija se samo 34 ishoda, pri čemu se ocene kreću od 1 do 125 pri čemu nedostaje 73% ishoda. Na primer, najveće dve vrednosti ishoda rizika mogu biti 900 i 1000 odnosno 100 i 125, pri čemu se vrednosti koje se nalaze između ne mogu dobiti [25], [31], [32], [54], [59];
- Različite vrednosti parcijalnih indikatora rizika mogu generisati iste ishode. Pri tome nema dalje analize ako jedan od parcijalnih indikatora ima kritično visoku vrednost. Na primer: $RPN1=3 \times 3 \times 3=27$; $RPN1=1 \times 3 \times 9=27$; [31], [35], [50], [54], [59];
- Ako su dva parcijalna indikatora visokog nivoa, a treći niskog nivoa može se desiti da krajnji ishod rizika bude manji od primera gde će sva tri parcijalna indikatora biti na umereno niskom nivou. Na primer: $RPN3=1 \times 8 \times 9=72$; $RPN4=4 \times 4 \times 5=80$; [35], [50];
- Model izračunavanja RPN je osetljiv. Mala promena u jednom parcijalnom indikatoru može dosta uticati na ostale faktore i obrnuto [32], [50], [54], [59];
- Ista značajnost je dodeljena svim parcijalnim indikatorima rizika. Ne uzima se u obzir različitost uticaja na konkretne studije slučaja pri procenama RPN [31], [50], [59];

- Ocene parcijalnih indikatora su subjektivne jer zavise od ekspertskog tima. Ishod se može predvideti [31], [50];
- Ozbiljnost posledica može biti u podređenom položaju kada režim otkaza ima višestruke efekte u različitim kategorijama, pošto se u proračunu koristi samo najozbiljniji efekat [25];
- I pored toga što su procene „kvantitativne“, oslanjaju se na kvalitativni pristup, predviđen nivo neuspeha, generičke raspodele i druge faktore koji su uglavnom pretpostavka, čini da model bude manje precizan nego što to izgleda [25], [31], [53].

3.2 Upotrebnii kvalitet tehničkog sistema

Rudarska mehanizacija, konkretno rotorni bageri, mogu se posmatrati kao tehnički sistem u širem kontekstu. Tehnički sistem je integrisani skup elemenata (ili podsistema), njihovih relacija i karakteristika koji u interakciji ostvaruju neku projektovanu funkciju [60]. Može se predstaviti kao realizovani oblik ljudskog znanja i umeća, nastao kao odraz tehnološkog ali i kulturnog, socijalnog nivoa ličnosti i društvene sredine [61]. Tokom perioda rada i održavanja, stanje tehničkog sistema se definiše preko specifičnih pokazatelja koji su uglavnom dobijeni merenjem radnih performansi, statističkom obradom, empirijskim zapažanjem i dr. [62].

Upotrebnii kvalitet (engl. *Quality of service*) predstavlja sveobuhvatni pojam koji definiše ukupna svojstva vezana za rad tehničkog sistema, kao i za potrebnu podršku kako bi sistem uspešno izvršavao svoju funkciju [63]. Upotrebnii kvalitet se definiše kao „*ukupni efekat radnih performansi koji određuje stepen zadovoljenja korisnika sistemom*“ [63]. Posmatra se kroz tehnički sistem u celini, kroz sve faze životnog ciklusa i sa različitih tehničkih i tehnoloških aspekata. Analiziraju se svojstva, performanse i njihov međusobni uticaj. U funkciji je vremena, što znači da zavisi od trenutka posmatranja [63], [64]. Upotrebnii kvalitet zavisi od nivoa realizacije performansi sigurnosti funkcionisanja (engl. *Dependability*) [63], [64].

Sigurnost funkcionisanja je koncept formiran u cilju stvaranja integrisanog pristupa upravljanju tehničkog sistema, pri čemu se obezbeđuje: upravljanje bezbednošću, raspoloživost, pogodnost održavanja i systemska podrška održavanju [65]. Definisana je kao „*moćnost izbegavanja češćih i ozbiljnijih kvarova na nivou iznad prihvatljivog očekivanja korisnika*“ [65]–[67]. Međunarodna elektrotehnička komisija (engl. *International Electrotechnical Commission*) kroz standarde IEC 300 i 60300 [68], [69] prepoznaje performansu raspoloživosti kao meru sigurnosti funkcionisanja, a samim tim i meru upotrebnog kvaliteta.

Za dalju analizu u disertaciji značajan parametar je performansa raspoloživosti koja predstavlja karakteristiku koja opisuje i ocenjuje rad i održavanje nekog tehničkog sistema. Veliki broj autora dao je definicije performanse raspoloživosti. Jedna od karakterističnih je da je performansa raspoloživosti „*sposobnost tehničkog sistema da bude u stanju u kome može da izvršava zahtevanu funkciju, pod datim uslovima i u datom trenutku vremena, odnosno u toku datog intervala vremena*“ [65], [70], [71]. Polazna pretpostavka je da tehnički sistem u trenutku $t = 0$ nije bio u radu i da je obezbeđeno neophodno snabdevanje (spoljnim) resursima [65], [72]. Ukoliko je tehnički sistem bio u skladištu, njegovo stanje nije poznato pa postoji neizvesnost da li će moći da se uključi u rad [18], [64], [70]. Performansa raspoloživosti se određuje u zavisnosti od parcijalnih indikatora funkcije bezotkaznog rada odnosno pouzdanosti (engl. *Reliability*) i indikatora pogodnosti održavanja (engl. *Maintainability*) [63]. U poslednje vreme je implementiran i treći indikator koji predstavlja podršku u održavanju (engl. *Supportability*) [63], [65]. Uticaj indikatora ogleđa se kroz vreme kada je tehnički sistem u radu i vreme izvršavanja aktivnosti održavanja.

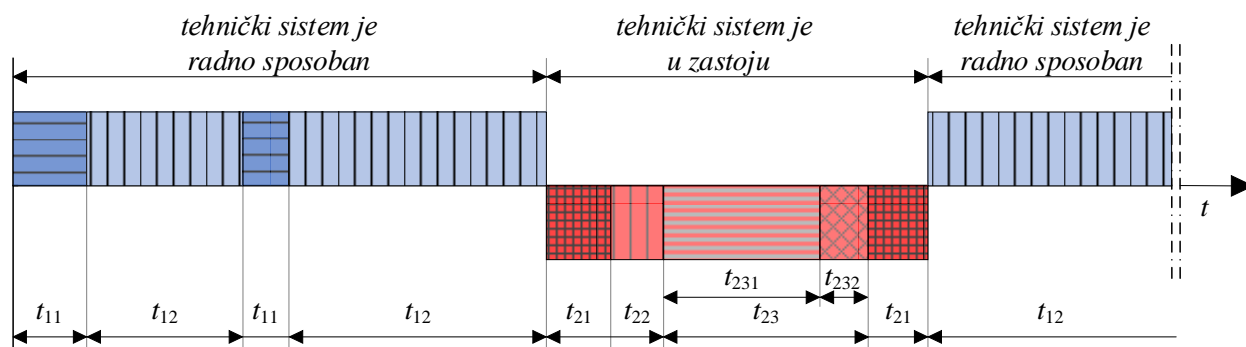
Tehnički sistem se smatra pouzdanim ako izvršava svoju definisanu funkciju bez kvara tj. otkaza. Pouzdanost se definiše kao „verovatnoća, na određenom nivou poverenja, da će tehnički sistem uspešno obavljati funkciju za koju je namenjen, bez otkaza i unutar specifičnih granica performansi, uzimajući u obzir prethodno vreme korišćenja sistema, u toku specifičnog vremena trajanja zadatka“ [70]. Odnosi se na vreme kada je tehnički sistem u radu. Jednostavnije se može reći da je pouzdanost „verovatnoća da će tehnički sistem uspešno vršiti funkciju kriterijuma u projektovanom vremenu rada i u datim uslovima okoline“ [18], [65], [70].

Pogodnost održavanja se definiše kao „skup konstruktivnih karakteristika tehničkog sistema koje mogu imati uticaj na vreme potrebno za aktivnosti održavanja“. U praksi se koriste i izrazi popravljivost i konstruktivna pogodnost održavanja [63]. Odnosi se na vreme kada je sistem u otkazu. Neki od faktora koji utiču na pogodnost održavanja su: tehnologičnost, unifikacija, dijagnostika, standardizacija, manipulativnost delovima, i dr. [63], [64].

Podrška održavanju je parcijalni indikator koji je po prirodi tehničkog, logističkog i administrativnog karaktera. Definiše se kao „sposobnost organizacije koja vrši održavanje, da pod datim uslovima obezbedi zahtevano održavanje tehničkog sistema, u skladu sa strategijom održavanja“ [63]. Kao i kod prethodnog indikatora, odnosi se na vreme kada je sistem u otkazu. Faktori koji utiču su: struktura i brojnost ljudstva, obučenos, posedovanje potrebnih priručnika, instrumenata i alata, opremljenost prostora održavanja, dovoljan broj rezervnih delova i drugog potrošnog materijala, i dr. [63], [64].

Otkaz ili kvar se mogu definisati kao prestanak radne sposobnosti elementa [70]. Otkaz elementa može, ali i ne mora značiti da će doći do otkaza celokupnog sistema. Da li će doći do otkaza čitavog sistema, zavisi od tipa veza između elemenata (redna ili paralelna) i od toga da li je element koji je otkazao od vitalnog značaja [70]. Sa aspekta raspoloživosti odnosno pouzdanosti, intenzitet otkaza je značajan parametar pri numeričkim analizama rada tehničkog sistema. Intenzitet otkaza (λ) predstavlja verovatnoću da element koji je u radu bez otkaza do nekog vremenskog trenutka (t), otkáže u sledećoj jedinici vremena (Δt) [62], [70]. Prikazuje promene verovatnoće otkaza u funkciji vremena. Može se izraziti kao odnos gustine raspodele pojave otkaza $f(t)$ i pouzdanosti $R(t)$ gde je $\lambda(t) = f(t) / R(t)$ [70].

Najjednostavniji prikaz i izračunavanje raspoloživosti dobija se preko vremenske slike stanja na kojoj se smenjuju vremena radne sposobnosti i vremena u zastoju [65]. Na slici 3.2 je primer vremenske slike stanja tehničkog sistema sa podeljenom strukturom vremena. Osnovna struktura vremena prikazana na slici sačinjena je od vremena radne sposobnosti (t_1) i vremena u zastoju (t_2). Vreme kada je tehnički sistem u radnoj sposobnosti može biti neaktivno vreme (t_{11}) kada je sistem radno sposoban ali nije angažovan, i aktivno vreme (t_{12}) kada je sistem radno sposoban i angažovan. Parcijalna vremena koja sačinjavaju ukupno vreme zastoja tehničkog sistema su: organizaciono vreme (t_{21}), logističko vreme (t_{22}), i vreme aktivnosti na održavanju (t_{23}). Vreme aktivnosti na održavanju se može raščlaniti na vreme korektivnih (t_{231}) i vreme preventivnih aktivnosti (t_{232}) [63], [65].



Slika 3.2. Vremenska slika stanja tehničkog sistema [63], [65]

Raspoloživost $A(t)$ se može računati na više načina. U odnosu na vremensku sliku stanja, računa se primenom jednačine [65]:

$$A(t) = \frac{\sum t_{11}, t_{12}}{\sum t_{11}, t_{12}, t_{21}, t_{22}, t_{23}} \quad (3.1)$$

Operativna raspoloživost $A_o(t)$ iz imenioca prethodne jednačine (vremena u zastoju) isključuje gubitke organizacionog i logističkog karaktera. Od ukupnog vremena zastoja koristi se samo vreme aktivne popravke (korektivno i preventivno održavanje), pa jednačina ima sledeći oblik [65]:

$$A_o(t) = \frac{\sum t_{11}, t_{12}}{\sum t_{11}, t_{12}, t_{23}} \quad (3.2)$$

Unutrašnja raspoloživost $A_i(t)$ uzima u obzir samo vreme korektivnog održavanja [65]:

$$A_i(t) = \frac{\sum t_{11}, t_{12}}{\sum t_{11}, t_{12}, t_{231}} \quad (3.3)$$

Raspoloživost se može analizirati preko velikog broja podataka pri čemu se dobija tačan izraz za funkciju raspoloživosti. Pri izračunavanju raspoloživosti tada se mogu koristiti srednje vreme između dva otkaza ($MTBF$) i srednje vreme otkaza (MDT) [65].

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MDT} \quad (3.4)$$

3.3 Rotorni bageri

Rotorni bageri su rudarske mašine neprekidnog (kontinualnog) dejstva. Karakteriše ih rad tokom cele godine uglavnom u režimu sa tri smene, pri promenljivim radnim i klimatskim uslovima. Primenuju se za otkopavanje različitih materijala, a najčešće sedimentnih stena (otkrivke - zemljanog materijala; i uglja - lignita). Nakon otkopavanja, otkrivka se transportuje na definisani prostor spoljašnjeg ili unutrašnjeg odlagališta. Ugalj se transportuje na deponiju, gde se odlaže ili dodatno prerađuje postupcima pripreme mineralnih sirovina radi usklađivanja sa energetskim zahtevima termoelektrana. Količine materijala su velike, postupci kompleksni, pa su takvim sistemima potrebne velike, kompleksne rudarske mašine.

Kontinualni sistemi eksploatacije organizovani su u tri povezana postupka: otkopavanje, transport i odlaganje/deponovanje. Uz rotorne bagere deo sistema su i transporter i odlagači ili drobilice/deponijske mašine. Sistemi na otkopavanju otkrivke su organizovani u tzv. BTO sisteme (bager-transporter-odlagač) [73], [74]. Na otkopavanju uglja sistemi su organizovani u tzv. BTD sisteme (bager-transporter-deponija) [73], [74]. U oba slučaja rotorni bageri su početni činilac u rednoj vezi.

Rotorni bageri su specifične mašine koje se ne izrađuju u velikim serijama [75]. Njihovo dizajniranje, projektovanje i izrada su usklađeni specifičnim uslovima. Period od definisanja potreba i zahtevane dokumentacije do puštanja bagera u rad je nekoliko godina. Veličina, oblik i konstrukcija rotornog bagera u funkciji je zahtevanog kapaciteta, karakteristika materijala koji se otkopava, načina utovara i drugih specifičnih uslova na radnom prostoru [73].

Životni vek rotornih bagera u funkciji je stanja čelične konstrukcije, a u većini slučajeva je isti ili približan životnom veku rudnika [76]. To znači da se aktivnosti na njihovom održavanju, revitalizaciji i modernizaciji trebaju uskladiti u cilju produženja veka trajanja. Ovakva situacija povećava rizik od kvara u komponentama i sklopovima. Zastoji radi popravke mogu biti dugotrajni, a okolnosti su nepovoljnije u slučaju havarije. Siguran i bezbedan rad bagera zahteva visok nivo poznavanja njihove strukture u pogledu čelične konstrukcije, mehaničkih komponenti, sistema upravljanja, elektro sistemima i sl. [75], [76].

Pojave koje stvaraju radna opterećenja bagera određuju i učestalost i karakter njihovog potencijalnog oštećenja. Takvi fenomeni se generalno mogu podeliti na [76]:

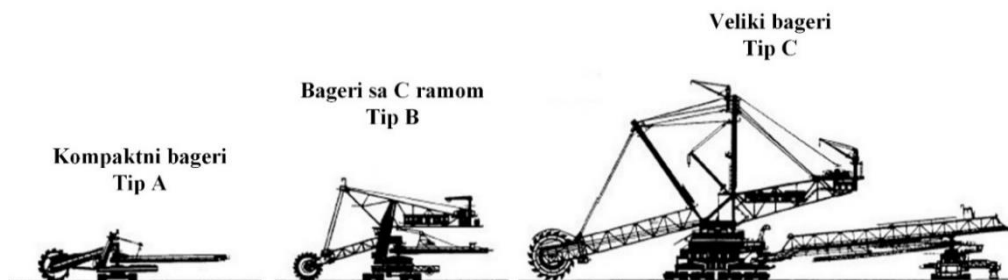
- Uzrokovane eksploatacijom (otkopavanjem): sila kopanja; dinamička naprezanja; opterećenja u kinematskim čvorovima; i sl.
- Uzrokovane operativnim kretanjem – prvenstveno tokom transporta bagera.

Uticaj na pojedinačne elemente bagera je različit i u funkciji se opsega i intenziteta interakcija [76].

Klasifikacija rotornih bagera može biti na osnovu velikog broja različitih parametara. Najčešće su u odnosu na teorijski kapacitet, konstruktivne karakteristike, specifičnu silu kopanja, tip transportnog uređaja, i sl. U praksi se najviše koriste podele bagera u odnosu na teorijski kapacitet i konstruktivne karakteristike. Prema kapacitetu dele se na [73], [75]:

- bagere malog kapaciteta (do 630 m³/h),
- bagere srednjeg kapaciteta (od 630 do 2500 m³/h),
- bagere velikog kapaciteta (od 2500 do 5000 m³/h),
- bagere vrlo velikog kapaciteta (od 5000 do 10000 m³/h),
- bagere izuzetno velikog kapaciteta (preko 10000 m³/h).

Nemački DIN 22261-3:2015-11 standard [77] na osnovu konstruktivnih karakteristika razlikuje tri kategorije bagera oznaka: A, B i C (slika 3.3). Svaka kategorija bagera je konstruktivno specifična i obuhvata opseg kapaciteta, mase, prečnika rotornog točka, snage pogona kopanja i dr. Bageri tipa A su kompaktne konstrukcije, tip B su bageri sa gornjom gradnjom u obliku latiničnog slova C, dok su bageri tipa C velikog kapaciteta sa pretovarnim mostom i konstrukcijom sa jednim ili dva centralna stuba.



Slika 3.3. Prikaz različitih kategorija bagera [73], [74]

Rotorni bageri A tipa su kompaktni bageri teorijskog kapaciteta do 6000 m³/h. Sa aspekta dimenzija i kapaciteta, to su najmanji bageri. Odlikuje ih kompaktna nosiva (čelična) konstrukcija. Opremljeni su hidrauličnim sistemima za podizanje i spuštanje strele rotornog točka. Za razliku od ostalih, nisu opremljeni sa klasičnim protivtegom na odvojenoj strelji, već je protivteg smešten na platformi gornje gradnje. Pogodni su za rad u delovima rudnika koji nisu lako dostupni ili u delovima gde je materijal većeg specifičnog otpora na kopanje. Oslonjeni su najčešće na dva gusenična sistema transporta što im olakšava manevrisanje u prostoru, ali ima i negativan uticaj u smanjenju strukturne stabilnosti mašine [73], [76].

Rotorni bageri B tipa su teorijskog kapaciteta do 7500 m³/h, ali je prosečan kapacitet postojećih mašina ovog tipa je 5000 m³/h. Specifične su konstruktivne građe gde gornja gradnja, centralni stub i strela protivtega formiraju oblik tkz. C-rama. Protivteg (balast) je fiksno vezan na strelji protivtega. Na suprotnoj strani je strela rotornog točka koja se podiže i spušta preko sistema užadi sa vitlom koje se nalazi na strelji protivtega. Neke mašine iz ove kategorije imaju dodatni stub (jarbol) koji je povezan za strelu rotornog točka preko fiksnih veza – lamela kutijastog profila. U klasi su srednjih dimenzija i kapaciteta pa su relativno pogodni za rad u umereno kompleksnim oblastima rudnika. Uz poseban dizajn noseće konstrukcije, pogonskih sistema i radnih organa, mogu otkopavati materijal većeg specifičnog otpora na kopanje. Mašina je oslonjena na tri do četiri para guseničnog sistema transporta. Takva konstrukcija transporta smanjuje manevarske sposobnosti, ali povećava stabilnost mašine [73], [76].

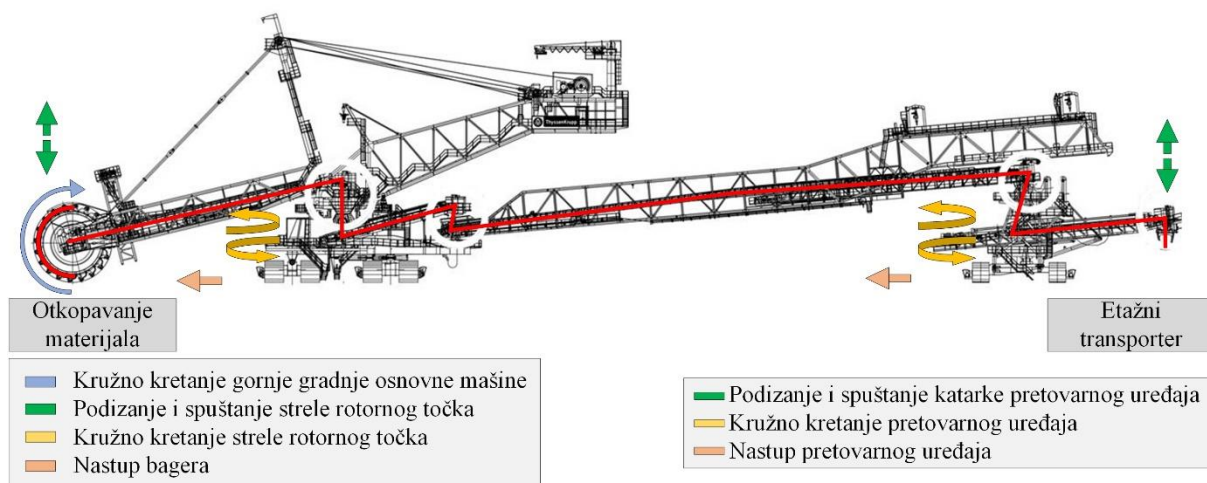
Rotorni bageri C tipa su najveći mobilne rudarske mašine sa teorijskim kapacitetom do 22700 m³/h. Masa ovih bagera je često veća od 10000 tona. Konstruktivna karakteristika ovih bagera je da umesto centralnog stuba, imaju dve glavne nadgradne jedinice. Prvu čine strela rotornog točka i stub (jarbol) međusobno povezani sistemom čeličnih užadi. Drugu čine strela protivtega i stub (jarbol) koji su takođe povezani sistemom čeličnih užadi. Obe jedinice su povezane za obrtnu platformu gornje gradnje koju podupire aksijalni ležaj čime se preko okvira portala ostvaruje veza sa donjom gradnjom. Mašina se na transportni sistem oslanja u tri tačke pri čemu je broj gusenica u funkciji potrebne stabilnosti bagera tj. specifičnog pritiska na tlo [73], [76].

U tabeli 3.1 je dat pregled opsega kapaciteta, pogonske mase, prečnika rotornog točka i snage pogona rotornog točka [73].

Tabela 3.1. Karakteristike različitih kategorija rotornih bagera [73]–[75]

Tip bagera	A	B	C
Kapacitet, [m ³ /h]	420 – 6600	3600 – 7500	7300 – 22700
Pogonska masa, [t]	55 – 1200	1200 – 3500	6000 – 14000
Prečnik rotornog točka, [m]	4,2 – 12,0	8,4 – 12,5	17,3 – 21,6
Snaga na rotornom točku, [kW]	75 – 1000	750 – 1500	1500 – 5040

Radni proces rotornog bagera karakteriše nekoliko kretanja delova ili čitave konstrukcije mašine. Osnovno je kružno kretanje radnog organa - rotornog točka u vertikalnoj ravni. Vedrice koje su ravnomerno raspoređene na rotornom točku otkopavaju materijal. Otkopavanjem se formira debljina odreska, vedrice se pune i sa materijalom kružno kreću do zone pražnjenja gde materijal gravitaciono pada na transporter. Drugo karakteristično kretanje u radu bagera je kružno okretanje strele rotornog točka u horizontalnoj ravni, za definisani ugao čime se formira blok otkopavanja. Kada se jedan odrezak završi za čitav ugao zaokreta strele, čitava konstrukcija bagera se pomera u napred za novu debljinu odreska (kod vertikalnog reza) ili se strela spušta (kod horizontalnog reza). Preostalo kretanje u radnom procesu je visinsko pomeranje strele bagere za odreske iznad ili ispod. Na slici 3.4 različitim bojama su prikazana kretanja bagera dok je tok kretanja materijala definisan crvenom linijom.



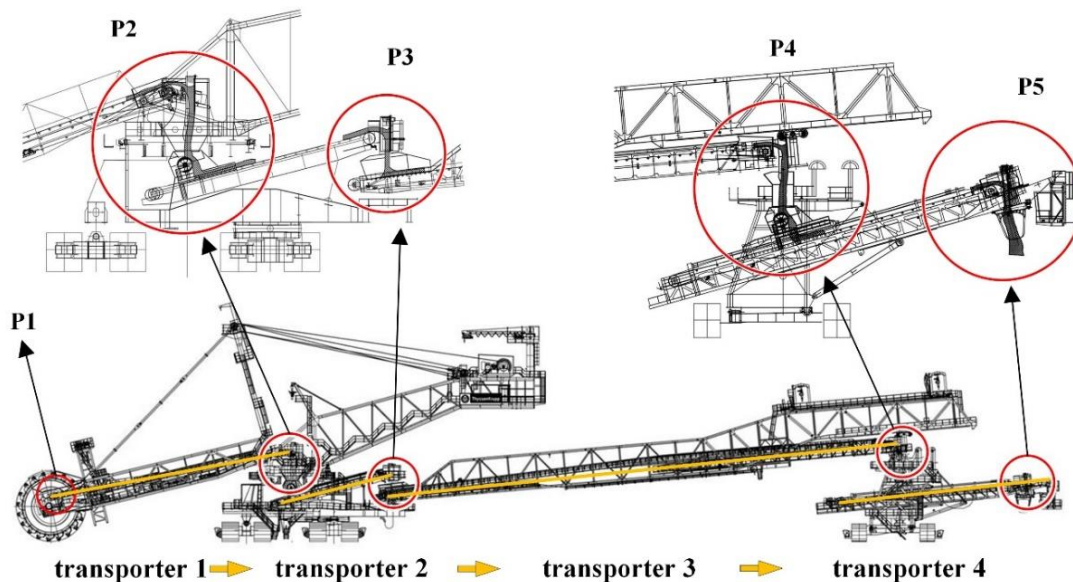
Slika 3.4. Osnovna kretanja bagera u radu

U zavisnosti od konstrukcije i tipa, na svakom bageru je prisutno više transportnih sistema (najmanje 2) povezanih mestima na kojima se materijal presipa na sledeći transporter u nizu. Posmatrajući bager SRs2000 koji je predmet analize, prisutno je 4 transportera sa gumenom trakom odnosno 5 presipnih mesta. Na slici 3.5 prikazan je šematski prikaz rotornog bagera SRs2000 sa obeleženim transporterima i presipnim mestima.

Transporteri sa gumenom trakom na rotornom bageru nalaze se na:

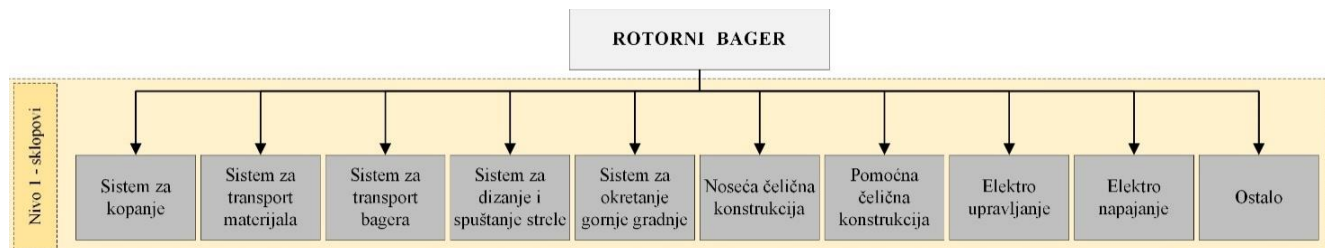
- Strelji rotornog točka – transporter 1;
- Gornjoj gradnji bagera (međutransporter) – transporter 2;
- Odložnoj strelji – transporter 3;
- Pretovarnom uređaju – transporter 4;
- Dodatni transporter za prosuti materijal na strelji rotornog točka (prljava traka).

Prvo presipno mesto nalazi se na rotornom točku bagera. Materijal koji se vedricama otkopava nailazi na prostor za pražnjenje i tu se predaje transporteru 1. Drugo presipno mesto je u osi bagera. Materijal se sa transportera 1 prebacuje na transporter 2. Na početku odložne strele je treće presipno mesto i tu se materijal sa transportera 2 predaje transporteru 3. Četvrto presipno mesto je na kraju odložne strele gde se materijal prebacuje na pretovarni uređaj tj. sa transportera 3 na transporter 4. Poslednje presipno mesto je kada materijal odlazi sa bagera i predaje se etažnom transporteru BTO sistema.



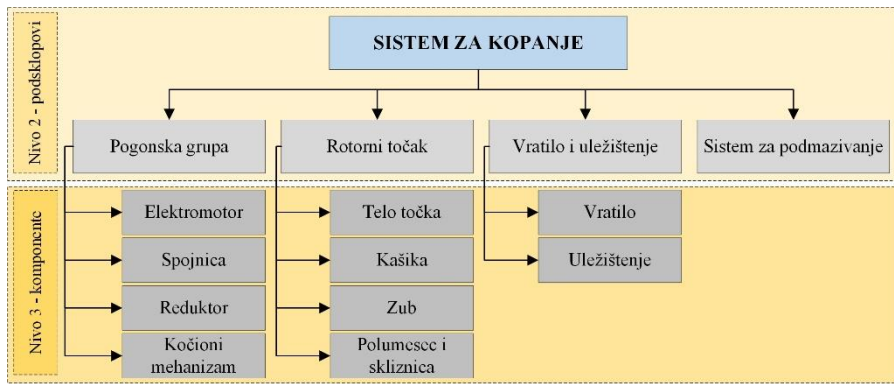
Slika 3.5. Transporteri i presipna mesta na rotornom bageru [73]

Osnovna dekompozicija rotornih bagera kao kompleksne rudarske mehanizacije izvršena na osnovu funkcionalno-konstruktivnih kriterijuma. Dekompozicija sklopova izvršena je na nekoliko nivoa. Osnovni (prvi) nivo svakog bagera je sklop koji se u sledećem nivou dekomponuje na podsklopove. Poslednji nivo dekompozicije su komponente. Na slici 3.6 prikazan je prvi nivo dekompozicije gde je rotorni bager raščlanjen na 10 sklopova [78].

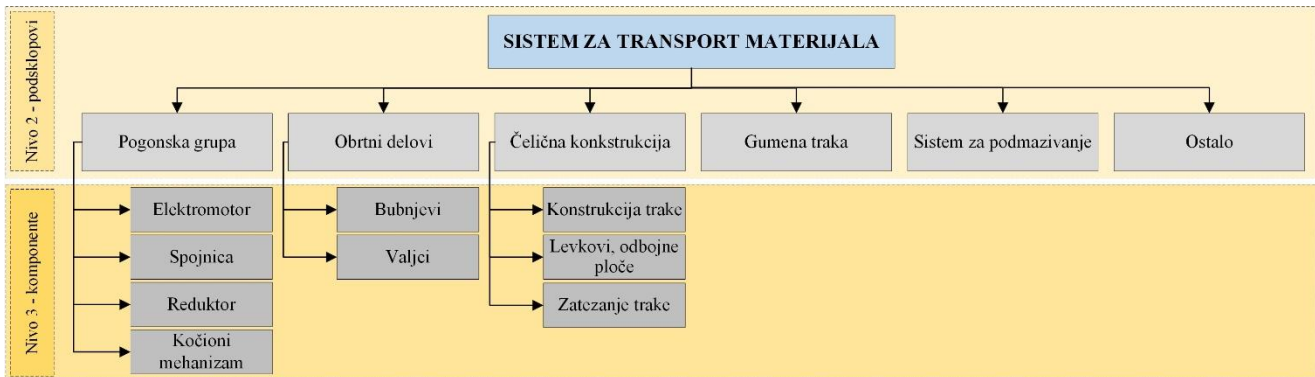


Slika 3.6. Prvi nivo funkcionalno-konstruktivne dekompozicije rotornih bagera

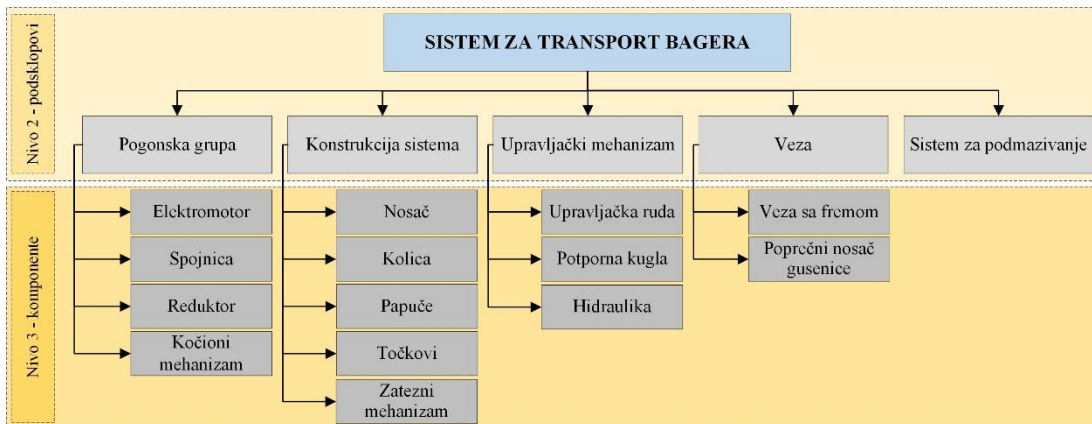
Dalja dekompozicija svakog sklopa na podsklopove i komponente prikazana je grafički na predstojećim slikama 3.7-3.15 [78].



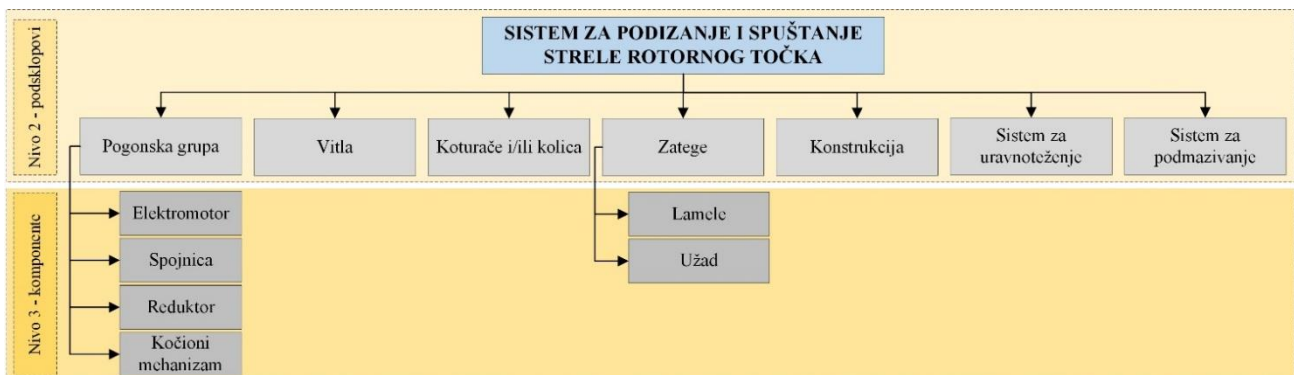
Slika 3.7. Podsklopovi i komponente sistema za kopanje



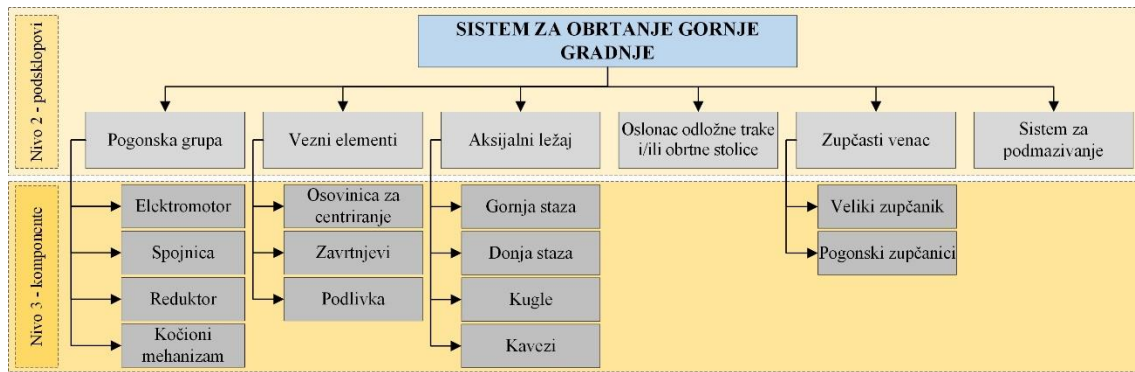
Slika 3.8. Podsklopovi i komponente sistema za transport materijala



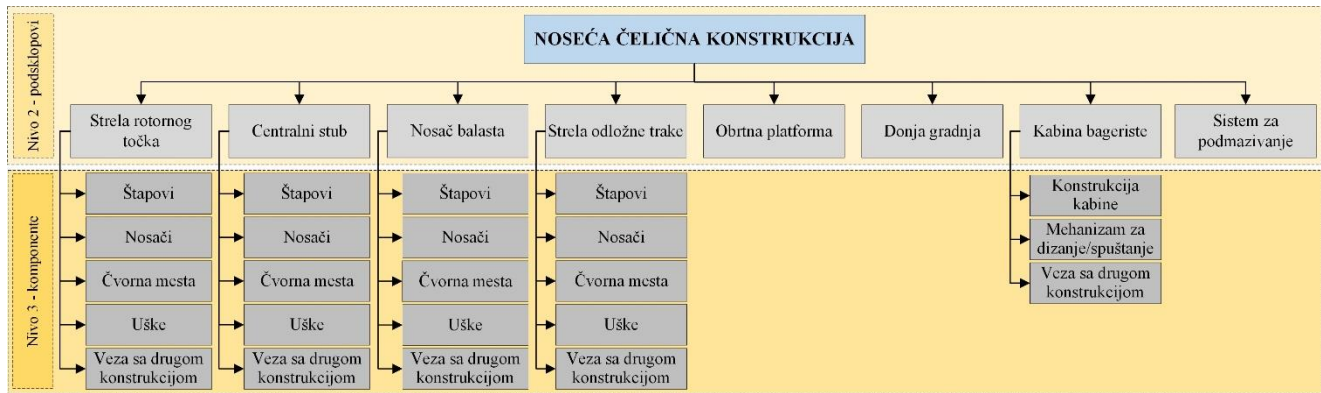
Slika 3.9. Podsklopovi i komponente sistema za transport bagera



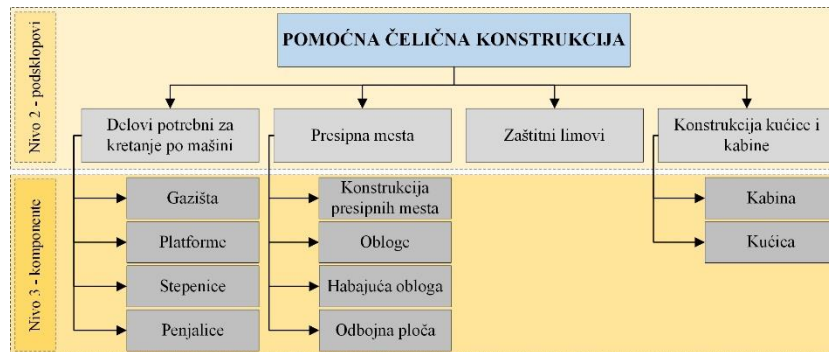
Slika 3.10. Podsklopovi i komponente sistema za podizanje i spuštanje strele rotornog točka



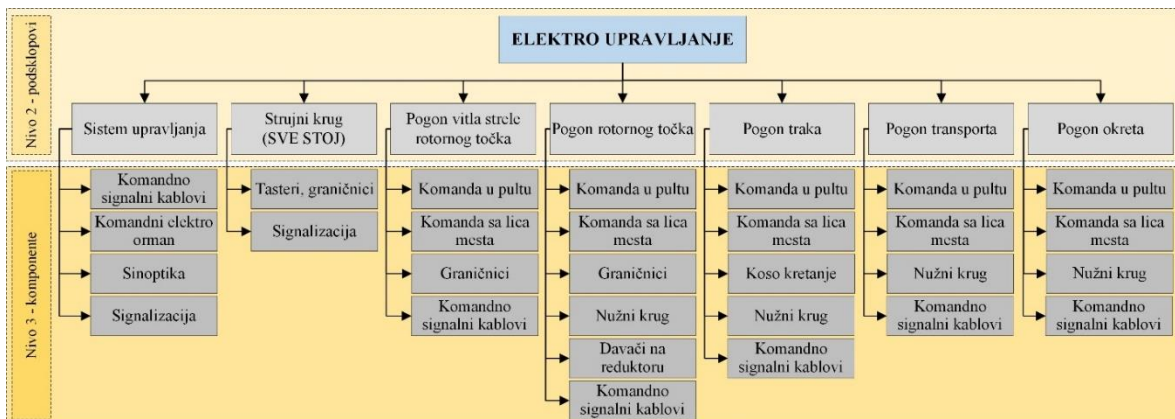
Slika 3.11. Podsklopovi i komponente sistema za obrtnje gornje gradnje bagera



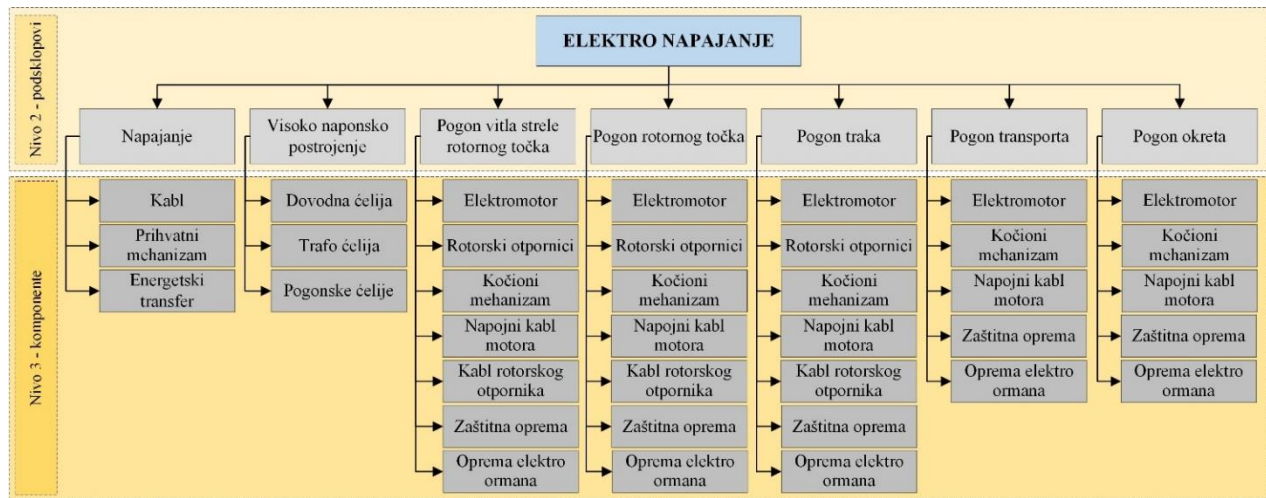
Slika 3.12. Podsklopovi i komponente noseće čelične konstrukcije



Slika 3.13. Podsklopovi i komponente pomoćne čelične konstrukcije



Slika 3.14. Podsklopovi i komponente elektro upravljanja



Slika 3.15. Podsklopovi i komponente elektro napajanja

3.4 Sistemi održavanja rudarskih mašina

Osnovni ciljevi održavanja tehničkih sistema zasnivaju se na zaštiti investicionog ulaganja [79]. Kroz kvalitetno i blagovremeno organizovano i sprovedeno održavanje obezbeđuje se visoka performansa raspoloživosti sistema. Zadatak održavanja je da sprovedenim aktivnostima tehnički sistem bude maksimalno moguće u stanju rada, odnosno minimalno moguće u stanju otkaza. Takvim pristupom obezbeđuje se i zaštita ulaganja vlasnika opreme.

Održavanje se definiše kao stalna kontrola, vršenje određenih popravki i preventivnih radnji sa ciljem funkcionalnog osposobljavanja i čuvanja sredstava za rad [18]. Kvalitet sprovedenog održavanja može se jednostavno uočiti kroz tri pitanja usmerena ka tehničkom sistemu: Da li može da radi? Koliko može da radi? Kako izvršava definisani zadatak? [65]. Procesom održavanja postiže se:

- Smanjenje troškova (indirektnih) usled neplaniranih zastoja tj. kvarova tehničkog sistema [65];
- Sporije zastarevanje tehničkog sistema koje može nastati zbog lošeg kvaliteta proizvoda [65];
- Smanjenje troškova (direktnih) rada i materijala u proizvodnji koji nastaju usled povećanih kvarova i zastoja tehničkih sistema [65].

Strategija održavanja u funkciji je politike kompanije. Faktori koji utiču na izbor strategije su organizacioni, konceptijski i tehnološki. Sa aspekta metodologije razlikuju se dva pristupa održavanju [65]:

- Održavanje prema pouzdanosti – zasnovano je na poznavanju karakteristika pouzdanosti na osnovu kojih se vrši prognoza budućeg stanja sistema. Na taj način se donose odluke o budućim postupcima održavanja kako bi se sprečila iznenadna pojava otkaza [65];
- Totalno produktivno održavanje – zasnovano je na proceni trenutnog stanja sistema. Ne uzimaju se u obzir informacije o prethodnom radu ni o zakonima pouzdanosti. Aktivnosti se preduzimaju kada je dovoljno jasno da će do otkaza doći [65].

Aktivnosti održavanja tehničkog sistema sadržane su u nekoliko koraka: identifikacija problema, rešavanje problema, preduzimanje akcije i vođenje evidencije [79]. Sa aspekta koncepcije u teoriji i praksi se razlikuju korektivni i preventivni pristup održavanju.

Preventivno održavanje sprovodi se dok je sistem u radu, odnosno pre nego što dođe do pojave otkaza. Cilj preventivnog održavanja je da se spreči ili odloži pojava otkaza [18]. Realizuje se kroz program periodičnih pregleda. Primenjivo je za sisteme čiji su troškovi zastoja veliki ili gde trenutni kvalitet sistema utiče na iskorišćenje jedinice i kvalitet proizvoda. Prednosti primene preventivnog održavanja su: porast pouzdanosti i raspoloživosti; smanjenje obima popravki; niži ukupni troškovi; bolji kvalitet proizvoda; povećanje očekivanog životnog veka; smanjenje potreba za rezervnom opremom; veća

sigurnost i bezbednost radnika [79]. Značajan faktor kod ovog održavanja je mogućnost planiranja i organizovanja aktivnosti održavanja. Preventivno održavanje sastoji se od sledećih elemenata: kontrola; servisiranje; kalibracija; testiranje; regulacija; podešavanje; i instalacija [18]. Prema karakteru postupaka preventivno održavanje može biti:

- Osnovno održavanje – postupci koji se obavljaju na licu mesta, bez potrebe za posebnim tehnologijama, obučenosti lica i alata [18];
- Preventivna zamena – postupci u okolnostima kada je posmatrani element u životnom veku zašao u period predvidivih otkaza (zamor, habanje, korozija, i sl.) [18];
- Održavanje prema stanju – postupci utvrđeni na osnovu stanja sistema nakon pregleda sistema. Karakteristično za trenutak kada je stopa kvara konstantna [18].

Korektivno održavanje sprovodi se kada je već došlo do zastoja tj. prekida proizvodnog procesa. Osnovni zadatak je da se tehnički sistem u što kraćem roku iz stanja u otkazu vrati u stanje u radu. Troškovi kod ovog tipa održavanja javljaju se tek kada dođe do zastoja. Takav pristup stvara samo prividno niže troškove. Kvar na jednom elementu može indukovati štetu na i na drugim elementima [18]. Korektivno održavanje sačinjeno je od neplanskih aktivnosti tj. potreba za održavanjem je nepredvidiva i ne može se planirati. Korektivno održavanje sastoji se od sledećih elemenata: popravka kvara; likvidacija; remont; servisiranje; likvidacija; i obnavljanje [18]. Aktivnosti kod korektivnog održavanja zahtevaju intervenciju u što kraćem vremenskom periodu. Problemi do kojih može doći kod ovog tipa održavanja su: nedostatak rezervnih delova; nedostatak obučenog kadra u datom trenutku; nedostatak alata ili pomoćnih uređaja za postupak otklanjanja kvara; i sl. Dakle, vreme zastoja sačinjeno je od aktivnog vremena popravke, administrativnog i logističkog vremena i vremena kašnjenja. Aktivno vreme popravke čine: vreme pripreme; vreme lokacije greške; vreme dostavljanja rezervnog dela; vreme korekcije greške; vreme podešavanja i kalibracije; i vreme provere [18].

Težište trenutnih aktivnosti na površinskim kopovima su u okvirima korektivnog održavanja. Preventivno održavanje analiziranih tehničkih sistema, sprovodi se u vidu servisa i godišnjih remonta. S obzirom na kompleksnost tehničkih sistema, visoka investiciona ulaganja, visoke indirektno troškove zastoja, težište u politici održavanja treba usmeriti ka preventivnim aktivnostima u održavanju. Prostor za optimizaciju održavanja može se ostvariti uvođenjem segmenta održavanja prema riziku u okvire preventivnog delovanja. Na taj način se dodatno optimizuje organizacija i vreme planiranja postupaka održavanja. Definisanjem slabih mesta i praćenjem stanja mogu se sprečiti zastoji i havarije odnosno gubitak proizvodnje i narušavanje strukturne stabilnosti mašine. Zastoj rotornog bagera od jednog sata može indukovati indirektno troškove i do nekoliko hiljada evra. U slučaju havarije zastoj mašine može trajati i po nekoliko nedelja ili meseci. U slučaju otkaza (kvara) nekog dela bagera, vreme zastoja se meri u časovima, smenama ili danima u zavisnosti od kompleksnosti popravke i raspoloživosti rezervnog dela.

4. TEORIJSKE OSNOVE METODA

U cilju formiranja sveobuhvatnog modela ocene i analize rizika, potrebno je definisati odgovarajući matematičko-koncepcijski model. S obzirom na karakter rizika kao fenomena, model bi trebalo da ima sledeće osobine: sinteznu formu, hibridni karakter i algoritamsku strukturu. U te svrhe, u disertaciji je predložen fazi ekspertski model koji će sadržati korektivnu petlju na bazi višekriterijumskih metoda. Primenjuju se metode na bazi fazi logike i višekriterijumskog odlučivanja. U osnovi je model na bazi fazi logike u čije su segmente implementirane dve višekriterijumske metode. Prednosti metoda iskorišćeni su u cilju formiranja inovativnog sinteznog modela procene rizika koji će umanjiti uticaj nedostataka prisutan kod tradicionalnih modela procena rizika. Primenom predloženog modela, moguć je rad sa ulaznim pojmovima i podacima koji su karakteristični po sledećem: mogu se predstaviti samo u lingvističkoj ili samo u numeričkoj formi; ne postoji egzaktna definicija njihove vrednosti i veličine, već samo njihova percepcija; imaju međusobno hijerarhijsku strukturu; međuzavisnost nema linearnu, ni bilo kakvu drugu funkcionalnu zavisnost. U nastavku su date osnovne teorijske postavke metoda koje će biti korišćene, kao i načini obrade podataka.

4.1 Osnove teorije fazi logike

Koncept fazi logike predstavlja osnovu fazi sistema i oslanja se na ideju da ne postoji izrazita potreba za preciznošću. U radu pod nazivom „*Fuzzy sets*“ [80] predstavio je i matematički opisao fazi logiku Lofti A. Zadeh 1965. godine. Uvođenjem izvesne nepreciznosti stvara se robusni model koji dozvoljava modelovanje kompleksnih sistema kod kojih se ne mogu primeniti klasične tehnike odnosno teorija verovatnoće ili intervalna matematika [63]. Prilikom posmatranja nekog kompleksnog tehničkog sistema u realnom vremenu, često nije moguće prikupiti i predstaviti sve podatke [65]. U takvim okolnostima prednost dobija primena fazi logike.

Kod fazi sistema pripadnost elementa nije jednoznačna i moguća je primena elemenata kod kojih preovlađuje nedovoljna preciznost. Fazi logika predstavlja generalizaciju ideje klasičnih skupova [81]. Klasični skupovi baziraju na binarnom (0, 1) modelu što znači da postoje samo dve mogućnosti („ne pripada“ ili „pripada“). Granice pripadnosti kod takvih skupova su jasne (engl. *crisp*). Nasuprot klasičnim skupovima, u fazi skupovima kvalifikacija elementa nije binarna, već oni mogu imati „veću“ ili „manju“ pripadnost skupu. Pojam koji definiše nivo učešća elementa u određenom fazi skupu, naziva se stepen pripadnosti ili funkcija pripadnosti. Kreće se u intervalu od 0 do 1 [82]. Na taj način je omogućeno interpretiranje načina razmišljanja ljudi. Naime, razmišljanje i govor ljudi ne moraju uvek biti strogo tačni ili netačni. Fazi logika je tolerantna na neprecizne podatke i fleksibilna na područja primene i predstavlja intuitivnu crtu ljudskog rezonovanja [83].

Za potrebe razumevanja postupaka primene fazi logike u inovativnim modelima, u nastavku su date definicije osnovnih pojmova, njihove osobine, operacije i principi.

4.1.1. Osnovni pojmovi fazi teorije

Fazi skup predstavlja skup elemenata koji imaju slična svojstva. Diskretni skupovi sadrže elemente koji imaju ista svojstva [84]. Ključne reči u definicijama su „slična“ i „ista“. U prvom slučaju su granice jasno postavljene, dok u drugom nisu.

Ako se kroz ekspertsku komunikaciju na primeru rudarske mehanizacije, uvedu skupovi dobra, srednja i loša mašina, neizbežno je da će istu mašinu analitičari kvalifikovati u različite grupe skupove. Može se desiti da istu mašinu kvalifikuju i u istu grupu, ali sa različitim stepenom pripadnosti (40% dobra, 60% srednja mašina) [63].

Fazi skup A se može predstaviti skupom parova u sledećem obliku [63], [84], [85]:

$$A = \{(x, \mu_A(x)), x \in X\} \quad (4.1)$$

gde je:

μ_A – funkcija (stepen) pripadnosti elementa x u fazi skupu A za svako $x \in X$;
 X – nadskup ili univerzalni skup;

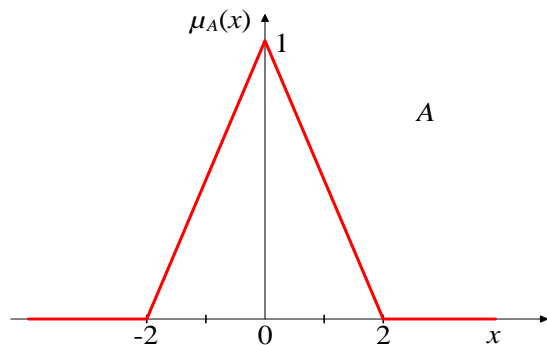
Kada je X konačan skup u obliku $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ fazi skup A se može predstaviti kao unija elemenata x_1, x_2, \dots, x_n na sledeći način [63], [81]:

$$A = \frac{\mu_A(x_1)}{x_1}, \frac{\mu_A(x_2)}{x_2}, \dots, \frac{\mu_A(x_n)}{x_n} \quad (4.2)$$

U slučaju da X nije konačan skup, fazi skup A se predstavlja na sledeći način [63], [81]:

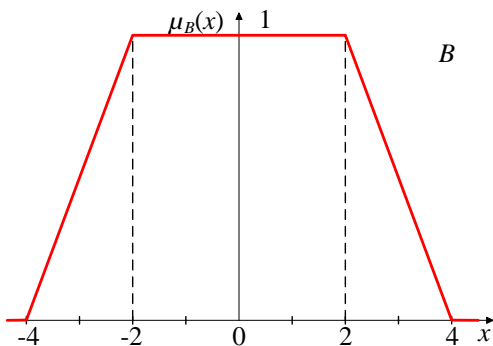
$$A = \int_{x \in X} \frac{\mu_A(x)}{x} \quad (4.3)$$

Funkcija pripadnosti u teoriji fazi skupova pokazuje nivo pripadnosti elementa određenom skupu. Može da uzme bilo koju vrednost iz zatvorenog intervala $[0,1]$. Funkcija pripadnosti bi imala oblik $\mu_A = 1$ ako i samo ako bi element x pripadao skupu A . Nasuprot tome, je oblik $\mu_A = 0$ ako i samo element x ne pripada skupu A . Veća vrednost funkcije pripadnosti ukazuje da ima više „istine“ u tvrdnji da element pripada određenom fazi skupu. Za definisanje pripadnosti u okviru fazi logike, koriste se različiti tipovi funkcija. [86]. Najčešće su primenjene trougaona i trapezoidna, a često se koriste i pravolinijska i zvonasta. Na slikama 4.1-4.4 prikazane su najčešće korišćene funkcije, a dati su i izrazi koji ih opisuju [84], [85].



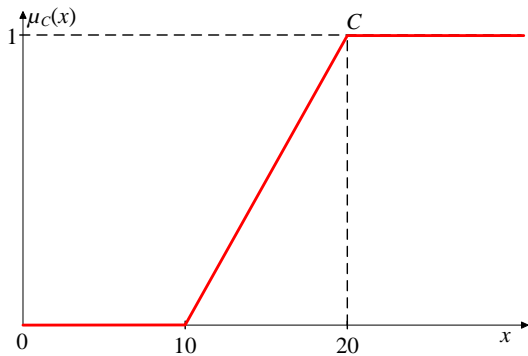
Slika 4.1. Trougaona funkcija pripadnosti [84]

$$A = \int_{-2}^0 \frac{(2+x)}{x} + \int_0^2 \frac{(2-x)}{x} \quad (4.4)$$



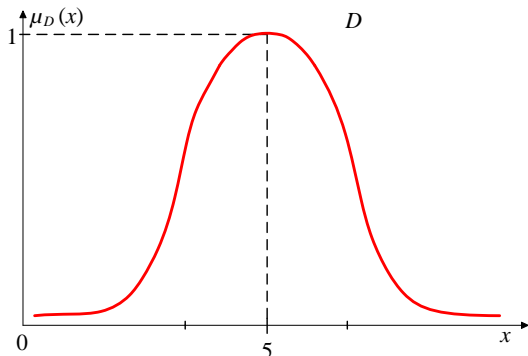
Slika 4.2. Trapezoidna funkcija pripadnosti [84]

$$B = \int_{-4}^{-2} \frac{(4+x)}{x} + \int_{-2}^2 \frac{1}{x} + \int_2^4 \frac{(4-x)}{x} \quad (4.5)$$



$$C = \int_0^{10} 0.1x/x + \int_{10}^{20} 1/x, \quad x \in [0, 20] \quad (4.6)$$

Slika 4.3. Pravolinijska funkcija pripadnosti [84]



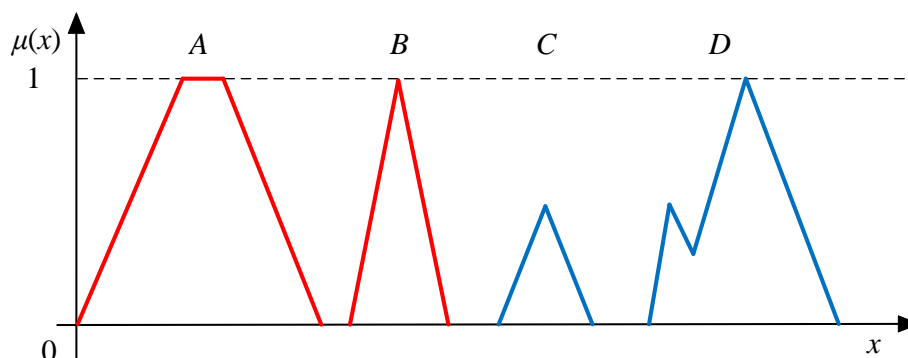
$$D = \int_x e^{-0.5 \cdot (x-5)^2 / x} \quad (4.7)$$

Slika 4.4. Zvonasta funkcija pripadnosti [84]

Osobine koje karakterišu fazi skupove su: normalnost, konveksnost i kardinalnost . Pored navedenih, postoji veliki broj osobina koje važe za diskretne i fazi skupove, a to su: idempotentnost, komutativnost, asocijativnost, distributivnost, dvostruka negacija i De Morganov zakon [63], [84], [87]. Dve osobine koje važe za fazi skupove, a ne važe za diskretne skupove su: zakon isključenja trećeg i zakon kontradikcije [63], [84], [87]. Najznačajnija svojstva i operacije nad fazi skupovima su: jednakost, podskup, presek, unija i komplement [84], [85], [88].

4.1.2. Fazi broj

Osnovni koncept fazi sistema je fazi broj. Fazi broj A je fazi skup jasno definisanih granica koji je predstavljen funkcijom pripadnosti $\mu_A(x)$, koja je: 1) definisana nad skupom realnih brojeva (Re); 2) konveksna; 3) normalna; 4) deo po deo neprekidna [63]. Na slici 4.5 dati su primeri nekoliko fazi skupova koji ispunjava i ne ispunjavaju uslove da budu fazi brojevi. Skupovi sa oznakama A i B su fazi brojevi jer ispunjavaju pomenuta četiri uslova, dok skupovi C i D nisu fazi brojevi. Skup C ne zadovoljava uslov normalnosti, dok skup D ne zadovoljava uslov konveksnosti [84].



Slika 4.5. Primer fazi skupova koji jesu (A i B) i koji nisu fazi brojevi (C i D) [84], [89]

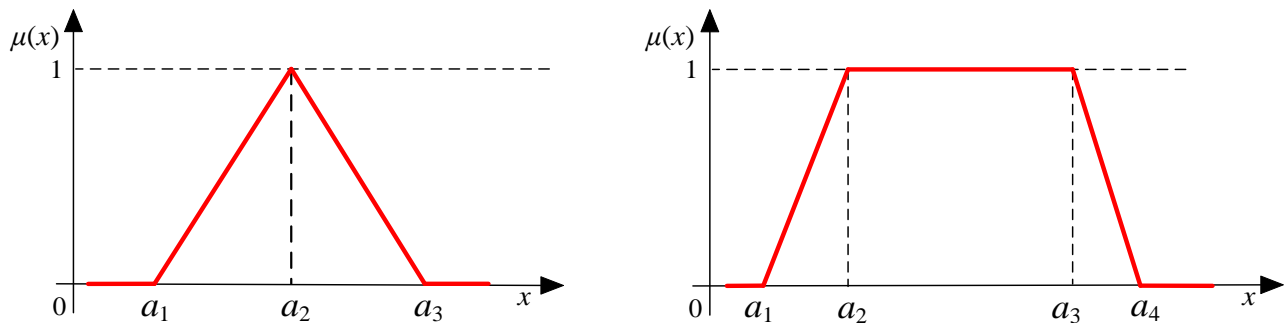
Pored osobina konveksnosti i normalnosti, fazi brojeve karakterišu i interval poverenja $[a_1, a_2]$ i stepen sigurnosti (α). Interval poverenja predstavlja granične vrednosti određene tvrdnje. Stepenn sigurnosti predstavlja interval poverenja u tu tvrdnju. Fazi broj može se izraziti pomoću intervala i stepena poverenja [90], [91].

Najčešće primenjene klase fazi brojeva su trouglasti i trapezni. Na slici 4.6 prikazana su oba oblika. Funkcija pripadnosti trouglastog fazi broj $A = (a_1, a_2, a_3)$ definisana na sledećim izrazom [88]:

$$\mu_A = \begin{cases} 0 & \text{za } x \leq a_1 \\ a_2 - x / a_2 - a_1 & \text{za } a_1 < x < a_2 \\ a_3 - x / a_3 - a_2 & \text{za } a_2 < x < a_3 \\ 0 & \text{za } x \geq a_3 \end{cases} \quad (4.8)$$

Funkcija pripadnosti trapeznog fazi broj $A = (a_1, a_2, a_3, a_4)$ definisana na sledećim izrazom [88]:

$$\mu_A = \begin{cases} 0 & \text{za } x \leq a_1 \\ a_2 - x / a_2 - a_1 & \text{za } a_1 < x < a_2 \\ 1 & \text{za } a_2 \leq x \leq a_3 \\ a_4 - x / a_4 - a_3 & \text{za } a_3 < x < a_4 \\ 0 & \text{za } x \geq a_4 \end{cases} \quad (4.9)$$



Slika 4.6. Funkcija pripadnosti trouglastog i trapeznog fazi broja A

4.1.3. Lingvističke promenljive

Razmišljanje i rezonovanje ljudi oslanja se na slike i šablone znatno češće nego na numeričke vrednosti. U želji da se interpretira način čovekovog razmišljanja, uvode se veličine koje predstavljaju govorni jezik [85], [92]. Lingvističke promenljive (engl. *linguistic variables* – LV) su promenljive čije su dozvoljene vrednosti reč ili reči prirodnog jezika [84]. Često se susreće i upotreba naziva fazi promenljive. Predstavljaju ulazne vrednosti fazi sistema. Izlazne vrednosti fazi sistema mogu se interpretirati u lingvističkoj ili numeričkoj formi. Lingvističke promenljive se mogu povezivati sa numeričkim vrednostima kroz funkcije pripadnosti i klase [93].

Kako bi se jasnije definisale lingvističke promenljive i dobili složeni lingvistički izrazi često se koriste modifikatori (vrlo, veoma, izrazito, i sl.) i veznici (i, ili, ne). Način na koji modifikatori i veznici deluju na funkciju pripadnosti je proizvoljan. Osnovna klasifikacija modifikatora izvršena je na osnovu njihovog dejstva na funkcije pripadnosti [86], [89]: 1) jak modifikator (jako dejstvo) – pojačava se značenje funkcije pripadnosti čime smanjuje broj elemenata u fazi skupu; 2) slab modifikator (slabo dejstvo) – teži da oslabi funkciju pripadnosti čime povećava broj elemenata u fazi skupu; 3) jednak modifikator (jednako dejstvo) – dodatno slabu funkciju pripadnosti.

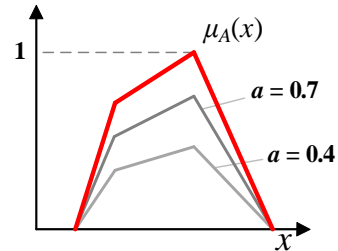
Izbor modifikatora koji idu uz lingvističke promenljive zavisi od njihove dalje upotrebe. Najčešće se primenjuje veliki broj različitih modifikatora. Osnovni nedostatak primene velikog broja modifikatora i veznika odnosi se na jezičke manipulacije prvenstveno sa aspekta dvosmislenosti. Složenim kombinovanjem se može izgubiti osnovna uloga funkcija pripadnosti. Preporuka je da se definišu fazi skupovi (njihovi nazivi), tako da najbolje apsorbuju analizirani fenomen [63]. Operatori modifikacije podeljeni su u dve grupe. Koncizno objašnjenje je dato na fazi skupu A čija funkcija pripadnosti ima oblik $\mu_A(x)$ gde $x \in X$, pri čemu je X univerzalni skup i $A \subset X$.

Prvu grupu modifikatora čine [84]:

1. Množenje skalarom:

$$\mu_{\alpha A}(x) = \alpha \mu_A(x);$$

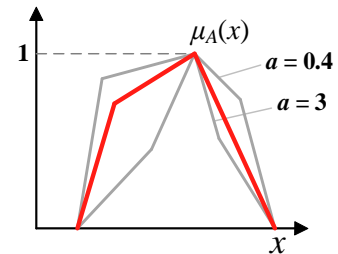
$$a > 0, a \in Re \text{ i } \forall x \in X \ \alpha \mu_A(x) \leq 1$$



2. Stepenovanje:

$$\mu_{A^a}(x) = (\mu_A(x))^a;$$

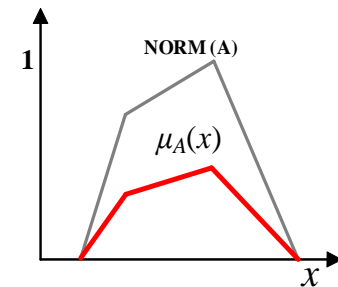
$$a > 0, a \in Re$$



3. Normalizacija:

$$NORM(A) = \frac{A}{\sup_x \mu_A(x)};$$

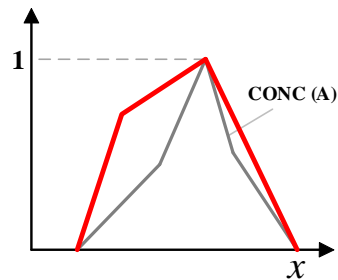
$$\sup_x \mu_A(x) \neq 0$$



4. Koncentrisanje:

$$CONC(A) = A^2;$$

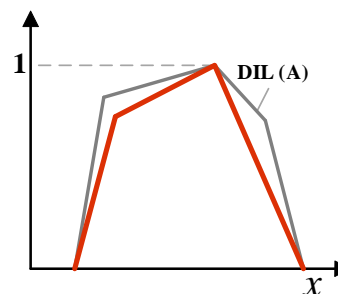
$$\mu_{CONC(A)} = (\mu_A(x))^2$$



5. Proširenje:

$$DIL(A) = A^{0,5};$$

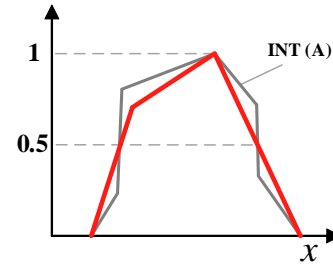
$$\mu_{DIL(A)} = (\mu_A(x))^{0,5}$$



Drugu grupu modifikatora čine [84]:

1. Pojačavanje kontrasta:

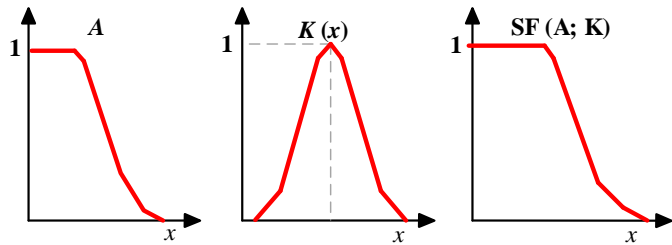
$$\mu_{INT(A)} = \begin{cases} 2(\mu_A(x))^2 & \text{za } 0 \leq \mu_A(x) \leq 0,5 \\ 1 - 2(1 - \mu_A(x))^2 & \text{za } 0,5 \leq \mu_A(x) \leq 1 \end{cases}$$



2. Fazifikacija:

Fazifikacija fazi skupa A se vrši pomoću drugog fazi skupa $K(x_i)$ gde je $K(x_i)$ jezgro fazifikacije [84].

$$SF(A; K) = \sum_i \mu_A(x_i) K(x_i)$$



Modifikatori lingvističkih vrednosti se pridružuju operatoru modifikacije najčešće na sledeći način [63], [81], [84], [94]:

- veoma $A = CONC(A)$;
- manje-više $A = DIL(A)$;
- ponešto $A = NORM(A \text{ i } ne(VEOMA(A)))$;
- prilično $A = NORM\{INT(A) \text{ i } ne\ INT[CON(A)]\}$;
- izuzetno $A = NORM(INT(A))$.

Vežnici (i, ili, ne) u lingvističkim izrazima se definišu na sledeći način [63], [84]:

$$A \text{ „i“ } B \quad A \cap B; \quad A \text{ „ili“ } B \quad A \cup B; \quad \text{„ne“ } A \quad \tilde{A}.$$

4.1.4. Fazi propozicija i fazifikacija

Uloga fazi propozicije je da predstavi tvrdnje koje sadrže lingvističke vrednosti. To je postupak da se realnost sagleda i interpretira na matematički i računaru pristupačan način. U poređenju sa klasičnom propozicijom, fazi propozicija se razlikuje u opsegu istinitosti vrednosti. Klasična propozicija istinitost prepoznaje u samo dva oblika tačno/nije tačno. Kod fazi propozicije opseg tačnosti nije ograničen na dve vrednosti, te može uzimati od 2 do n vrednosti. Druga bitna prednost fazi propozicije je da ona prepoznaje stepen tačnosti (istinitosti) koja je u opsegu od 0 do 1 [86], [95]. Dakle, postupak fazi propozicije je jedan od najznačajnijih koraka u formiranju modela i u značajnoj meri utiče na dalji tok modela. Potrebno je poznavanje kompleksnosti sistema, iskustvo, odgovarajuća merenja i dr.

Fazifikacija se definiše kao proces preslikavanja ulaznih podataka skalarnog oblika u odgovarajuće intervale [0-1] pogodne funkcije pripadnosti fazi skupova [89]. Dakle, elementi diskretnog skupa se prevode u oblike primenjive u teoriji fazi skupova. Postupak fazifikacije se često naziva i fazi kodiranje [86]. U postupku fazifikacije se najčešće primenjuju skale sa 3, 5, 7 ili 10 promenljivih formirane u postupku fazi propozicije.

4.1.5. Fazi relacije i fazi kompozicija

Odnosi između dve veličine koji nisu precizni opisuju se fazi relacijama. Ako su X i Y dva univerzalna skupa, tada je binarna fazi relacija oblika $R = \{ ((x, y), \mu_R(x, y)) \mid (x, y) \in X \times Y \}$. Pri tome je $\mu_R(x, y)$ funkcija pripadnosti sa dve dimenzije [96]. Najčešće fazi relacije su: x je blizu y (brojevi); x zavisi od y (događaji); x liči na y (objekti); x je veliko, y je malo (fazi sistem zaključivanja)[94].

Ako su date dve binarne fazi relacije R_1 i R_2 definisane kao $X \times Y$ i $Y \times Z$, respektivno [94]. Kompozicija relacije R_1 i R_2 definisana je nad $X \times Z$, označava se kao $R_1 \circ R_2$ i ima sledeći oblik [94]:

$$R_1 \circ R_2 = \left\{ \left[(x, z); (x, y) \in R_1, (y, z) \in R_2 \right] \mid x \in X; y \in Y; z \in Z; \right\} \quad (4.10)$$

Kompozicija dve relacije može se posmatrati kroz izračunavanje nove relacije $R_1 \circ R_2$ [81].

Fazi kompozicija predstavlja postupak sinteznog kombinovanja dve ili više fazi relacija u jednu. Generalno posmatrano, fazi kompozicija je sveobuhvatnog karaktera jer predstavlja postupak integracije i sinteze parcijalnih uticaja. Produkt može, ali ne mora da ima svojstvo komutacije. U tom smislu može ali ne mora biti definisan redosled članova proizvoda. U zavisnosti od željene funkcije cilja definiše se ishod kompozicije [97]. Danas je prisutno više različitih modela fazi kompozicija koje se razlikuju prema oblastima primene, očekivanim rezultatima a pre svega prema svojim matematičkim osobinama [96]. Najčešće korišćeni modeli fazi kompozicije su „*IF-THEN*“, „*MAX-MIN*“, „*MAX-PRODUCT*“ i „*MIN-MAX*“. Osnove pomenutih modela će biti prikazane u nastavku.

- „*IF-THEN*“ fazi kompozicija se naziva još i fazi implikacija ili logički operator. Predstavlja osnovni oblik fazi kompozicije. Jednostavni primer ovog modela ima oblik „AKO je a vrednost X , onda je b vrednost Y “ pri čemu su X i Y lingvistički opisane vrednosti nad univerzalnim skupovima. U ovakvoj postavci „ a je X “ čini pretpostavku koja prethodi, dok je u odnosu na nju zaključak „ b je Y “ [86]. Jednostavnim jezikom, može se opisati i rečenicom „Ako je ispunjen skup uslova, onda se može proizvesti posledica“ [96]. Kada je u pitanju skup uslova u algoritmu zaključivanja, najčešće se koristi veznik „ili“. Primena ove fazi kompozicije najčešće implicira da je neophodno više interakcija. Nakon prve interakcije, postavljena pravila (uslovi) se mogu naknadno korigovati i testirati ponovo rezultati [88];
- „*MAX-MIN*“ fazi kompozicija je najčešće primenjena kompozicija. Naziva se još i pesimističkom jer iz skupa najlošijih kombinacija ishoda, pronalazi najbolje moguće rešenje [63]. Na primeru kompozicija fazi relacije R_1 i R_2 , za date uslove definiše se kao [63], [88]:

$$R_1 \circ R_2 = \left\{ \left[(x, z); \max_y \left(\mu_{R_1}(x, y), \mu_{R_2}(y, z) \right) \right] \mid x \in X; y \in Y; z \in Z \right\} \quad (4.11)$$

odnosno za konkretno izračunavanje:

$$\mu_{R_1 \circ R_2}(x, z) = \left\{ \max_y \left[\mu_{R_1}(x, y) \wedge \mu_{R_2}(y, z) \right] \mid x \in X; y \in Y; z \in Z \right\} \quad (4.12)$$

gde su operatori: $\vee = \max$ i $\wedge = \min$.

Ova kompozicija se naziva i *MAX-MIN* proizvod, jer u matičnom obliku računanje podseća na matično množenje sa razlikom u tome da se množenje i sabiranje menjaju sa \vee i \wedge , respektivno [81]. Ova kompozicija se primenjuje kod fenomena kap što su sigurnost i pouzdanost [63].

- „*MAX-PRODUCT*“ fazi kompozicija ima postupak sličan prethodnoj. Na primeru iste kompozicije fazi relacije R_1 i R_2 , za date uslove definiše se kao [86], [96]:

$$R_1 \circ R_2 = \left\{ \left[(x, z); \max_y \left(\mu_{R_1}(x, y) \cdot \mu_{R_2}(y, z) \right) \right] \mid x \in X; y \in Y; z \in Z \right\} \quad (4.13)$$

Primenjuje se i „*MAX-AVERAGE*“ kompozicija koja ima oblik [86]:

$$R_1 \circ_{av} R_2 = \left\{ \left[(x, z); \frac{1}{2} \max_y \left(\mu_{R_1}(x, y) \cdot \mu_{R_2}(y, z) \right) \right] \mid x \in X; y \in Y; z \in Z \right\} \quad (4.14)$$

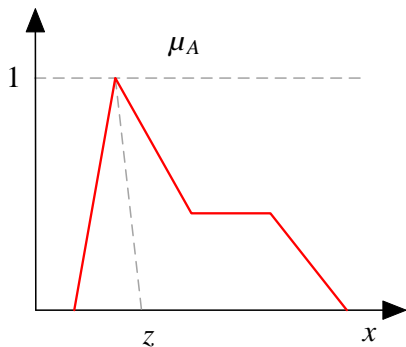
- „MIN-MAX“ fazi kompozicija često se primenjuje kod fenomena kao što je rizik. Naziva se još i optimističnom kompozicijom jer iz skupa najboljih mogućih ishoda pronalazi najlošiji [97]. Na istom primeru, ova kompozicija ima sledeći oblik [86]:

$$R_1 \circ R_2 = \left\{ (x, z); \min_y \max (\mu_{R_1}(x, y), \mu_{R_2}(y, z)) \mid x \in X; y \in Y; z \in Z \right\} \quad (4.15)$$

4.1.6. Defazifikacija

Defazifikacija je proces prevođenja rezultata fazi modela u realan broj. Smatra se da su rezultati fazi zaključivanja jasniji i međusobno uporedivi ako se pretvore u realan broj [98]. Najčešće primenjene metode defazifikacije su [85], [87], [94], [96]:

- Metoda principa maksimalne funkcije pripadnosti (engl. *Max-membership principle*) [98]



- Metoda koja daje rezultat sa najvećom funkcijom pripadnosti prethodno izračunatog fazi modela [94].

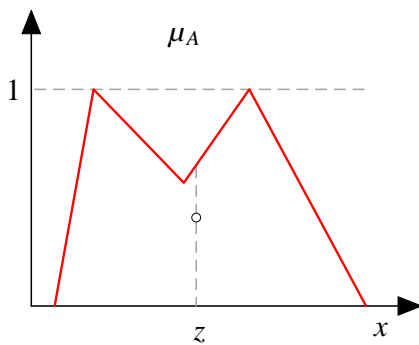
$$\mu_A(z) \geq \mu_A(x_i) \quad \text{za svako } x \in X \quad (4.16)$$

gde je:

z – skup mogućih rešenja;

μ_A – funkcija pripadnosti rešenja fazi skupa A .

- Metoda težišta (engl. *Centroid method*) [87], [98]

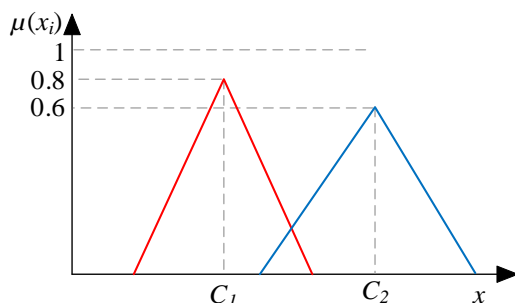


- Najčešće primenjena metoda. Naziva se još i metoda centra površi [94].

$$z = \frac{\int \mu_A(x) x dx}{\int \mu_A(x) dx} \quad (4.17)$$

gde se \int koristi za algebarsku interakciju.

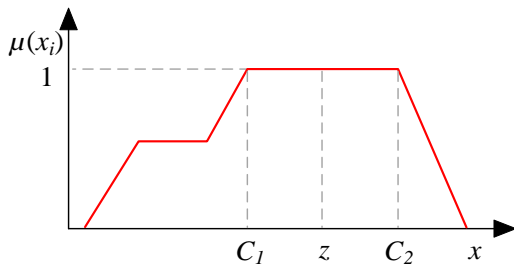
- Metoda srednje ponderisane vrednosti (engl. *Weighted average method*) može se koristiti samo za simetrične funkcije pripadnosti. Naziva se još i „Sugeno defazifikacija“. Svaka funkcija pripadnosti ponderiše se svojom maksimalnom vrednošću skupa [87], [94], [98].



$$z = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_{C_i}(x_i) \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n \mu_{C_i}(x_i)} \quad (4.18)$$

gde je C_1, C_2, \dots, C_n izlazna vrednost fazi sistema; x_i je geometrijska sredina svake simetrične funkcije pripadnosti.

- Metoda srednje vrednosti maksimuma (engl. *Mean-max membership*) [87], [98]

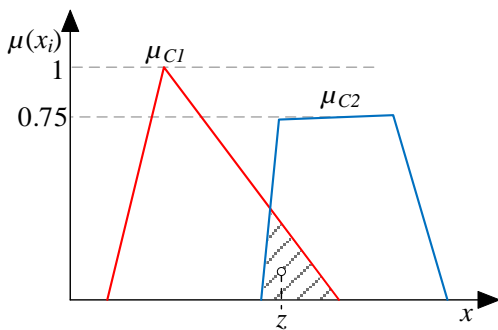


- Metoda se oslanja na trenutne maksimalne funkcije pripadnosti koje ne moraju biti jedinstvene. Mogu biti predstavljene kao tačka ili kao opseg [94].

$$z = \frac{C_1 + C_2}{2} \quad (4.19)$$

gde su C_1 i C_2 početna i krajnja tačka opsega maksimalne funkcije pripadnosti.

- Metoda centara zbira (engl. *Centre of sums*) uključuje algebarski zbir pojedinačnih izlaznih vrednosti fazi skupova. Slična je metodi ponderisane vrednosti [87], [94], [98].

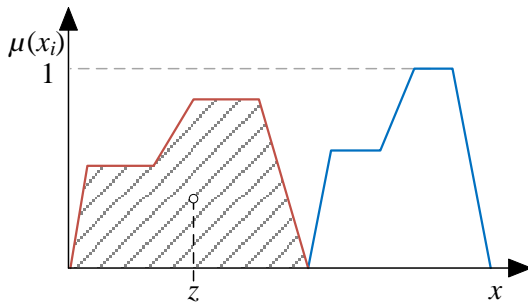


U centru zbira težine oblasti su definisane respektivno odgovarajućim funkcijama pripadnosti što je razlika u odnosu na metodu ponderisane vrednosti gde su definisane težine pojedinačnih vrednosti funkcija pripadnosti [94].

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n \mu(x_i) \int_z \bar{x} dx}{\sum_{i=1}^n \mu(x_i) \int_z dx} \quad (4.20)$$

gde je \bar{x} rastojanje do težišta svake od odgovarajućih funkcija pripadnosti.

- Metoda centara najveće oblasti (engl. *Center of largest area*) [87], [94], [98]



- Ako fazi skup ima dve konveksne oblasti, za proračun se koristi težinska vrednost dela koji ima najveću površinu. Proračun za izabranu oblast se dalje radi na isti način kao kod metode težišta [94].

$$z = \int \frac{\mu_{C_m}(x) x dx}{\mu_{C_m}(x) dx} \quad (4.21)$$

gde je C_m je najveća konveksna oblast.

- Metoda prvog ili poslednjeg maksimuma (engl. *First of maxima or last of maxima*) je metoda slična metodi srednje vrednosti maksimuma, s tim što u prvom slučaju uzima prvu maksimalnu vrednost dok u drugom slučaju uzima poslednju maksimalnu vrednost. Nazivaju se još i metoda levog odnosno desnog maksimuma [94].

4.2 Osnove teorije višekriterijumskih metoda

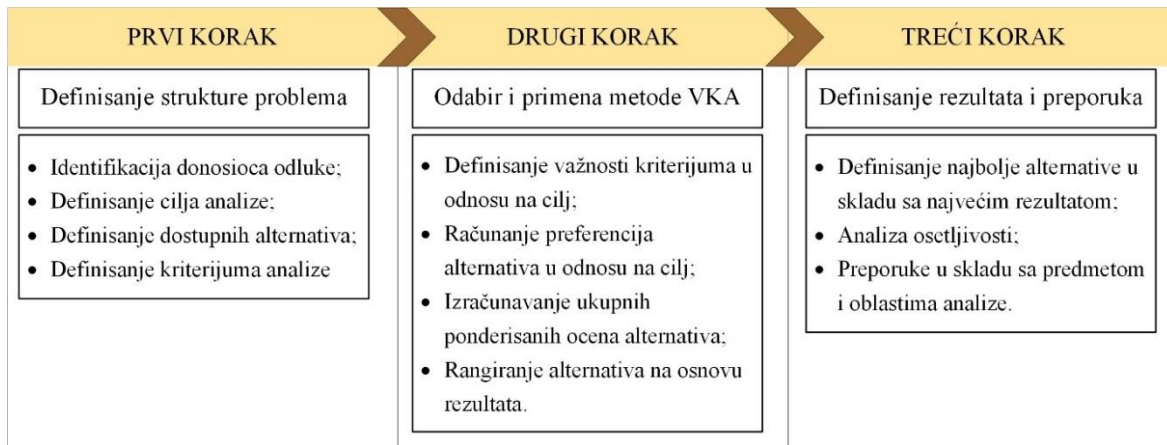
Višekriterijumske metode odlučivanja (VKO) (engl. *Multi-Criteria Decision Making - MCDM*) su deo operativnog istraživanja i primenjuju se u situacijama kada je potrebna analiza, rangiranje i odlučivanje među više interesno pomešanih alternativa. Predstavljaju alat za rešavanje kvantitativnih i kvalitativnih izbora. Alternative se analiziraju u skladu sa više različitih kriterijuma (parametara) koji po svojoj prirodi mogu ali ne moraju biti međusobno merivi.

Uglavnom se primenjuju za numeričku vrstu podataka. Izlazna vrednost metoda VKO je numeričkog oblika i predstavlja sintezu svih parametara analize za svaku od alternativa parcijalno [99]. Rezultat VKO predstavlja kompromisno rešenje u odnosu na preference donosioca odluke [100].

Metode VKO primenjuju se za rešavanje [101]–[103]:

- Problema izbora gde se koriste za izbor najbolje alternative iz skupa;
- Problema kvalifikacije gde se koriste za dodeljivanje skupa alternativa kategorijama koje su definisane;
- Problema rangiranja, gde se koriste za rangiranje alternativa na osnovu definisanih parametara;
- Opis problema, gde se koriste za razradu alternativa, definisanje kriterijuma i određivanje performansi svih ili pojedinih alternativa pri čemu se primenjuju dodatne informacije.

Različiti autori [102]–[106] navode da je odlučivanje i primena različitih vrsta VKO metoda, sadržana u tri logički povezana koraka koji su prikazani na slici 4.7. Treba naglasiti da se izbor optimalne metode, vrši tek nakon što su definisane sve stavke iz prve tačke definisanja strukture problema.



Slika 4.7. Koraci u primeni metoda višekriterijumskog odlučivanja

Danas je razvijen veliki broj različitih VKO metoda. Svaka metoda dizajnirana je za različite, specifične vrste problema. Ne može se reći da je neka od metoda dovoljno sveobuhvatna za rešavanje svih vrsta problema. Čovek kao donosilac odluke suočen je sa kvantitativnim i kvalitativnim, kompleksnim informacijama u čemu VKO predstavlja koristan alat jer uključuje ekspertski i menadžerski nivo odlučivanja [107]. Osnovni cilj primene metoda VKO je da se problem reši na način koji je konzistentan.

Osnovna klasifikacija VKO metoda [29-31] izvršena je na: Višeatributno odlučivanje (VAO) (engl. *Multi-Attribute Decision Making* - MADM), i Višeciljno odlučivanje (VCO) (engl. *Multi-Objective Decision Making* - MODM). Metode iz prve grupe se primenjuju za probleme izbora jedne od razmatranih alternativa iz reprezentativnog uzorka alternativa. U novije vreme se nazivaju metodama višekriterijumske analize (VKA) i taj izraz će biti korišćen i u nastavku. Drugu grupu čine metode koje se koriste za probleme sa beskonačno velikim brojem alternativa koje su pri tome matematički ograničene [111]. Preostale razlike prikazane su u tabeli 4.1 [112].

Tabela 4.1. Razlike između dve grupe metoda [112]

Metode	Razlike u odnosu na						
	Kriterijum	Zadatak	Parametar	Ograničenje	Alternative	Interakcija	Primena
VKA	Atribut	Implicitan	Eksplicitan	Neaktivno	Ograničene	Slaba	Izbor
VCO	Cilj	Eksplicitan	Implicitan	Aktivno	Neograničene	Jaka	Projektovanje

Metode VKA se mogu podeliti na: metode korisnosti (engl. *Utility Methods*), metode rangiranja (engl. *Outranking Methods*), metode kompromisa (engl. *Compromise Methods*) i ostale metode. Neke od metoda prikazane su u tabeli 4.2 [108]–[110].

Tabela 4.2. Metode VKO [108]

VKA - Metode koristi		VKA - Metode rangiranja	
SAW / WSN	<i>Simple Additive Weights / Weighted Sum Model</i>	ELECTREE	<i>ELimination Et Choix Traduisant la Réalité</i>
SMART	<i>Simple Multiattribute Rating Technique</i>	PROMETHEE	<i>Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation</i>
SPW / WPN	<i>Simple Product Weighting Weighted Product Model</i>	NAIADE	<i>Novel Approach to Imprecise Assessment and Decision Environments</i>
AHP / ANP	<i>Analytical Hierarchy Process Analytical Network Process</i>	ORESTE	<i>Organisation, Rangement Et Synthèse De Données Relarionnelles</i>
MACBETH	<i>Measure Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique</i>	COPRAS	<i>COmplex PROportional ASsessment</i>
RC	<i>Redukcioni koeficijenti</i>	ARAS	<i>Additive Ratio ASsessment</i>
VKA - Metode kompromisa		VKA - Druge metode	
CP	<i>Compromise Programming</i>	SMAA	<i>Stochastic Multicriteria Acceptability Analysis</i>
VIKOR	<i>VIšeKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Rešenje</i>	DEMATEL	<i>DEcision MAKing Trial and Evaluation Laboratory</i>
TOPSIS	<i>Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution</i>	FLAG	<i>Flag</i>
VCO			
DEA	<i>Data Envelopment Analysis</i>	MOP	<i>MultiObjective Programming</i>
LP	<i>Linear Programming</i>	SP	<i>Stochastic Programming</i>
NP	<i>Nonlinear Programming</i>	GP	<i>Goal Programming</i>
MOORA	<i>Multi-Objective Optimisation on the basis of Ratio Analysis</i>	MULTI-MOORA	<i>Multi-Objective Optimization by Ratio Analysis plus Full Multiplicative Form</i>

U oblasti rudarstva, najčešće primenjene metode su [103], [113]:

- AHP – *Analytical Hierarchy Process* [114], Thomas L. Saaty;
- PROMETHEE (I-VI) – *Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation* [115], Jean-Pierre Barns;
- TOPSIS – *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution* [108], Ching-Lai Hwang & Kwangsun Yoon;
- VIKOR – *VIšeKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Rešenje (Multicriteria Optimization and Compromise Solution)* [107], Serefim Opricovic & Gwo-Hshung Tzeng;
- ELECTRE (I, II, III, IV) – *ELimination Et Choix Traduisant la REALité* (ELimination and Choice Expressing REALity) [116], Bernard Roy.

Metoda AHP se svrstava u metode koristi a može se kvalifikovati i u grupu metoda rangiranja. Metode PROMETHEE i ELECTREE su metode rangiranja, dok su VIKOR i TOPSIS metode kompromisa. U modelu se primenjuju AHP i TOPSIS metode. Osnovne teorijske informacije metoda koje će se koristiti su date respektivno. Matematička interpretacija će biti prikazana kroz poglavlje 5.

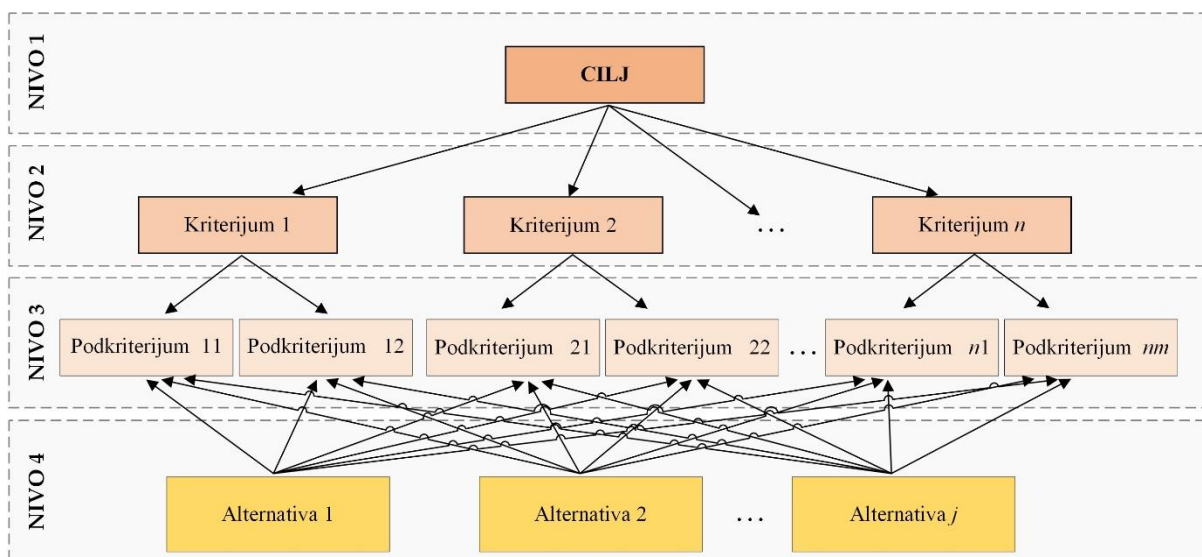
4.2.1. AHP metoda

Metodu AHP osmislio je *Thomas L. Saaty* 1980 godine [114]. Smatra se najčešće primenjenom metodom u oblasti rudarstva [103]. Bazira na sistemskom procesu koji uključuje različite faktore kao što su logika, iskustvo, znanje, emocije i sl. Predstavlja metodu koristi i rangiranja u kojoj značajan faktor ima donosioc odluke. Generalizacija ove metode izvedena je uvođenjem metode ANP koja se bavi interakcijama i zavisnostima kriterijuma i podkriterijuma na osnovu povratnih informacija (engl. *feedback*) iz relacija sa alternativama [117].

Koristi se za evaluaciju i izbor među više ponuđenih alternativa. Predstavlja jednostavan matematički alat za analizu parametara koji se po svojoj osnovnoj prirodi ne mogu porediti [99]. Metoda bazira na dekompoziciji problema na elementarne činioce koji se potom mogu porediti u parovima. Oslanja se na tri principa: dekompozicija, poređenje u parovima i sinteza prioriteta [118], [119].

Ulazni podaci mogu biti kvantitativnog ili kvalitativnog oblika [113]. Osnova nije u konkretnim vrednostima već u međusobnom odnosu (proporciji) razmatranih veličina. Početna pretpostavka je da se sa aspekta psihologije najjednostavnije odluke donose kada je ponuđeno samo dve alternative u jednoj interakciji [118]. Upravo je to osnova AHP metode. Kada se problem razloži, u svakoj interakciji poređenje uzima u obzir samo dve veličine. Sintezom svih rezultata poređenja dobijaju se sveobuhvatna rešenja.

AHP metoda se na osnovu toka aktivnosti može podeliti na nekoliko hijerarhijska nivoa. Broj hijerarhijskih nivoa je fleksibilan i zavisi od tipa analize i donosioca odluke. Na reprezentativnom primeru prikazanom na slici 4.8 dat je izgled hijerarhijskog pristupa AHP sa 4 nivoa.

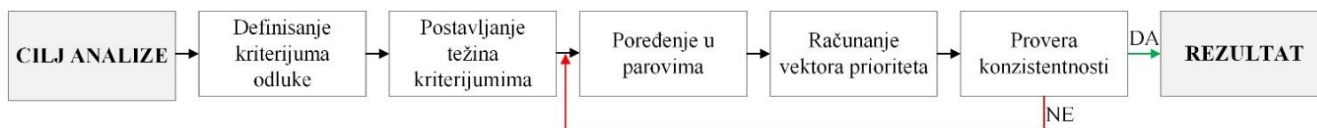


Slika 4.8. Hijerarhijska postavka AHP metode [113], [118]

Prvi nivo podrazumeva da se definiše cilj analize. Postavljanjem kriterijuma analize u odnosu na postavljeni cilj formira se drugi nivo metode. Treći nivo je opcioni i on sadrži niži nivo kriterijuma (podkriterijumi) u okviru već definisanih kriterijuma prethodnog nivoa. Da li će biti ovog nivoa i u kojoj meri zavisi od tipa analize i donosioca odluke. Poslednji nivo podrazumeva definisanje alternativa u izboru. Alternative se porede u odnosu na kriterijume i pod-kriterijume prethodnih nivoa.

Dodatna pogodnost ove metode je provera konzistentnosti donosioca odluka [120], [121]. Poseban značaj ovoga je u ekspertskim modelima. Postupak provere je matematički definisan. Autor metode definisao je granicu konzistentnosti na 10% [121]. Ako je vrednost iznad definisane granice potrebno je ponoviti postupak i pronaći grešku donosioca odluke.

Jednostavan grafički prikaz toka AHP metode prikazan je na slici 4.9.



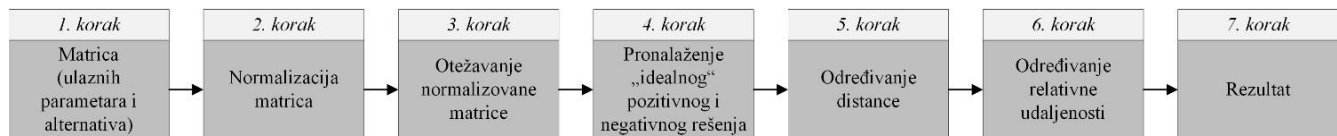
Slika 4.9. Tok AHP metode

4.2.2. TOPSIS metoda

Metodu TOPSIS su osmislili i opisali *Hwang & Yoon* 1981. godine. Vremenom je metoda unapređena. Predstavlja metodu koja rešenje vidi u kompromisu među ponuđenim alternativama. Za izabranu alternativu se može reći da je najbliže pozitivnom „idealnom“ rešenju tj. najdalje negativnom „idealnom“ rešenju [99], [121], [122]. U zavisnosti od tipa podatka, pozitivnom „idealnom“ rešenju se dodeljuje preferenca maksimuma ili minimuma [99]. Osnovna prednost ove metode je u tome što se razmatrana alternativa prema određenom kriterijumu poredi sa najboljim mogućim rezultatom među drugim alternativama u okviru tog kriterijuma. Na taj način se umanjuje subjektivnost u metodi [50], [99].

Optimalno alternativno rešenje koja se dobije kao najbolje kompromisno rešenje, sačinjeno je od najboljih vrednosti iz razmatranog seta kriterijuma. Nasuprot je najlošije alternativno rešenje koje ima najlošije vrednosti iz seta kriterijuma. Metoda ima matematički definisanu mogućnost vrednovanja značajnosti svakog kriterijuma [123]. Vrednovanje može biti deo ekspertske ocene ili rezultat implementacije neke druge metode što se sve više koristi u poslednje vreme [113], [124].

Na slici 4.10 prikazan je tok metode. Metoda je sačinjena od 7 posledičnih koraka. Matematička interpretacija svakog koraka će biti definisana u narednom poglavlju. U okviru trećeg koraka se koriste vrednosti značajnosti kriterijuma dobijene na jedan od pomenuta dva načina.



Slika 4.10. Tok TOPSIS metode

4.3 Statistička obrada podataka

Kod kompleksnih tehničkih sistema često je prisutan veliki broj podataka. Analize podataka sa aspekta raspoloživosti podrazumevaju da je potrebno pronaći analitički oblik izraza koji u najboljoj mogućoj meri može da aproksimira podatke u funkciji vremena. Postupak je definisan iz nekoliko generalnih koraka: statistička obrada zabeleženih podataka; postavljanje odgovarajućeg zakona raspodele; i određivanje parametara raspodele [62].

Karakter događaja (otkaza) sa vremenom t kao slučajnom nezavisnom promenljivom ili karakter drugih fenomena sa slučajnom veličinom x , može biti neprekidan ili prekidan [62]. Statički proračuni i analize tada koriste kontinualne ili diskretne zakone raspodele. Pouzdanost i raspoloživost tehničkih sistema je najčešća oblast sa kontinualnim zakonima raspodele, dok je održavanje tehničkih sistema (npr. analiza zaliha rezervnih delova) oblast diskretnih zakona raspodele. U nastavku je dat kratak pregled raspodela neprekidnog i prekidnog karaktera.

Neprekidni zakoni raspodele:

- Eksponencijalna raspodela je jednoparameterska. Primenjuje se u teoriji pouzdanosti, kod složenih tehničkih sistema, dok je u matematičkom kontekstu najjednostavnija [62], [70], [125].
- Normalna raspodela je dvoparameterska i predstavnik je osnovnih zakonitosti u statistici. Primenjuje se u analizi različitih fenomena u prirodi i tehnicima. Karakteristična je za pojave na čiji rezultat utiče veliki broj faktora, a da ni jedan pri tome nije dominantan [62], [70].
- Logaritamsko normalna raspodela je karakteristična po desnoj asimetriji koja raste u funkciji povećanja standardne devijacije. Koristi se u analizi postupaka održavanja odnosno pogodnosti održavanja kada se određene aktivnosti obavljaju sa vremenskim zastojem [62].

- Vejbulova raspodela može biti i troparametarska. Složenog je oblika ali se koristi u teoriji pouzdanosti. Često se primenjuje pri ispitivanju elemenata na zamor. Uslovljena je parametarskim oblikom pa može predstaviti fenomene koje pokrivaju drugi zakoni distribucije. Može da uključi intenzitet otkaza u padajućem, nepromenjenom ili rastućem obliku [62], [70].

Prekidni (diskretni) zakoni raspodele:

- Binomna raspodela je osnovna diskretna raspodela. Bazira na pretpostavci da će se od ukupno n pokušaja nekog ishoda, ostvariti x puta postavljeni rezultat [62], [125].
- Poasonova raspodela se koristi kada nije poznata verovatnoća pojavljivanja povoljnih ishoda. U poređenju sa binomnom, slučajna veličina može imati beskonačno mnogo vrednosti [62], [125].

Kada se podaci koji su potrebni za analizu izdvoje, obrada se sastoji iz nekoliko koraka [62], [70]:

1. Osnovna statistička obrada i određivanje veličine grupe podataka,
2. Izdvajanje, grupisanje i obrada podataka,
3. Grafičko predstavljanje (histogram ili poligon),
4. Postavljanje hipoteza o teorijskom zakonu raspodele,
5. Određivanje teorijskog zakona raspodele,
6. Testiranje hipoteza.

Osnovna statistička obrada velike grupe podataka, podrazumeva niz opšte poznatih matematičkih operacija koje podrazumevaju da se iz skupa odredi: minimalni i maksimalni član, aritmetička sredina (srednja vrednost), standardna devijacija, medijana i mod-a.

Grupisanje podataka započinje određivanjem veličine skupa. Podaci se preliminarno sortiraju prema rastućim veličinama a potom dele u intervale. Posmatrani podaci se mogu podeliti na z intervala. Dužine intervala ne moraju biti jednake. Preporučeni broj intervala u zavisnosti od broja parametara prikazan je u tabeli 4.3, a može se odrediti i na osnovu iskustvenih preporuka preko nekog od sledećih izraza [62], [70], [125]:

$$\begin{aligned}
 z &= N^{0,5} \\
 z &= 2 \cdot N^{0,333} \\
 z &= 5 \cdot \log N \\
 z &= 1 + 3.33 \cdot \log N
 \end{aligned}
 \tag{4.22}$$

Tabela 4.3. Preporučeni broj intervala u funkciji broja podataka u skupu N [70]

N	30 – 60	60 – 100	100 – 200	200 – 500	> 500
z	5 – 8	7 – 10	9 – 12	12 – 17	21

Grafičko prikazivanje razvrstanih podataka u intervale, predstavlja korak koji sledi. Najčešće se koriste dva grafička oblika: histogram i poligon. U zavisnosti od tipa analize, histogrami mogu sadržati kumulativne (apsolutne) ili relativne vrednosti podataka u granicama intervala. Na apscisi dijagrama se najčešće prikazuje vreme (t), dok se na ordinati prikazuje učestalost pojavljivanja podataka (n).

Poslednji korak u analizi podataka predstavlja definisanje teorijskog zakona raspodele, a potom i testiranje hipoteze o raspodeli. Potrebno je utvrditi da li je, i u kojoj meri, usvojeni teorijski zakon raspodele podoban za interpretaciju slučajne promenljive t usvojene za analizu. Metode testiranja mogu biti grafičke i analitičke. U ovom slučaju se akcenat stavlja na analitičke metode, koje podrazumevaju izračunavanje funkcije gustine i kumulativne verovatnoće za grupu podataka. Dobijeni rezultati se upoređuju sa rezultatima koji bi se dobili na osnovu izabrane teorijske funkcije. Najčešće su korišćeni dva statistička testa: Kolmogorov-Smirnova (KS) i χ^2 kriterijum Pirsona [62], [125].

Kod oba postupka odstupanje se može tolerisati do određenih (definisanih) granica u zavisnosti od veličine grupe podataka. Odstupanje u granicama dozvoljenog ukazuje da su funkcije saglasne, dok u suprotnom treba ispitati poklapanje sa drugom teorijskom funkcijom. Matematička interpretacija će biti data za χ^2 test, koji će se koristiti u nastavku. Test je sadržan u 5 koraka [62], [125].

Korak 1 – računanje parcijalne verovatnoće (p_i) kada slučajna veličina x uzima vrednosti iz intervala (x_i ; x_{i+1}) pomoću teorijske raspodele funkcije [125]:

$$p_i = P(x_i \leq x \leq x_{i+1}) = \int_{x_i}^{x_{i+1}} p(x) dx = F(x_{i+1}) - F(x_i), \quad i = 1, 2, \dots, z \quad (4.23)$$

Korak 2 – definisanje teorijske učestalosti ($N \cdot p_i$) za intervale [x_{i-1} ; x_i] [62], [125].

Korak 3 – računanje kriterijuma testa (χ_{sr}^2) [62], [125]:

$$\chi_{sr}^2 = \sum_{i=1}^z \frac{(n_i N \cdot p_i)^2}{N \cdot p_i} \quad (4.24)$$

Korak 4 – određivanje stepena slobode (ν) [62], [125]:

$$\nu = z - r - 1 \quad (4.25)$$

gde je r – broj parametara pretpostavljene teorijske raspodele (za eksponencijalnu $r = 1$; za normalnu i vejbulovu $r = 2$) [62], [70].

Korak 5 – izračunate vrednosti χ_{sr}^2 se upoređuju sa vrednostima iz tabele 4.4. Kritične vrednosti (χ_{kr}^2) iz tabele se usvajaju na osnovu izračunatog stepena slobode (ν) i nivoa značajnosti (α) pri čemu se najčešće koriste $\alpha = 0.01$ ili $\alpha = 0.05$ [74], [125].

$$\chi_{kr}^2 = \chi^2(\alpha, \nu) \quad (4.26)$$

pri čemu se donose sledeći zaključci [125]:

$$\begin{array}{ll} \chi_{sr}^2 \geq \chi_{kr}^2 & \text{postavljena hipoteza se odbacuje; ili} \\ \chi_{sr}^2 < \chi_{kr}^2 & \text{postavljena hipoteza se prihvata.} \end{array}$$

Tabela 4.4. Kritične vrednosti za χ^2 test u odnosu na broj stepena slobode (ν) i nivo značajnosti (α) [62], [125]

stepen slobode (ν)	Nivo značajnosti (α)					
	0.01	0.05	0.10	0.90	0.95	0.99
1	6.6	3.8	2.71	0.02	0.004	0.0002
2	9.2	6.0	4.61	0.21	0.10	0.02
3	11.3	7.8	6.25	0.58	0.35	0.12
4	13.3	9.5	7.75	1.06	0.71	0.30
5	15.1	11.1	9.24	1.61	1.15	0.55
6	16.8	12.6	10.6	2.20	1.64	0.87
7	18.5	14.1	12.0	2.83	2.17	1.24
8	20.1	15.5	13.4	3.49	2.73	1.65
9	21.7	16.9	14.7	4.17	3.33	2.09
10	23.2	18.3	16.0	4.87	3.94	2.56
11	24.7	19.7	17.3	5.58	4.57	3.05
12	26.2	21.0	18.5	6.30	5.23	3.57
13	27.7	22.4	19.8	7.04	5.89	4.11
14	29.1	23.7	21.1	7.79	6.57	4.66
15	30.6	25.0	22.3	8.5	7.26	5.23

4.3.1. Eksponencijalna raspodela

Eksponencijalna raspodela se ubraja u jedno-parametarske raspodele. U oblasti pouzdanosti i raspoloživosti ima veliku primenu. Matematička interpretacija je jednostavna. Funkcija gustine raspodele otkaza definiše se sledećim izrazom [62], [70]:

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (4.27)$$

gde veličina (λ) predstavlja intenzitet otkaza kao parametar raspodele. Kada gustina otkaza ima konstantnu vrednost ($\lambda = \text{const}$), koristi se izraz [70]:

$$\lambda = \frac{1}{m} = \text{const} \quad (4.28)$$

gde je vrednost (m) srednje vreme i zavisi od zabeleženih pojedinačnih vrednosti vremena (t_1, \dots, t_n).

Kumulativna funkcija raspodele tj. funkcija otkaza može se predstaviti na sledeći način [62], [70]:

$$F(t) = \int_0^t \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t} \cdot dt = 1 - e^{-\lambda \cdot t} \quad (4.29)$$

Sledi da funkcija pouzdanosti ima oblik [62], [70]:

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\lambda \cdot t} \quad (4.30)$$

Intenzitet otkaza u funkciji vremena se može razložiti na sledeći način [62], [70]:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t}}{e^{-\lambda \cdot t}} = \lambda = \text{const} \quad (4.31)$$

Kod složenih sistema koji su sačinjeni od n redno vezanih elemenata, pri čemu se za svaki element ponaosob mogu koristiti eksponencijalne raspodele sa intenzitetima otkaza $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, raspodela otkaza čitavog sistema će takođe biti eksponencijalna. U tom slučaju se ukupni intenzitet otkaza dobija sabijanjem parcijalnih intenziteta svakog elementa [62], [70].

5. RAZVOJ FAZI EKSPERTSKOG MODELA PROCENE RIZIKA

Svaka situacija koja stvara efekat neizvesnosti na postavljane ciljeve predstavlja rizik. Efekat, odnosno odstupanje od ciljeva može biti pozitivno ili negativno. Procena i upravljanje rizikom, usmerena je na negativne efekte. Kod rotornih bagera, rizik predstavlja sveobuhvatni pojam koji se može posmatrati sa više aspekata. Na osnovu različitih aspekata rizika, analize mogu obuhvatati: rizik po strukturnu stabilnost; rizik po prekid proizvodnog procesa; rizik po radno okruženje; i rizik po životnu sredinu. Predmet analize u disertaciji su prva dva aspekta rizika.

Neizvesnost na razmatrane apsekte rizika izazivaju havarija i zastoj. Pojam havarija se definiše kao „svaka šteta, nezgoda, ili kvar uopšte“ [126]. Predstavlja događaj koji nije očekivan i nije izazvan sa namerom. Zastoj se definiše kao „vremenski interval kada tehnički sistem nije ispravan i definisani zadatak se ne može izvršiti na propisan način“ [18]. Kada je zastoj izazvan otkazom elemenata, tada događaj nije očekivan i nije izazvan sa namerom. U suprotnom je reč o planiranim aktivnostima održavanja koja predstavljaju drugi deo ukupnog zastoja nekog sistema.

U disertaciji se formiraju dva parcijalna modela rizika. Prvi model analizira rizik po strukturnu stabilnost rotornog bagera odnosno rizik od havarije. Drugi model analizira rizik po prekid proizvodnje rotornog bagera odnosno rizik od zastoja. Pri izračunavanju i proceni rizika, havarija i zastoj su opisani kroz parcijalne indikatore rizika. Takav pristup isti je kod inovativnih modela definisanih u disertaciji i kod tradicionalnih pristupa računanja rizika. Sličnost sa tradicionalnim pristupom ogleda se i u ekspertskom ocenjivanju parcijalnih indikatora. Za procenu rizika od nastanka havarije, parcijalni indikatori koji sintezuju ukupni rizik su: verovatnoća da će do havarije da dođe, ozbiljnost posledica havarije i mogućnost blagovremene detekcije havarije. Parcijalni indikatori koji opisuju zastoj, a koji sintezuju ukupni rizik su: raspoloživost, vreme zastoja i mogućnost detekcije zastoja.

Koncept kalkulacije rizika kod oba modela je sličan. Inovativnost se ogleda u sintezi parcijalnih indikatora i razvoju metodološkog pristupa izračunavanju rizika. Fazi logika predstavlja osnovu oba sintezna modela. Kako bi se ostvarila poboljšanja sa aspekta rangiranja uticaja parcijalnih indikatora i smanjenja disperzije rezultata, primenjene su dve višekriterijumske metode. AHP metoda se koristi za rangiranje parcijalnih indikatora, dok se TOPSIS metoda koristi u kompoziciji fazi modela.

Polazne hipoteze inovativnih modela mogu da se predstavje kroz četiri tačke:

- i. smanjenje subjektivnosti ekspertskog tima u ocenjivanju rizika;
- ii. fleksibilnost modela u odnosu na konkretnu analizu uvođenjem međusobnog rangiranja parcijalnih indikatora u model;
- iii. povećanje preciznosti modela kroz model koji će smanjiti disperziju rezultata; i
- iv. definisanje smernica za poboljšanje postojeće strategije održavanja na osnovu rezultata rizika.

Razlika između dva formirana inovativna modela je u načinu dekompozicije rotornih bagera i tipu podataka koji koriste. Prvi model razmatra rizik na prethodno definisanim slabim mestima. Slaba mesta predstavljaju delove ili komponente rotornog bagera koji su prema funkciji statički i dinamički opterećene, dok su prema konstruktivnoj poziciji odgovorni za stabilnost bagera. Ulazni podaci koji se koriste su dobijeni na osnovu ekspertskih ocena (lingvistički tip). Drugi model razmatra rizik od zastoja na nivou čitavog bagera. Rezultat rizika usmeren je ka uočavanju trenutnog stanja i preostalih mogućnosti bagera, pa analiza može biti sprovedena na taj način. Ulazni podaci za ovaj model se dobijaju na osnovu statističke obrade podataka (numerički tip) i na osnovu ekspertskih ocena (lingvistički tip).

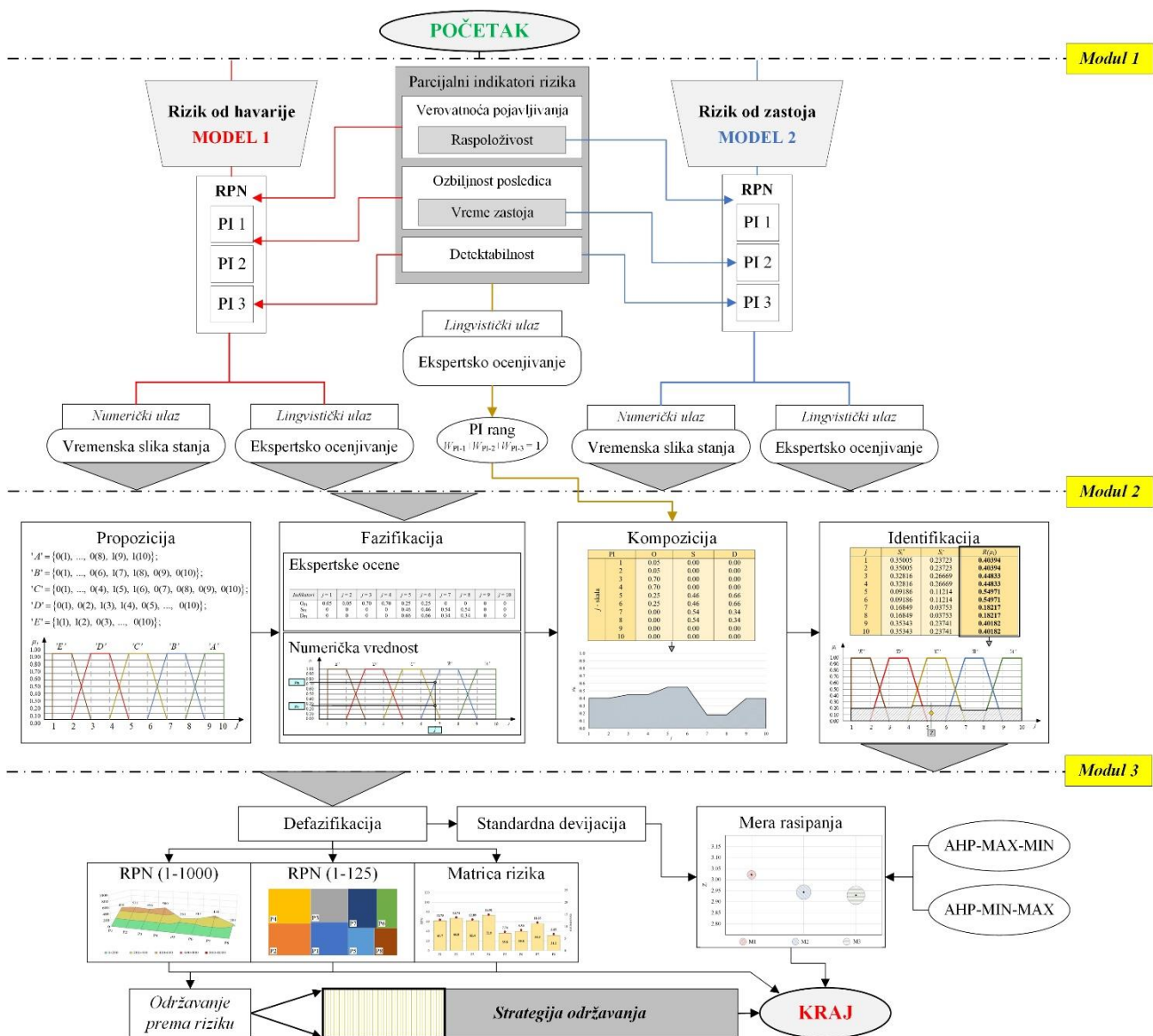
U prvom slučaju se ekspertске ocene dodeljuju u skladu sa datim lingvističkim opisom. U drugom slučaju ulazni podaci se dobijaju obradom postojećih podataka koji se potom predstavljaju na formiranu *j*-skalu fazi skupova gde presečne tačke predstavljaju funkcije pripadnosti određenim fazi skupovima.

U fazi propoziciji se definišu oblici fazi skupova i lingvistički opisi svakog skupa [50]. Ulazni podaci se postupkom fazifikacije mapiraju na formirane fazi skupove. Na taj način se formira set ocena u obliku funkcije pripadnosti svakom skupu. Fazi kompozicija modela predstavlja najznačajniji deo modela. U ovom delu se izvršava kalkulacija i definišu ishodi prema j -skali. Metoda TOPSIS je implementirana u fazi kompoziciju u cilju smanjenja rasipanja rezultata. Kod fenomena kao što je rizik, smanjenje rasipanja rezultata je značajan faktor. Izlazne vrednosti TOPSIS metode se postupkom identifikacije mapiraju u potreban izlazni oblik. Metodom centra masa (engl. *the centre of mass*) vrednosti se svode na jednu numeričku vrednost koja predstavlja rizik i koja je međusobno uporediva sa ostalim analizama [50]. Rezultati se prikazuju i na tri skale koje su vezane za tradicionalne pristupe: FMECA (od 1 do 1000), FMEA metode (od 1 do 125) i matrica rizika (od 1 do 25). Na osnovu rezultata, formira se nivo rizika slabih mesta, uočava se trenutno stanje rotornog bagera, ukazuje se na preostale mogućnosti i formiraju smernice za promene u postojećoj strategiji održavanja.

Algoritam sinteznih modela prikazan je na slici 5.1. Modeli su po prirodi univerzalni za različite tipove ulaznih podataka. Kod prvog modela se zadržava osnovni oblik parcijalnih indikatora iz tradicionalnog RPN pristupa. Parcijalni indikatori su: verovatnoća pojavljivanja (O), ozbiljnost posledica (S) i mogućnost detekcije (D). Kod drugog modela parcijalni indikatori su delimično izmenjeni. Kao indikator verovatnoće pojavljivanja koristi se raspoloživost (A) tehničkog sistema, kao indikator ozbiljnosti posledica koristi se vreme zastoja (T), dok je mogućnost detekcije (D) ostala u osnovnom obliku. Sa dijagrama se može uočiti da se oba modela sastoje iz tri modula [50]:

- Modul 1 – *definisane ulaznih parametara i obrada podataka*.
 - Prikupljanje, analiza i obrada podataka sa ciljem formiranja informacija o istorijatu događaja i radu tehničkog sistema.
 - Za prvi model rezultat analize treba da prikaže slaba mesta na tehničkom sistemu za koja se potom radi ekspertsko ocenjivanje na osnovu lingvističkih podloga, što predstavlja ulazne vrednosti u Modul 2.
 - Za drugi model se radi statistička obrada podataka, koja za prva dva parcijalna indikatora predstavlja ulaz u Modul 2, dok se za treći (mogućnost detekcije) koristi ekspertsko ocenjivanje.
 - Koeficijenti značajnosti parcijalnih indikatora određuju se AHP metodom na osnovu ekspertskih ocena. Izračunati koeficijenti takođe predstavljaju izlaznu veličinu iz ovog modula;
- Modul 2 – *izračunavanje rizika*.
 - Ulaz u ovaj modul su ekspertске ocene i/ili rezultati statističke obrade podataka prema parcijalnim indikatorima koji su definisani. Fazi propozicija se formira nezavisno od prethodnog modula. Ulazni podaci i vrednosti fazi propozicije se mapiraju u postupku fazifikacije.
 - U narednom koraku, fazi zaključivanja, se za kompoziciju modela koristi TOPSIS metoda. U skladu sa tokom metode pridodaju joj se i vrednosti koeficijenta značajnosti parcijalnih indikatora iz prethodnog modula. Na osnovu toga se dobijaju ishodi kompozicija u skladu sa j -skalom.
 - Postupkom identifikacije se rezultati mapiraju na skalu od 'A' do 'E' rizika koja sadrži i lingvistički opis. Vrednosti iz identifikacije predstavljaju izlaz iz ovog modula;
- Modul 3 – *prikaz rezultata*.
 - Postupkom defazifikacije se rezultat generiše u jednu numeričku vrednosti. Tok modela ide u dva pravca.
 - Prvi je ponderisanje vrednosti na različite skale i primena sistema održavanja prema riziku.
 - Drugi predstavlja određivanje standardne devijacije kao mere rasipanja i po potrebi analiza u odnosu na druge metode primenjene u ovoj oblasti.

Teorijska osnova svih metoda koje se koriste u modelima prikazana je u poglavlju 4. Prethodno je dat i kratak prikaz toka modela. U nastavku su detaljnije informacije u skladu sa tokom modela i matematički proračun procene rizika. Segmenti u nastavku podeljeni su u skladu sa definisana tri modula.



Slika 5.1. Strukturni algoritam modela procene rizika

5.1 Modul 1 – Definisanje ulaznih parametara i obrada podataka

5.1.1. Definisanje ulaznih podataka

Kod oba modela međusobno rangiranje parcijalnih indikatora se dobija ekspertskim ocenjivanjem. U svakoj interakciji ocenjuje se međusobni odnos po dva parcijalna indikatora na ukupnu performansu rizika. Postupak ekspertskog ocenjivanja i formiranja matrice će biti prikazano u poglavlju 5.1.2.

a) Ulazni podaci za Model 1 – Rizik po strukturu stabilnost (rizik od havarije)

Parcijalni indikatori ovog modela su zadržani u osnovnom obliku (O, S, D). Nakon što je izvršeno njihovo međusobno ocenjivanje, pristupa se drugom nivou ekspertskog ocenjivanja. U ovom delu eksperti dodeljuju ocene za svaki parcijalni indikator. Parcijalni indikatori definisani su u odnosu na lingvističke promenljive. Za svaku ocenu dat je lingvistički opis. Na osnovu opisa, analitičari dodeljuju ekspertske ocene. Ocene se mogu dodeliti jednom skupu ili se mogu raspodeliti na dva susedna. Zbir dodeljenih ocena za svaki parcijalni indikator je 1 (100%). Dodeljene ocene predstavljaju ulazne podatke modela. U tabeli 5.1 prikazane su ocene i lingvistički opisi za sve parcijalne indikatore rizika.

Tabela 5.1. Lingvistički opis ocena parcijalnih indikatora rizika [50]

Ocena	Ključna reč	Lingvistički opis
Verovatnoća pojavljivanja (<i>O</i>)		
A_{O1}	Izraženo	Izvesna je pojava havarije
B_{O1}	Verovatno	Velike šanse da dođe do pojave havarije
C_{O1}	Umereno	Havarija je moguća
D_{O1}	Retko	Izrazito mala verovatnoća pojave havarije
E_{O1}	Neznatno	Nema opasnosti od pojave havarije
Ozbiljnost posledica (<i>S</i>)		
A_{S1}	Izražena	Ugrožena bezbednost mašine
B_{S1}	Velika	Veliki poremećaj mašine
C_{S1}	Umerena	Prisutna potencijalna opasnost
D_{S1}	Mala	Neznatni poremećaj
E_{S1}	Nikakva	Mašina nije ugrožena
Mogućnost detekcije (<i>D</i>)		
A_{D1}	Nemoguće	Nije moguće uočiti opasnost
B_{D1}	Neznatno	Kompleksna situacija uočiti opasnosti
C_{D1}	Umereno	Postoji šansa da se locira opasnost
D_{D1}	Izvesno	Lako se locira potencijalna havarija
E_{D1}	Očito	Havarija se može sprečiti

b) Ulazni podaci za Model 2 – Rizik po prekid proizvodnje (rizik od zastoja)

Kod drugog modela parcijalni indikatori su: raspoloživost (*A*), vreme u zastoju (*T*) i mogućnost detekcije (*D*). Raspoloživost predstavlja prvi parcijalni indikator. Kada je u pitanju velika grupa podataka, može se primeniti postupak izračunavanja stacionarne raspoloživosti (k_A). Vreme zastoja (*T*) analizira se na osnovu iste grupe podataka. Vreme u zastoju je značajan parametar jer je u direktnoj korelaciji sa indirektnim troškovima koji se generišu usled gubitka planirane proizvodnje.

Najveći broj slučajeva analize raspodele podataka kod tehničkih sistema ukazuje da se može primeniti zakonitost eksponencijalne raspodele. Tada intenzitet otkaza (λ) i intenzitet održavanja (μ) su konstante i imaju vrednosti u funkciji vrednosti *MTBF* i *MDT*.

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} = const. \rightarrow MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (5.1)$$

$$\mu = \frac{1}{MDT} = const. \rightarrow MDT = \frac{1}{\mu} \quad (5.2)$$

Sledi da se funkcija raspoloživosti $A(t)$ predstavlja kao:

$$A(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot e^{-(\lambda + \mu)t} \quad (5.3)$$

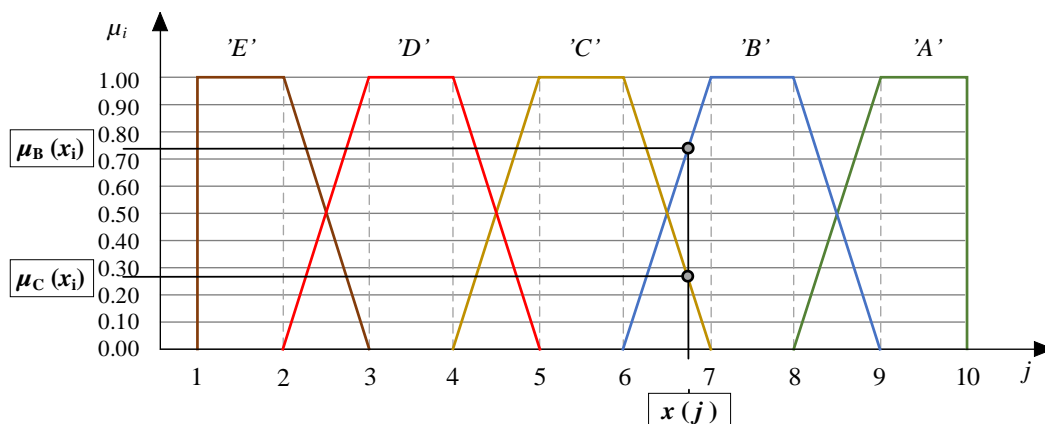
Stacionarna vrednost raspoloživosti (k_A) se dobija na osnovu:

$$A = k_A = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{1}{1 + \frac{\lambda}{\mu}} \quad (5.4)$$

Na osnovu rezultata za sve podatke iz grupe određuju se maksimalna i minimalna vrednost raspoloživosti. Dobijene vrednosti postaju referente granice za formiranje *j*-skale fazi skupova. Rastojanje između susednih ocena na *j*-skali je jednako. Funkcija pripadnosti dobija se mapiranjem vrednosti na formiranu skalu.

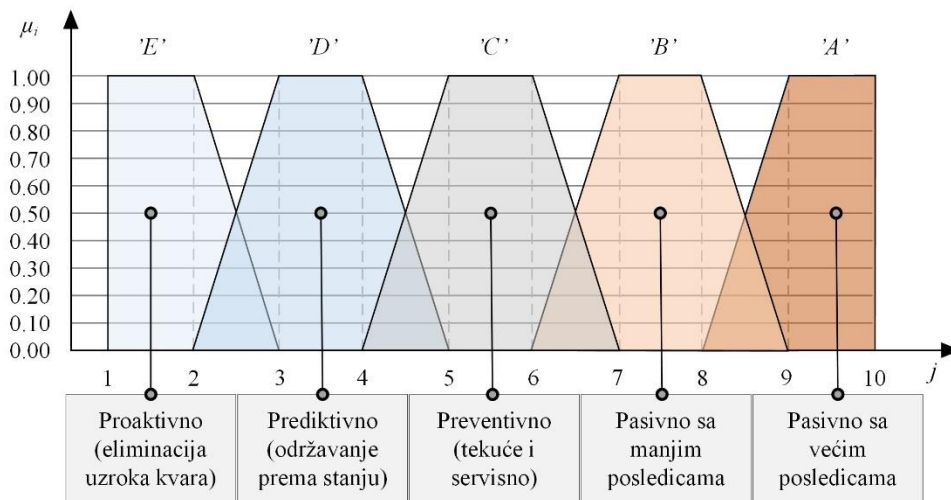
Za određivanje drugog parcijalnog indikatora, vremena zastoja (T) koriste se sva vremena o zabeleženim zastojima u razmatranom periodu. Ukupna vremena zastoja se dele na 5 intervala koji procentualno sadrže jednak broj podataka. Širina intervala ne mora biti jednaka. Krajnje vrednosti intervala postaju krajnje (granične) vrednosti fazi skupova ('A', ..., 'E') na j -skali. Iz ukupne grupe podataka se izdvajaju vrednosti koje značajno odstupaju i računa se srednje vreme zastoja kao referentna veličina koja se potom mapira na formiranu skalu na isti način kao kod prethodnog parcijalnog indikatora.

Nakon što se formira skala i odredi referentna veličina, pristupa se očitavanju vrednosti funkcije pripadnosti koja može biti sadržana u jednom ili u dva fazi skupa. Dobijene vrednosti postaju ulazni parametri za Modul 2. Primer mapiranja dat je na slici 5.2.



Slika 5.2. Primer određivanja funkcije pripadnosti za parcijalne indikatore (A) i (T)

Mogućnost detekcije (D) je treći parcijalni indikator i dobija se kao i kod prvog modela ekspertskim ocenjivanjem. Za konkretnu studiju slučaja formirana je anketa na osnovu različitih politika održavanja. Najjednostavnija detekcija je kod proaktivnog sistema održavanja sa totalnim monitoringom. U takvim okolnostima je smanjenja šansa za dođe do nepredviđenog zastoja u proizvodnji. Nasuprot je pasivno održavanje sa većim posledicama kod kog nije prisutan monitoring i mašini se dozvoljava rad dokle god ne nastane problem. U ovom slučaju detektabilnost ima veliki uticaj na ukupni rizik. Između pomenuta dva sistema od najlošijeg do najboljeg scenarija su: pasivno održavanje sa manjim posledicama, preventivno održavanja (tekuće i servisno) i prediktivno održavanje (prema stanju). Raspodela je prikazana grafički na slici 5.3. Ulazni podaci za ovaj parcijalni indikator se dobijaju na osnovu ekspertskog ocenjivanja na isti način kao kod prvog modela. Lingvistički opis svake ocene dat je u tabeli 5.2.



Slika 5.3. Raspodela sistema održavanja kao polazna osnova za određivanje detektabilnosti

Tabela 5.2. Lingvistički opis ocena mogućnosti detekcije za Model 2

Ocena	Ključna reč	Lingvistički opis
A_{D1}	Pasivno održavanje sa većim posledicama	Ne postoji monitoring i održavanje je isključivo korektivno, zastoji se ne mogu predvideti
B_{D1}	Pasivno održavanje sa manjim posledicama	Nizak nivo monitoringa i održavanja, manji zastoji se ne mogu predvideti
C_{D1}	Preventivno održavanje (tekuće i servisno)	Plansko vremenski definisano preventivno održavanje sa vizuelnim opažanjima, postoji šansa da se predvidi zastoj
D_{D1}	Prediktivno održavanje (održavanje prema stanju)	Stalno posmatranje i praćenje stanja sistema sa visokim učešćem monitoringa, ozbiljniji zastoj se može predvideti
E_{D1}	Proaktivno održavanje (eliminacija uzroka kvara)	Totalni monitoring sistema (24/7), kvar se može predvideti

5.1.2. AHP metoda – Rangiranje parcijalnih indikatora

Metoda AHP implementirana je u cilju rangiranja parcijalnih indikatora (O, S, D odnosno A, T, D). Dakle, metoda ima interakciju sa prvim ekspertskim ocenama. Kombinacije ocena parcijalnih indikatora zavise od sveobuhvatnosti uticaja na ukupnu performansu rizika. Opravdanost primene AHP metode ogleda se kroz nekoliko prednosti ove metode. AHP metoda predstavlja jednostavan matematički alat, koji se oslanja na relativne vrednosti odnosa među razmatranim indikatorima [99], [118]. Izlazne vrednosti metode iskazane su u specifičnom obliku (koeficijentima) za svaki od razmatranih parcijalnih indikatora, čiji zbir daje vrednost 1 [50]. Metoda daje mogućnost provere konzistentnosti donosioca odluke pri formiranju matrice. Na osnovu svega toga izabrana je AHP metoda u ovom delu modela.

Osnovne teorijske postavke AHP metode prikazane su u poglavlju 4.2.1. Metoda je koncipirana u jednom nivou međusobnog poređenja. U nastavku je prikazan tok matematičkog proračuna sadržanog u tri koraka.

Korak 1 – Poređenje parcijalnih indikatora u parovima

Poređenje u parovima parcijalnih indikatora sprovodi se na osnovu ekspertskog ocenjivanja u skladu sa dodeljenim vrednostima odnosa. U svakoj interakciji se međusobno porede dva parcijalna indikatora. Ulazne informacije za dodeljivanje poređenja parcijalnih indikatora prikazane su u tabeli 5.3 na modifikovanoj Saaty skali [114], [119] relativnog odnosa značajnosti.

Tabela 5.3. AHP skala značajnosti [114]

Nivo značajnosti	Numerička vrednost unosa	Recipročna vrednost unosa
Jaka značajnost	3	1/3 (0.333)
Umerena značajnost	2	1/2 (0.500)
Jednaka značajnost	1	1 (1.000)

Korak 2 – Formiranje matrice i izračunavanje koeficijenta preferencija parcijalnih indikatora

Nakon poređenja u parovima svih parcijalnih indikatora, dobijaju se vektori prioriteta (w_i) [50]. Dobijene vrednosti se koriste za formiranje matrice oblika M ($m \times n$) (5.5) gde je n broj razmatranih parcijalnih indikatora, dok je a_{ij} mera relativnog poređenja w_i/w_j pri čemu je $i, j = 1, \dots, n$ [50], [127]–[129].

$$M = \begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_j \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_j \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_i/w_1 & w_i/w_2 & \dots & w_i/w_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1j} \\ a_{21} & 1 & \dots & a_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{i1} & a_{i2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

Rezultati AHP metode dobijaju se izračunavanjem matrice. Izlazne vrednosti definisane su kao težinski koeficijenti različitih parcijalnih indikatora ($W_{O, A}$, $W_{S, T}$, W_D) [50]. Ove vrednosti predstavljaju ulazne parametre za dalji model.

Korak 3 – Provera konzistentnosti donosioca odluke

Dodatna pogodnost primene AHP metode je jednostavna provera konzistentnosti ekspertskog tima [120]. Kako bi se to ostvarilo potrebno je da se izračunaju indeks konzistentnosti (engl. *Consistency Index* – *CI*) i stepen konzistentnosti (engl. *Consistency Ratio* – *CR*) [50]. Uslov konzistentnosti je da vrednost (*CR*) bude manja od 0.1 [50]. U suprotnom slučaju potrebno je proveriti rezultate, ulazne podatke i detektovati razlog nekonzistentnosti. Obično se to svodi na ponavljanje postupka [99], [124]. Jednačina (5.6) koristi se za izračunavanje stepena konzistentnosti (*CR*).

$$CR = \frac{CI}{RI}, \quad (5.6)$$

gde se *CI* računa primenom jednačine (5.7) dok je vrednost *RI* slučajni indeks konzistentnosti (engl. *Random Index*) koji zavisi od broja razmatranih elemenata tj. parcijalnih indikatora (*n*) i prikazan je u tabeli 5.4 [50], [65], [99], [118].

$$CI = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n-1)}, \quad (5.7)$$

gde je λ_{\max} ponderisana srednja vrednost koeficijenta λ_i izračunatog primenom jednačine (5.9) [50], [124]:

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (5.8)$$

$$\lambda_i = \frac{\sum_{j=1}^n (a_{ij} \cdot W_j)}{W_i} \quad (5.9)$$

Tabela 5.4. Vrednosti koeficijenta (*RI*) u zavisnosti od broja elemenata (*n*) [114], [119], [124]

<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	0.89	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

Nakon što je proverena konzistentnost donosioca odluka, izračunate vrednosti težinskih koeficijenata predstavljaju jedan od ulaznih podataka za Modul 2 odnosno koriste se u fazi kompoziciji modela.

5.2 Modul 2 – Izračunavanje rizika

5.2.1. Fazi propozicija

Kako bi se predstavile ocene koje sadrže lingvističke vrednosti primenjuje se postupak fazi propozicije. Postupak se koristi da lingvističko posmatranje realnosti predstavi u analitički tj. numerički oblik. Fazi propozicija pripada domenu veštačke inteligencije [50].

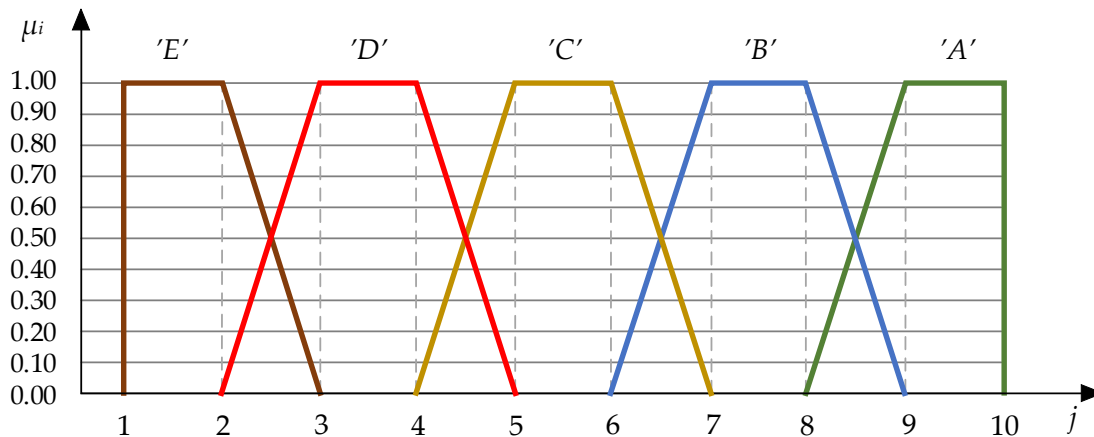
Za svaki parcijalni indikator i ukupnu performansu rizika, daju se pet lingvističkih promenljivih ('*A*', ..., '*E*'). One su definisane koordinatnim sistemom u obliku funkcije pripadnosti ($\mu = 0$ do 1.0) i klasa kao indikatorskih mera ($j = 1$ do 10) [50], [65], [97], [130], [131]. Lingvističke promenljive su prikazane kao fazi skupovi koji su trapeznog oblika. Ovaj oblik se koristi za lingvističke promenljive kod kojih ne postoji precizno definisana razlika između fazi pojmova [50], [97]. Lingvistička promenljiva (*LV*) ima sledeći oblik [50]:

$$LV = \{\mu(j=1), \mu(j=1), \dots, \mu(j=10)\} \quad (5.10)$$

Oblik svih lingvističkih promenljivih je prikazan u nastavku,

$$\begin{aligned} 'A' &= \{0(1), \dots, 0(8), 1(9), 1(10)\}; \\ 'B' &= \{0(1), \dots, 0(6), 1(7), 1(8), 0(9), 0(10)\}; \\ 'C' &= \{0(1), \dots, 0(4), 1(5), 1(6), 0(7), 0(8), 0(9), 0(10)\}; \\ 'D' &= \{0(1), 0(2), 1(3), 1(4), 0(5), \dots, 0(10)\}; \\ 'E' &= \{1(1), 1(2), 0(3), \dots, 0(10)\}; \end{aligned}$$

Grafički prikaz izgleda svih oblika fazi skupova dat je na slici 5.4.



Slika 5.4. Generalni oblik raspodele lingvističkih promenljivih u odnosu na funkcije pripadnosti [50], [65]

5.2.2. Fazifikacija ulaznih vrednosti

Formirani oblik fazi skupova sa lingvističkim promenljivima u odnosu na funkcije pripadnosti iz fazi propozicije se koristi u postupku fazifikacije. Ulazni podaci lingvističkog i numeričkog oblika dobijeni ekspertskim ocenjivanjem ili statističkim analizama iz Modula 1 se postupkom fazifikacije mapiraju na fazi skupove iz fazi propozicije. Mapiranje će biti objašnjeno u studiji slučaja kroz konkretan primer.

5.2.3. TOPSIS metoda – kompozicija fazi modela

Fazi kompozicija (produkt) predstavlja postupak sinteze dve ili više fazi relacija u jednu (ukupnu). Fazi relacije u ovom slučaju predstavljaju parcijalne indikatore iskazane u formi fazi brojeva [50]. Produkt može, ali ne mora imati svojstvo komutacije [97]. Dakle, redosled članova proizvoda može, ali ne mora biti definisan. Ishod se definiše u zavisnosti od željene funkcije cilja [50].

Osnovni logički operater u kompoziciji fazi modela je tzv. „IF-THEN“. Intenzivno se koriste i aplikativni modeli MAX-MIN i MIN-MAX [24], [65], [132], [133]. Kompozicija MAX-MIN se naziva pesimističkom [65], jer se iz kombinacije najlošijih ishoda pronalazi najbolje moguće rešenje [50]. Primenuje se za fenomene kao što su sigurnost funkcionisanja, raspoloživost i dr. [65]. Nasuprot je MIN-MAX kompozicija koja se naziva optimističkom, jer iz grupe najboljih mogućih ishoda pronalazi najlošije moguće rešenje [50]. Koristi se za fenomene usmerene ka rizicima [35], [50], [65].

Na osnovu polazne hipoteze usmerene ka povećanju preciznosti tj. smanjenju rasipanja, u modelu se za fazi kompoziciju primenjuje metoda TOPSIS [50]. Ova metoda iz zadatog skupa kombinacija pronalazi najbolji mogući ishod, a potom za svaki alternativni ishod računa udaljenost od najboljeg. Primena TOPSIS metode u kompoziciji dokazala se kao kvalitetan izbor u cilju povećanja preciznosti [50]. Matematički sled metode sačinjena je iz 7 koraka respektivno prikazanih.

Korak 1 – formiranje ulazne matrice M (5.11), sačinjene od m alternativa i n kriterijuma [50], [129]:

$$M_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1j} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2j} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{i1} & x_{i2} & \cdots & x_{ij} & \cdots & x_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mj} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

gde x_{ij} (za $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$) predstavlja vrednost i alternative prema j kriterijumu.

Korak 2 – normalizacija matrice (5.11) primenom jednačine (5.12):

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad i = 1, \dots, m; \quad j = 1, \dots, n. \quad (5.12)$$

Korak 3 – ponderisanje normalizovane matrice (r_{ij}) težinskim koeficijentima dobijenim kao izlaz ih Modula 1, odnosno AHP metode ($W_i = W_{O, A}, W_{S, T}, W_D$) primenom jednačine [50]:

$$p_{ij} = W_i \cdot r_{ij}, \quad i = 1, \dots, m; \quad j = 1, \dots, n. \quad (5.13)$$

Korak 4 – iz grupe vrednosti (p_{ij}) pronalaze se idealni (A^+) i anti-idealni (A^-) ishodi. Pri tome se u obzir se uzimaju samo vrednosti ishoda koje su različite od nule [50], [134]. U te svrhe primenjuju se jednačine (5.14-5.15):

$$A^+ = \left(\begin{matrix} MAX \\ i \neq 0 \end{matrix} p_{ij} \mid j \in J' \right), \left(\begin{matrix} MIN \\ i \neq 0 \end{matrix} p_{ij} \mid j \in J'' \right) = \{p_1, p_2, \dots, p_j, \dots, p_n\} \quad (5.14)$$

$$A^- = \left(\begin{matrix} MIN \\ i \neq 0 \end{matrix} p_{ij} \mid j \in J' \right), \left(\begin{matrix} MAX \\ i \neq 0 \end{matrix} p_{ij} \mid j \in J'' \right) = \{p_1, p_2, \dots, p_j, \dots, p_n\} \quad (5.15)$$

gde su J' i J'' povezani sa korisnim i nekorisnim atributima analize [50].

Korak 5 – u odnosu na selektovane prethodne vrednosti, određuje se distanca svakog ishoda (S_i^+, S_i^-) [50], [108], [124]:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (p_{ij} - p_j^+)^2} \quad (5.16)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (p_{ij} - p_j^-)^2} \quad (5.17)$$

Korak 6 – računanje relativnog rastojanja svakog ishoda od idealnog rešenja (μ_i) [50]:

$$\mu_i = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+}, \quad 0 \leq \mu_i \leq 1 \quad (5.18)$$

Korak 7 – formiranje izlaznog oblika performanse rizika nakon TOPSIS kompozicije modela (R) [50]:

$$R = \mu(j=1), \mu(j=2), \dots, \mu(j=10) \quad (5.19)$$

5.2.4. Identifikacija

Osnovni cilj postupka identifikacije je da se izlazna vrednost kompozicije (jednačina 5.19) mapira u formu gde je zavisnost data u odnosu na fazi skupove 'A', ..., 'E' [50].

$$RPN = \mu('A'), \mu('B'), \dots, \mu('E') \quad (5.20)$$

Za postupak identifikacije koristi se metoda „Best-fit“ [50], [65]. Funkcija pripadnosti klasa (5.18) se mapira sa funkcijama pripadnosti fazi skupova (5.10) [50]. Potom se računa relativno rastojanje d između funkcije pripadnosti rezultata i fazi broja definisanog lingvističkim promenljivim oblika 'A', ..., 'E' [50], [65]. Za svaku od lingvistički promenljivih se primenjuje sledeći izraz:

$$d_{A(R,A)} = \sqrt{\sum_{j=1}^{j=10} (\mu_R^j - \mu_{A'}^j)^2} \quad \dots \quad d_{E(R,E)} = \sqrt{\sum_{j=1}^{j=10} (\mu_R^j - \mu_{E'}^j)^2} \quad (5.21)$$

gde je $\mu_{R(j)}$ izlazna vrednost jednačine (5.18), dok je $\mu_{A'(j)}, \dots, \mu_{E'(j)}$ u skladu sa jednačinom (5.10).

Iz grupe vrednosti $d_{A'}, \dots, d_{E'}$ bira se minimalna vrednost d_{\min} . Što je vrednost RPN (5.22) bliža nekoj lingvističkoj promenljivoj to je vrednost d_{\min} manja. Vrednost d_{\min} će biti jednako nuli, ako je RPN isti određenom izrazu u kontekstu funkcije pripadnosti [50], [97].

Na osnovu odnosa $d_{\min} / d_{A'}, \dots, d_{E'}$ dobijaju se oblici funkcija pripadnosti definisani izrazom (5.22) [50]:

$$\mu_{RPN(A')} = \frac{d_{\min}}{d_{A'} \cdot \left(\frac{d_{\min}}{d_{A'}} + \dots + \frac{d_{\min}}{d_{E'}} \right)} \quad \dots \quad \mu_{RPN(E')} = \frac{d_{\min}}{d_{E'} \cdot \left(\frac{d_{\min}}{d_{A'}} + \dots + \frac{d_{\min}}{d_{E'}} \right)} \quad (5.22)$$

Vrednosti funkcija pripadnosti oblika μ_{RPN} računaju se za sve ocene od 'A' do 'E'. Te vrednosti postaju ulazni parametri za Modul 3, odnosno postupak defazifikacije i određivanje preciznosti modela (mere disperzije rezultata) [50]. Svaka vrednost $\mu_{RPN(A' \text{ do } E')}$ prikazuje stepen pripadnosti RPN definisanim izrazima fazi skupova rizika (5.10). Ako RPN u potpunosti pripada određenom fazi skupu, onda je $\mu_{RPN(A' \text{ do } E')}$ jednak 1, dok su ostali jednaki 0 [97]. Dakle, $\mu_{RPN(A' \text{ do } E')}$ se može definisati kao stepen pouzdanosti da RPN pripada određenim ocenama rizika koje su definisane u fazi propoziciji modela (poglavlje 5.2.1) [50].

U zavisnosti od ulaznih parametara i procesa identifikacije, vrednost rizika se može tumačiti kao 'A' – „veoma visok rizik“, 'B' – „visok rizik“, 'C' – „prosečan rizik“, 'D' – „nizak rizik“, 'E' – „veoma nizak rizik“ [50].

5.3 Modul 3 – Prikaz rezultata

5.3.1. Defazifikacija i standardna devijacija

Postupkom defazifikacije se fazi brojevi konvertuju u realni broj koji postaje uporediv sa drugim analiziranim objektima. Izlazne vrednosti postupka identifikacije raspoređene su na ocene $\mu_i = 'A', 'B', 'C', 'D', 'E'$. Za postupak defazifikacije se koristi metoda centra masa (Z_n) [25], [31], [50], [135]. Oцени se dodeljuje vrednost $C_i = 5$. Preostalim ocenama se daju opadajuće vrednosti sve do ocene 'E' kojoj se dodeljuje vrednost $C_i = 1$ [135]. Rezultati defazifikacije se dobijaju primenom sledećeg izraza:

$$Z_n = \frac{\sum_{i=1}^j \mu_i \cdot C_i}{\sum_{i=1}^j \mu_i} \quad (5.23)$$

Kako bi se odredila mera disperzije rezultata računa se standardna devijacija (S_n) [136], primenom izraza:

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=N} (\mu_i - \mu_{sr})^2}{N-1}} \quad (5.24)$$

U odnosu na proračune iz izraza (5.23) i (5.24), procena rizika tehničkog sistema se iskazuje na sledeći način [50]:

$$RPN = Z_n, S_n \quad (5.25)$$

gde (Z_n) uzima vrednosti u opsegu od 1 do 5, dok (S_n) uzima vrednosti u opsegu od 0 do 1.

Za predstavljanje krajnjih vrednosti na FMECA, FMEA skali i matrici rizika u ponovnom postupku defazifikacije se za ocene C_i usvajaju vrednosti iz različitih opsega definisanih minimalnim i maksimalnim vrednostima metoda (1-125; 1-1000; 1-25). Na taj način se krajnje vrednosti ponderišu na različite skale i postaju reprezentativne odabranoj metodi.

6. FAZI EKSPERTSKI MODEL PROCENE RIZIKA KOD ROTORNOG BAGERA

Verifikacija modela urađena je na rotornom bageru oznake SRs2000, proizvođača Takraf. Izbor ovog tipa bagera urađen je na osnovu njegove veličine i kompleksnosti u poređenju sa drugim rotornim bagerima. Ovaj tip bagera je veoma zastupljen u svetu, pri čemu je njihov ukupan broj 57 [50]. Na osnovu toga, definisana su dva parcijalna modela u odnosu na različite aspekte rizika.

Prvi model razmatra rizik po strukturnu stabilnost mašine. Slaba mesta za koja će biti urađena analiza su definisana na osnovu istorijata događaja, uvida u dokumentaciju bagera i iskustvenog znanja. Kod ovog modela su parcijalni indikatori rizika u osnovnom obliku (O, S, D). Ulazni podaci dobijaju se na osnovu ekspertskog ocenjivanja u dva nivoa. Na početku se dodeljuju vrednosti međusobnog uticaja parcijalnih indikatora na ukupni rizik. Potom se u drugom nivou na osnovu lingvističkog opisa dodeljuju konkretne vrednosti rizika parcijalnim indikatorima za svako od razmatranih slabih mesta.

Drugi model razmatra rizik po prekid proizvodnog procesa. Posmatra se čitav bager. Koriste se ulazni podaci o ostvarenim rezultatima mašine i ekspertске ocene. Kao što je definisano u poglavlju 5, napravljene su izmene kod dva parcijalna indikatora. Umesto verovatnoće pojavljivanja, koristi se statička raspoloživost (A), dok se umesto ozbiljnosti posledica koristi vreme u zastoju (T). Ulazni podaci za ova dva parcijalna indikatora se dobijaju statističkom obradom postojećih podataka o radu bagera. Mogućnost detekcije (D) je zadržana u osnovnom obliku i ulazni podaci se dobijaju ekspertskim ocenjivanjem. Prethodno se međusobni uticaj sva tri parcijalna indikatora na ukupni rizik, dobija AHP metodom na osnovu podataka iz ekspertskog ocenjivanja.

Tok proračuna rizika za oba modela definisan je u poglavlju 5 i sadrži 3 modula. Rezultati će biti prikazani u obliku ocena rizika ('A', ..., 'E') uz lingvističke opise i krajnji rezultat u obliku jednog broja sa ponderisanim vrednostima na različite skale. Krajnji cilj modela je izračunavanje rizika, rangiranje slabih mesta, definisanje stanja bagera i formiranje smernica za poboljšanja u strategiji održavanja.

6.1 Model procene rizika po strukturnu stabilnost rotonog bagera (Model 1)

6.1.1. Definisanje slabih mesta i ulaznih podataka rizika po strukturnu stabilnost bagera

U okviru modula 1 potrebno je definisati slaba mesta za koja će biti urađena analiza i definisati sve potrebne ulazne podatke za Modul 2. Ulazni podaci definišu se na osnovu ekspertskog ocenjivanja dobijenog od inženjera koji se bave održavanjem razmatranih mašina.

Početna razmatranja obuhvataju uvid u različita ekspertska iskustva i istorijat ozbiljnih otkaza rotornih bagera ovog tipa. U nekim slučajevima takvi otkazi doveli su i do ugrožavanja stabilnosti bagera istog ili sličnog tipa u Srbiji i svetu [4], [6], [8], [50]. Pored toga slaba mesta su definisana i na osnovu kritičnosti pozicije određenog elementa. U razmatranje su uzeta i slaba mesta kod kojih postoji potencijal da izazovu nepoželjni događaj. Takav stav je formiran usled činjenice da bi u statističkim analizama ovog tipa prevladala stohastička priroda događaja, kroz faktore kao što su: zamor materijala, greške ljudske prirode, seizmičke aktivnosti i sl. Na osnovu svega navedenog, sa aspekta rizika po strukturnu stabilnost mašine, formirano je 8 slabih mesta za koja će biti urađena analiza (slika 6.1):

P1 – Užetnjače na stubu. Ako se početne pukotine užetnjače ne uoče na vreme, u krajnjem slučaju to može dovesti do kidanja užeta i narušavanja stabilnosti bagera. Uzroci su najčešće loše tehničko rešenje (izrada segmenata savijanjem i zavarivanjem) ili preterana pohabanost žlebova [50];

P2 – Glava rotonog točka. Problemi kao što su: lom osovine rotonog točka, havarije na sklopu male membrane, podužne pukotine na šupljem vratilu, lom zavrtnjeva na membrani, oštećenja oslonca, mogu da ugroze stabilnost bagera. Slični problemi javljali su se na više bagera ovog tipa površinskih kopova u Srbiji [50];

P3 – Oslonci na A stubu. Ovo mesto predstavlja visoko opterećen deo bagera, a konstruktivni nedostatak ovog bagera javio se i usled zadržavanja vode u donjem osloncu centralnog stuba koji se naziva još i A stub. Voda je vremenom izazvala koroziju, a u zimskom periodu se zaledila, što je dovelo do pucanja stuba kod oslonca. Došlo je do totalnog narušavanja stabilnosti (pada) bagera [50];

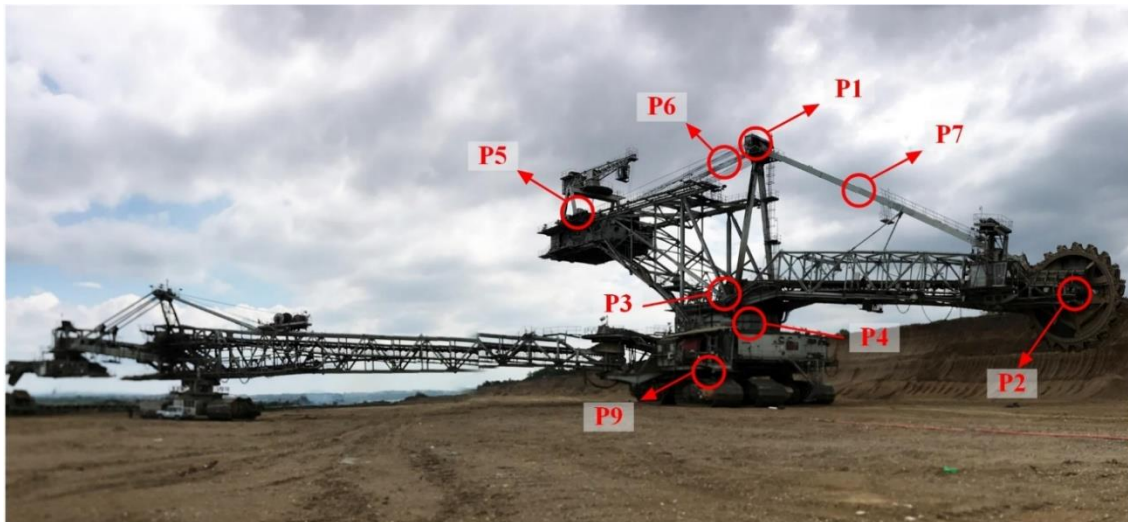
P4 – Obrtna platforma. Na više bagera ovog tipa uočena je deformacija (izbočavanje ploče) vertikalnog cilindra gornje obrtne platforme. Obrtna platforma je centralni, noseći deo bagera. Nosi strelu radnog točka, centralni stub i strelu protivtega. Pucanje vertikalnog cilindra može izazvati narušavanje stabilnosti bagera [50];

P5 – Kočioni uređaj pogona dizanja i spuštanja strele rotornog točka. Osnovna uloga je da preko vratila na bubnju za namotavanje užadi zadrži definisani položaj strele. U slučaju da kočnica nije ispravna može doći do oslanjanja strele o radnu površinu (ili pada) čime bi se urušila strukturalna stabilnost čitavog bagera. Ipak, ovaj sistem je paralelno obezbeđen sa dva pogona i dve kočnice, tako da je mala verovatnoća narušavanja stabilnosti bagera;

P6 – Čelično uže za dizanje i spuštanje strele rotornog točka. Ostvaruje ulogu podizanja, spuštanja i držanja strele rotornog točka u određenom položaju. Ove pozicije se ostvaruju preko pogona i užetnjača na vrhu A stuba. Narušavanjem integriteta čeličnog užeta može biti ugrožena strukturalna stabilnost bagera;

P7 – Lamelle strele rotornog točka. Kod ovog bagera postoji samo jedna lamela kutijastog preseka, što daje dobru prostornu čvrstoću. Pojavom prslina može biti ugrožena strukturalna stabilnost bagera. Posebna statička i dinamička naprezanja javljaju se kod veze lamelle sa strelom i veze lamelle sa A stubom. Narušavanjem integriteta ovih veza može biti ugrožena strukturalna stabilnost bagera;

P8 – Oslone tačke gornje gradnje bagera na gusenični transportni uređaj. Ovaj tip bagera odnosno, osnovna mašina je oslonjena u tri tačke na gusenični transportni uređaj. Oslonci su izvedeni zglobno u obliku kalote. I pored toga što se oslanjanje vrši na tri tačke, problemi kod jednog oslonca mogu da indukuju veće probleme i naruše strukturalnu stabilnost bagera.



Slika 6.1. Slaba mesta rizika po strukturalnu stabilnost bagera [50]

Definisanje slabih mesta urađeno je u skladu sa problemima koji su se dešavali kroz istoriju rada mašina ovog tipa. Drugi značajan parametar u definisanju slabih mesta je redna veza elemenata od strele radnog organa do strele protivtega. Rotorni bager je kompleksan tehnički sistem izložen stalnim statičkim, ali i dinamičkim naprezanjima kada je u radu (veliki broj izvora oscilacija na globalnom i lokalnom nivou strukture mašine). Posmatranjem redne veze strele radnog organ – strele protivtega, definisana su potencijalna mesta koja mogu imati uticaj na strukturalnu stabilnost bagera. Za sva slaba mesta se računa rizik prema definisanom modelu.

Prvi deo ulaznih podataka dobija se ekspertskim ocenjivanjem međusobnog uticaja parcijalnih indikatora (O, S, D) na ukupni rizik. Cilj je da se izračunaju koeficijenti značajnosti parcijalnih indikatora koji će se potom koristiti u Modulu 2, odnosno u fazi kompoziciji modela. Za izračunavanje se koristi AHP metoda koja je matematički definisana u poglavlju 5.1.2. Eksperti u svakoj interakciji porede međusobni uticaj dva parcijalna indikatora i to: O prema S, O prema D i S prema D. Poređenje se vrši na osnovu modifikovane *Saaty* skale vektora prioriteta. Anketni list prikazan je u prilogu 1. Ponuđene vrednosti za koje se 5 eksperata odlučuju imaju oblik ¹:

veoma mali uticaj	0.33;
mali uticaj	0.50;
isti uticaj	1.00;
veliki uticaj	2.00; i
veoma veliki uticaj	3.00.

Na osnovu ocena svih eksperata, računa se srednja vrednost koja postaje ulazni podatak za AHP metodu. Detaljan prikaz ekspertskih vrednovanja dat je za slabo mesto P1 u tabeli 6.1, dok tabela 6.2 sadrži samo prikaz izračunatih srednjih vrednosti za sva slaba mesta u analizi.

Tabela 6.1. Ekspertske ocene međusobnog odnosa parcijalnih indikatora za slabo mesto P1

	Ekspert 1	Ekspert 2	Ekspert 3	Ekspert 4	Ekspert 5	Prosečna ocena
O prema S	0.33	0.50	0.33	1.00	0.33	0.498
O prema D	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.500
S prema D	2.00	1.00	2.00	0.50	2.00	1.500

Tabela 6.2. Prosečne ocene međusobnog odnosa parcijalnih indikatora za sva slaba mesta

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
O prema S	0.498	0.800	0.364	0.398	0.800	0.566	0.700	1.100
O prema D	0.500	1.500	0.432	0.432	2.200	1.300	1.100	0.900
S prema D	1.500	1.800	1.400	1.300	2.600	2.600	1.700	1.200

Na osnovu ulaznih podataka formira se matrica (5.5). U tabeli 6.3 prikazan je osnovni oblik formirane matrice za slabo mesto P1. Izračunavanjem matrice dobijaju se težinski koeficijenti (W_i) parcijalnih indikatora, prikazani u poslednjoj koloni tabele. Provera konzistentnosti vrši se primenom jednačina (5.6-5.9). Rezultati provere konzistentnosti kao i svi ostali podaci korišćeni u postupku dati su u tabeli. Dobijena vrednost stepena konzistentnosti (CR) je manja od 10% čime je uslov zadovoljen.

Tabela 6.3. Rangiranje parcijalnih indikatora rizika prema slabom mestu P1

Parametri	O	S	D	W_i
O	1.000	0.498	0.500	0.197
S	1.000/0.498	1.000	1.500	0.456
D	1.000/0.500	1.000/1.500	1.000	0.347
λ_{max}	3.017948			
n	3			
R_i	0.58			
CI	0.008974			
CR	0.015472			

Vrednosti koeficijenata značajnosti parcijalnih indikatora za P1 imaju sledeći oblik:

$$W_{O-P1} = 0.197; W_{S-P1} = 0.456; W_{D-P1} = 0.347; \text{ pri čemu je } W_{O-P1} + W_{S-P1} + W_{D-P1} = 1$$

¹ I pored toga što se u srpskom pismu kod zapisa razdvajanja decimalnih brojeva koristi “;”, literarni izvori vezani za fazi ekspertске sisteme koriste anglosaksonski stil razdvajanja decimalnih vrednosti “.”, s toga će radi unifikacije, kroz čitav proračun biti korišćen anglosaksonski stil razdvajanja decimalnih vrednosti.

Na osnovu izračunatih vrednosti koeficijenta značajnosti parcijalnih indikatora, može se uočiti da dominantan uticaj ima indikator ozbiljnost posledica sa 45.6%, potom sledi mogućnost detekcije sa 34.7 %, dok najmanji uticaj na ukupan rizik ima verovatnoća pojavljivanja sa 19.7%. S obzirom da oštećenje na užetnjači na stubu može ugroziti statičku stabilnost bagera i da je lokacijski kompleksan prilaz radi detektovanja (održavanja), ovakav ishod rangiranja je očekivan.

Prema istom principu računaju se ocene težinskih koeficijenata parcijalnih indikatora i za preostala slaba mesta bagera. Za proračun se koriste ulazni podaci iz tabele 6.2. U tabeli 6.4 prikazani su rezultati koeficijenata značajnosti (W_i) i rezultati iz provere konzistentnosti ekspertskog tima (λ_{max} , CI , CR).

Tabela 6.4. Rezultati AHP metode rangiranja parcijalnih indikatora svih slabih mesta bagera

Parametri	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
W_O	0.197	0.344	0.164	0.171	0.372	0.279	0.298	0.332
W_S	0.456	0.424	0.476	0.456	0.456	0.515	0.438	0.343
W_D	0.347	0.232	0.360	0.373	0.172	0.206	0.264	0.325
λ_{max}	3.017948	3.000185	3.003034	3.003618	3.000350	3.001708	3.000687	3.01632
CI	0.008974	0.000092	0.001517	0.001809	0.000175	0.000854	0.000344	0.008162
CR	0.015472	0.000160	0.002615	0.003119	0.000301	0.001473	0.000592	0.014069

Drugi deo ulaznih podataka dobija se ocenjivanjem rizika kroz parcijalne indikatore (O, S, D) u odnosu na lingvističke opise date za svaku ocenu. Na osnovu toga 5 analitičara dodeljuju ocene. Reprezentativan primer čitavog modela dat je za prvo slabo mesto (P1). Usled kompleksnosti proračuna, za ostala slaba mesta će biti prikazani samo ulazni podaci i rezultati.

Za svaki od parcijalnih indikatora rizika dodeljuju se vrednosti na osnovu ocena 'A', 'B', 'C', 'D', 'E' pri čemu je ocena sa najvećim rizikom 'A', dok je najmanji rizik kod ocene 'E'. Ocene se dodeljuju na osnovu lingvističkog opisa definisanog u poglavlju 5.1.1, odnosno u tabeli 5.1. Zbir dodeljenih ocena prema parcijalnom indikatoru mora biti 1 (100%). U tabeli 6.5 prikazane su ocene svih pet eksperata za razmatrano slabo mesto P1. Poslednja sekcija tabele sadrži srednje ocene na osnovu svih dodeljenih i te vrednosti postaju ulazne za model u okviru trećeg modula.

Tabela 6.5. Ulazne ocene analitičara za parcijalne indikatore rizika za P1

Ekspert br.	Indikator	'A'	'B'	'C'	'D'	'E'
1.	O				0.95	0.05
	S		0.55	0.45		
	D		0.20	0.80		
2.	O				0.80	0.20
	S		0.60	0.40		
	D		0.50	0.50		
3.	O				1.00	
	S		0.40	0.60		
	D		0.10	0.90		
4.	O			0.25	0.75	
	S		0.65	0.35		
	D		0.20	0.80		
5.	O			1.00		
	S		0.50	0.50		
	D		0.70	0.30		
Prosečna ocena	O_{P1}	0	0	0.25	0.70	0.05
	S_{P1}	0	0.54	0.46	0	0
	D_{P1}	0	0.34	0.66	0	0

Uvidom u tabelu, može se uočiti da je za parcijalni indikator verovatnoća pojavljivanja (O) prvi ekspert dodelio 95 % oceni 'D' (retko; Izrazito mala verovatnoća pojave havarije), odnosno 5% oceni 'E' (neznatno; Nema opasnosti od pojave havarije). Za drugi parcijalni indikator – ozbiljnost posledica (S) isti ekspert je dodelio 55% oceni 'B' (velika; Veliki poremećaj mašine) i 45% oceni 'C' (umerena; Prisutna potencijalna opasnost). Mogućnost detekcije (D) ekspert je dodelio sa 20% oceni 'B' (neznatna; Kompleksna situacija uočiti opasnost) i 80% oceni 'C' (umereno; Postoji šansa da se locira opasnost). Prema istom principu ocene su dodeljivali i preostali eksperti.

Na osnovu ocena svih eksperata računa se srednja ocena za sve parcijalne indikatore ovog slabog mesta. Reprezentativan primer je dat za prvi parcijalni indikator (O). Ocene 'A' i 'B' nije dodelio ni jedan ekspert. Dva eksperta su dodelile ocenu 'C', četiri eksperta je dodelilo ocenu 'D', dok su dva dodelila ocenu 'E'. Sledi da su srednje ocene za indikator (O) [50]:

$$'C' = \frac{(0.25+1.00)}{5} = 0.25; \quad 'D' = \frac{(0.95+0.80+1.00+0.75)}{5} = 0.70; \quad 'E' = \frac{(0.05+0.20)}{5} = 0.05$$

Za preostale parcijalne indikatore (S) i (D) date su samo krajnje vrednosti. Sledi da su srednje ocene za sve indikatore sledećeg oblika:

$$O_{P1} = (0/'A', 0/'B', 0.25/'C', 0.70/'D', 0.05/'E')$$

$$S_{P1} = (0/'A', 0.54/'B', 0.46/'C', 0/'D', 0/'E')$$

$$D_{P1} = (0/'A', 0.34/'B', 0.66/'C', 0/'D', 0/'E')$$

U tabeli 6.6 prikazane su srednje ocene za sva slaba mesta (P1-P8) u analizi. Srednje vrednosti predstavljaju drugi deo ulaznih podataka za Modul 2 i koristiće se u postupku fazifikacije.

Tabela 6.6. Ulazne ocene analitičara za parcijalne indikatore rizika svih slabih mesta analize

Slaba mesta	Indikatori	'A'	'B'	'C'	'D'	'E'
P1	Op1	0	0	0.25	0.70	0.05
	Sp1	0	0.54	0.46	0	0
	Dp1	0	0.34	0.66	0	0
P2	Op2	0	0	0.20	0.63	0.17
	Sp2	0.36	0.62	0.02	0	0
	Dp2	0	0	0.18	0.65	0.17
P3	Op3	0	0	0.11	0.74	0.15
	Sp3	0.64	0.36	0	0	0
	Dp3	0	0.25	0.53	0.22	0
P4	Op4	0	0.15	0.61	0.24	0
	Sp4	0.94	0.06	0	0	0
	Dp4	0.13	0.80	0.07	0	0
P5	Op5	0	0	0	0.11	0.89
	Sp5	0	0	0.14	0.22	0.64
	Dp5	0	0	0	0.20	0.80
P6	Op6	0	0	0.21	0.31	0.50
	Sp6	0	0	0.06	0.21	0.73
	Dp6	0	0	0	0.21	0.79
P7	Op7	0	0	0.01	0.31	0.68
	Sp7	0	0.05	0.55	0.40	0
	Dp7	0	0	0	0.09	0.91
P8	Op8	0	0	0	0.04	0.96
	Sp8	0	0	0	0.19	0.81
	Dp8	0	0	0	0.04	0.96

6.1.2. Izračunavanje rizika po strukturnu stabilnost bagera

Ulazni podaci se postupkom fazifikacije mapiraju na fazi skupove. Vrednosti iz tabele 6.6 se množe sa presečnim tačkama fazi skupova koje su definisane u poglavlju 5.2.1. Fazi skupovi ('A', 'B', 'C', 'D', 'E') su trapeznog oblika, definisani vrednosti na j -skali (jednačina 5.10). Ulazni podaci se množenjem mapiraju na j -skalu. Primer postupka fazifikacije za parcijalni indikator O za P1 dat je u tabeli 6.7.

Tabela 6.7. Postupak fazifikacije slabog mesta P1 prema parcijalnom indikatoru O

	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 4$	$j = 5$	$j = 6$	$j = 7$	$j = 8$	$j = 9$	$j = 10$
'A'	0×0	0×0	0×0	0×0	0×0	0×0	0×0	0×0	0×1	0×1
'B'	0×0	0×0	0×0	0×0	0×0	0×0	0×1	0×1	0×0	0×0
'C'	0.25×0	0.25×0	0.25×0	0.25×0	0.25×1	0.25×1	0.25×0	0.25×0	0.25×0	0.25×0
'D'	0.70×0	0.70×0	0.70×1	0.70×1	0.70×0	0.70×0	0.70×0	0.70×0	0.70×0	0.70×0
'E'	0.05×1	0.05×1	0.05×0	0.05×0	0.05×0	0.05×0	0.05×0	0.05×0	0.05×0	0.05×0
Σ	0.05	0.05	0.70	0.70	0.25	0.25	0	0	0	0

Fazifikovani oblik ulaznih podataka na j -skali za P1 u odnosu na sva tri parcijalna indikatora ima oblik:

$$O_{P1} = (0.05/1, 0.05/2, 0.70/3, 0.70/4, 0.25/5, 0.25/6, 0/7, 0/8, 0/9, 0/10)$$

$$S_{P1} = (0/1, 0/2, 0/3, 0/4, 0.46/5, 0.46/6, 0.54/7, 0.54/8, 0/9, 0/10)$$

$$D_{P1} = (0/1, 0/2, 0/3, 0/4, 0.66/5, 0.66/6, 0.34/7, 0.34/8, 0/9, 0/10)$$

Za preostala slaba mesta analize prikazane su samo krajnje fazifikovane vrednosti (tabela 6.8).

Tabela 6.8. Fazifikovane vrednosti svih parcijalnih indikatora i slabih mesta

Slaba mesta	Indikatori	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 4$	$j = 5$	$j = 6$	$j = 7$	$j = 8$	$j = 9$	$j = 10$
P1	O_{P1}	0.05	0.05	0.70	0.70	0.25	0.25	0	0	0	0
	S_{P1}	0	0	0	0	0.46	0.46	0.54	0.54	0	0
	D_{P1}	0	0	0	0	0.66	0.66	0.34	0.34	0	0
P2	O_{P2}	0.17	0.17	0.63	0.63	0.20	0.20	0	0	0	0
	S_{P2}	0	0	0	0	0.02	0.02	0.62	0.62	0.36	0.36
	D_{P2}	0.17	0.17	0.65	0.65	0.18	0.18	0	0	0	0
P3	O_{P3}	0.15	0.15	0.74	0.74	0.11	0.11	0	0	0	0
	S_{P3}	0	0	0	0	0	0	0.36	0.36	0.64	0.64
	D_{P3}	0	0	0.22	0.22	0.53	0.53	0.25	0.25	0	0
P4	O_{P4}	0	0	0.24	0.24	0.61	0.61	0.15	0.15	0	0
	S_{P4}	0	0	0	0	0	0	0.06	0.06	0.94	0.94
	D_{P4}	0	0	0	0	0.07	0.07	0.80	0.80	0.13	0.13
P5	O_{P5}	0.89	0.89	0.11	0.11	0	0	0	0	0	0
	S_{P5}	0.64	0.64	0.22	0.22	0.14	0.14	0	0	0	0
	D_{P5}	0.80	0.80	0.20	0.20	0	0	0	0	0	0
P6	O_{P6}	0.50	0.50	0.31	0.31	0.21	0.21	0	0	0	0
	S_{P6}	0.73	0.73	0.21	0.21	0.06	0.06	0	0	0	0
	D_{P6}	0.79	0.79	0.21	0.21	0	0	0	0	0	0
P7	O_{P7}	0.68	0.68	0.31	0.31	0.01	0.01	0	0	0	0
	S_{P7}	0	0	0.40	0.40	0.55	0.55	0.05	0.05	0	0
	D_{P7}	0.91	0.91	0.09	0.09	0	0	0	0	0	0
P8	O_{P8}	0.96	0.96	0.04	0.04	0	0	0	0	0	0
	S_{P8}	0.81	0.81	0.19	0.19	0	0	0	0	0	0
	D_{P8}	0.96	0.96	0.04	0.04	0	0	0	0	0	0

Fazi kompozicija formira se na osnovu fazifikovanih vrednosti ulaznih podataka na j -skali u skladu sa sva tri parcijalna indikatora (vrednosti iz tabele 6.7). Sintezni oblik za sva tri parcijalna indikatora dobija se korišćenjem fazi TOPSIS kompozicije. Detaljan opis TOPSIS metode dat je u poglavlju 5.2.3. Postupak će biti definisan i prikazan na reprezentativnom primeru P1. Pored vrednosti iz fazifikacije ulaznih podataka, u kompoziciji modela se koriste i vrednosti težinskih koeficijenata parcijalnih indikatora dobijeni AHP metodom (vrednosti iz tabele 6.4). Pregled svih ulaznih parametara kompozicije je dat u tabeli 6.9.

Tabela 6.9. Ulazne vrednosti za formiranje fazi TOPSIS kompozicije Modela 1

Parcijalni indikator		O	S	D
Težinski koeficijenti (W_i)		0.197	0.456	0.347
j - skala	1	0.05	0.00	0.00
	2	0.05	0.00	0.00
	3	0.70	0.00	0.00
	4	0.70	0.00	0.00
	5	0.25	0.46	0.66
	6	0.25	0.46	0.66
	7	0.00	0.54	0.34
	8	0.00	0.54	0.34
	9	0.00	0.00	0.00
	10	0.00	0.00	0.00

Primenom jednačine (5.12) vrši se normalizacija vrednosti iz prethodne tabele. Dat je primer za vrednost 1 sa j -skale parcijalnog indikatora O. Normalizovane vrednosti za ostale su prikazane u tabeli 6.10. U trećem koraku se uvode vrednosti težinskog koeficijenta (W_i) dobijene AHP metodom. Množenje normalizovanih vrednosti (r_{ij}) vrši se sa težinskim koeficijentima iz tabele 6.4 primenom jednačine (5.13). Rezultati ponderisanja (p_{ij}) prikazani su u takode u tabeli 6.10. Kao i za postupak iz prethodnog koraka, dat je primer izračunavanja i prikazan je respektivno nakon postupka normalizacije.

$$r_1 = \frac{x_1}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} = \frac{0.05}{\sqrt{0.05^2 + 0.05^2 + 0.70^2 + 0.70^2 + 0.25^2 + 0.25^2 + 0.00^2 + 0.00^2 + 0.00^2 + 0.00^2}} = 0.04746$$

$$p_1 = W_{O-P1} \cdot r_1 = 0.197 \cdot 0.04746 = 0.00937$$

Tabela 6.10. Normalizovane i ponderisane vrednosti za P1

j	r_{ij}			p_{ij}		
	O	S	D	O	S	D
1	0.04746	0.00000	0.00000	0.00937	0.00000	0.00000
2	0.04746	0.00000	0.00000	0.00937	0.00000	0.00000
3	0.66441	0.00000	0.00000	0.13123	0.00000	0.00000
4	0.66441	0.00000	0.00000	0.13123	0.00000	0.00000
5	0.23729	0.45854	0.62860	0.04687	0.20897	0.21798
6	0.23729	0.45854	0.62860	0.04687	0.20897	0.21798
7	0.00000	0.53828	0.32382	0.00000	0.24531	0.11229
8	0.00000	0.53828	0.32382	0.00000	0.24531	0.11229
9	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
10	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

Četvrti korak podrazumeva da se iz grupe vrednosti (p_{ij}) pronalaze idealni (A_i^+) i anti-idealni (A_i^-) ishodi primenom jednačina (5.14) i (5.15). Treba naglasiti da se u obzir uzimaju samo vrednosti ishoda koje su različite od nule. Sve izračunate vrednosti za P1 date su u tabeli 6.11, dok su u nastavku dati primeri.

$$A_{P1-O}^+ = \max\{0.00937, 0.00937, 0.13123, 0.13123, 0.04687, 0.04687\} = 0.13123$$

$$A_{P1-O}^- = \min\{0.00937, 0.00937, 0.13123, 0.13123, 0.04687, 0.04687\} = 0.00937$$

Tabela 6.11. Definisavanje idealnih i anti-idealnih ishoda kompozicije modela

	O	S	D
A^+	0.13123	0.24531	0.21798
A^-	0.00937	0.20897	0.11229

U narednom koraku se određuju distance (S_i^+ , S_i^-) svakog ishoda od idealnog (A^+) i anti-idealnog (A^-) ishoda koristeći jednačine (5.16) i (5.17). Vrednosti rezultata $R(\mu_i)$ primene TOPSIS metode u okviru fazi kompozicije su sintezni koeficijenti (μ_i) koji sjedinjuje sva tri parcijalna indikatora prema raspodeli ishoda na j -skali (od 1 do 10). U te svrhe primenjuje se jednačina (5.18). Primeri izračunavanja su dati u nastavku, dok su u tabeli 6.12 sadržane izračunate vrednosti (S_i^+ , S_i^- , μ_i).

$$S_{P1-1}^+ = \sqrt{(0.00937 - 0.13123)^2 + (0.0 - 0.24531)^2 + (0.0 - 0.21798)^2} = 0.35005$$

$$S_{P1-1}^- = \sqrt{(0.00937 - 0.00937)^2 + (0.00937 - 0.20897)^2 + (0 - 0.11229)^2} = 0.23723$$

$$\mu_{P1-1} = \frac{0.23723}{(0.35005 + 0.23723)} = 0.40394$$

Tabela 6.12. Suma distanci ishoda od idealnog i anti-idealnog ishoda i rezultati rizika (R)

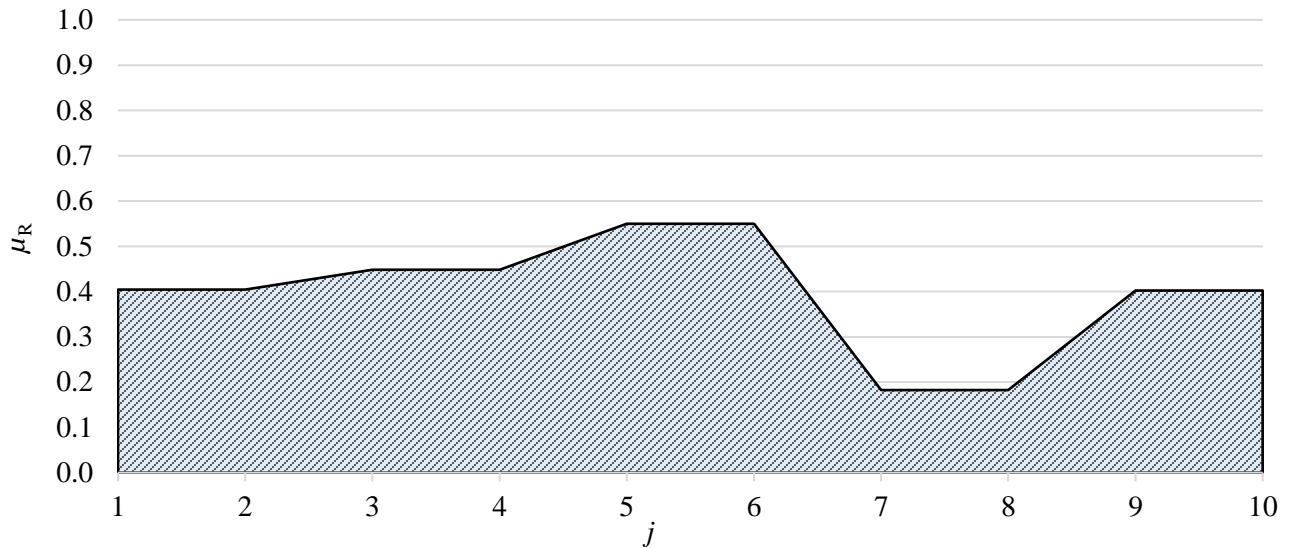
j	S_i^+	S_i^-	$R(\mu_i)$
1	0.35005	0.23723	0.40394
2	0.35005	0.23723	0.40394
3	0.32816	0.26669	0.44833
4	0.32816	0.26669	0.44833
5	0.09186	0.11214	0.54971
6	0.09186	0.11214	0.54971
7	0.16849	0.03753	0.18217
8	0.16849	0.03753	0.18217
9	0.35343	0.23741	0.40182
10	0.35343	0.23741	0.40182

Izračunate vrednosti kompozicije modela $R(\mu_i)$ za slabo mesto P1 raspodeljene su prema j -skali i mogu se predstaviti se na sledeći način:

$$R(\mu_{P1}) = \left\{ 0.40394(1), 0.40394(2), 0.44833(3), 0.44833(4), 0.54971(5), \right. \\ \left. 0.54971(6), 0.18217(7), 0.18217(8), 0.40182(9), 0.40182(10) \right\}$$

Grafički prikaz rezultata nakon kompozicije modela dat je na slici 6.2.

Za preostala slaba mesta (P2-P8) kompozicija modela je istog oblika. Istim postupkom dolazi se do izlaznih vrednosti oblika $R(\mu_i)$. Zbog kompleksnosti proračuna, u tabeli 6.13 je prikazan samo krajnji rezultat izlaznih vrednosti kompozicije modela. Te vrednosti predstavljaju ulazne podatke za naredni postupak – fazi identifikaciju.



Slika 6.2. Raspodela izlaznih vrednosti kompozicije prema j-skali

Tabela 6.13. Rezultati kompozicije modela za sva slaba mesta

j	$R_{P1}(\mu_i)$	$R_{P2}(\mu_i)$	$R_{P3}(\mu_i)$	$R_{P4}(\mu_i)$	$R_{P5}(\mu_i)$	$R_{P6}(\mu_i)$	$R_{P7}(\mu_i)$	$R_{P8}(\mu_i)$
1	0.40394	0.02494	0.33382	0.08705	1.00000	1.00000	0.50408	1.00000
2	0.40394	0.02494	0.33382	0.08705	1.00000	1.00000	0.50408	1.00000
3	0.44833	0.43489	0.37403	0.07636	0.10629	0.22123	0.46291	0.00000
4	0.44833	0.43489	0.37403	0.07636	0.10629	0.22123	0.46291	0.00000
5	0.54971	0.03367	0.40207	0.17566	0.10583	0.09389	0.46187	0.12368
6	0.54971	0.03367	0.40207	0.17566	0.10583	0.09389	0.46187	0.12368
7	0.18217	0.48987	0.09159	0.43070	0.15965	0.16645	0.05039	0.12368
8	0.18217	0.48987	0.09159	0.43070	0.15965	0.16645	0.05039	0.12368
9	0.40182	0.35279	0.39322	0.55505	0.15965	0.16645	0.07428	0.12368
10	0.40182	0.35279	0.39322	0.55505	0.15965	0.16645	0.07428	0.12368

Postupkom fazi identifikacije se izlazne vrednosti iz fazi kompozicije prevode u oblik ocena rizika $RPN = \mu('A'), \mu('B'), \mu('C'), \mu('D'), \mu('E')$. U ovom postupku se primenjuje metoda „best-fit“ koja je definisana u poglavlju 5.2.4. Svaka krajnja ocena sadrži lingvistički opis. Postupak započinje jednačinom (5.21), odnosno računanjem relativnog rastojanja (d) između funkcije pripadnosti rezultata kompozicije modela i fazi broja definisanog lingvističkim promenljivima oblika ‘A’, ..., ‘E’. Reprezentativan primer proračuna dat je za P1. U tabeli 6.14 prikazane su vrednosti (d) za sva slaba mesta analizirana u modelu.

$$d_{1(P1,'A')} = \sqrt{(0.40394 - 0)^2 + (0.40394 - 0)^2 + \dots + (0.18217 - 0)^2 + (0.40182 - 1)^2 + (0.40182 - 1)^2} = 1.45421$$

$$d_{2(P1,'B')} = \sqrt{(0.40394 - 0)^2 + \dots + (0.18217 - 1)^2 + (0.18217 - 1)^2 + (0.40182 - 0)^2 + (0.40182 - 0)^2} = 1.73012$$

$$d_{3(P1,'C')} = \sqrt{(0.40394 - 0)^2 + \dots + (0.54971 - 1)^2 + (0.54971 - 1)^2 + \dots + (0.40182 - 0)^2} = 1.23416$$

$$d_{4(P1,'D')} = \sqrt{(0.40394 - 0)^2 + \dots + (0.44833 - 1)^2 + (0.44833 - 1)^2 + \dots + (0.40182 - 0)^2} = 1.38876$$

$$d_{5(P1,'E')} = \sqrt{(0.40394 - 1)^2 + (0.40394 - 1)^2 + (0.44833 - 0)^2 + \dots + (0.40182 - 0)^2} = 1.45129$$

gde je: $\mu_{'A'}(P1) \dots \mu_{'E'}(P1)$ prema μ_i iz tabele 6.13, dok je $\mu_A \dots \mu_E$ prema raspodeli fazi skupova na j-skali.

Tabela 6.14. Izračunata relativna rastojanja za sva analizirana slaba mesta

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
$d_{1(A)}$	1.45421	1.30364	1.25664	0.92494	1.87305	1.88694	1.75568	1.89659
$d_{2(B)}$	1.73012	1.07292	1.66902	1.16314	1.87305	1.88694	1.78268	1.89659
$d_{3(C)}$	1.23416	1.72510	1.24247	1.54047	1.92967	1.96234	1.23776	1.89659
$d_{4(D)}$	1.38876	1.17093	1.28681	1.66441	1.92919	1.82795	1.23608	2.02282
$d_{5(E)}$	1.45129	1.73519	1.34787	1.65151	0.38334	0.47576	1.16756	0.30295

U sledećem koraku se iz grupe vrednosti $d_{A'}, \dots, 'E'$ bira minimalna vrednost d_{\min} parcijalno za svako analizirano slabo mesto. Iz odnosa $d_{\min}/d_{A'}, \dots, 'E'$ primenom jednačine (5.22) računaju se oblici funkcije pripadnosti koji su u skladu sa potrebnim oblikom rizika prikazanim jednačinom (5.20). Proračun za slabo mesto P1 je prikazan respektivno,

$$\mu_1 = \frac{1.23416}{\left(1.45421 \cdot \left(\frac{1.23416}{1.45421} + \frac{1.23416}{1.73012} + \frac{1.23416}{1.23416} + \frac{1.23416}{1.38876} + \frac{1.23416}{1.45129}\right)\right)} = 0.19732$$

$$\mu_2 = \frac{1.23416}{\left(1.73012 \cdot \left(\frac{1.23416}{1.45421} + \frac{1.23416}{1.73012} + \frac{1.23416}{1.23416} + \frac{1.23416}{1.38876} + \frac{1.23416}{1.45129}\right)\right)} = 0.16585$$

$$\mu_3 = \frac{1.23416}{\left(1.23416 \cdot \left(\frac{1.23416}{1.45421} + \frac{1.23416}{1.73012} + \frac{1.23416}{1.23416} + \frac{1.23416}{1.38876} + \frac{1.23416}{1.45129}\right)\right)} = 0.23250$$

$$\mu_4 = \frac{1.23416}{\left(1.38876 \cdot \left(\frac{1.23416}{1.45421} + \frac{1.23416}{1.73012} + \frac{1.23416}{1.23416} + \frac{1.23416}{1.38876} + \frac{1.23416}{1.45129}\right)\right)} = 0.20662$$

$$\mu_5 = \frac{1.23416}{\left(1.45129 \cdot \left(\frac{1.23416}{1.45421} + \frac{1.23416}{1.73012} + \frac{1.23416}{1.23416} + \frac{1.23416}{1.38876} + \frac{1.23416}{1.45129}\right)\right)} = 0.19771$$

Ocene za slabo mesto P1 će imati sledeći oblik:

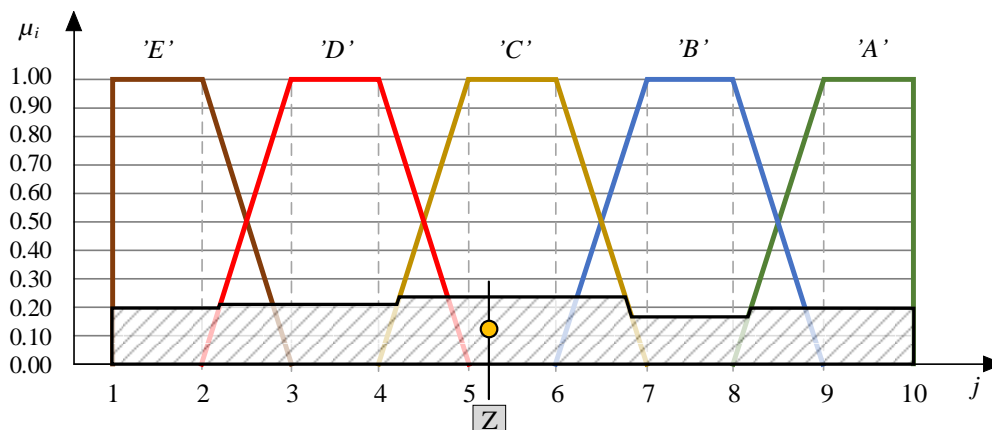
$$RPN(P1) = (0.19732/'A', 0.16585/'B', 0.23250/'C', 0.20662/'D', 0.19771/'E')$$

U skladu sa datim lingvističkim opisom iz poglavlja 5.2.4 ocene za slabo mesto P1 se mogu tumačiti na sledeći način: 19.73% - veoma visok rizik, 16.58% - visok rizik, 23.25% - prosečan rizik, 20.66% - nizak rizik i 19.77% - veoma nizak rizik. Distribucija ocena rizika sa označenim težištem prikazana je grafički na slici 6.3.

U tabeli 6.15 prikazane su krajnje vrednosti za sva slaba mesta (P1-P8).

Tabela 6.15. Raspodela vrednosti nakon procesa identifikacije za sva analizirana slaba mesta

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
$\mu('A')$	0.19732	0.20681	0.21399	0.28479	0.11328	0.12563	0.15804	0.09806
$\mu('B')$	0.16585	0.25128	0.16111	0.22647	0.11328	0.12563	0.15565	0.09806
$\mu('C')$	0.23250	0.15628	0.21643	0.17099	0.10996	0.12080	0.22417	0.09806
$\mu('D')$	0.20662	0.23025	0.20897	0.15826	0.10998	0.12968	0.22448	0.09194
$\mu('E')$	0.19771	0.15538	0.19950	0.15950	0.55350	0.49826	0.23765	0.61388



Slika 6.3. Izlazne vrednosti nakon identifikacije sa označenim težištem

6.1.3. Prikaz rezultata rizika po strukturu stabilnost bagera

Poslednji korak modela (Modul 3) je postupak sintezovanja vrednosti dobijenih iz identifikacije u jedan broj koji označava ukupnu ocenu rizika. U postupku defazifikacije koristi se metoda “centra masa” (Z_n). Postupak je objašnjen u poglavlju 5.3.1. Primenom jednačine (5.23) dobija se krajnja ocena. Pored krajnje vrednosti rizika, primenom jednačine (5.24) za izračunavanje standardne devijacije dobija se rasipanja rezultata. Reprezentativan primer izračunavanja obe vrednosti, dat je za slabo mesto P1. Vrednosti krajnjih ocena za sva slaba mesta u analizi (P1-P8) i njihova disperzija dati su u tabeli 6.16.

$$Z_{P1} = \frac{0.19732 \cdot 5 + 0.16585 \cdot 4 + 0.23250 \cdot 3 + 0.20662 \cdot 2 + 0.19771 \cdot 1}{0.19732 + 0.16585 + 0.23250 + 0.20662 + 0.19771} = 2.958$$

$$S_{P1} = \sqrt{\frac{(0.19732 - 0.2)^2 + (0.16585 - 0.2)^2 + (0.23250 - 0.2)^2 + (0.20662 - 0.2)^2 + (0.19771 - 0.2)^2}{5 - 1}} = 0.02387$$

Tabela 6.16. Defazifikovane vrednosti i mera rasipanja za sva slaba mesta

Slaba mesta	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
Z_n	2.958	3.124	2.981	3.319	2.123	2.251	2.772	1.975
S_n	0.02387	0.04328	0.02268	0.05503	0.19762	0.16676	0.03978	0.23138

Kod tradicionalnog pristupa izračunavanja i tumačenja rizika tehničkih sistema dominirala su dva načina prikaza krajnjih rezultata. Prvi način je preko performanse rizika RPN koja se dobija množenjem tri parcijalna indikatora. Parcijalni indikatori se ocenjuju u opsegu od 1 do 5 ili od 1 do 10. Sledi da opseg performanse rizika može imati vrednost od 1 ($1 \times 1 \times 1$) do 125 ($5 \times 5 \times 5$) odnosno do 1000 ($10 \times 10 \times 10$). Drugi pristup uzima u obzir dvoparametarsku matricu sačinjenu od verovatnoće pojavljivanja i ozbiljnosti posledica. Opseg mogućih vrednosti rezultata rizika je od 1 do 25.

Da bi se stvorila jasnija slika kod inovativnog modela, u postupku defazifikacije za ocene ‘A’, ..., ‘E’ su umesto vrednosti od 1 do 5 uzete jednako raspoređene ocene od 1 do 125, od 1 do 1000, odnosno od 1 do 25. Prema istom principu izračunata je defazifikovana vrednost rizika za svako slabo mesto sa izmenjanim vrednostima u jednačini (5.23). Svi rezultati prikazani su u tabeli 6.17.

Tabela 6.17. Različiti oblici interpretacije rezultata rizika

Slaba mesta		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
RPN	(1-125)	61.7	66.8	62.4	72.9	35.8	39.8	55.9	31.2
	(1-1000)	490	531	496	580	281	313	444	244
Matrica	(1-25)	12.75	13.74	12.89	14.91	7.74	8.50	11.63	6.85

6.2 Model procene rizika po prekid proizvodnog procesa rotonog bagera (Model 2)

Kao što je prethodno objašnjeno, izmene kod ovog Modela 2 (u poređenju sa prethodnim) su napravljene kod dva parcijalna indikatora i tipa podataka koji koriste. Parcijalni indikatori koji se koriste u ovom modelu su: raspoloživost (A), vreme u zastoju (T) i mogućnost detekcije (D). Ulazni podaci za (A) i (T) dobijaju se na osnovu konkretnih podataka o radu bagera, dok se za (D) ulazni podaci dobijaju na osnovu ekspertске ocene.

Na osnovu dostupnih podataka za parcijalne indikatore (A) i (T), analizom u Modelu 2 je obuhvaćen čitav bager. U samom toku modela izmene se javljaju u Modulu 1. Naime, za ove parcijalne indikatore koriste se rezultati koje je mašina ostvarila u razmatranom periodu. Statističkom obradom podataka dobijaju se ulazne vrednosti koje se potom mapiraju na fazi skupove i kao takve koriste za proračun rizika. Za treći parcijalni indikator, mogućnost detekcije (D), koristi se ekspertsko ocenjivanje na osnovu lingvističkog opisa prema sistemima održavanja i stepena raspoloživog monitoringa bagera. Nakon što se definišu svi ulazni podaci, proračun rizika (Modul 2) isti je kao kod računanja rizika po strukturnu stabilnost bagera.

6.2.1. Definisanje ulaznih podataka rizika po prekid proizvodnog procesa

Prvi deo ulaznih podataka za Model 2 dobija se ekspertskim ocenjivanjem međusobnog odnosa parcijalnih indikatora rizika na isti način kao kod Modela 1. Ukupan broj eksperata i u ovom slučaju je 5. Izgled anketnog lista prikazan je u Prilogu 2. Ocene se dodeljuju poređenjem u paru po dva parcijalna indikatora u svakoj interakciji. Srednje vrednosti ocena svih eksperata postaju ulazni podaci za formiranje matrice AHP metode kojom se izračunavaju koeficijenti značajnosti svakog indikatora na ukupni rizik. U tabeli 6.18 prikazane su sve dodeljene vrednosti eksperata.

Tabela 6.18. Ekspertске ocene međusobnog odnosa parcijalnih indikatora za Model 2

	Ekspert 1	Ekspert 2	Ekspert 3	Ekspert 4	Ekspert 5	Prosečna ocena
A prema T	1.0	0.5	2.0	1.0	1.0	1.1
A prema D	2.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.4
T prema D	2.0	2.0	1.0	1.0	1.0	1.4

Na osnovu vrednosti prosečne ocene formira se matrica AHP metode, prikazana u tabeli 6.19. U nastavku tabele prikazani su rezultati koeficijenta značajnosti (W_i) kao i svi potrebni podaci i rezultati provere konzistentnosti ekspertskog tima. Iz tabele se može uočiti da je potrebna konzistentnost zadovoljena, odnosno vrednost (CR) je manja od 0,1 (10%).

Tabela 6.19. Proračun AHP metode za Model 2

Parametri	A	T	D	W_i
A	1.000	1.100	1.400	0.380
T	1.000/1.100	1.000	1.400	0.357
D	1.000/1.400	1.000/1.400	1.000	0.263
λ_{max}	3.00101			
n	3			
R_i	0.58			
CI	0.0005			
CR	0.00087			

Vrednosti koeficijenata značajnosti parcijalnih indikatora koriste se u fazi propozicije (Modul 2) i imaju sledeći oblik:

$$W_A = 0.380; W_T = 0.357; W_D = 0.263; \text{ pri čemu je } W_A + W_T + W_D = 1$$

Drugi deo ulaznih podataka dobija se na osnovu ostvarenih rezultata bagera oznake SRs2000 na površinskim kopovima u Republici Srbiji. Na osnovu uvida u podatke definisana su vremena rada bagera između dva otkaza i vreme otkaza. Posmatra se period između dva remonta bagera. S obzirom da je reč o velikom broju podataka, potrebno je definisati teorijski zakon raspodele podatka. Polazna hipoteza je da je reč o ekspanencijalnoj raspodeli. Primenom χ^2 testa se vrši provera postavljene hipoteze raspodele.

Na osnovu raspoloživih podataka, formirano je 8 grupa. Reprezentativan postupak je dat za prvu grupu. Za preostale će biti prikazani samo podaci i rezultati značajni za dalju analizu. U prilogu broj 3 su tabelarno prikazani svi podaci iz osam grupa.

Ulazne vrednosti iz prve grupe podataka su prikazane u tabeli 6.20. Sadrže vreme u radu tj. vreme između dva otkaza (T_{i-r}) i vreme u otkazu (T_{i-o}). Ukupan broj podataka je $n = 44$.

Tabela 6.20. Podaci o vremenu rada i vremenu zastoja iz prve grupe podataka

r. br.	T_{i-r} , [min]	T_{i-o} , [min]	r. br.	T_{i-r} , [min]	T_{i-o} , [min]	r. br.	T_{i-r} , [min]	T_{i-o} , [min]
1.	3341	120	16.	361	600	31.	506	140
2.	11675	255	17.	241	155	32.	506	472
3.	14503	720	18.	140	160	33.	1213	65
4.	19582	648	19.	4371	545	34.	786	950
5.	1313	105	20.	3982	1058	35.	714	195
6.	5095	480	21.	1269	95	36.	463	165
7.	16783	920	22.	1524	770	37.	593	270
8.	3289	535	23.	1260	398	38.	869	105
9.	3083	240	24.	1484	310	39.	645	45
10.	7846	620	25.	802	185	40.	455	100
11.	7154	530	26.	2808	531	41.	106	165
12.	8543	410	27.	396	110	42.	961	185
13.	6706	950	28.	595	995	43.	500	95
14.	433	110	29.	2656	841	44.	14548	1100
15.	8756	1240	30.	702	45			

U prvom koraku se podaci statistički obrađuju. Maksimalno vreme rada je $T_{r-max} = 19582$ min, dok je u otkazu $T_{o-max} = 1240$ min. Minimalna vremena u radu, odnosno otkazu su: $T_{r-min} = 106$ min; $T_{o-min} = 45$ min. Izračunavanje preostalih statističkih veličina dato je u nastavku.

Srednje vreme rada (T_{r-sr}) i srednje vreme u otkazu (T_{o-sr}) će biti:

$$T_{r-sr} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} T_i}{n} = \frac{(3341 + 11675 + \dots + 500 + 14548)}{44} = 3717.2$$

$$T_{o-sr} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} T_i}{n} = \frac{(120 + 255 + \dots + 95 + 1100)}{44} = 425.8$$

Srednje kvadratno odstupanje (standardna devijacija) za vreme rada i vreme u otkazu:

$$\sigma_{T_r} = \sqrt{D(T)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (T_i - T_{sr})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{(3341 - 3717.2)^2 + \dots + (14548 - 3717.2)^2}{44-1}} = 4880.1$$

$$\sigma_{T_o} = \sqrt{\frac{(120 - 425.8)^2 + \dots + (1100 - 425.8)^2}{44-1}} = 339.1$$

Broj intervala računa se primenom neke od jednačina (4.22). U nastavku je dat primer za ovu grupu podataka, s tim da je broj podataka kod oba skupa (rad i otkaz) isti i iznosi 44.

$$z_{(r,o)} = 5 \cdot \log(n) = 5 \cdot \log(44) = 8$$

Širina intervala dobija se na sledeći način:

$$h_r = \frac{(T_{r-\max} - T_{r-\min})}{z} = \frac{(19582 - 106)}{8} = 2435$$

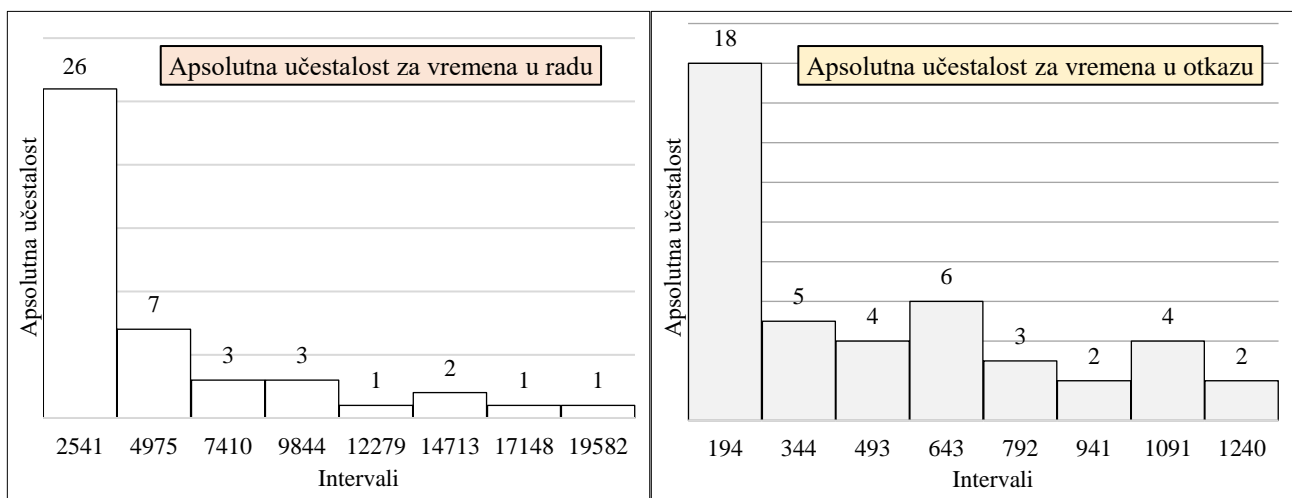
$$h_o = \frac{(T_{o-\max} - T_{o-\min})}{z} = \frac{(1240 - 45)}{8} = 149$$

U konkretnom slučaju će se koristiti jednaka širina intervala. Na osnovu podataka o broju i širini intervala, za svaki interval se definišu granice. U tabeli 6.21 prikazane su granice za svakog intervala grupe podataka. Na osnovu granica određuje se apsolutna učestalost podataka u svakom intervalu, a potom i relativna učestalost.

Tabela 6.21. Apsolutna i relativna učestalost intervala vremena rada i vremena u otkazu iz prve grupe podataka

Vreme u radu					Vreme u otkazu			
Broj interv.	Opseg intervala		Apsolutna učestalost, $[m_i]$	Relativna učestalost, $[m_i/n]$	Opseg intervala		Apsolutna učestalost, $[m_i]$	Relativna učestalost, $[m_i/n]$
	od	do			od	do		
1	106	2541	26	0.5909	45	194	18	0.4091
2	2541	4975	7	0.1591	194	344	5	0.1136
3	4975	7410	3	0.0682	344	493	4	0.0909
4	7410	9844	3	0.0682	493	643	6	0.1364
5	9844	12279	1	0.0227	643	792	3	0.0682
6	12279	14713	2	0.0455	792	941	2	0.0455
7	14713	17148	1	0.0227	941	1091	4	0.0909
8	17148	19582	1	0.0227	1091	1240	2	0.0455
		Σ	44	1.0000		Σ	44	1.0000

Apsolutna učestalost po intervalima može se predstaviti i grafički preko histograma. Na slici 6.4 prikazani su histogrami vremena rada i vremena u otkazu sa označenim stubastim oblicima apsolutne učestalosti podataka u definisanim intervalima.



Slika 6.4. Histogram apsolutne učestalosti za vremena u radu i vremena u otkazu

Na osnovu oblika histograma, podatke treba testirati na prema eksponencijalnoj raspodeli primenom χ^2 testa. Parametri intenziteta otkaza (λ) i intenziteta održavanja (μ) određuju se na dva načina. Kod prvog se određuje na osnovu aritmetičke sredite (srednje vrednosti) iz grupe podataka (T_{r-sr} , T_{o-sr}):

$$\lambda_1 = \frac{1}{T_{r-sr}} = \frac{1}{3717.2} = 0.0002690$$

$$\mu_1 = \frac{1}{T_{o-sr}} = \frac{1}{425.8} = 0.0023488$$

Drugi način se određuje na osnovu standardne devijacije (σ_T):

$$\lambda_2 = \frac{1}{\sigma_{T_r}} = \frac{1}{4880.1} = 0.00020492$$

$$\mu_2 = \frac{1}{\sigma_{T_o}} = \frac{1}{339.1} = 0.0029488$$

Krajnji oblici parametara (λ , μ) dobijaju se na osnovu oba načina:

$$\lambda = \frac{1}{2} \cdot (\lambda_1 + \lambda_2) = \frac{1}{2} \cdot (0.0002690 + 0.00020492) = 0.0002370$$

$$\mu = \frac{1}{2} \cdot (\mu_1 + \mu_2) = \frac{1}{2} \cdot (0.0023488 + 0.0029488) = 0.0026488$$

Prvi korak testiranja podrazumeva računanje parcijalne verovatnoće realizacije intervala (t_{i-1} , t_i) primenom jednačine (4.23). Na osnovu dobijenih vrednosti (p_i) množenjem sa brojem podataka (n) računa se teorijske učestalosti. Reprezentativan primer za izračunavanje vrednosti (p_i) je dat u nastavku, preostale vrednosti su prikazane u tabeli 6.22.

$$p_i = P(106 \leq T \leq 2541) = \int_{106}^{2541} 0.0002370 \cdot e^{-0.0002370t} dt$$

$$= \left[1 - e^{-0.0002370 \cdot 2541} \right] - \left[1 - e^{-0.0002370 \cdot 106} \right] = 0.42749$$

Tabela 6.22. Vrednosti (p_i) za oba skupa podataka iz prve grupe

broj intervala	opseg intervala		p_i	broj intervala	opseg intervala		p_i
	od	do			od	do	
1	106	2541	0.42749	1	45	194	0.29005
2	2541	4975	0.24009	2	194	344	0.19527
3	4975	7410	0.13485	3	344	493	0.13146
4	7410	9844	0.07573	4	493	643	0.08851
5	9844	12279	0.04254	5	643	792	0.05958
6	12279	14713	0.02389	6	792	941	0.04011
7	14713	17148	0.01342	7	941	1091	0.02701
8	17148	19582	0.00754	8	1091	1240	0.01818

Rezultati teorijske učestalosti ($N \times p_i$) za svaki interval obe grupe podataka prikazani su u tabeli 6.23.

Tabela 6.23. Vrednosti teorijske učestalosti

broj intervala	opseg intervala		$n \times p_i$	broj intervala	opseg intervala		$n \times p_i$
	od	do			od	do	
1	106	2541	18.8	1	45	194	12.8
2	2541	4975	10.6	2	194	344	8.6
3	4975	7410	5.9	3	344	493	5.8
4	7410	9844	3.3	4	493	643	3.9
5	9844	12279	1.9	5	643	792	2.6
6	12279	14713	1.1	6	792	941	1.8
7	14713	17148	0.6	7	941	1091	1.2
8	17148	19582	0.3	8	1091	1240	0.8

Primenom jednačine (4.24) računa se vrednost kriterijuma testa (χ_{sr}^2). Parcijalne vrednosti za svaki interval i ukupne vrednosti su date u tabeli 6.24.

Tabela 6.24. Vrednosti kriterijuma testa (χ_{sr}^2)

broj intervala	opseg intervala		$\chi_{sr_i}^2$	broj intervala	opseg intervala		$\chi_{sr_i}^2$
	od	do			od	do	
1	106	2541	2.75	1	45	194	2.15
2	2541	4975	1.20	2	194	344	1.50
3	4975	7410	1.45	3	344	493	0.55
4	7410	9844	0.03	4	493	643	1.14
5	9844	12279	0.41	5	643	792	0.05
6	12279	14713	0.86	6	792	941	0.03
7	14713	17148	0.28	7	941	1091	6.65
8	17148	19582	1.35	8	1091	1240	1.80
χ_{sr}^2			8.3	χ_{sr}^2			13.9

Stepen slobode (ν) računa se na osnovu jednačine (4.25), pri čemu se za vrednost broja parametara raspodele (r) usvaja 1 na osnovu testiranja eksponencijalne raspodele koja je jedno-parametarska.

$$\nu = z - r - 1 = 8 - 1 - 1 = 6$$

Za prag značajnosti se usvaja $\alpha = 0,01$ i izračunatog stepena slobode $r = 6$, iz table 4.4 se usvaja kritične vrednosti $\chi_{kr}^2 = 16,8$. Poređenjem izračunatih vrednosti χ_{sr}^2 i usvojene vrednosti χ_{kr}^2 može se zaključiti da je izračunata vrednost u granici dozvoljenog. Na osnovu toga se prihvata hipoteza da se podaci mogu opisati eksponencijalnom raspodelom.

Na osnovu dobijenih intenziteta otkaza (λ) i intenziteta održavanja (μ) dobija se funkcija oblika:

$$A(t) = \frac{\mu}{(\lambda + \mu)} + \frac{\lambda}{(\lambda + \mu)} \cdot e^{-(\lambda + \mu)t}$$

$$A(t) = \frac{0.0026488}{(0.0002370 + 0.0026488)} + \frac{0.0002370}{(0.0002370 + 0.0026488)} \cdot e^{-(0.0002370 + 0.0026488)t}$$

$$A(t) = 0.9179 + 0.08212 \cdot e^{-0.002886t}$$

Za date podatke, prosečno vreme rada između dva otkaza ($MTBF$) dobija se primenom jednačine (5.1):

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{0.0002370} = 4220 \text{ h}$$

Prosečno vreme zastoja (MDT) računa se primenom jednačine (5.2):

$$MDT = \frac{1}{\mu} = \frac{1}{0.0026488} = 378 \text{ h}$$

Sledi da je na osnovu jednačine (5.3) stacionarna raspoloživost (k_A):

$$k_A = \frac{\mu}{(\lambda + \mu)} = \frac{0.0026488}{(0.0002370 + 0.0026488)} = 0.9179$$

U prilogu broj 3 date su vrednosti iz svakog od preostalih grupa podataka. Osnovne informacije o broju podataka i rezultati χ^2 testa u odnosu na eksponencijalnu teorijsku raspodelu za sve grupe podataka dati su u tabeli 6.25. Na osnovu eksponencijalne teorijske raspodele, prema prethodno definisanom postupku, urađen je proračun za preostale grupe podataka i rezultati su prikazani u tabeli 6.26.

Tabela 6.25. Rezultati χ^2 testa za sve grupe podataka

Podaci br.	n	$\sum T_r$	$\sum T_o$	χ_{sr}^2		χ_{kr}^2	Uslov raspodele
				rad	otkaz		
1	44	163558	18733	8.3	13.9	16.80	Zadovoljen
2	122	515589	107690	12.9	14.5	20.10	Zadovoljen
3	94	426675	105060	16.2	14.8	18.50	Zadovoljen
4	56	357567	513285	9.1	15.8	16.80	Zadovoljen
5	42	160855	15605	12.5	7.2	16.80	Zadovoljen
6	95	410745	34410	16.8	11.3	18.50	Zadovoljen
7	62	440398	70220	3.4	13.8	16.80	Zadovoljen
8	42	119106	40050	8.1	5.5	16.80	Zadovoljen

Tabela 6.26. Rezultati parametara raspoloživosti za sve grupe podataka

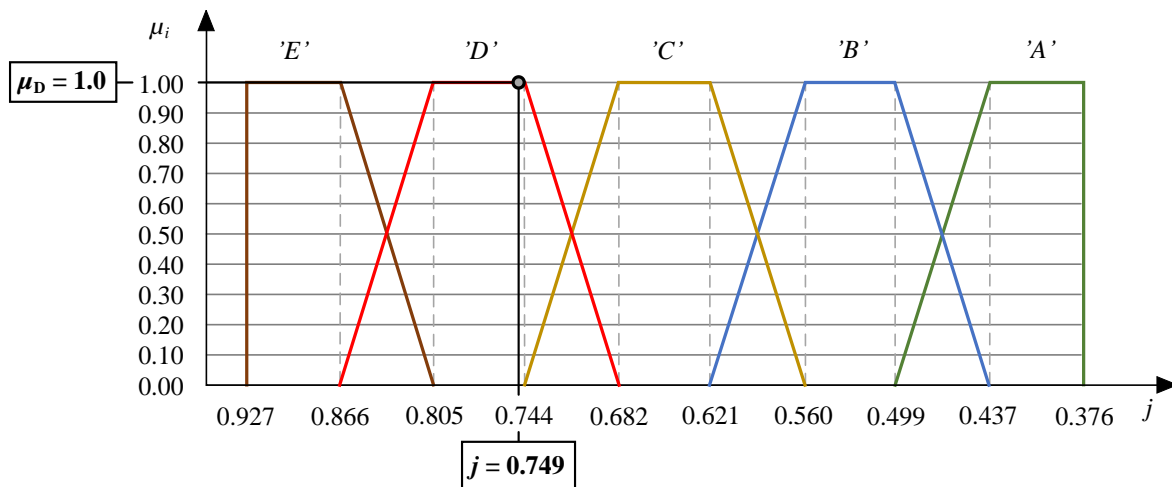
Podaci br.	λ	μ	$A(t)$	$MTBF$	MDT	k_A
1	0.000237	0.002649	$A(t) = 0.9179 + 0.0821 \cdot e^{-0.002886t}$	4220	378	0.9179
2	0.000220	0.000824	$A(t) = 0.7895 + 0.2105 \cdot e^{-0.001044t}$	4550	1213	0.7895
3	0.000199	0.000635	$A(t) = 0.7615 + 0.2385 \cdot e^{-0.000834t}$	5026	1574	0.7615
4	0.000157	0.000095	$A(t) = 0.3762 + 0.6238 \cdot e^{-0.000251t}$	6378	10576	0.3762
5	0.000226	0.002886	$A(t) = 0.9274 + 0.0726 \cdot e^{-0.003112t}$	4428	347	0.9274
6	0.000202	0.002413	$A(t) = 0.9229 + 0.0771 \cdot e^{-0.002615t}$	4960	414	0.9229
7	0.000137	0.000676	$A(t) = 0.8310 + 0.1690 \cdot e^{-0.000813t}$	7277	1480	0.8310
8	0.000330	0.000766	$A(t) = 0.6987 + 0.3014 \cdot e^{-0.001097t}$	3026	1305	0.6987

Na osnovu rezultata definišu se parametri stacionarne raspoloživosti koji predstavljaju ulazne vrednosti za model procene rizika. U tabeli 6.27 su date minimalna, maksimalna vrednost i ponderisana aritmetička sredina (srednja vrednost) iz skupa svih podataka. Ponderisanje se vrši u relaciji ukupnog vremena rada i stacionarne raspoloživosti iz svake grupe podataka.

Tabela 6.27. Ulazne vrednosti parcijalnog indikatora verovatnoća pojavljivanja za model procene rizika

	Minimalna vrednost	Maksimalna vrednost	Ponderisana srednja vrednost
k_A	0.3762	0.9274	0.7490

Na osnovu dobijenih minimalnih i maksimalnih vrednosti iz svih grupa podataka formiraju se minimalne i maksimalne vrednosti j -skale fazi skupova. Vrednosti između su proporcionalno raspoređene. Ponderisana srednja vrednost koeficijenta k_A se mapira na fazi skupove. Presečna tačka ukazuje kom fazi skupu pripada i kolika je funkcija pripadnost. Očitana vrednost funkcije pripadnost koristi se u daljem proračunu kao ulazni podatak ovog parcijalnog indikatora. Na slici 6.5 dat je prikaz mapiranja koji je u skladu sa definisanim načinom (slika 5.2). Vrednost pripada u potpunosti fazi skupu 'D' pa će funkcija pripadnosti imati oblik $\mu_D = 1.0$.

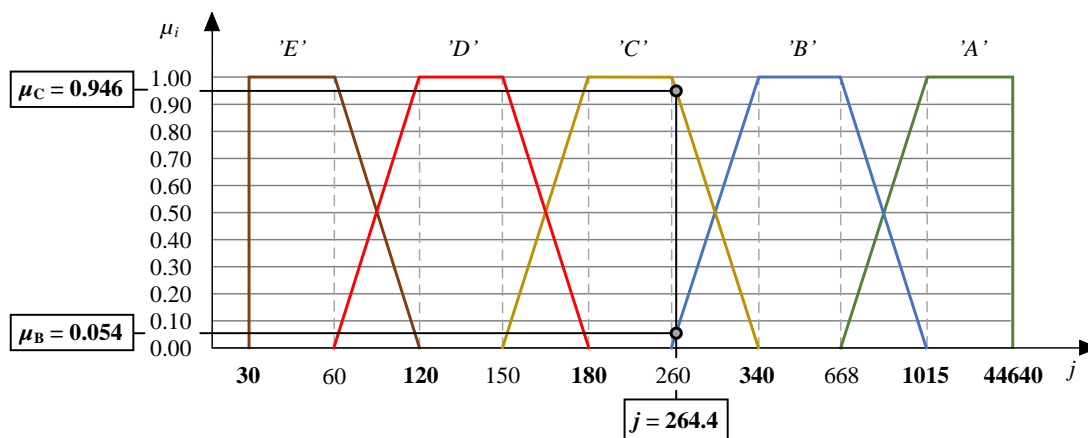


Slika 6.5. Definisane ulazne vrednosti za parcijalni indikator (A)

Drugi parcijalni indikator predstavlja vreme zastoja (T). U direktnoj je vezi sa stvaranjem indirektnih troškova. Prosečna dobit koju ostvaruje rotorni bager SRs2000 kreće se od 5688 do 6707 [€/h] [78]. Kada je bager u zastoju, vrednost dobiti postaje indirektna trošak usled gubitka planirane proizvodnje. Na taj način se uočava značaj uzimanja u obzir vremena zastoja kao mere parcijalnog indikatora ozbiljnosti posledica u analizi rizika.

Parcijalni indikator (T) se određuje na osnovu zabeleženih vremena u zastoju (prilog broj 3) za sve podatke. Ukupan broj podataka je 557. Svi podaci se sortiraju od najmanje do najveće vrednosti i klasifikuju u 5 intervala. Svi intervali izuzev poslednjeg, sadrže isti broj podataka (112), ali su različite širine. Krajnje vrednosti iz intervala su: 120, 180, 340, 1015, 44640. Te vrednosti definišu krajnje granice fazi skupova ('A', ..., 'E') na *j*-skali. Ulazna vrednost za konkretan model formira se kao srednja vrednosti svih podataka iz prva četiri intervala. Poslednji interval nije uzet u razmatranje zbog velikog odstupanja vrednosti sadržanih u njima. Dužine zastoja od oko mesec dana, uglavnom su rezultat administrativnih i tehničkih problema (npr. čekanje na nabavku dela) tj. rezultat su greške ljudi. Kao takvi, ti podaci nisu relevantni za dalju procenu rizika jer neće stvoriti realnu sliku o stanju rotonog bagera. Uvidom u sve podatke iz četiri intervala izračunata je srednja vrednost zastoja koja iznosi 264.4 minuta.

Na osnovu dobijenih vrednosti intervala formira se *j*-skala, a mapiranje srednjeg vremena zastoja na skalu prikazano je na slici 6.6. Način mapiranja isti je kao kod prvog parcijalnog indikatora. Funkcija pripadnosti u ovom slučaju je raspodeljena na dva fazi skupa ('C' i 'B'). Sledi da su usvojene vrednosti za Modul 2 oblika: $\mu_C = 0.946$ i $\mu_B = 0.054$.



Slika 6.6. Definisane ulazne vrednosti za parcijalni indikator (T)

Treći parcijalni indikator dobija se ekspertskim ocenjivanjem na isti način kao kod Modela 1. Izgled anketnog lista dat je u prilogu 2. Ocene su dodeljivane u skladu sa lingvističkim opisom iz tabele 5.2. Pregled dodeljenih ocena i prosečna ocena prikazani su u tabeli 6.28. Ulazna vrednost za Modul 2 predstavlja prosečna ocena.

Tabela 6.28. Ulazne ocene analitičara za parcijalni indikator (D)

Ekspert br.	'A'	'B'	'C'	'D'	'E'
1.		0.25	0.75		
2.		1			
3.		0.65	0.35		
4.		0.40	0.60		
5.		0.50	0.50		
Prosečna ocena	0	0.56	0.44	0	0

6.2.2. Izračunavanje rizika po prekid proizvodnog procesa

Tok modela izračunavanja rizika po prekid proizvodnog procesa isti je kao kod izračunavanja rizika po strukturnu stabilnost mašine. S obzirom da je postupak detaljno objašnjen i prikazan kroz primer, u nastavku ovog modela daje se samo prikaz rezultata svakog koraka. U tabeli 6.29 prikazane su fazifikovane vrednosti ulaznih podataka.

Tabela 6.29. Fazifikovane vrednosti svih parcijalnih indikatora

Indikator	$j=1$	$j=2$	$j=3$	$j=4$	$j=5$	$j=6$	$j=7$	$j=8$	$j=9$	$j=10$
A	0	0	1.00	1.00	0	0	0	0	0	0
T	0	0	0	0	0.946	0.946	0.054	0.054	0	0
D	0	0	0	0	0.44	0.44	0.56	0.56	0	0

U odnosu na fazifikovane vrednosti sva tri parcijalna indikatora na j -skali formira se fazi kompozicija modela. Za fazi kompoziciju se i u ovom slučaju koristi TOPSIS metoda. Vrednosti težinskih koeficijenata dobijenih AHP metodom, koriste se u ovom delu modela. U tabeli 6.30 prikazan je pregled svih ulaznih vrednosti kompozicije.

Tabela 6.30. Ulazne vrednosti za formiranje fazi TOPSIS kompozicije Modela 2

Parcijalni indikator		A	T	D
Težinski koeficijenti (W_i)		0.380	0.357	0.263
j - skala	1	0.00000	0.00000	0.00000
	2	0.00000	0.00000	0.00000
	3	1.00000	0.00000	0.00000
	4	1.00000	0.00000	0.00000
	5	0.00000	0.94600	0.44000
	6	0.00000	0.94600	0.44000
	7	0.00000	0.05400	0.56000
	8	0.00000	0.05400	0.56000
	9	0.00000	0.00000	0.00000
	10	0.00000	0.00000	0.00000

Ulazne vrednosti se u sledećim koracima normalizuju (r_{ij}), a potom se ponderišu (p_{ij}) vrednostima težinski koeficijenti dobijeni AHP metodom (W_i). Rezultati oba postupka prikazani su u tabeli 6.31. Iz grupe ponderisanih vrednosti (p_{ij}) se pronalaze idealni (A_i^+) i anti-idealni (A_i^-) ishodi koji su prikazani u tabeli 6.32. U narednoj tabeli 6.33 prikazane su vrednosti distance (S_i^+ , S_i^-) svakog ishoda od idealnog (A^+) i anti-idealnog (A^-) ishoda. Tabela sadrži i sintezni koeficijenti (μ_i) koji se dobija na osnovu prethodno izračunatih vrednosti (S_i^+ , S_i^-). Dobijeni koeficijenti sjedinjuje sva tri parcijalna indikatora prema raspodeli ishoda na j -skali (od 1 do 10).

Tabela 6.31. Normalizovane i ponderisane vrednosti

<i>j</i>	<i>r_{ij}</i>			<i>p_{ij}</i>		
	A	T	D	A	T	D
1	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
2	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
3	0.70711	0.00000	0.00000	0.26883	0.00000	0.00000
4	0.70711	0.00000	0.00000	0.26883	0.00000	0.00000
5	0.00000	0.70596	0.43687	0.00000	0.25187	0.11491
6	0.00000	0.70596	0.43687	0.00000	0.25187	0.11491
7	0.00000	0.04030	0.55601	0.00000	0.01438	0.14625
8	0.00000	0.04030	0.55601	0.00000	0.01438	0.14625
9	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
10	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

Tabela 6.32. Definisiranje idealnih i anti-idealnih ishoda kompozicije

	A	T	D
<i>A</i> ⁺	0.26883	0.25187	0.14625
<i>A</i> ⁻	0.26883	0.01438	0.11491

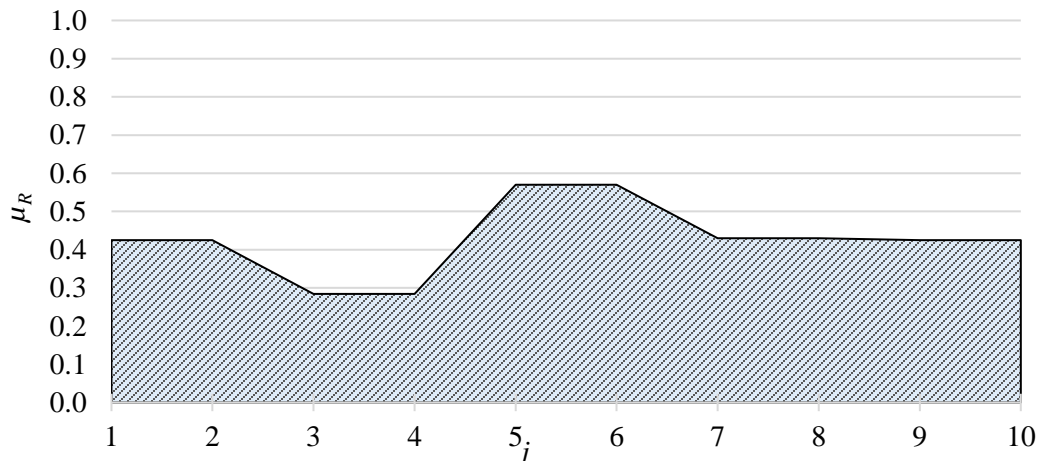
Tabela 6.33. Suma distanci ishoda od idealnog i anti-idealnog ishoda i rezultati rizika (*R*)

<i>j</i>	<i>S_i⁺</i>	<i>S_i⁻</i>	<i>R(μ_i)</i>
1	0.39636	0.29272	0.42480
2	0.39636	0.29272	0.42480
3	0.29125	0.11581	0.28450
4	0.29125	0.11581	0.28450
5	0.27065	0.35871	0.56996
6	0.27065	0.35871	0.56996
7	0.35871	0.27065	0.43004
8	0.35871	0.27065	0.43004
9	0.39636	0.29272	0.42480
10	0.39636	0.29272	0.42480

Izračunate vrednosti kompozicije modela *R(μ_i)* raspodeljene su prema *j*-skali i mogu se predstaviti se na sledeći način:

$$R(\mu) = \left\{ 0.42480(1), 0.42480(2), 0.28450(3), 0.28450(4), 0.56996(5), \right. \\ \left. 0.56996(6), 0.43004(7), 0.43004(8), 0.42480(9), 0.42480(10) \right\}$$

Grafički prikaz rezultata nakon kompozicije modela dat je na slici 6.7.



Slika 6.7. Raspodela izlaznih vrednosti kompozicije prema *j*-skali

Izračunate vrednosti postaju ulazni podaci za postupak fazi identifikacije. Metodom „best-fit“ se ishodi prevode u oblik ocene rizika $RPN = \mu('A'), \mu('B'), \mu('C'), \mu('D'), \mu('E')$ koji sadrži lingvistički opis rizika. Postupak započinje računanjem relativnog rastojanja (d) za svako $d_{A'}, \dots, 'E'$. Iz dobijene grupe vrednosti se bira minimalna vrednost d_{\min} , a potom se iz odnosa $d_{\min}/d_{A'}, \dots, 'E'$ dobija krajnje rešenje ovog postupka. Proračun identifikacije prema prethodno definisanom sledu dat je u nastavku respektivno.

$$d_{1('A')} = \sqrt{(0.42480 - 0)^2 + (0.42480 - 0)^2 + \dots + (0.43004 - 0)^2 + (0.42480 - 1)^2 + (0.42480 - 1)^2} = 1.48461$$

$$d_{2('B')} = \sqrt{(0.42480 - 0)^2 + \dots + (0.43004 - 1)^2 + (0.43004 - 1)^2 + (0.42480 - 0)^2 + (0.42480 - 0)^2} = 1.47753$$

$$d_{3('C')} = \sqrt{(0.42480 - 0)^2 + \dots + (0.56996 - 1)^2 + (0.56996 - 1)^2 + \dots + (0.42480 - 0)^2} = 1.27414$$

$$d_{4('D')} = \sqrt{(0.42480 - 0)^2 + \dots + (0.28450 - 1)^2 + (0.28450 - 1)^2 + \dots + (0.42480 - 0)^2} = 1.66291$$

$$d_{5('E')} = \sqrt{(0.42480 - 1)^2 + (0.42480 - 1)^2 + (0.2845 - 0)^2 + \dots + (0.42480 - 0)^2} = 1.48461$$

gde je: $\mu_{A'} \dots \mu_{E'}$ prema μ_i iz tabele 6.33, dok je $\mu_A \dots \mu_E$ prema raspodeli fazi skupova na j -skali.

$$\mu_1 = \frac{1.27414}{\left(1.48461 \cdot \left(\frac{1.27414}{1.48461} + \frac{1.27414}{1.47753} + \frac{1.27414}{1.27414} + \frac{1.27414}{1.66291} + \frac{1.27414}{1.48461}\right)\right)} = 0.19752$$

$$\mu_2 = \frac{1.27414}{\left(1.47753 \cdot \left(\frac{1.27414}{1.48461} + \frac{1.27414}{1.47753} + \frac{1.27414}{1.27414} + \frac{1.27414}{1.66291} + \frac{1.27414}{1.48461}\right)\right)} = 0.19847$$

$$\mu_3 = \frac{1.27414}{\left(1.27414 \cdot \left(\frac{1.27414}{1.48461} + \frac{1.27414}{1.47753} + \frac{1.27414}{1.27414} + \frac{1.27414}{1.66291} + \frac{1.27414}{1.48461}\right)\right)} = 0.23015$$

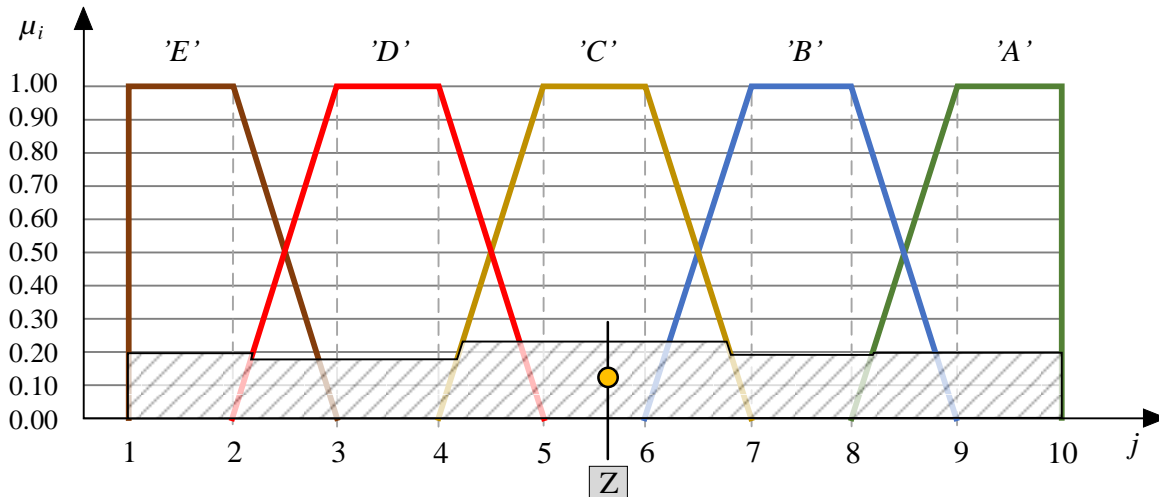
$$\mu_4 = \frac{1.27414}{\left(1.66291 \cdot \left(\frac{1.27414}{1.48461} + \frac{1.27414}{1.47753} + \frac{1.27414}{1.27414} + \frac{1.27414}{1.66291} + \frac{1.27414}{1.48461}\right)\right)} = 0.17634$$

$$\mu_5 = \frac{1.27414}{\left(1.48461 \cdot \left(\frac{1.27414}{1.48461} + \frac{1.27414}{1.47753} + \frac{1.27414}{1.27414} + \frac{1.27414}{1.66291} + \frac{1.27414}{1.48461}\right)\right)} = 0.19752$$

Ocene analize za Model 2 će imati oblik:

$$RPN = (0.19752/'A', 0.19847/'B', 0.23015/'C', 0.17634/'D', 0.19752/'E')$$

U skladu sa datim lingvističkim opisom iz poglavlja 5.2.4 ocene za slabo mesto P1 se mogu tumačiti na sledeći način: 19.75% - veoma visok rizik, 19.85% - visok rizik, 23.02% - prosečan rizik, 17.63% - nizak rizik i 19.75% - veoma nizak rizik. Distribucija ocena rizika sa označenim težištem prikazana je grafički na slici 6.8.



Slika 6.8. Izlazne vrednosti nakon identifikacije sa označenim težištem

6.2.3. Prikaz rezultata rizika po prekid proizvodnog procesa

Reprezentativna vrednost rizika dobija se sinteznim postupkom sjedinjavanja vrednosti iz identifikacije. Na taj način se dobija jedna numerička vrednost koja je reprezentativna i to se postiže postupkom defazifikacije (Z_n). U te svrhe koristi se metoda „centra masa“. Krajnji rezultat upotpunjuje se izračunavanjem disperzije rezultata (S_n). Rezultati se prikazuju u obliku RPN (Z_n, S_n). U nastavku je dat proračun za prikaz rezultata Modela 2.

$$Z_n = \frac{0.19752 \cdot 5 + 0.19847 \cdot 4 + 0.23015 \cdot 3 + 0.17634 \cdot 2 + 0.19752 \cdot 1}{0.19752 + 0.19847 + 0.23015 + 0.17634 + 0.19752} = 3.0221$$

$$S_n = \frac{\sqrt{(0.19752 - 0.2)^2 + (0.19847 - 0.2)^2 + (0.23015 - 0.2)^2 + (0.17634 - 0.2)^2 + (0.19752 - 0.2)^2}}{5 - 1} = 0.01926$$

Predstavljanje vrednosti prema FMECA, FMEA skali i matrici rizika ima oblik: $RPN_{(FMECA)} = 506$; $RPN_{(FMEA)} = 63.7$; $RPN_{(MTX)} = 13.13$.

7. ANALIZA REZULTATA I DISKUSIJA

Analize dobijenih rezultata i diskusija usmereni su ka poboljšanjima koje je inovativni sintezni model upravljanja rizikom ostvario u odnosu na dosadašnje modele. Osnovni ciljevi disertacije treba da doprinesu:

- smanjenju subjektivnosti ekspertskeg tima;
- formiranju metodološkog pristupa koji omogućuje rangiranje parcijalnih indikatora;
- povećanju preciznosti; i
- korišćenju rezultata procena rizika za dobijanje smernica u aktivnostima postojeće strategije održavanja.

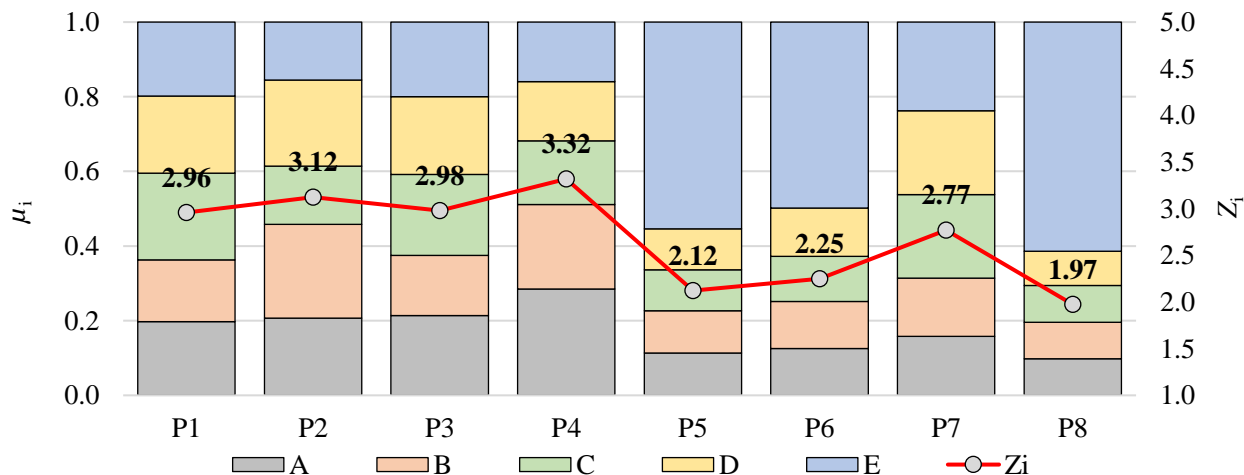
Model procene rizika sačinjen je od više različitih matematičkih metoda. Konceptualne prednosti svake od matematičkih metoda, doprinose umanjenoj definisanim nedostacima. Lingvistički postupak ekspertskeg vrednovanja i metode primenjene u okviru fazi logike imaju za cilj da umanje subjektivnost modela. Integrisanjem AHP metode postiže se uvođenje istih ili različitih koeficijenata značajnosti parcijalnim indikatorima čime se pomera težište u modelu u odnosu na konkretnu analizu koja je sprovedena. Primena TOPSIS metode u kompoziciji modela ima za cilj da poveća preciznost modela. Na kraju se na osnovu rezultata mogu dati smernice za unapređenje postojećih sistema održavanja.

Dalja razmatranja u odnosu na oba modela, koncipirana su kroz: analizu rezultata studije slučaja, analizu disperzije rezultata primenom sličnih fazi modela i mogućnosti poboljšanja održavanja rotornih bagera.

7.1 Analiza rezultata iz studije slučaja

Model procene rizika po strukturnu stabilnost rotornog bagera

Na osnovu sprovedene analize u studiji slučaja modela, rezultati su prikazani u tabeli 6.16. Drugačiji oblik prikaza rezultata u skladu sa FMECA i FMEA metodama i pristupom sa matricom rizika dat je u tabeli 6.17. Grafički prikaz rezultata dat je na slici 7.1. Na apscisi slike su obeležena sva slaba mesta obuhvaćena analizom rizika po strukturnu stabilnost rotornog bagera. Na primarnoj ordinati obeležene su izlazne vrednosti postupka identifikacije u obliku μ_{RPN} na skali od 0 do 1. Svaka ocena rizika oblika $\mu_{A'}$, ..., $\mu_{E'}$ sadrži lingvistički opis. Za svako slabo mesto stubastom raspodelom definisan je opseg pripadnosti nivou rizika $\mu_{A'}$, ..., $\mu_{E'}$. Sekundarna ordinata označava izlazne vrednosti postupka defazifikacije (Z_i) u opsegu od 1 do 5. Tačkaste oznake definišu vrednost rizika za svako slabo mesto. Kako bi razlika bila preglednija, tačkaste oznake su spojene crvenom linijom [50].



Slika 7.1. Prikaz rezultata analize slabih mesta po strukturnu stabilnost bagera

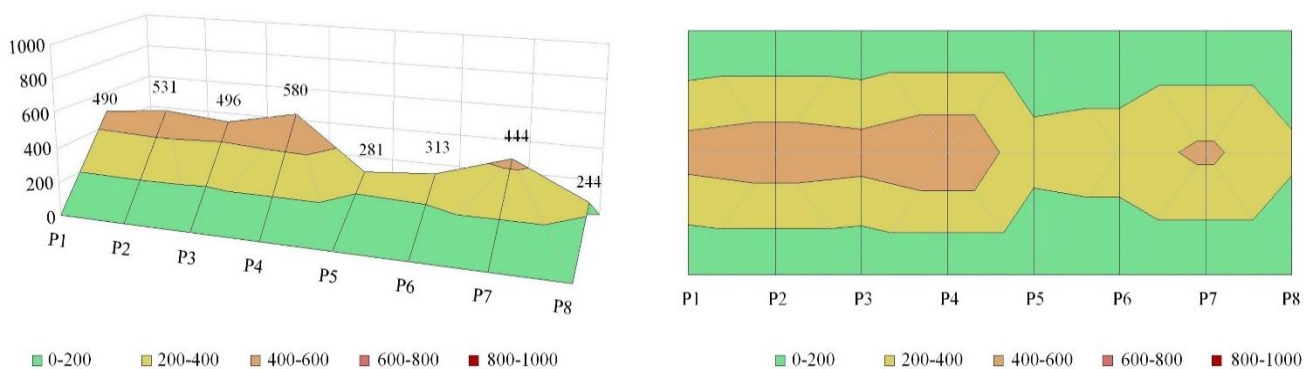
Najveći rizik izračunat je na slabom mestu P4 – obrtna platforma bagera. Krajnja ocena rizika je 3.32. Raspodela pripadnosti ocenama je takva da dominira ocena 'A' („veoma visok rizik“) sa 28.5%, potom sledi ocena 'B' („visok rizik“) sa 22.7%. Ocena 'C' („prosečan rizik“) sadržana je sa 17.1%, dok su ocene 'D' („nizak rizik“) i 'E' („veoma nizak rizik“) najniže sa 15.8% odnosno 15.9%. RPN_{FMECA} rezultat ovog slabog mesta je 580, RPN_{FMEA} je 72.9, dok je vrednost u skladu sa matricom rizika 14.91.

Na drugoj poziciji prema visini rizika je slabo mesto P2 – glava rotornog točka. Krajnja ocena rizika u ovom slučaju je 3.12. Raspodela ocena je slična. U ovom slučaju dominira ocena 'B' („visok rizik“) sa 25.1%, sledi ocena 'D' („nizak rizik“) sa 23.0%, pa ocena 'A' („veoma visok rizik“) sa 20.7%. Vrednosti 'C' i 'E' imaju 15.6% odnosno 15.5%. RPN_{FMECA} ocena je 531, RPN_{FMEA} je 66.8, dok je rezultat ocene prema matrici rizika 13.74.

Slede dva slaba mesta sa približno sličnim rezultatima P3 – oslonci na A stubu i P1 – užetnjača na stubu. Rezultati za ova dva slaba mesta su 2.98 odnosno 2.96. Rezultati RPN_{FMECA} su 496 i 490, RPN_{FMEA} su 62.4 i 61.7, dok rezultati 12.89 i 12.75 u skladu sa matricom. Raspodela ocena kod ova dva mesta je slična. Dominantna je vrednost 'C' („prosečan rizik“). Srednji nivo rizika sa ocenom 2.77 je lociran i za P7 – lamele strele radnog. Preostale vrednosti rezultata su: $RPN_{FMECA} = 444$, $RPN_{FMEA} = 55.9$ i 11.63 za matricu rizika.

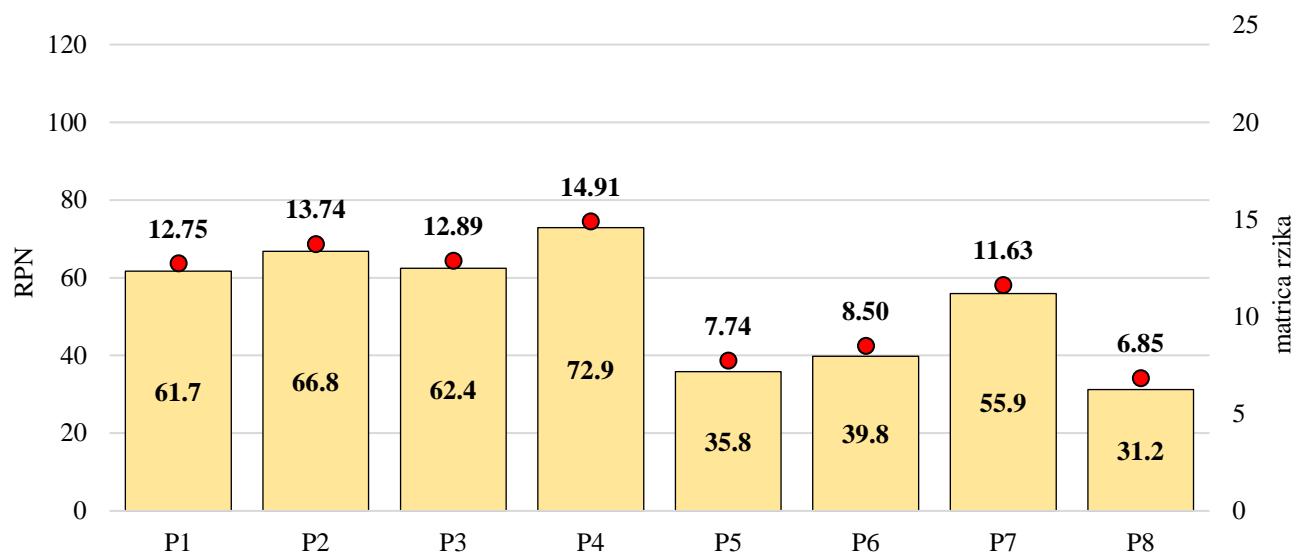
Nizak nivo rizika lociran je kod slabih mesta P6 – čelično uže za dizanje i spuštanje strele radnog točka, P5 – kočioni uređaj pogona dizanja i spuštanja strele radnog točka, i P8 – oslona tačka gornje gradnje na gusenični uređaj. Vrednosti su respektivno 2.25; 2.12; 1.97. Dominantne su ocene 'E' u sva tri slučaja. Vrednosti rizika u odnosu na RPN_{FMECA} za ova tri mesta su: 313; 281; 244. Prema skali RPN_{FMEA} ocene su: 39.8; 35.8; 31.2. U odnosu na matricu rizika rezultati su: 8.50; 7.44; i 6.85. Može se uočiti da je najniža vrednost rizika kod P8 gde je raspodela ocene: 'A' („veoma visok rizik“) sa 9.8% koliko imaju 'B' i 'C' ocene, 'D' – nizak rizik 9.1% i ocena 'E' („veoma nizak rizik“) sa 61.4%.

Raspodela rezultata u odnosu na RPN_{FMECA} vrednovanje (1-1000) prikazano ja u trodimenzionalnom obliku sa svim slabim mestima na slici 7.2. Može se uočiti da nivo rizika ni kod jednog slabog mesta nije u kritičnoj zoni koja bi ukazala na hitnu reakciju. Kod pet slabih mesta je u trećoj zoni na osnovu čega se na takva mesta treba obratiti posebna pažnja. Preostala tri slaba mesta su u drugoj zoni rizika.



Slika 7.2. Prikaz rezultata slabih mesta u skladu sa RPN_{FMECA} skalom

Na slici 7.3 dat je kombinovani prikaz rezultata interpretiranih kroz RPN_{FMEA} skalu (1-125) i vrednosti iz matrice rizika (1-25). Grafikon je prikazan sa primarnom i sekundarnom skalom i sadrži stubasto i tačkasto interpretiranje rezultata. Na apscisi dijagrama su obeležena sva slaba mesta analize. Na levoj ordinati su vrednosti RPN_{FMEA} parametara, pri čemu su stubastim dijagramom označene vrednosti svakog slabog mesta. Na desnoj ordinati su vrednosti matrice, dok su konkretne vrednosti za slaba mesta označene tačkastom raspodelom.



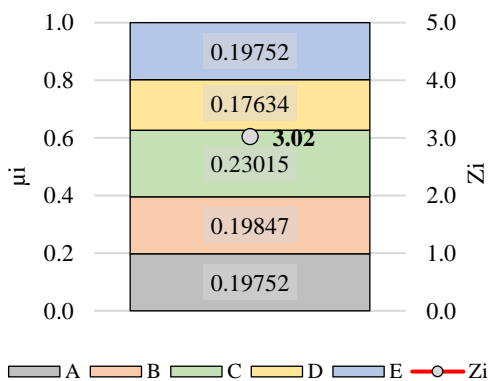
Slika 7.3. Prikaz rezultata slabih mesta u skladu sa RPN_{FMEA} skalom i vrednostima matrice rizika

Model procene rizika po prekid proizvodnog procesa rotornog bagera

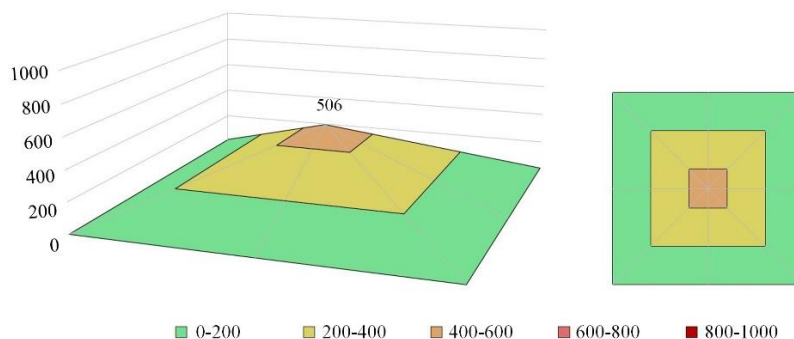
Kod drugog modela procena rizika je izvršena na nivou čitavog bagera. Na osnovu dostupnih podataka o radu, nije bila moguća analiza slabih mesta. S obzirom na veliku kompleksnost rotornog bagera, tačnost podataka za slaba mesta bila bi upitna, pa samim tim i preciznost modela. Prekidom proizvodnog procesa rotorni bager stvara velike indirektno troškove bez obzira na konkretan uzrok, pa sledi da je sveobuhvatna procena rizika na nivou čitavog bagera smislen vid analize radi uočavanja trenutnog stanja i preostalih mogućnosti mašine.

U sprovedenoj analizi korišćeni su podaci o radu i zastoju bagera SRs2000 na osnovu čega su formirane vrednosti za dva parcijalna indikatora (A) i (T). Treći parcijalni indikator (D) koristi ekspertske vrednovanje. Rezultati su prikazani kroz defazifikovanu vrednost, raspodelu na nivoe rizika ('A', ..., 'E'), vrednosti u skladu sa skalama RPN_{FMECA} i RPN_{FMEA} , odnosno matrice rizika.

Primenom ovog modela izračunata vrednost rizika je 3.02. Kod raspodele pripadnosti ocenama najveću vrednost sa 23.02% ima ocena 'C' („prosečan rizik“), potom slede ocena B' („visok rizik“) sa 19.85%, ocena 'A' („veoma visok rizik“) i 'E' („veoma nizak rizik“) sa 19.75%, dok najmanju vrednost 17.63% ima ocena 'D' („nizak rizik“). Grafički prikaz rezultata dat je na slici 7.4. Dobijene vrednosti rizika iskazuju se i prema ostalim skalama. Sledi da je RPN_{FMECA} rezultat 506, RPN_{FMEA} 63.7, dok je vrednost u skladu sa matricom rizika 13.13. Rezultat RPN_{FMECA} prikazan je i grafički na slici 7.5.



Slika 7.4. Prikaz rezultata rizika po prekid proizvodnog procesa



Slika 7.5. Prikaz rezultata rizika po prekid proizvodnog procesa u skladu sa RPN_{FMECA} skalom

Na osnovu analize rezultata u oba modela, uočava se da su ostvareni doprinosi:

- Fazi model za izračunavanje rizika kompenzuje subjektivnost ekspertskeg tima;
- Rezultati se mogu iskazati na različite načine, u skladu sa različitim skalama i mogu sadržati lingvističke opise;
- RPN skale su kontinualne. Prikazom vrednosti na RPN_{FMECA} i RPN_{FMEA} skale, ishodi mogu imati sve vrednosti iz opsega 1-1000 ili 1-125;
- Vrednovanjem značajnosti parcijalnih indikatora, težište rezultata se pomera;
- Bez obzira na tip ulaznih podataka, ishodi se ne mogu predvideti;
- Osetljivost modela na ulazne podatke je redukovana.

7.2 Analiza disperzije rezultata

U različitim oblastima analiza rizika, kompoziciju modela najčešće su činile aplikativne metode MAX-MIN i MIN-MAX [65], [97], [134], [137]. Kod fenomena kao što je rizik prednost se davala MIN-MAX kompoziciji [50], [138]. Sa ciljem smanjenja rasipanja, u prezentovanom modelu je u kompoziciji fazi modela implementirana TOPSIS metoda. Kako bi se uočila razlika u rasipanju, urađena je komparativna analiza. Pored postojećeg modela sa TOPSIS kompozicijom (M1) formirana su još dva modela sa MAX-MIN kompozicijom (M2) i MIN-MAX kompozicijom (M3). Ulazni podaci za obe analize isti su kod sva tri modela (M1, M2, M3). Metode fazi propozicije, fazifikacije, identifikacije i defazifikacije su iste. Jedina razlika je u kompozicijama. Matematički postupak fazi kompozicija za M2 i M3 ukratko je objašnjen u nastavku na prvoj razmatranoj formi rizika.

Ulazni podaci za kompozicije dobijaju se iz fazifikacije. U osnovi fazi MIN-MAX i MAX-MIN kompozicije imaju oblik:

$$R_i = \max \{ \min(O_i, S_i, D_i) \} \quad 7.1$$

$$R_i = \min \{ \max(O_i, S_i, D_i) \} \quad 7.2$$

Fazi brojevi parcijalnih indikatora O, S, D su definisani funkcijama pripadnosti μ i klasama $j = 1, \dots, n$.

$$\begin{aligned} O_i &= (\mu_{O(1)}, \dots, \mu_{O(j)}, \dots, \mu_{O(n)}); \\ S_i &= (\mu_{S(1)}, \dots, \mu_{S(j)}, \dots, \mu_{S(n)}); \\ D_i &= (\mu_{D(1)}, \dots, \mu_{D(j)}, \dots, \mu_{D(n)}); \end{aligned} \quad 7.3$$

Broj mogućih kombinacija u funkciji je broja ocena na j -skali i broja parcijalnih indikatora $C = n^3$ [35], [65]. Sledi da će za obe metode biti po 1000 mogućih kombinacija koje imaju oblik:

$$A_c = [\mu_{O(j=1, \dots, n)}, \mu_{S(j=1, \dots, n)}, \mu_{D(j=1, \dots, n)}] \quad 7.4$$

gde je $c = 1$ do C .

Uzevši u obzir samo kombinacije ishoda različite od nule $\mu_{O, S, D(j=1, \dots, n)} \neq 0$ broj potencijalnih ishoda se smanjuje ($c = 1$ do 0 , gde je $0 \leq C$). Za svaku kombinaciju ishoda koja zadovoljava uslov, računa se vrednost J_c i zaokružuje na ceo broj primenom izraza (7.5) [65].

$$J_c = \left[(W_{O_i} \cdot j_{(\mu_{O})c}) + (W_{S_i} \cdot j_{(\mu_{S})c}) + (W_{D_i} \cdot j_{(\mu_{D})c}) \right] \quad 7.5$$

gde je: W_i težinski koeficijent iz AHP metode; j_c je klasa kojoj pripada odgovarajući fazi broj za posmatranu funkciju pripadnosti i datu kombinaciju c ($j_c = 1, \dots, n$) [65].

Za svaki ishod se kod MIN-MAX kompozicije bira minimalna vrednost među μ_O, μ_S, μ_D , iz oblika A_c jednačine (7.4) [65]. Postupak je definisan izrazom (7.6). Nasuprot je MAX-MIN kompozicija gde se iz istog oblika bira maksimalna vrednost, što je prikazano izrazom (7.7).

$$MN_o = \min \{ \mu_{O(j)o}, \mu_{S(j)o}, \mu_{D(j)o} \} \quad 7.6$$

$$MN_o = \max \{ \mu_{O(j)o}, \mu_{S(j)o}, \mu_{D(j)o} \} \quad 7.7$$

za svako $o = 1$ do O .

Dobijeni ishodi u oba slučaja se grupišu u skladu sa dobijenim vrednostima (J_c), gde je broj grupa od 0 do n [65]. Iz svake grupe ishoda (izrazi 7.6 i 7.7), u prvom modelu se definiše maksimalna (MX) vrednost primenom izraza (7.8), dok se u drugom modelu definiše minimalna (MN) vrednost izrazom (7.9).

$$MX_j = \max \{ MN_1, \dots, MN_0, \dots, MN_O \}_{J_c} \quad 7.8$$

$$MN_j = \min \{ MN_1, \dots, MN_0, \dots, MN_O \}_{J_c} \quad 7.9$$

za svako $j = 0$.

Krajnji oblici nakon postupka fazi MIN-MAX i MAX-MIN kompozicije imaju oblik koji je u skladu sa izrazima (5.1) i (7.1):

$$R_{M2} = (MX_{j=1}, \dots, MX_{j=n}) = (\mu_{RM2(1)}, \dots, \mu_{RM2(j)}, \dots, \mu_{RM2(n)}) \quad 7.10$$

$$R_{M3} = (MN_{j=1}, \dots, MN_{j=n}) = (\mu_{RM3(1)}, \dots, \mu_{RM3(j)}, \dots, \mu_{RM3(n)})$$

Na osnovu definisanog postupka, isti ulazni podaci korišćeni su za sva tri modela. U prvom delu analiziraju se rezultati rizika po strukturnu stabilnost rotornog bagera, dok će u drugom delu biti analizirani rezultati rizika po prekid proizvodnog procesa. S obzirom na kompleksnost proračuna, u oba slučaja će biti samo prikazani krajnji rezultati. Rezultati sadrže krajnju defazifikovanu vrednost rizika i vrednost disperzije tj. standardne devijacije. Akcenat u analizi nije u postignutim rezultatima već u meri disperzije oko rezultata.

U tabeli 7.1 prikazani su rezultati sva tri modela za procenu rizika po strukturnu stabilnost rotornog bagera. Analiza je sprovedena za sva definisana slaba mesta (P1-P8) rotornog bagera. U poslednjem redu tabele označene su metode kod kojih je disperzija najmanje za razmatrano slabo mesto.

Tabela 7.1. Rezultati primene modela sa tri različite kompozicije za prvu analizu

		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
M1	Z_n	2.958	3.124	2.981	3.319	2.123	2.251	2.772	1.974
	S_n	0.02387	0.04328	0.02268	0.05503	0.19762	0.16676	0.03978	0.23138
M2	Z_n	3.045	3.068	3.174	3.326	2.330	2.569	2.780	2.024
	S_n	0.04198	0.04007	0.03418	0.06580	0.14224	0.08321	0.04104	0.23411
M3	Z_n	3.075	3.027	3.182	3.245	2.438	2.650	2.757	2.050
	S_n	0.05939	0.09366	0.07216	0.05670	0.11814	0.06413	0.07981	0.20980
<i>najmanje rasipanje:</i>		M1	M2	M1	M1	M3	M3	M1	M3

U poređenju M1 sa M2 kod 5 slučajeva slabih mesta (P1, P3, P4, P7, P8) je manje rasipanje kod inovativnog modela sa TOPSIS metodom u fazi kompozicijom. Kod 3 slaba mesta (P2, P5, P6) je manje rasipanje kod druge metode sa MIN-MAX fazi kompozicijom. Pri poređenju M1 sa M3 takođe je u 5 slučajeva slabih mesta (P1-P4, P7) manje rasipanje kod M1, u preostala 3 slučaja (P5, P6, P8) je manje rasipanje kod M3.

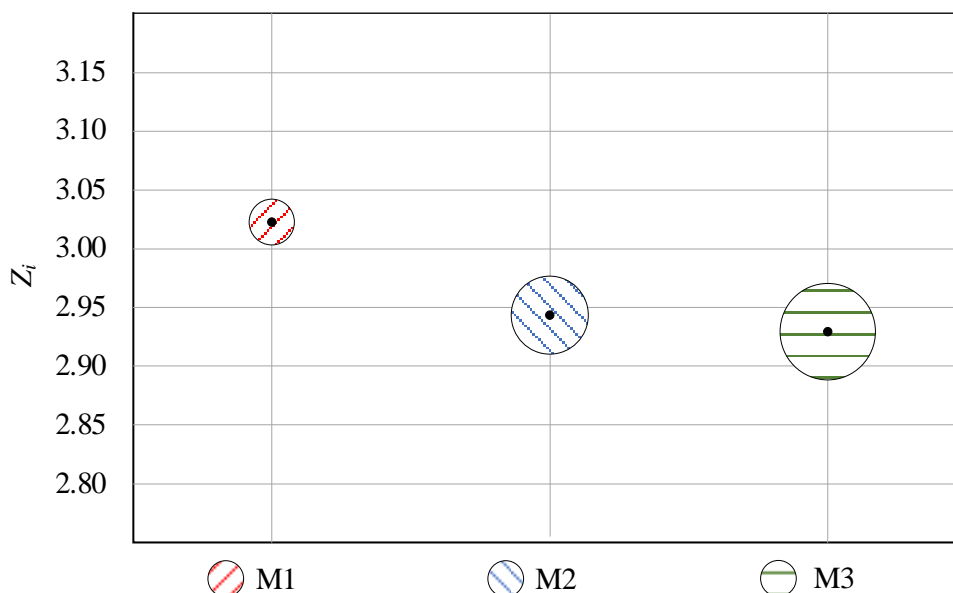
Ukupno poređenje sve tri metode ukazuje da je kod 4 slaba mesta najmanje rasipanje metode M1. U tri slučaja je najmanje rasipanje kod metode M3 dok je kod jednog slabog mesta najmanje rasipanje primenom metode M2.

U tabeli 7.2 prikazani su rezultati sva tri modela za procenu rizika po prekid proizvodnog procesa rotornog bagera. U poslednjoj koloni tabele označena je metoda kod kojih je disperzija najmanje.

Tabela 7.2. Rezultati primene modela sa tri različite kompozicije za drugu analizu

	M1	M2	M3	Najmanje rasipanje
Z_n	3.022	2.943	2.929	
S_n	0.01926	0.03110	0.03893	M1

Uvidom u tabelu, može se uočiti da je disperzija najmanja kod inovativnog sinteznog modela predstavljenog u disertaciji. Poređenjem M1 sa M2 disperzija je manja za 38.1%, dok je poređenjem M1 sa M3 manja za 50.5%. Grafički prikaz rezultata i mere rasipanja dat je na slici 7.6. Poluprečnik svake kružnice oko rezultata ukazuje na meru rasipanja.



Slika 7.6. Grafički prikaz disperzije rezultata za rizik po prekid proizvodnog procesa

Na osnovu analize disperzije u oba modela, uočava se da su ostvareni doprinosi:

- Inovativni model predstavljen u disertaciji ima manju disperziju od najčešće primenjenih drugih modela;
- Preciznost inovativnog modela je veća.

7.3 Unapređenja postojećih sistema održavanja

Različiti autori (poglavlje 2.4) definisali su i predlagali primenu strategije održavanja prema riziku u oblastima industrije, saobraćaja, tehnike i sl. Strategiju održavanja prema riziku, nije jednostavno implementirati i sprovesti u velikim kompanijama i kod kompleksnih tehničkih sistema.

Prostor za unapređenje održavanja razmatranog rotornog bagera, ogleda se kroz promene „lokalnog“ karaktera. Strategija održavanja rotornih bagera treba da zadrži osnovne principe i smernice. Na osnovu rezultata procene rizika, mogu se formirati poboljšanja u konceptijskom i/ili organizacionom segmentu. Tehnologija postupaka održavanja (popravke i servisiranja) ovakvih mašina opšte je poznata i promene nisu potrebne.

Sprovedenim analizama u studiji slučaja, posmatrajući rizik po strukturnu stabilnost i rizik po prekid proizvodnog procesa rotornog bagera, stvaraju se višestruke prednosti (benefiti). Prvom analizom rizika, osnovni benefit ogleda se u prevenciji događaja sa neželjenim efektima i havarija. Na taj način se obezbeđuje zaštita života i zdravlja ljudi, povećava bezbednost opreme, smanjuju se direktni i indirektni troškovi, i sl. Drugom analizom rizika se uočava trenutno stanje i mogu se predvideti preostale mogućnosti rotornog bagera. Prevencijom ozbiljnijih kvarova i smanjenjem intenziteta manjih zastoja, povećava se raspoloživost bagera, stvaraju se uštede vremena i resursa, pa samim tim se smanjuju i troškovi.

Na osnovu prve analize, održavanje je usmereno ka slabim mestima. U nastavku je za svako slabo mesto koje je analizirano u radu dat kratak konstruktivni opis. Definisane su prednosti ili nedostaci takvog konstruktivnog rešenja ukoliko ih ima. Označen je nivo rizika koji ukazuje na „rangiranje“ odnosno definisanje prioriteta u aktivnostima održavanja. Date su preporuke o budućim dijagnostičkim aktivnostima i aktivnostima preventivnog održavanja prema stanju. Na taj način se u odnosu na nivo rizika koriguje servisna lista što je posebno izraženo za mašine starije od 20 godina.

Slabo mesto P1 – užetnjača na A stubu. Nalazi se na vrhu A stuba. Ima ulogu da usmerava užad preko koji se vrši podizanje i spuštanje strele rotornog točka. Izrađuju se od čelika procesima koji uključuju savijanje i zavarivanje. Dizajn i tehnička rešenja kao i kvalitet izrade imaju ključnu ulogu. Problemi mogu nastati i usled pohabanosti žlebova. Ako se ošteti ili se početne pukotine ne uoče na vreme, kretanjem užadi preko oštećenja može doći do kidanja i u takvim okolnostima je ugrožena stabilnost bagera. Treba naglasiti i da je pristupačnost ljudstva radi provere otežana. Prema analizi iz studije slučaja ovo slabo mesto nalazi se na četvrtom mestu sa vrednošću rizika koja se ne treba zanemariti. Provere trebaju biti vremenski definisane. Trenutni postupci provere su na svakih 6 meseci. Preporuka je da se period smanji na 3 meseca. Pri svakom velikom servisu ili bilo kakvom dužem prekidu rada mašine treba ispitati stepen pohabanosti i da li ima oštećenja na užetnjači. Opažanja su uglavnom usmerena na vizuelnu kontrolu. U slučaju uočavanja promena može se sprovesti analiza primenom penetrantske i magnetne metode, u zavisnosti od pristupačnosti uočenog mesta.

Slabo mesto P2 – glava rotornog točka. Pogon kopanja preko sistema vratila i ostalih konstruktivnih elemenata ostvaruje okretanje rotornog točka i proces kopanja. Opterećenje je promenljivo i u funkciji kapaciteta i materijala koji se otkopava. Dinamička opterećenja su izražena. U istoriji rada ovih mašina dolazilo je do: loma osovine rotornog točka, havarije na sklopu male membrane, podužnih pukotina na šupljem vratilu, oštećenja oslonaca i loma više zavrtnejeva na membrani. Ovi problemi ugrožavali su strukturnu stabilnost bagera. Trenutna vizuelna kontrola se sprovodi na periodu od 6 meseci. Akcenat treba staviti na redovno i detaljno popunjavanje servisnih listi. Period između dve kontrole po potrebi treba smanjiti na 3 meseca. Detaljnu kontrolu u slučaju potrebe treba sprovesti pomoću ultrazvučne metode (kod osovine i šupljeg vratila), a u nekim slučajevima i penetratskom i magnetnom metodom u zavisnosti od pristupačnosti mesta koje se kontroliše. Na samom pogonu treba vršiti provere merenjem vibracija u radnom režimu.

Slabo mesto P3 – oslonci na A stubu. Centralni deo bagera predstavlja A stub. Izrađen je od čelične konstrukcije punih zidova. Donjim delom se oslanja na obrtnu platformu. Na gornjem kraju je sa jedne strane veza sa lamelama koje predstavljaju sponu do strele rotornog točka, dok je sa druge strane preko užetnjača i užadi povezana sa strelom protivtega. U donjem delu na mestu veze sa obrtnom platformom dolazilo je do zadržavanja vode nakon padavina i sl. Zadržavanje vode izaziva koroziju a u zimskim periodima može da se zaledi i ugrozi bager. Problem je konstruktivne prirode, greška projektovanja i izrade, ali je iz tog razloga došlo do havarije i totalnog urušavanja stabilnosti (pada) bagera. Došlo je do pucanja stuba kod oslonca. Analiza sprovedena u studiji slučaja ukazuje da je ovo slabo mesto rangirano kao treće sa aspekta rizika. Izračunata je vrednost koja se ne treba zanemariti. Tome u prilog ide i činjenica da je ukupan broj bagera ovog tipa u svetu preko 50. Konkretan problem se rešava redizajnom,

odnosno bušenjem otvora kojim će se ukloniti nagomilane količine vode. S obzirom da je A stub centralni deo za obe strele bagera veze i stanje čelične konstrukcije se moraju stalno pratiti. Ispitivanja se sprovede uglavnom vizuelno. Kada se problem zadržavanja vode reši, preostaju potencijalni problemi uzrokovani statičkim naprezanjima. U slučaju da ovo mesto nije predmet redovnih evidencija u servisnim listama, treba ga dodati i proveravati u vremenskom intervalu od 3 do 6 meseci.

Slabo mesto P4 – obrtna platforma. Predstavlja centralni noseći deo rotornog bagera. Izrađena je od čelične konstrukcije. Na obrtnu platformu se sa jedne strane oslanja strela rotornog točka a sa druge strela protivtega. Centralni stub bagera je takođe oslonjen. Ima ulogu da nosi strelu rotornog točka i protivtega, centralni stub i sopstvenu masu. Sve mase prenosi dalje na donju gradnju i transportni uređaj. Izložena je statičkim opterećenjima ali i dinamičkim u toku rada. S obzirom da je u poređenju sa ostalim slabim mestima, vrednost rizika najveća potrebno je obratiti pažnju kroz monitoring i održavanje. Provera stanja čelične konstrukcije vrši se sa aspekta deformacija, prslina ili drugih oštećenja. Kod bagera koji su stariji od 20 godina, osnovne provere vizuelizacijom trebaju biti na nedeljnom ili mesečnom nivou. Pogodnost za praćenje ovog slabog mesta je jednostavna pristupačnost. Povremene dijagnostičke provere trebaju biti vremenski definisane na tromesečnom ili šestomesečnom nivou. Tada se mogu koristiti metoda kao što su: akustična ispitivanja, primena termalne kamere, tenziometrijska ispitivanja i sl.

Slabo mesto P5 – kočioni uređaj pogona dizanja i spuštanja strele rotornog točka. Pozicioniran je na strelu protivtega. Deluje na vratilo bubnja za namotavanje čeličnih užadi za potrebe podizanja ili spuštanja strele rotornog točka. Na oba pogona nalazi se po jedna kočnica. Uloga je da preko vratila na bubnju zadrži potreban položaj strele. U slučaju da kočnica nije ispravna ili „popusti“, strela i rotorni točak će se osloniti ili pasti na radnu etažu. Time bi se izgubila uravnoteženost strele rotornog točka i strele protivtega. To može izazvati urušavanje dela konstrukcije ili čitavog bagera. Na osnovu analize sprovedene u studiji slučaja, vrednost rizika je u grupi manjih rizika. Razlog je prvenstveno što je prisutan paralelni sistem. Popuštanjem jedne kočnice, druga će ostaviti mogućnost da se reaguje pre nego što dođe do havarije. Opažanje i dijagnostikovanje sprovodi se vizuelno. S obzirom da je lociran niži nivo rizika, vizuelne provere mogu biti na šestomesečnom nivou.

Slabo mesto P6 – čelično uže za dizanje i spuštanje strele rotornog točka. Povezuje strelu protivtega preko bubnja za namotavanje sa užetnjačama na A stubu. Preko čeličnih užadi se ostvaruje proces podizanja i spuštanja strele rotornog točka. Kod bagera SRs2000 postoje 2 užeta (2×700 m). Narušavanje integriteta čeličnog užeta može biti izazvano zamorom materijala, mehaničkom preprekom na užetnjači ili bubnju i sl. Sistem je takođe paralelno organizovan kao i kod kočnice, tako da bi u slučaju problema sa jednim užetom, drugo će zadržati položaj strele za potrebno vreme delovanja u cilju sprečavanja havarije. Dakle, u takvim okolnostima drugo uže mora da preuzme kompletno opterećenje bagera. Vrednost rizika koji je izračunat u studiji slučaja je u grupi nižih. Vizuelna kontrola se sprovodi na mesečnom nivou, dok se dijagnostičkom magnetnom metodom ispitivanje treba sprovoditi na tromesečnom ili šestomesečnom nivou.

Slabo mesto P7 – lamele strele rotornog točka. Veza strele rotornog točka sa centralnim A stubom ostvaruje se preko lamele. Izrađena je u kutijastom preseku što daje dobru prostornu čvrstoću. Radom bagera lamela je izložena dinamičkim opterećenjima. Statičko opterećenje je konstantno prisutno. Pojavom prslina može biti ugrožena strukturna stabilnost bagera. Mesta posebnog opterećenja javljaju se na uškama koje su veza lamele sa strelom rotornog točka i veza lamele sa centralnim A stubom. Vrednost rizika koja je izračunata u studiji slučaja je u grupu umerenog ka visokim sa rangiranjem na petom mestu. Prisutna je jedna lamela (sistem nije paralelan) pa se mesto kao slabo i u procesima održavanja ne sme zanemariti u procesima održavanja i preventivnom delovanju. Osnovna kontrola je vizuelnog tipa. U slučaju da je mašina starija od 20 godina, periodično treba izvršiti proveru tenziometrijskom i penetrantskom metodom dijagnostikovanja. Servisne liste se moraju redovno evidentirati, a provere treba vremenski definisati na svakih 6 meseci.

Slabo mesto P8 – oslone tačke gornje gradnje bagera na gusenični transportni uređaj. Ukupno opterećenje koje se prenosi sa obrtno platforme preko tri oslone tačke se prenosi na gusenični transportni uređaj odnosno podlogu. Oslonci su izvedeni zglobno u obliku kalote. Tri oslone tačke sa aspekta stabilnosti nisu u paralelnom sistemu po pitanju rizika. Veće oštećenje jedne oslone tačke može poremetiti balans bagera. Na osnovu analize iz studije slučaja ovo slabo mesto ima najniži rizik. Detekcija je jednostavna i pristupačna, oštećenja jednog oslonca će poremetiti balans ali neće ugroziti strukturnu stabilnost bagera. Verovatnoća pojavljivanja je mala. S obzirom da je jednostavan pristup razmatranom mestu i da je izračunat nizak nivo rizika, kontrole treba sprovoditi vizuelnim opažanjem na svakih 3 ili 6 meseci. Ipak, u slučaju da je mašina starija od 20 godina kontrole trebaju biti u kraćem vremenskom intervalu.

Model procene rizika po prekid proizvodnog procesa, ukazao je na trenutno stanje rotornog bagera. Pored toga, ima i indirektan prediktivan karakter kroz procenu preostalih mogućnosti bagera. Rezultati analize pokazali su da se nivo rizika po prekid proizvodnog procesa ne sme zanemariti. Treba naglasiti i da se svakim satom zastoja ovog bagera, u trenutnim uslovima rada na RB Kolubara (Tamnava Zapadno polje), stvaraju indirektni troškovi od oko 6000 €. Unapređenje strategije održavanja treba usmeriti ka doslednijoj primeni „preventivnog održavanja prema stanju“. Ovakav pristup nalaže primenu savremenog monitoringa i dijagnostike, što pomaže u prediktivnom definisanja stanja. Neophodne su i organizacione promene. U cilju blagovremenog sprovođenja analiza, prikupljanje informacija o stanju sistema treba biti intenzivnije i bolje strukturno organizovano. Na taj način se povećavaju šanse da se izbegne veliki zastoj i skрати vreme intervencije usled zastoja. Rezultat je veća raspoloživost sistema, odnosno niži indirektni troškovi.

Kvalitetnijim i studioznim prikupljanjem podataka, koji su pri tome ciljno definisani, mogla bi se izvršiti detaljnija analiza rizika. Rezultati bi ukazali na slaba mesta kod kojih je moguće sprovesti intenzivnije održavanje i stalni monitoring. Visok rizik slabog mesta ukazuje da podrška održavanju treba biti na visokom nivou. Rezervni delovi i drugi potrošni materijali moraju biti dostupni, radnici obučeni, obezbeđen specijalizovan alat, instrumenti i priručnici i dr. Kod velikih pogona, u slučaju visokog rizika treba uvesti sistem agregatne zamene. To podrazumeva zamenu pogona koji je u kvaru, rezervnim. Intervencija se izvršava na licu mesta. Time se skraćuje vreme za intervenciju, a pokvareni pogon se u radioničkim uslovima kvalitetnije priprema za kasniju upotrebu.

Na osnovu analize rezultata u oba modela, uočava se da su ostvareni doprinosi:

- Usklađivanje koncepcije održavanja prema riziku – prediktivno održavanje prema stanju;
- Usklađivanje organizacije održavanja prema koncepciji;
- Definisane redosleda prioriteta u aktivnostima održavanja na osnovu rangiranja slabih mesta;
- Korigovanje servisnih listi za mašine starije od 20 godina prema vrednostima rizika slabih mesta.

8. APLIKATIVNI I VIZUELNI PRIKAZ MODEL

Model procene rizika predstavljen kroz studiju slučaja, dizajniran je i u aplikativnom i vizuelnom obliku. U te svrhe korišćen je *Python* programski jezik i *Streamlit* softverski okvir, koji su otvorenog korisničkog pristupa. Metodologija povezana sa sinteznim modelom upravljanja rizikom kao i neophodne operacije razlaganja, transformacije i očitavanja (engl. *extract transform load* - ETL), sadržani su u jedinstvenoj datoteci pod nazivom *Risk_evaluation.py* koja predstavlja pozadinu aplikacije. Datoteka sa celokupnim kodom prikazana je u prilogu broj 4.

Dizajn datoteke sačinjen je iz funkcija koje predstavljaju specifične metode. Proračun je definisan na višestepeni i generički način. I pored toga što je inovativni sintezni model procene rizika sadržan od eksplicitno definisanih parametara odnosno parcijalnih indikatora, ovakav dizajn koda omogućuje korišćenje promenljivih veličina ulaznih matrica. Dakle, mogao bi da koristi različit broj parcijalnih indikatora na ulazu.

Aplikativna forma je dizajnirana tako da obezbeđuje proračun rizika sadržan u Modulu 2 i 3 sinteznog modela. Dakle, za upotrebu aplikativnog oblika korisnik je dužan da izvrši pripremu podataka definisanu Modulom 1. Korisnik mora da obezbedi dva .csv dokumenta za uvoz. Sa uvozom dva dokumenta završava se interakcija sa korisnikom i rezultati se automatski generišu. Podaci u .csv dokumentima treba da sadrže izračunate prosečne ekspertske ocene ili rezultate prethodne statističke obrade. Prvi dokument je AHP ulazna matrica oblika prikazanog u tabeli 8.1, dok je drugi dokument srednja ocena ekspertskog vrednovanja rizika prema lingvističkom opisu prikazana u tabeli 8.2.

Tabela 8.1. Izgled prvog ulaznog csv dokumenta sa postavkom AHP matrice kao prvi ulazni dokument

O	S	D
1.000	0.498	0.500
2.008	1.000	1.500
2.000	0.667	1.000

Tabela 8.2. Izgled drugog ulaznog csv dokumenta sa prosečnim ekspertskim ocenama ili obrađenim podacima

A	B	C	D	E
0	0	0.25	0.70	0.05
0	0.54	0.46	0	0
0	0.34	0.66	0	0

Datoteka *Risk_evaluation.py* sadrži 11 funkcija koje izvršavaju proračun na osnovu podataka definisanih u dokumentima koji se uvoze. Naslov svake od funkcija usklađen je sa postupkom koji izvršavaju, dok tekst u zagradi ukazuje na podatke koje funkcija koristi kao svoj uvoz iz prethodnog dela dataoteke. U tabeli 8.3 je dat pregled svih funkcija i njihovih uloga u modelu. Tabela sadrži oznake ulaznog podatka koji funkcija koristi, kao i oznake podataka koji izlaze kao rezultat procesa definisanog u funkciji.

Tabela 8.3. Pregled funkcija sadržanih u datoteci *Risk_evaluation.py*

Funkcija	Opis	Oznaka ulaznog podatka	Oznaka izlaznog podatka
def input_data(file_name):	Učitava .csv dokumente kao ulazne podatke za model	file_name*	result
def ahp_calculation(AHP_input):	Kalkulacija koeficijenata značajnosti AHP metodom	AHP_input	AHP_weight
def ahp_consistency_check(AHP_input):	Provera konzistentnosti eksperta u ocenjivanju iz AHP dokumenta ulaza	AHP_input	CR
def fuzzy_proposition():	Formira fazi skupove trapeznog oblika	/	fuzzy_s

Funkcija	Opis	Oznaka ulaznog podatka	Oznaka izlaznog podatka
def fuzzification(fuzzy_s, fuzzy_input):	Mapira vrednosti ulaznih podataka iz drugog uvoznog dokumenta na fazi trapezne fazi skupove	fuzzy_s fuzzy_input	fuzzy_propos
def composition_TOPSIS(fuzzy_propos, AHP_weight):	Kompozicija modela koja definiše ishode modela prema <i>j</i> -skali (1-10)	fuzzy_propos AHP_weight	R
def fuzzy_identification(R, fuzzy_s):	Identifikacija ishoda u cilju preslikavanja sa <i>j</i> -skale na vrednosti rizika 'A', ..., 'E'	R fuzzy_s	identification
def chart(identification):	Formira dijagram od rezultata prethodne funkcije identifikacije	identification	plt
def comments(identification):	Dodaje lingvističke opise svakom nivou rizika 'A', ..., 'E' iz funkcije identifikacije	identification	rslt
def defuzification(identification):	Sintezuje rezultate identifikacije u jednu numeričku vrednost	identification	results
def risk_values(identification):	Mapira rezultate na različite skale tradicionalnih metoda FMECA i FMEA kao i na matricu rizika	identification	present

*file name – ime koje je dodeljeno .csv dokumentu (prvi dokument – AHP_input; drugi dokument – fuzzy_input)

Rezultati svake funkcije generišu se dodeljivanjem vrednosti promenljivima. Na taj način je kroz aplikativni oblik moguće imati parcijalni uvid u postupke.

Vizuelizacija aplikativnog oblika i modela generalno urađena je korišćenjem *Streamlit* softverskog okvira. Korisnički interfejs se pokreće sa datoteke *Model_visualisation.py* koja predstavlja hibridni dokument. Sastoji se od komponenti uloge kontrolora (odgovornih za komunikaciju sa pozadinom) i *front-end* komponenti koje omogućavaju dinamičko generisanje korisničkog interfejsa. Hibridna datoteka u svom sadržaju poziva datoteku *Risk_evaluation.py* sa ciljem sprovođenja funkcija generisanih u njoj. Preostali sadržaj ima ulogu u vizuelizaciji aplikativne forme radi jednostavnije pristupačnosti korisniku. U prilogu broj 5 prikazana je datoteka sa kodom za formiranje vizuelnog izgleda modela.

Na slici 8.1 dat je vizuelni prikaz modela odnosno odeljka gde je potrebno uneti (engl. *Drag and drop*) .csv dokumenta. U donjem delu iste slike su prikazani i rezultati AHP metode odnosno koeficijenti značajnosti parcijalnih indikatora i provera konzistentnosti ekspertskog tima. Rezultati se odnose na podatke za prvo slabo mesto rizika po strukturnu stabilnost rotornog bagera.

Model za procenu rizika

Ulazni podaci

Ulazne ocene za rangiranje parcijalnih indikatora

Unesi AHP ulazni .csv dokument

Drag and drop file here
Limit 200MB per file

Browse files

AHP_in.csv 96,08

Ulazne ocene rizika za slaba mesta

Unesi Fuzzy ulazni .csv dokument

Drag and drop file here
Limit 200MB per file

Browse files

Fuzzy_input.csv 64,08

Rezultati težina parcijalnih indikatora

	W _i
O	0.1975
S	0.4557
D	0.3468

Provera konzistentnosti donosioca odluke AHP metode

Izračunata vrednosti Random Consistency Index (CR) je 0.01373

Konzistentnost je u dozvoljenim granicama (CR<0.1) !

Slika 8.1. Vizuelni prikaz odeljka za uvoz dokumenata i rezultati AHP metode sa proverom konzistentnosti

Na slici 8.2 dati je prikaz preostalih rezultata za prvo analizirano slabo mesto rizika po strukturnu stabilnost rotornog bagera. Slika sadrži rezultate postupka identifikacije sa grafičkim prikazom u skladu sa ocenama 'A', ..., 'E', rezultate defazifikacije, standardne devijacije i mapirane vrednosti na FMECA, FMEA metode i matricu rizika.

Rezultati sinteznog modela: distribucija nivoa rizika na ocene 'A',..., 'E'

	R(μ) - raspodela vrednosti rizika	linguistički opis
A	0.1973	Veoma visok rizik
B	0.1659	Visok rizik
C	0.2325	Umeren rizik
D	0.2066	Nizak rizik
E	0.1977	Veoma nizak rizik

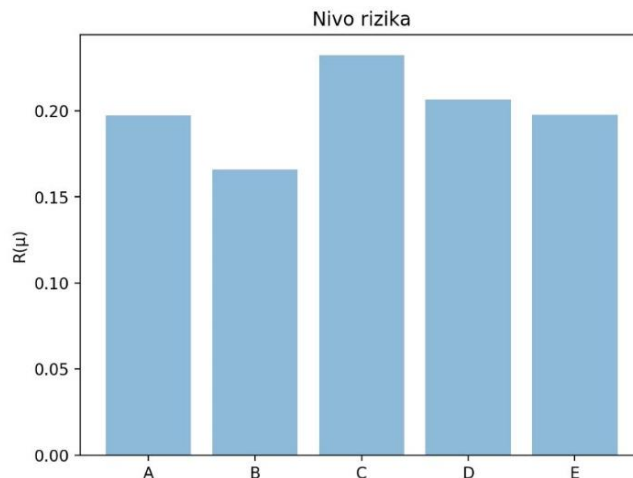
Vrednost rizika

	0
ZI - Vrednost rizika	2.9584
SI - Mera rasipanja	0.0239

Mapirane vrednosti na različite skale rizika

	0
RPN Fmeca	490.1206
RPN Fmea	61.7117
Risk matrix	12.7506

Grafički prikaz rezultata



Slika 8.2. Vizuelni prikaz rezultata za prvo slabo mesto analize rizika po strukturnu stabilnost bagera

9. ZAKLJUČAK

U disertaciji je definisan, urađen i verifikovan inovativni sintezni model upravljanja rizikom kod rotornih bagera. Istraživanje je orjentisano ka dva cilja:

- i. definisanje algoritma procene i analize rizika; i
- ii. unapređenje sistema održavanja kompleksnih tehničkih sistema kao što je rotorni bager.

Rizik kao fenomen, predstavljen je kao kompleksan pojam sa izraženom hibridnom strukturom. Elementi rizika predstavljaju: verovatnoću nastanka inicijalnog događaja, verovatnoću nastanka posledice i verovatnoću sprečavanja događaja i posledice. Tradicionalni modeli ocene rizika zasnivaju se na kumulativnom proizvodu navedenih verovatnoća, koje se prethodno ekspertske vrednuju. U disertaciji je pokazano da je ovakav pristup nefunkcionalan za složene tehničke sisteme. U ovakvim situacijama elementi rizika predstavljaju fenomene kod kojih dominira neodređenost, višeznačnost, neizvesnost i subjektivnost. U cilju propozicije elemenata rizika i njihove kompozicije korišćen je fazi ekspertske sistem kao domen veštačke inteligencije. Ekspertske sistem sadrži fazi model zaključivanja sa korekcijom ishoda preko AHP rangiranja.

U odnosu na tradicionalne modele ocene rizika, izloženi matematički i konceptijski fazi ekspertske model doprinosi smanjenju negativnih uticaja, izraženih kod tradicionalnog pristupa i ima sledeća svojstva:

- Postupak propozicije je višedimenzionalan. Nezavisno se definišu oblik, dispozicija i položaj fazi skupova i lingvističkih promenljivih koji definišu elemente rizika; rang elemenata rizika; i konačno samu ocenu elemenata rizika. Na ovaj način smanjena je subjektivnost kod parcijalnih ocena, smanjena je predvidljivost ishoda kompozicije ekspertske ocena. Ovo je posebno značajno za kompleksne tehničke sisteme gde su događaji uglavnom stohastičke prirode.
- Kompozicija (sinteza) parcijalnih pokazatelja rizika na nivo rizika izvedena je primenom TOPSIS preferencija kao deo fazi zaključivanja, odnosno kao fazi skrining koncept. Na ovaj način je povećana preciznost modela, a disperzija konačne ocene je svedena na najmanju moguću meru. Ovo je posebno značajno za fenomene kao što je rizik.

Stvaranjem funkcionalnog modela ocene rizika dobijena je mogućnost analize rotornog bagera, posmatrajući ga kroz dve forme rizika. U prvom slučaju analiziran je rizik od havarije, dok je drugi slučaj koncipiran tako da se analizira rizik od pojave neplaniranih zastoja. Narušavanje strukturne stabilnosti (havarija) bagera može da: ugrozi bezbednost, zdravlje i život ljudi; ugrozi bezbednost opreme; stvori velike troškove i sl. Zastoj bagera dovodi do zastoja čitavog BTO ili BTD sistema. Veličina direktnih i indirektnih troškova koji se tada javljaju su u funkciji trajanja zastoja. Upravo zbog toga je model formiran za rotorne bagere i za pomenuta dva slučaja.

Konačna forma modela ocene rizika ima algoritamsku strukturu. Prednosti primene modela iskazane su kroz karakteristike koje su postignute, a to su:

- Algoritam ima vertikalnu i horizontalnu dimenziju. Jedan isti tip bagera može, ali i ne mora imati isti uticaj parcijalnih indikatora na ukupni rizik. Značaj uticaja je promenljiv i sa vremenom.
- Uniformnost i algoritamska struktura modela omogućava jednostavnu integraciju u bilo koje druge tehničke sisteme. Model je fleksibilan, adaptivan i primenljiv za bilo koji mašine, tehnološke procese i fenomene uopšte; model se može koristiti za različite oblike i baze ulaznih podataka ili funkcije.
- Algoritam definiše aplikativni i vizuelni oblika modela. Na taj način se doprinosi jednostavnijoj i bržoj analizi rizika. Izlazni rezultat ocene rizika prikazan je u obliku uređenih parova (lingvistički opis stanja, disperzija rezultata). Ovakav homogen i konzistentan oblik ocene rizika daje mogućnosti komparativne analize trenutnog stanja tehničkog sistema.

- Rekurzivnost modela. Rezultati modela ukazuju na slaba mesta i/ili trenutno stanje sistema. Generisanjem povratnih informacije planiraju se potrebne aktivnosti na održavanju. Definisanje trenutnog stanja sistema procenom rizika, indirektno se dobijaju i informacije o preostalim mogućnostima sistema. Na osnovu toga se formiraju smernice za rad i održavanje čime se postiže upravljanje rizikom, odnosno adekvatno upravljanje imovinom.
- Razvojem održavanja prema riziku, doprinosi se smanjenju direktnih i indirektnih troškova kroz vreme u radu i vreme u zastoju. Rezultati iskazani kroz analizu slabih mesta, posebno su značajni za mašine velike investicione vrednosti.

Model je testiran za dva tipa podataka. Koriste se lingvistički i numerički tip podataka na ulazu u model. Ulazni podaci definisani su u skladu sa parcijalnim indikatorima koje predstavljaju. Rezultat prvog modela ukazuje i rangira slaba mesta po strukturnu stabilnost bagera. Rezultat drugog modela je definisanje trenutnog stanja na nivou čitavog rotornog bagera. Kroz dva pristupa formirana u studiji slučaja, dobijeni su sledeći rezultati (kratak pregled rezultata):

- Kod prvog modela:
 - Najveća vrednost rizika je kod slabog mesta P4 – obrtna platforma bagera, dok je najniži rizik kod slabog mesta P8 – oslone tačke gornje gradnje bagera na gusenični transportni uređaj. Vrednost rizika u prvom slučaju je 3.32, dok je u drugom slučaju 1.97.
 - Sve vrednosti rizika su definisane i na skalama: RPN_{FMECA} i RPN_{FMEA} i RPN_{MTX} . Prema rezultatima RPN_{FMECA} skale slaba mesta nisu u kritičnoj zoni koja bi zahtevala hitnu reakciju. U trećoj zoni rizika je 5 slabih mesta, dok su u drugoj zoni 3 slaba mesta.
 - Disperzija rezultata inovativne metode u poređenju sa druge dve, je manja u 4 od 8 slabih mesta. Prema parcijalnom poređenju disperzija je manja u oba slučaja kod 5 slabih mesta.
 - Ocnom rizika i rangiranjem slabih mesta, formiraju se preporuke za unapređenje postojećeg sistema održavanja.
- Kod drugog modela:
 - Vrednost rizika od zastoja prema standardnoj skali, na nivou čitavog bagera je 3.02.
 - Prema RPN_{FMECA} skali rizik je na vrednosti 506 što je u trećoj zoni.
 - Disperzija rezultata kod inovativnog modela je manja u poređenju sa druge dve metode. Procentualna razlika u odnosu na MAX-MIN kompoziciju je 38.1%, dok je u odnosu na MIN-MAX razlika 50.5%.
 - Ocnom rizika definiše se trenutno stanje i preostale mogućnosti rotornog bagera. Formiraju se smernice za unapređenje postojećeg sistema održavanja.

Na osnovu rezultata dobijenih verifikacijom modela na rotornom bageru i definisanih doprinosa kroz unapređena postojećih pristupa analize rizika, osnovne postavke doktorske disertacije su nedvosmisleno potvrđene. Prikazani model procene rizika uz aplikativni i vizuelni oblik može biti primenjiv u različitim oblastima industrije, a fleksibilnost i adaptivnost omogućuju prilagodljivost konkretnim okolnostima.

LITERATURA

- [1] Elektroprivreda Srbije, "Termoelektrane," 2022. <http://www.eps.rs/cir/Poslovanje-EE/Pages/Termoelektrane.aspx> (accessed Apr. 15, 2022).
- [2] S. Ivković, "Rizici pojave otkaza i štetnih događaja u složenim sistemima - primer BTO," in *XII Savetovanje sa međunarodnim učešćem "Upravljanje rizicima, preventiva i osiguranje u energetici"*, 2004, pp. 5–11.
- [3] S. Ivković, D. Ignjatović, M. Tanasijević, and D. Ivković, "Ponašanje rotornih bagera u eksploataciji na površinskim kopovima uglja u Srbiji i rizici," in *XII Savetovanje sa međunarodnim učešćem "Upravljanje rizicima, preventiva i osiguranje u energetici"*, 2004, pp. 199–204.
- [4] E. Rusiński, J. Czmochowski, A. Iluk, and M. Kowalczyk, "An analysis of the causes of a BWE counterweight boom support fracture," *Engineering Failure Analysis*, vol. 17, no. 1, pp. 179–191, Jan. 2010, doi: 10.1016/j.engfailanal.2009.06.001.
- [5] S. Bošnjak, N. Zrnić, A. Simonović, and D. Momčilović, "Failure analysis of the end eye connection of the bucket wheel excavator portal tie-rod support," *Engineering Failure Analysis*, vol. 16, no. 3, pp. 740–750, Apr. 2009, doi: 10.1016/j.engfailanal.2008.06.006.
- [6] S. M. Bošnjak, S. D. Savićević, N. B. Gnjatović, I. L. J. Milenović, and M. P. Pantelić, "Disaster of the bucket wheel excavator caused by extreme environmental impact: Consequences, rescue and reconstruction," *Engineering Failure Analysis*, vol. 56, pp. 360–374, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.engfailanal.2015.01.002.
- [7] S. Bošnjak, Z. Petković, N. Zrnić, G. Simić, and A. Simonović, "Cracks, repair and reconstruction of bucket wheel excavator slewing platform," *Engineering Failure Analysis*, vol. 16, no. 5, pp. 1631–1642, Jul. 2009, doi: 10.1016/j.engfailanal.2008.11.009.
- [8] E. Rusiński, P. Harnatkiewicz, M. Kowalczyk, and P. Moczko, "Examination of the causes of a bucket wheel fracture in a bucket wheel excavator," *Engineering Failure Analysis*, vol. 17, no. 6, pp. 1300–1312, Sep. 2010, doi: 10.1016/j.engfailanal.2010.03.004.
- [9] S. Bošnjak, M. Pantelić, N. Zrnić, N. Gnjatović, and M. Đorđević, "Failure analysis and reconstruction design of the slewing platform mantle of the bucket wheel excavator O&K SchRs 630," *Engineering Failure Analysis*, vol. 18, no. 2, pp. 658–669, Mar. 2011, doi: 10.1016/j.engfailanal.2010.09.035.
- [10] P. D. Jovančić, D. Ignjatović, M. Tanasijević, and T. Maneski, "Load-bearing steel structure diagnostics on bucket wheel excavator, for the purpose of failure prevention," *Engineering Failure Analysis*, vol. 18, no. 4, pp. 1203–1211, Jun. 2011, doi: 10.1016/j.engfailanal.2011.03.001.
- [11] D. Djurdjevic, T. Maneski, V. Milosevic-Mitic, N. Andjelic, and D. Ignjatovic, "Failure investigation and reparation of a crack on the boom of the bucket wheel excavator ERS 1250 Gacko," *Engineering Failure Analysis*, vol. 92, pp. 301–316, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.engfailanal.2018.05.015.
- [12] S. Bosnjak, Z. Petkovic, M. Dunjic, N. Gnjatovic, and M. Djordjevic, "Redesign of the vital subsystems as a way of extending the bucket wheel excavators life," *Technics Technologies Education Management*, vol. 7, no. 4, pp. 1620–1629, 2012.

- [13] E. Rusiński, L. Cegiel, A. Michalczyk, P. Moczko, J. Olejarz, and D. Pietrusiak, "Investigation and modernization of buckets of surface mining machines," *Engineering Structures*, vol. 90, pp. 29–37, May 2015, doi: 10.1016/j.engstruct.2015.02.009.
- [14] Military Standard - MIL-P-1629A, "Procedures for performing a failure mode, effects and criticality analysis," Washington DC, Nov. 1949.
- [15] Military Standard - MIL-STD-1629A, "Procedures for performing a failure mode, effects and criticality analysis," Washington DC, Jan. 1980. Accessed: Jan. 05, 2022. [Online]. Available: https://elsmar.com/pdf_files/Military%20Standards/mil-std-1629.pdf
- [16] R. A. Neal, *Modes of failure analysis summary for the Nerva B-2 reactor*. Pittsburgh: WANL-TNR-042, Westinghouse Electric Corporation Astronuclear Laboratory, 1962.
- [17] R. Dill, *State of the Art Reliability Estimate of Saturn V Propulsion Systems*. Boston: General Electric Company, RM 63TMP-22, 1963.
- [18] P. Jovančić, *Održavanje rudarskih mašina*. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, 2014.
- [19] P. Kumar and A. Kumar, "Methods for Risk Management of Mining Excavator through FMEA and FMECA," *The International Journal Of Engineering And Science (IJES)*, vol. 5, no. 6, pp. 57–63, 2016.
- [20] M. Rafie and F. Samimi Namin, "Prediction of subsidence risk by FMEA using artificial neural network and fuzzy inference system," *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 25, no. 4, pp. 655–663, Jul. 2015, doi: 10.1016/j.ijmst.2015.05.021.
- [21] P. Kumar and S. R.K, "Development of a Condition Based Maintenance Architecture for Optimal Maintainability of Mine Excavators," *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, vol. 11, no. 3, pp. 18–22, 2014, doi: 10.9790/1684-11351822.
- [22] M. P. Pantelić, S. M. Bošnjak, M. Z. Misita, N. B. Gnjatović, and A. Z. Stefanović, "Service FMECA of a bucket wheel excavator," *Engineering Failure Analysis*, vol. 108, p. 104289, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.engfailanal.2019.104289.
- [23] M. Pantelić, "Unapređenje koncepcije održavanja putem operativnog upravljanja sigurnošću bagerskih jedinica na površinskim kopovima," Univerzitet u Kragujevcu, Tehnički fakultet u Čačku, Čačak, 2009.
- [24] J. Wang, J. B. Yang, and P. Sen, "Safety analysis and synthesis using fuzzy sets and evidential reasoning," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 47, no. 2, pp. 103–118, Jan. 1995, doi: 10.1016/0951-8320(94)00053-Q.
- [25] J. B. Bowles and C. E. Peláez, "Fuzzy logic prioritization of failures in a system failure mode, effects and criticality analysis," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 50, no. 2, pp. 203–213, Jan. 1995, doi: 10.1016/0951-8320(95)00068-D.
- [26] M. Bevilacqua, M. Braglia, and R. Gabrielli, "Monte Carlo simulation approach for a modified FMECA in a power plant," *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 16, no. 4, pp. 313–324, Jul. 2000, doi: 10.1002/1099-1638(200007/08)16:4<313::AID-QRE434>3.0.CO;2-U.
- [27] K. Xu, L. C. Tang, M. Xie, S. L. Ho, and M. L. Zhu, "Fuzzy assessment of FMEA for engine systems," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 75, no. 1, pp. 17–29, Jan. 2002, doi: 10.1016/S0951-8320(01)00101-6.

- [28] A. Pillay and J. Wang, "Modified failure mode and effects analysis using approximate reasoning," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 79, no. 1, pp. 69–85, Jan. 2003, doi: 10.1016/S0951-8320(02)00179-5.
- [29] S. J. Rhee and K. Ishii, "Using cost based FMEA to enhance reliability and serviceability," *Advanced Engineering Informatics*, vol. 17, no. 3–4, pp. 179–188, Jul. 2003, doi: 10.1016/j.aei.2004.07.002.
- [30] A. C. F. Guimarães and C. M. Franklin Lapa, "Effects analysis fuzzy inference system in nuclear problems using approximate reasoning," *Annals of Nuclear Energy*, vol. 31, no. 1, pp. 107–115, Jan. 2004, doi: 10.1016/S0306-4549(03)00173-7.
- [31] Y.-M. Wang, K.-S. Chin, G. K. K. Poon, and J.-B. Yang, "Risk evaluation in failure mode and effects analysis using fuzzy weighted geometric mean," *Expert Systems with Applications*, vol. 36, no. 2, pp. 1195–1207, Mar. 2009, doi: 10.1016/j.eswa.2007.11.028.
- [32] K.-S. Chin, Y.-M. Wang, G. Ka Kwai Poon, and J.-B. Yang, "Failure mode and effects analysis using a group-based evidential reasoning approach," *Computers & Operations Research*, vol. 36, no. 6, pp. 1768–1779, Jun. 2009, doi: 10.1016/j.cor.2008.05.002.
- [33] F. Zammori and R. Gabbrielli, "ANP/RPN: a multi criteria evaluation of the Risk Priority Number," *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 28, no. 1, pp. 85–104, Feb. 2012, doi: 10.1002/qre.1217.
- [34] H.-C. Liu, L. Liu, N. Liu, and L.-X. Mao, "Risk evaluation in failure mode and effects analysis with extended VIKOR method under fuzzy environment," *Expert Systems with Applications*, vol. 39, no. 17, pp. 12926–12934, Dec. 2012, doi: 10.1016/j.eswa.2012.05.031.
- [35] D. v. Petrović, M. Tanasijević, V. Milić, N. Lilić, S. Stojadinović, and I. Svrkota, "Risk assessment model of mining equipment failure based on fuzzy logic," *Expert Systems with Applications*, vol. 41, no. 18, pp. 8157–8164, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.eswa.2014.06.042.
- [36] J. Balaraju, M. Govinda Raj, and C. S. Murthy, "Fuzzy-FMEA risk evaluation approach for LHD machine-A case study," *Journal of Sustainable Mining*, vol. 18, no. 4, pp. 257–268, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.jsm.2019.08.002.
- [37] D. Łapczyńska and A. Burduk, "Fuzzy FMEA Application to Risk Assessment of Quality Control Process," 2021, pp. 309–319. doi: 10.1007/978-3-030-57802-2_30.
- [38] M. Khodadadi-Karimvand and H. Shirouyehzad, "Well drilling fuzzy risk assessment using fuzzy FMEA and fuzzy TOPSIS," *Journal of fuzzy extension and application*, vol. 2, no. 2, pp. 144–155, 2021.
- [39] U. Kumar, "Maintenance strategies for mechanized and automated mining systems: a reliability and risk analysis based approach," *Journal of mines, metals and fuels*, vol. 46, no. 11, pp. 343–347, 1998.
- [40] S. Apeland and T. Aven, "Risk based maintenance optimization: foundational issues," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 67, no. 3, pp. 285–292, Mar. 2000, doi: 10.1016/S0951-8320(99)00068-X.
- [41] F. I. Khan and M. M. Haddara, "Risk-based maintenance (RBM): a quantitative approach for maintenance/inspection scheduling and planning," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 16, no. 6, pp. 561–573, Nov. 2003, doi: 10.1016/j.jlp.2003.08.011.
- [42] F. Khan, "Risk-based maintenance of ethylene oxide production facilities," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 108, no. 3, pp. 147–159, May 2004, doi: 10.1016/j.jhazmat.2004.01.011.

- [43] N. S. Arunraj and J. Maiti, "Risk-based maintenance—Techniques and applications," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 142, no. 3, pp. 653–661, Apr. 2007, doi: 10.1016/j.jhazmat.2006.06.069.
- [44] F. Jaderi, Z. Z. Ibrahim, and M. R. Zahiri, "Criticality analysis of petrochemical assets using risk based maintenance and the fuzzy inference system," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 121, pp. 312–325, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.psep.2018.11.005.
- [45] B. Yeter, Y. Garbatov, and C. Guedes Soares, "Risk-based maintenance planning of offshore wind turbine farms," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 202, p. 107062, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.res.2020.107062.
- [46] L. Leoni, F. de Carlo, N. Paltrinieri, F. Sgarbossa, and A. BahooToroody, "On risk-based maintenance: A comprehensive review of three approaches to track the impact of consequence modelling for predicting maintenance actions," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 72, p. 104555, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.jlp.2021.104555.
- [47] International Organization for Standardization, "ISO 55000:2014 Asset management — Overview, principles and terminology," Geneva, 2014. Accessed: Dec. 15, 2021. [Online]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:55000:ed-1:v2:en>
- [48] International Organization for Standardization, "ISO 31000:2018 Risk management — Guidelines," Geneva, 2018. Accessed: Dec. 15, 2021. [Online]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:31000:ed-2:v1:en>
- [49] D. Nišić, "Razvoj modela za procenu rizika na deponijama industrijskog otpada mineralnog porekla," Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, 2018.
- [50] S. Djenadic, M. Tanasijevic, P. Jovancic, D. Ignjatovic, D. Petrovic, and U. Bugaric, "Risk Evaluation: Brief Review and Innovation Model Based on Fuzzy Logic and MCDM," *Mathematics*, vol. 10, no. 5, p. 811, Mar. 2022, doi: 10.3390/math10050811.
- [51] M. unutrašnjih poslova Republika Srbija, "Zakon o smanjenju rizika od katastrofa i upravljanju vanrednim situacijama," Beograd, Nov. 2018. Accessed: Dec. 16, 2021. [Online]. Available: <https://www.pravno-informacioni-sistem.rs/SIGlasnikPortal/eli/rep/sgrs/skupstina/zakon/2018/87/1/reg>
- [52] International Electrotechnical Commission, "IEC 31010:2019 Risk management - Risk assessment techniques," Geneva, 2019.
- [53] M. Durivage, "Pharmaceutical online, Guest Column," *Is It Time to Say Goodbye to FMEA Risk Priority Number (RPN) Scores?*, Apr. 27, 2020.
- [54] J. Braband, "Definition and Analysis of a New Risk Priority Number Concept," in *Probabilistic Safety Assessment and Management*, London: Springer London, 2004, pp. 2006–2011. doi: 10.1007/978-0-85729-410-4_322.
- [55] D. Stamatis, *Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution*. Milwaukee, Wisconsin: American Society for Quality (ASQ), 1995.
- [56] V. Petrović, "Analiza rizika i FMEA metoda," *Journal of Applied Engineering Science*, vol. 1, no. 2, pp. 7–14, 2003.
- [57] M. Braglia, M. Frosolini, and R. Montanari, "Fuzzy criticality assessment model for failure modes and effects analysis," *International Journal of Quality & Reliability Management*, vol. 20, no. 4, pp. 503–524, Jun. 2003, doi: 10.1108/02656710310468687.

- [58] K.-H. Chang and C.-H. Cheng, "Evaluating the risk of failure using the fuzzy OWA and DEMATEL method," *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 22, no. 2, pp. 113–129, Apr. 2011, doi: 10.1007/s10845-009-0266-x.
- [59] H.-C. Liu, L. Liu, and N. Liu, "Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review," *Expert Systems with Applications*, vol. 40, no. 2, pp. 828–838, Feb. 2013, doi: 10.1016/j.eswa.2012.08.010.
- [60] L. Papić and Z. Milovanović, *Održavanje i pouzdanost tehničkih sistema*. Prijedor: Istraživački centar za upravljanje kvalitetom i pouzdanošću DQM, 2007.
- [61] M. Ognjanović, *Inovativni razvoj tehničkih sistema*. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2014.
- [62] U. Bugarić, "Upravljanje sistemom održavanja." Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, 2020. Accessed: May 10, 2022. [Online]. Available: http://ie.mas.bg.ac.rs/predmeti_p.php?SchoolSubjectID=1
- [63] M. Tanasijević, "Sigurnost funkcionisanja mehaničkih komponenti rotornog bagera," Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, 2007.
- [64] S. Đenadić, "Projekat unapređenja upravljanja rudarskom opremom," Master rad, Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet u Nišu, Niš, 2021.
- [65] S. Djenadic, D. Ignjatovic, M. Tanasijevic, U. Bugaric, I. Jankovic, and T. Subaranovic, "Development of the Availability Concept by Using Fuzzy Theory with AHP Correction, a Case Study: Bulldozers in the Open-Pit Lignite Mine," *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 21, p. 4044, Oct. 2019, doi: 10.3390/en12214044.
- [66] V. Ebrahimipour and K. Suzuki, "A synergetic approach for assessing and improving equipment performance in offshore industry based on dependability," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 91, no. 1, pp. 10–19, Jan. 2006, doi: 10.1016/j.ress.2004.11.008.
- [67] A. Avizienis, J.-C. Laprie, B. Randell, and C. B. Landwehr, "Basic concepts and taxonomy of dependable and secure computing," *IEEE Trans Dependable Secure Comput*, vol. 1, no. 1, pp. 11–33, 2004.
- [68] K. Strandberg, "IEC 300: the dependability counterpart of ISO 9000," in *Annual Reliability and Maintainability Symposium. 1991 Proceedings*, Jan. 1991, pp. 463–467. doi: 10.1109/ARMS.1991.154481.
- [69] International Electrotechnical Commission, "IEC 60300-3-11:2009 Dependability management - Application guide - Reliability centred maintenance," Geneva, 2003. Accessed: Feb. 25, 2021. [Online]. Available: <https://infostore.saiglobal.com/preview/iec/iec60000/60300/iec60300-3-11%7Bed2.0%7Db.pdf?sku=1129025>
- [70] S. Ivković, *Otkazi elemenata rudarskih mašina*. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, 1997.
- [71] B. S. Dhillon, *Mining Equipment Reliability, Maintainability, and Safety*. London: Springer London, 2008. doi: 10.1007/978-1-84800-288-3.
- [72] J. Todorović, *Inženjerstvo održavanja tehničkih sistema*. Beograd: Jugoslovensko društvo za motore i vozila, 1993.
- [73] D. Ignjatović, *Rudarske mašine*. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, 2012.

- [74] S. Ivković, D. Ignjatović, P. Jovančić, and M. Tanasijević, *Projektovanje održavanja opreme površinskih kopova uglja*. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, 2008.
- [75] W. Durst and W. Vogt, *Bucket wheel excavator*. Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications Ltd, 1988.
- [76] E. Rusiński, J. Czmochowski, P. Moczko, and D. Pietrusiak, *Surface Mining Machines*. Cham: Springer International Publishing, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-47792-3.
- [77] DIN, “DIN 22261-3:2015-11 Excavators, spreaders and auxiliary equipment in opencast lignite mines - Part 3: Execution of steel structures,” Berlin, 2015.
- [78] Mašinski fakultet & Rudarsko-geološki fakultet, “Studija izvodljivosti unapređenja procesa održavanja rudarske mehanizacije uvođenjem sistema agragatne zamene,” Beograd, 2021.
- [79] T. Tanasković, *Održavanje rudarskih mašina*. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, 1998.
- [80] L. A. Zadeh, “Fuzzy sets,” *Information and Control*, vol. 8, no. 3, pp. 338–353, Jun. 1965, doi: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.
- [81] M. Crnogorac, “Optimizacija izbora mehaničke metode eksploatacije naftnih bušotina primenom fazi logike,” Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, 2020.
- [82] I. Miljanović, *Fazi logičko upravljanje procesima u pripremi mineralnih sirovina*. Beograd: Rudarsko-geološki fakultet, 2008.
- [83] L. A. Zadeh, “The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—I,” *Information Sciences*, vol. 8, no. 3, pp. 199–249, Jan. 1975, doi: 10.1016/0020-0255(75)90036-5.
- [84] P. Subašić, *Fazi logika i neuronske mreže*. Beograd: Tehnička knjiga, 1997.
- [85] R. Jovanović, *Fazi logika, modelovanje i upravljanje*. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2020.
- [86] A. Madžarević, “Metodologija integralne analize scenarija energetskeg razvoja,” Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, 2019.
- [87] J. T. Ross, *Fuzzy Logic With Engineering Application*, 3rd ed. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2010.
- [88] D. Teodorović and S. Kikuchi, *Uvod u teoriju fuzzy skupova i primene u saobraćaju*. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, 1991.
- [89] G. Klir and B. Yuan, *Fuzzy sets and fuzzy logic: theory and applications*. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1995. doi: 10.5860/CHOICE.33-2786.
- [90] A. Kaufmann and M. Gupta, *Fuzzy Mathematical Models in Engineering and Management Science*. North Holland: Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1988.
- [91] P. Guttorp, “Fuzzy Mathematical Models in Engineering and Management Science,” *Technometrics*, vol. 32, no. 2, pp. 238–238, May 1990, doi: 10.1080/00401706.1990.10484661.
- [92] R. Fullér, *Fuzzy Reasoning for Fuzzy Optimization*. Turku Centre for Computer Science, 1998. doi: 10.1007/978-3-7908-1805-5_5.
- [93] J. J. Buckley, “The multiple judge, multiple criteria ranking problem: A fuzzy set approach,” *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 13, no. 1, pp. 25–37, May 1984, doi: 10.1016/0165-0114(84)90024-1.

- [94] D. Petrović, “Razvoj algoritma procene efekata rizika rada rudarskih mašina na bazi fazi algebre,” Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, 2014.
- [95] R. Bělohlávek, *Fuzzy Relational Systems: Foundations and Principles*. New York : Springer, Boston, MA, 2002.
- [96] H.-J. Zimmermann, *Fuzzy Set Theory—and Its Applications*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2001. doi: 10.1007/978-94-010-0646-0.
- [97] D. Ivezić, M. Tanasijević, and D. Ignjatović, “Fuzzy approach to dependability performance evaluation,” *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 24, no. 7, pp. 779–792, Nov. 2008, doi: 10.1002/qre.926.
- [98] S. N. Sivanandam, S. Sumathi, and S. N. Deepa, *Introduction to Fuzzy Logic using MATLAB*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007. doi: 10.1007/978-3-540-35781-0.
- [99] S. Djenadic, P. Jovancic, D. Ignjatovic, M. Tanasijevic, and F. Miletic, “Effectiveness analysis of different bucket-wheel excavators,” in *8th International Conference Mining and Environmental Protection*, Sep. 2021, pp. 239–248.
- [100] M. S. García-Cascales and M. T. Lamata, “On rank reversal and TOPSIS method,” *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 56, no. 5–6, pp. 123–132, Sep. 2012, doi: 10.1016/j.mcm.2011.12.022.
- [101] B. Roy, “The Optimisation Problem Formulation: Criticism and Overstepping,” *Journal of the Operational Research Society*, vol. 32, no. 6, pp. 427–436, Jun. 1981, doi: 10.1057/jors.1981.93.
- [102] B. Roy, *Multicriteria Methodology for Decision Aiding*, vol. 12. Boston, MA: Springer US, 1996. doi: 10.1007/978-1-4757-2500-1.
- [103] F. Sitorus, J. J. Cilliers, and P. R. Brito-Parada, “Multi-criteria decision making for the choice problem in mining and mineral processing: Applications and trends,” *Expert Systems with Applications*, vol. 121, pp. 393–417, May 2019, doi: 10.1016/j.eswa.2018.12.001.
- [104] R. L. Keeney, “Feature Article—Decision Analysis: An Overview,” *Operations Research*, vol. 30, no. 5, pp. 803–838, Oct. 1982, doi: 10.1287/opre.30.5.803.
- [105] A. Tsoukiàs, “On the concept of decision aiding process: an operational perspective,” *Annals of Operations Research*, vol. 154, no. 1, pp. 3–27, Jul. 2007, doi: 10.1007/s10479-007-0187-z.
- [106] J. Dodgson, M. Spackman, and A. Pearman, “Multi-criteria analysis: a manual,” London, 2009.
- [107] S. Opricovic and G.-H. Tzeng, “Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS,” *European Journal of Operational Research*, vol. 156, no. 2, pp. 445–455, Jul. 2004, doi: 10.1016/S0377-2217(03)00020-1.
- [108] C.-L. Hwang and K. Yoon, *Multiple Attribute Decision Making*, vol. 186. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1981. doi: 10.1007/978-3-642-48318-9.
- [109] J. Chai, J. N. K. Liu, and E. W. T. Ngai, “Application of decision-making techniques in supplier selection: A systematic review of literature,” *Expert Systems with Applications*, vol. 40, no. 10, pp. 3872–3885, Aug. 2013, doi: 10.1016/j.eswa.2012.12.040.
- [110] E. K. Zavadskas, Z. Turskis, and S. Kildienė, “STATE OF ART SURVEYS OF OVERVIEWS ON MCDM/MADM METHODS,” *Technological and Economic Development of Economy*, vol. 20, no. 1, pp. 165–179, Mar. 2014, doi: 10.3846/20294913.2014.892037.

- [111] B. Agarski, "Razvoj sistema za inteligentnu višekriterijumsku procenu opterećenja životne sredine kod ocenjivanja životnog ciklusa proizvoda i procesa," Novi Sad, 2014.
- [112] M. Čupić, R. Tummala, and M. Suković, *Odlučivanje: formalni pristup*. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Fakultet Organizacionih Nauka, 2001.
- [113] S. Savkovic, P. Jovancic, S. Djenadic, M. Tanasijevic, and F. Miletic, "Development of the hybrid MCDM model for evaluating and selecting bucket wheel excavators for the modernization process," *Expert Systems with Applications*, vol. 201, p. 117199, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.eswa.2022.117199.
- [114] T. Saaty, *The Analytic Hierarchy Process*. New York: McGraw-Hill, 1980.
- [115] J. P. Brans, Ph. Vincke, and B. Mareschal, "How to select and how to rank projects: The Promethee method," *European Journal of Operational Research*, vol. 24, no. 2, pp. 228–238, Feb. 1986, doi: 10.1016/0377-2217(86)90044-5.
- [116] B. Roy, "The Outranking Approach and the Foundations of Electre Methods," in *Readings in Multiple Criteria Decision Aid*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1990, pp. 155–183. doi: 10.1007/978-3-642-75935-2_8.
- [117] T. L. Saaty, "The Analytic Network Process," in *Decision Making with the Analytic Network Process*, vol. 95, Boston: Springer US, 2006, pp. 1–26. doi: 10.1007/0-387-33987-6_1.
- [118] I. Jankovic, S. Djenadic, D. Ignjatovic, P. Jovancic, T. Subaranovic, and I. Ristovic, "Multi-Criteria Approach for Selecting Optimal Dozer Type in Open-Cast Coal Mining," *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 12, p. 2245, Jun. 2019, doi: 10.3390/en12122245.
- [119] T. L. Saaty, "Decision making with the analytic hierarchy process," *International Journal of Services Sciences*, vol. 1, no. 1, p. 83, 2008, doi: 10.1504/IJSSCI.2008.017590.
- [120] G. Milentijević, B. Nedeljković, M. Lekić, Z. Nikić, I. Ristović, and J. Djokić, "Application of a Method for Intelligent Multi-Criteria Analysis of the Environmental Impact of Tailing Ponds in Northern Kosovo and Metohija," *Energies (Basel)*, vol. 9, no. 11, p. 935, Nov. 2016, doi: 10.3390/en9110935.
- [121] R. A. Krohling and A. G. C. Pacheco, "A-TOPSIS – An Approach Based on TOPSIS for Ranking Evolutionary Algorithms," *Procedia Computer Science*, vol. 55, pp. 308–317, 2015, doi: 10.1016/j.procs.2015.07.054.
- [122] M. S. García-Cascales and M. T. Lamata, "On rank reversal and TOPSIS method," *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 56, no. 5–6, pp. 123–132, Sep. 2012, doi: 10.1016/j.mcm.2011.12.022.
- [123] M. A. M. Ali and J.-G. Kim, "Selection mining methods via multiple criteria decision analysis using TOPSIS and modification of the UBC method," *Journal of Sustainable Mining*, vol. 20, no. 2, pp. 49–55, Jun. 2021, doi: 10.46873/2300-3960.1054.
- [124] 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.
- [125] V. Simonović, *Uvod u teoriju verovatnoće i matematičku statistiku*, vol. 4. Tekon - Tehnokonsalting, Beograd, 1995.
- [126] I. Klajn and M. Šipka, *Veliki rečnik stranih reči i izraza*, vol. 6. Novi Sad: PROMETEJ, Novi Sad, 2012.

- [127] H. Karahalios, "The application of the AHP-TOPSIS for evaluating ballast water treatment systems by ship operators," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 52, pp. 172–184, May 2017, doi: 10.1016/j.trd.2017.03.001.
- [128] T. L. Saaty and M. S. Ozdemir, "Why the magic number seven plus or minus two," *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 38, no. 3–4, pp. 233–244, Aug. 2003, doi: 10.1016/S0895-7177(03)90083-5.
- [129] I. Konstantinos, T. Georgios, and A. Garyfalos, "A Decision Support System methodology for selecting wind farm installation locations using AHP and TOPSIS: Case study in Eastern Macedonia and Thrace region, Greece," *Energy Policy*, vol. 132, pp. 232–246, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.enpol.2019.05.020.
- [130] M. Tanasijevic, "A fuzzy-based decision support model for evaluation of mining machinery," in *48th International October Conference on Mining and Metallurgy*, Sep. 2016, pp. 15–18.
- [131] D. Ivezic, M. Tanasijevic, P. Jovancic, and R. Djuric, "A Fuzzy Expert Model for Availability Evaluation," in *2019 20th International Carpathian Control Conference (ICCC)*, May 2019, pp. 1–6. doi: 10.1109/CarpathianCC.2019.8766031.
- [132] R. Miodragović, M. Tanasijević, Z. Mileusnić, and P. Jovančić, "Effectiveness assessment of agricultural machinery based on fuzzy sets theory," *Expert Systems with Applications*, vol. 39, no. 10, pp. 8940–8946, Aug. 2012, doi: 10.1016/j.eswa.2012.02.013.
- [133] M. Tanasijevic, P. Jovancic, D. Ivezic, U. Bugaric, and R. Djuric, "A fuzzy-based decision support model for effectiveness evaluation - A case study of the examination of bulldozers," *International Journal of Industrial Engineering : Theory Applications and Practice*, vol. 26, no. 6, pp. 878–897, 2019.
- [134] M. Tanasijević, D. Ivezić, P. Jovančić, D. Čatić, and D. Zlatanović, "Study of Dependability Evaluation for Multi-hierarchical Systems Based on Max-Min Composition," *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 29, no. 3, pp. 317–326, Apr. 2013, doi: 10.1002/qre.1383.
- [135] S. Djenadic, M. Tanasijevic, V. Milisavljevic, D. Ignjatovic, and P. Jovancic, "Application of the Fuzzy Model in the Evaluation and Selection of Hydraulic Excavators on Open-Pit Lignite Mine," *SSRN Electronic Journal*, 2021, doi: 10.2139/ssrn.3945617.
- [136] M. Crnogorac, M. Tanasijević, D. Danilović, V. Karović Maričić, and B. Leković, "Selection of Artificial Lift Methods: A Brief Review and New Model Based on Fuzzy Logic," *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 7, p. 1758, Apr. 2020, doi: 10.3390/en13071758.
- [137] V. Ebrahimipour and K. Suzuki, "A synergetic approach for assessing and improving equipment performance in offshore industry based on dependability," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 91, no. 1, pp. 10–19, Jan. 2006, doi: 10.1016/j.res.2004.11.008.
- [138] S. Kundu, "The min-max composition rule and its superiority over the usual max-min composition rule," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 93, no. 3, pp. 319–329, Feb. 1998, doi: 10.1016/S0165-0114(96)00188-1.

SPISAK PRILOGA

Doktorska disertacija sadrži 5 priloga:

Prilog broj 1 – Anketni list za model procene rizika po strukturnu stabilnost bagera

Prilog broj 2 – Anketni list za model procene rizika po prekid proizvodnog procesa

Prilog broj 3 – Ulazni podaci za procenu raspoloživosti i vreme zastoja bagera

Prilog broj 4 – Datoteka sa kodom za aplikativnu formu modela procene rizika

Prilog broj 5 – Datoteka sa kodom za vizuelizaciju modela procene rizika

Prilog broj 1 – Anketni list za model procene rizika po strukturnu stabilnost bagera

Slabo mesto:

Ukupna ocena rizika se sastoji od tri elementa (parcijalna indikatora) koja se ekspertski vrednuju: **verovatnoća pojavljivanja (O), ozbiljnost posledica (S) i mogućnost detekcije (D).**

Prvi nivo **ekspertske ocene**: Oceniti odnos uticaja na rizik ovih indikatora kroz međusobno poređenje. Odnos ocena definisan je kroz stepen uticaja i ima sledeći oblik:

0.33	0.5	1	2	3
veoma mali uticaj	mali uticaj	isti uticaj	veliki uticaj	vrlo veliki uticaj

Ocene uneti u tabelu. Moguće su sve kombinacije bilo da je uticaj svih isti ili različit. Kod trećeg reda se usvaja konzistentni odnos iz prva dva odgovora (A:B i A:C sledi B:C).

O:S	Verovatnoća pojavljivanja u odnosu na ozbiljnost posledica	
O:D	Verovatnoća pojavljivanja u odnosu na mogućnost detekcije	
S:D	Ozbiljnost posledica u odnosu na mogućnost detekcije	/

Drugi nivo **ekspertske ocene**: Oceniti procentualno od 0 do 100% na osnovu opisa. Ocenu može dobiti jedno polje (100%) ili može biti raspodeljeno na dva susedna pri čemu je njihov zbir 100%.

Verovatnoća pojavljivanja (O)		
<i>Ključna reč</i>	<i>Opis ocene</i>	<i>0-100 %</i>
Izraženo	Izvesna je pojava havarije	
Verovatno	Velike šanse da dođe do pojave havarije	
Umereno	Havarija je moguća	
Retko	Izrazito mala verovatnoća pojave havarije	
Neznatno	Nema opasnosti od pojave havarije	

Ozbiljnost posledica (S)		
<i>Ključna reč</i>	<i>Opis ocene</i>	<i>0-100 %</i>
Izražena	Ugrožena bezbednost mašine	
Velika	Veliki poremećaj mašine	
Umerena	Prisutna potencijalna opasnost	
Mala	Neznatni poremećaj	
Nikakva	Mašina nije ugrožena	

Mogućnost detekcije (D)		
<i>Ključna reč</i>	<i>Opis ocene</i>	<i>0-100 %</i>
Nemoguće	Nije moguće uočiti opasnost	
Neznatno	Kompleksna situacija uočiti opasnosti	
Umereno	Postoji šansa da se locira opasnost	
Izvesno	Lako se locira potencijalna havarija	
Očito	Havarija se može sprečiti	

Prilog broj 2 – Anketni list za model procene rizika po prekid proizvodnog procesa

Ukupna ocena rizika se sastoji od tri elementa (parcijalna indikatora) koja se ekspertski vrednuju: **raspoloživost (A), indirektni troškovi (T) i mogućnost detekcije (D).**

Prvi nivo **ekspertske ocene**: Oceniti odnos uticaja na rizik ovih indikatora kroz međusobno poređenje. Odnos ocena definisan je kroz stepen uticaja i ima sledeći oblik:

0.33 **0.5** **1** **2** **3**
veoma mali uticaj **mali** uticaj **isti** uticaj **veliki** uticaj **vrlo veliki** uticaj

Ocene uneti u tabelu. Moguće su sve kombinacije bilo da je uticaj svih isti ili različit. Kod trećeg reda se usvaja konzistentni odnos iz prva dva odgovora (A:B i A:C sledi B:C).

A:T	Raspoloživost u odnosu na indirektno troškove	
A:D	Raspoloživost u odnosu na mogućnost detekcije	
T:D	Indirektni troškovi u odnosu na mogućnost detekcije	/

Drugi nivo **ekspertske ocene**: Oceniti procentualno od 0 do 100% na osnovu opisa. Ocenu može dobiti jedno polje (100%) ili može biti raspodeljeno na dva susedna pri čemu je njihov zbir 100%.

Mogućnost detekcije (D)		
<i>Ključna reč</i>	<i>Opis ocene</i>	<i>0-100 %</i>
Pasivno održavanje sa većim posledicama	Ne postoji monitoring i održavanje je isključivo korektivno, zastoji se ne mogu predvideti	
Pasivno održavanje sa manjim posledicama	Nizak nivo monitoringa i održavanja, manji zastoji se ne mogu predvideti	
Preventivno održavanje (tekuće i servisno)	Plansko vremenski definisano preventivno održavanje sa vizuelnim opažanjima, postoji šansa da se predvidi zastoj	
Prediktivno održavanje (održavanje prema stanju)	Stalno posmatranje i praćenje stanja sistema sa visokim učešćem monitoringa, ozbiljniji zastoj se može predvideti	
Proaktivno održavanje (eliminacija uzroka kvara)	Totalni monitoring sistema (24/7), kvar se može predvideti	

Prilog broj 3 – Ulazni podaci za procenu raspoloživosti i vreme u zastoju bagera

Vremena u radu i vremena u zastoju bagera SRs2000 (podaci iz druge grupe)

r. br.	T_{i-r} , [min]	T_{i-o} , [min]	r. br.	T_{i-r} , [min]	T_{i-o} , [min]	r. br.	T_{i-r} , [min]	T_{i-o} , [min]
1.	9385	495	42.	7251	565	83.	184	1820
2.	9171	715	43.	3268	115	84.	1340	185
3.	7675	1715	44.	9165	4750	85.	1627	180
4.	1229	195	45.	1121	330	86.	12480	3270
5.	2565	110	46.	229	100	87.	17092	4450
6.	1662	360	47.	477	90	88.	7168	390
7.	860	165	48.	2378	170	89.	1672	310
8.	955	150	49.	2047	90	90.	184	105
9.	2354	165	50.	5221	90	91.	1044	375
10.	2332	100	51.	552	140	92.	447	230
11.	8020	995	52.	6666	3540	93.	5150	315
12.	3847	230	53.	3791	535	94.	1173	300
13.	1156	135	54.	480	230	95.	10022	1050
14.	619	110	55.	1117	115	96.	401	960
15.	22487	6250	56.	10693	330	97.	5912	115
16.	1249	1540	57.	8307	135	98.	5850	120
17.	5290	155	58.	7245	185	99.	7024	135
18.	7320	1025	59.	9764	1780	100.	1132	120
19.	7981	16455	60.	3832	110	101.	11283	320
20.	2891	120	61.	7475	335	102.	4483	245
21.	241	130	62.	259	220	103.	4062	270
22.	2480	890	63.	5270	200	104.	1379	115
23.	7803	2100	64.	487	175	105.	7102	660
24.	3007	90	65.	9302	4850	106.	184	125
25.	1305	200	66.	4497	1055	107.	1169	190
26.	1242	150	67.	3751	120	108.	529	190
27.	1478	150	68.	3610	110	109.	127	315
28.	1702	120	69.	805	160	110.	386	120
29.	1865	125	70.	15277	7250	111.	567	115
30.	763	840	71.	916	100	112.	3208	1440
31.	790	100	72.	1283	480	113.	3330	160
32.	987	105	73.	193	2465	114.	5021	420
33.	265	120	74.	19647	1250	115.	1745	300
34.	1297	80	75.	75	140	116.	483	300
35.	564	50	76.	5112	380	117.	274	270
36.	2615	90	77.	3133	115	118.	1575	205
37.	8719	310	78.	1992	545	119.	2415	135
38.	9002	2800	79.	1858	520	120.	29465	4290
39.	975	90	80.	2249	185	121.	4974	470
40.	166	180	81.	4529	155	122.	18083	2085
41.	634	5675	82.	11571	730			

Vremena u radu i vremena u zastoju bagera SRs2000 (podaci iz treće grupe)

r. br.	T_{i-r} , [min]	T_{i-o} , [min]	r. br.	T_{i-r} , [min]	T_{i-o} , [min]	r. br.	T_{i-r} , [min]	T_{i-o} , [min]
1.	2860	220	33.	16930	4300	65.	311	90
2.	6738	215	34.	3176	90	66.	483	420
3.	869	260	35.	13174	100	67.	1139	480
4.	924	155	36.	1883	180	68.	465	575
5.	2497	100	37.	2662	160	69.	451	120
6.	1999	920	38.	22313	270	70.	1410	350
7.	6441	105	39.	1372	150	71.	1657	210
8.	782	55	40.	3988	390	72.	4222	180
9.	2065	210	41.	2223	695	73.	3193	90
10.	280	160	42.	3922	160	74.	26564	6580
11.	1329	155	43.	3429	300	75.	363	660
12.	1409	330	44.	287	110	76.	3629	115
13.	9735	3420	45.	5502	120	77.	1374	295
14.	687	120	46.	705	420	78.	13644	120
15.	2066	260	47.	11675	280	79.	5957	100
16.	1649	270	48.	222	175	80.	4812	890
17.	11650	7700	49.	3516	930	81.	729	160
18.	1470	330	50.	12968	175	82.	7128	215
19.	1053	1285	51.	12430	120	83.	9871	145
20.	2642	1105	52.	20701	5120	84.	687	180
21.	1765	140	53.	1232	120	85.	517	140
22.	2907	495	54.	5832	105	86.	16530	3280
23.	2036	1110	55.	225	115	87.	222	90
24.	7249	135	56.	21382	2575	88.	5601	7365
25.	541	170	57.	1205	430	89.	660	105
26.	1877	120	58.	10517	5250	90.	4955	440
27.	722	150	59.	588	80	91.	497	115
28.	7949	20500	60.	572	200	92.	8631	305
29.	380	4000	61.	860	100	93.	3115	420
30.	4729	210	62.	501	3950	94.	15659	7785
31.	3894	170	63.	707	100			
32.	637	1055	64.	1669	140			

Vremena u radu i vremena u zastoju bagera SRs2000 (podaci iz četvrte grupe)

r. br.	T_{i-r} , [min]	T_{i-o} , [min]	r. br.	T_{i-r} , [min]	T_{i-o} , [min]	r. br.	T_{i-r} , [min]	T_{i-o} , [min]
1.	15909	1415	20.	0	44640	39.	10175	1640
2.	12590	255	21.	0	44640	40.	2376	325
3.	11153	175	22.	0	28500	41.	833	8000
4.	657	6785	23.	2875	11800	42.	15286	17045
5.	13252	200	24.	5469	6800	43.	19891	10020
6.	2481	6010	25.	19279	220	44.	1708	180
7.	7194	190	26.	19637	480	45.	8508	6345
8.	1923	320	27.	0	210	46.	7227	540
9.	3951	220	28.	2721	360	47.	129	840
10.	13117	21000	29.	6985	5825	48.	432	7040
11.	5244	17640	30.	3280	1925	49.	6399	260
12.	0	33840	31.	9186	24480	50.	2472	6140
13.	851	12500	32.	0	11380	51.	3218	24675
14.	13852	415	33.	6124	405	52.	1259	170
15.	807	220	34.	20413	210	53.	105	610
16.	6874	620	35.	22468	225	54.	10771	6190
17.	7821	30150	36.	2568	8110	55.	3347	190
18.	0	35150	37.	14731	190	56.	9053	12600
19.	0	43200	38.	966	9770			

Vremena u radu i vremena u zastoju bagera SRs2000 (podaci iz pete grupe)

r. br.	T_{i-r} , [min]	T_{i-o} , [min]	r. br.	T_{i-r} , [min]	T_{i-o} , [min]	r. br.	T_{i-r} , [min]	T_{i-o} , [min]
1.	443	140	15.	541	693	29.	834	105
2.	4402	380	16.	1022	58	30.	12109	90
3.	4082	335	17.	707	299	31.	2674	155
4.	28984	280	18.	256	455	32.	8510	480
5.	7583	120	19.	720	815	33.	12331	195
6.	1122	100	20.	4808	110	34.	285	1115
7.	4042	285	21.	4261	340	35.	1129	105
8.	1696	110	22.	4542	1325	36.	523	85
9.	1538	155	23.	8171	155	37.	3045	110
10.	807	100	24.	752	935	38.	1892	290
11.	3979	215	25.	566	1015	39.	908	995
12.	14682	540	26.	4040	595	40.	572	210
13.	903	60	27.	1519	730	41.	745	130
14.	547	520	28.	4140	425	42.	4443	250

Vremena u radu i vremena u zastoju bagera SRs2000 (podaci iz šeste grupe)

r. br.	T_{i-r} , [min]	T_{i-o} , [min]	r. br.	T_{i-r} , [min]	T_{i-o} , [min]	r. br.	T_{i-r} , [min]	T_{i-o} , [min]
1.	12680	1900	33.	1061	150	65.	21097	155
2.	1196	30	34.	112	100	66.	3239	270
3.	2086	35	35.	4534	460	67.	3383	130
4.	3146	30	36.	4393	155	68.	7114	180
5.	933	40	37.	17135	1900	69.	1867	495
6.	1142	30	38.	581	400	70.	13725	145
7.	4081	620	39.	6324	550	71.	26604	150
8.	1769	105	40.	1098	375	72.	7971	220
9.	629	100	41.	575	80	73.	7711	190
10.	204	40	42.	543	55	74.	650	130
11.	1094	35	43.	425	50	75.	1208	120
12.	671	540	44.	917	100	76.	649	145
13.	340	40	45.	854	245	77.	590	300
14.	1417	30	46.	11254	1220	78.	5094	210
15.	1472	710	47.	348	830	79.	1305	120
16.	6315	1490	48.	6210	105	80.	3335	110
17.	213	80	49.	1367	660	81.	3908	150
18.	413	55	50.	978	95	82.	3226	150
19.	821	240	51.	634	390	83.	4649	115
20.	7457	150	52.	4045	890	84.	1010	580
21.	284	40	53.	930	50	85.	4945	450
22.	694	140	54.	644	150	86.	255	100
23.	3477	200	55.	7303	850	87.	10801	405
24.	1506	450	56.	407	50	88.	6511	110
25.	493	200	57.	720	115	89.	711	150
26.	4033	500	58.	4024	580	90.	17089	130
27.	1754	240	59.	2312	105	91.	4186	1290
28.	5835	900	60.	23641	525	92.	269	3270
29.	3917	105	61.	917	850	93.	26434	220
30.	555	110	62.	20165	480	94.	1154	600
31.	4124	100	63.	3776	205			
32.	513	300	64.	9593	185			

Vremena u radu i vremena u zastoju bagera SRs2000 (podaci iz sedme grupe)

r. br.	T_{i-r} , [min]	T_{i-o} , [min]	r. br.	T_{i-r} , [min]	T_{i-o} , [min]	r. br.	T_{i-r} , [min]	T_{i-o} , [min]
1.	9356	160	22.	1087	210	43.	3510	225
2.	17071	2395	23.	13881	135	44.	1199	375
3.	6886	150	24.	13910	295	45.	1454	720
4.	1163	145	25.	3643	140	46.	0	380
5.	2449	235	26.	0	120	47.	739	190
6.	13938	295	27.	797	180	48.	4778	105
7.	2438	260	28.	19609	2910	49.	3822	275
8.	7744	230	29.	8669	1750	50.	7596	295
9.	11587	1455	30.	6791	405	51.	3170	570
10.	8101	470	31.	10934	445	52.	23650	6480
11.	304	1290	32.	5963	250	53.	7133	10930
12.	17443	2205	33.	4156	155	54.	0	10800
13.	6459	490	34.	625	110	55.	2321	170
14.	2837	290	35.	2645	165	56.	1438	180
15.	12171	2420	36.	9931	110	57.	5639	155
16.	2276	125	37.	10258	1315	58.	5401	1575
17.	5647	1520	38.	0	235	59.	8357	2150
18.	3606	455	39.	1359	610	60.	5425	340
19.	31741	160	40.	274	940	61.	22849	5100
20.	5080	135	41.	3772	110	62.	2880	390
21.	36416	240	42.	6020	3100			

Vremena u radu i vremena u zastoju bagera SRs2000 (podaci iz osme grupe)

r. br.	T_{i-r} , [min]	T_{i-o} , [min]	r. br.	T_{i-r} , [min]	T_{i-o} , [min]	r. br.	T_{i-r} , [min]	T_{i-o} , [min]
1.	4646	140	15.	405	195	29.	2483	50
2.	4577	12160	16.	494	240	30.	458	95
3.	465	195	17.	1435	360	31.	2520	1650
4.	7818	290	18.	993	200	32.	414	1450
5.	9202	1750	19.	1532	150	33.	1113	50
6.	8471	155	20.	1673	125	34.	271	150
7.	3192	125	21.	577	100	35.	2532	200
8.	1992	75	22.	651	80	36.	2026	3260
9.	1962	120	23.	1575	100	37.	14265	1850
10.	3893	1980	24.	5765	5180	38.	1430	290
11.	1055	120	25.	2352	1550	39.	609	160
12.	2128	250	26.	413	240	40.	353	750
13.	1356	115	27.	273	50	41.	6049	120
14.	1472	180	28.	1755	100	42.	12461	3650

Prilog broj 4 – Datoteka sa kodom za aplikativnu formu modela procene rizika

```
1. import pandas as pd
2. import numpy as np
3. import matplotlib.pyplot as plt
4.
5. def input_data(file_name):
6.     """ funkcija za univerzalno učitavanje .csv dokumenta
7.     """
8.     result = pd.read_csv(file_name + ".csv")
9.
10.    return result
11.
12.    AHP_input=input_data("AHP_in")
13.
14.    def ahp_calculation(AHP_input):
15.        """ ulaz: .csv dokument AHP podataka
16.            izlaz: DataFrame sa rezultatima AHP težinski koeficijenti
17.            korak 1: na kopiji DataFrame naziv indeksa usklađen sa nazivom kolona
18.            korak 2: množenje matrice
19.            korak 3: zbir redova
20.            korak 4: normalizacija i rešenje AHP metode
21.        """
22.
23.        working_file=AHP_input.copy()
24.        working_file = working_file.set_index(working_file.columns)
25.        working_file = working_file.dot(working_file)
26.        working_file_sum=working_file.sum(axis=1)
27.        AHP_weight = working_file_sum.div(working_file_sum.sum())
28.        AHP_weight.columns=["Wi"]
29.
30.        return AHP_weight
31.
32.    AHP_weight = ahp_calculation(AHP_input)
33.
34.    def ahp_consistecny_check(AHP_input, AHP_weight):
35.        """ ulaz:.csv dokument i rezultati AHP metode
36.            vrednosti (RI) definisane su kao DataFrame u zavisnosti od broja parametara (n)
37.            broj parametara (n) se integriše u zavisnosti od veličine ulaznog csv.
38.            izlaz: jedan broj (CR) - indeks konzistentnosti
39.            korak 1: sabrati kolone ulaznog DataFrame
40.            korak 2: izračunavanje  $\lambda$  i  $\sum \lambda$ 
41.            korak 3: očitavanje (RI) iz tabele u zavisnosti od broja podataka (n)
42.            korak 4: izračunavanje koeficijenata (CI) and (CR)
43.        """
44.        RI_tab={
45.            '1':0,
46.            '2':0,
47.            '3':0.58,
48.            '4':0.89,
49.            '5':1.12,
50.            '6':1.24,
51.            '7':1.32,
52.            '8':1.41,
53.            '9':1.45,
54.            '10':1.49,
55.            '11':1.51,
56.            '12':1.48,
57.            '13':1.56,
58.            '14':1.57,
59.            '15':1.59,
60.        }
61.
```

```

62.     Input_working=AHP_input.copy()
63.     weight_working=AHP_weight.copy()
64.     column_sum=Input_working.sum(axis=0)
65.     lambd=column_sum*weight_working
66.     lambd = lambd.sum()
67.     RI = RI_tab[str(len(AHP_input.index))]
68.     n = len(AHP_input.index)
69.     CI=abs((lambd-n)/(n-1))
70.     CR=CI/RI
71.     format_value="{:.5f}".format(CR)
72.     CR=float(format_value)
73.
74.     return CR
75.
76. def fuzzy_proposition():
77.     """ formiranje oblika fazi skupova
78.     ulaz: /
79.     izlaz: DataFrame sa oblikom fazi skupova
80.     """
81.     sets={
82.         '1':['0', '0', '0', '0', '1'],
83.         '2':['0', '0', '0', '0', '1'],
84.         '3':['0', '0', '0', '1', '0'],
85.         '4':['0', '0', '0', '1', '0'],
86.         '5':['0', '0', '1', '0', '0'],
87.         '6':['0', '0', '1', '0', '0'],
88.         '7':['0', '1', '0', '0', '0'],
89.         '8':['0', '1', '0', '0', '0'],
90.         '9':['1', '0', '0', '0', '0'],
91.         '10':['1', '0', '0', '0', '0'],
92.     }
93.     grades=['A', 'B', 'C', 'D', 'E']
94.     fuzzy_s=pd.DataFrame(sets, index=grades)
95.
96.     return fuzzy_s
97.
98. fuzzy_s=fuzzy_proposition()
99. fuzzy_input=input_data("Fuzzy_input")
100. fuzzy_input=fuzzy_input.set_index(AHP_input.columns)
101.
102. def fuzzification(fuzzy_s, fuzzy_input):
103.     """ mapiranje ulaznih podataka na fazi skupove
104.     ulaz: 2DF - .csv sa ekspertskim ocenama i fazi skup iz propozicije
105.     izlaz: podaci za fazi kompoziciju
106.     """
107.     fuzzy_s=fuzzy_s.astype(float)
108.     fuzzy_input=fuzzy_input.astype(float)
109.
110.     fuzzy_p = {}
111.     for fuzzy_input_index, row in fuzzy_input.iterrows():
112.         fuzzy_p[str(fuzzy_input_index)] = []
113.         for column in fuzzy_s.columns:
114.             calculation = 0
115.             for fuzzy_s_index, fuzzy_s_row in fuzzy_s.iterrows():
116.                 calculation+=fuzzy_s.loc[fuzzy_s_index, column]*fuzzy_input.loc[fuzzy_input_index, fuzzy_s_index]
117.             fuzzy_p[fuzzy_input_index].append(calculation)
118.         scale = list(range(1, len(fuzzy_s.columns) + 1))
119.         fuzzy_propos=pd.DataFrame(fuzzy_p, index=scale)
120.
121.     return fuzzy_propos
122.
123. fuzzy_propos=fuzzification(fuzzy_s, fuzzy_input)
124.

```

```

125. def composition_TOPSIS(fuzzy_propos, AHP_weight):
126.     """ kompozicija fazi modela
127.         ulaz: mapirane vrednosti iz fazifikacije i AHP težinski koeficijenti
128.         izlaz: DataFrame sa raspodelom j od 1 do 10
129.             korak 1: normalizacija vrednosti
130.             korak 2: otežavanjem korišćenjem AHP težinskih koeficijenata
131.             korak 3: pronalaženje idealnog i anti-idealnog rešenja (bez nule)
132.             korak 4: određivanje distance od idealnog i anti-idealnog rešenja
133.             korak 5: rezultati kompozicije modela
134.     """
135.     fuzzy_top_norm = fuzzy_propos/np.sqrt(np.power(fuzzy_propos,2).sum(axis=0))
136.     fuzzy_top_weight=fuzzy_top_norm*AHP_weight
137.     positive_ideal = fuzzy_top_weight.max()
138.     nonzero = fuzzy_top_weight[fuzzy_top_weight !=0]
139.     negative_ideal = nonzero.min()
140.     SM_P = np.sqrt(np.power(fuzzy_top_weight-positive_ideal,2).sum(axis=1))
141.     SM_N = np.sqrt(np.power(fuzzy_top_weight-negative_ideal,2).sum(axis=1))
142.     R=SM_N/(SM_P+SM_N)
143.
144.     return R
145.
146. R=composition_TOPSIS(fuzzy_propos, AHP_weight)
147.
148. def fuzzy_identification(R, fuzzy_s):
149.     """ ulaz: DataFrame fazi propozicije i fazi kompozicije
150.         izlaz: DataFrame sa raspodelom nivoa rizika od A do E
151.             korak 1: izračunavanje distance (d)
152.             korak 2: definisanje minimalne vrednosti (dmin) iz (d)
153.             korak 3: određivanje relativnog rastojanja (a)
154.             korak 4: normalizacija (b)
155.     """
156.     fuzzy_s=fuzzy_s.astype(float)
157.     R=R.astype(float)
158.
159.     d_values = {}
160.     iter_count = 1
161.     for fuzzy_s_index, fuzzy_s_row in fuzzy_s.iterrows():
162.         row = fuzzy_s_row.astype(float)
163.         calculation = 0
164.         for value in row.index:
165.             calculation += (R.loc[int(value)] - row.loc[value]) ** 2
166.         calculation = np.sqrt(calculation)
167.         d_values['d' + str(iter_count)] = calculation
168.         iter_count +=1
169.
170.     dmin = min(d_values, key = d_values.get)
171.
172.     a_values = {}
173.     iter_count = 1
174.     asum = 0
175.     calculation = 0
176.     for value in d_values.values():
177.         calculation = 1 / (value / d_values[dmin])
178.         a_values['a' + str(iter_count)] = calculation
179.         asum += calculation
180.         iter_count += 1
181.     b_values = []
182.     for value in a_values.values():
183.         b_values.append(value / asum)
184.     identification = pd.DataFrame(b_values, index = fuzzy_s.index.values.tolist() )
185.     identification.columns=['R( $\mu$ )']
186.
187.     return identification
188. identification=fuzzy_identification(R, fuzzy_s)

```

```

189.
190.
191. def chart(identification):
192.     """ formiranje stubastog dijagrama raspodele rizika
193.         ulaz: DataFrame rezultata Identifikacije
194.         tip podatka: List
195.     """
196.     groups = identification.index
197.     y_position = np.arange(len(groups))
198.     values = identification['R( $\mu$ )'].tolist()
199.     plt.bar(y_position, values, align = "center", alpha = 0.5 )
200.     plt.xticks(y_position, groups)
201.     plt.ylabel("R( $\mu$ )")
202.     plt.title("Nivo rizika")
203.     plt.show()
204.
205.     return plt
206.
207.
208. def comments (identification):
209.     rsl=identification.copy()
210.     comm={
211.         'A':['Veoma visok rizik'],
212.         'B':['Visok rizik'],
213.         'C':['Umeren rizik'],
214.         'D':['Nizak rizik'],
215.         'E':['Veoma nizak rizik'],
216.     }
217.     comment=pd.DataFrame(comm)
218.     comment=comment.T
219.     rslt=pd.concat([rsl, comment], axis = 1)
220.
221.     return rslt
222.
223.
224. def defuzification(identification):
225.     """ defazifikacija vrednosti iz identifikacije
226.         ulaz: DataFrame iz identifikacije
227.         tip podatka: Series
228.         izlaz: Dataframe sa vrednostima rizika i mere rasipanja
229.         korak 1: formira se lista sa ocenama od 1 do 5 u skladu sa ocenama od A do E
230.         korak 2: mapiranje rezultata defazifikacijom
231.         korak 3: izračunavanje disperzije preko standardne devijacije
232.         korak 4: formiranje DataFrame sa rezultatima i disperzijom
233.     """
234.     identification=identification.astype(float)
235.     risk_mtx=pd.DataFrame([5,4,3,2,1], index=list('ABCDE'))
236.     risk_mtx.columns=['R( $\mu$ )']
237.
238.     Z=identification.mul(risk_mtx).sum(axis=0)
239.     Z.to_frame()
240.
241.     S=identification.std()
242.     S.to_frame()
243.
244.     results=Z.append(S, ignore_index=True)
245.     results.index=['Zi - Vrednost rizika', 'Si - Mera rasipanja']
246.     results.columns=['Values']
247.
248.     return results
249.
250. results = defuzification(identification)
251.
252.

```



```
253. def risk_values(identification):
254.     """ mapiranje rezultata na različite skale rizika
255.         ulaz: DataFrame iz identifikacije
256.         izlaz: DataFrame sa svim vrednostima
257.             korak 1: mapiranje na FMECA skalu
258.             korak 2: mapiranje na FMEA skalu
259.             korak 3: mapiranje na matricu rizika
260.             korak 4: formiranje jednog DataFrame koji sadrži sve rezultate
261.     """
262.     identification=identification.astype(float)
263.
264.     RPN_FMECA=pd.DataFrame([1000,750.25,500.5,250.75,1], index=list('ABCDE'))
265.     RPN_FMECA.columns=['R( $\mu$ )']
266.     RPN_FMECA=identification.mul(RPN_FMECA).sum(axis=0)
267.     RPN_FMECA.to_frame()
268.
269.     RPN_FMEA=pd.DataFrame([125,94,63,32,1], index=list('ABCDE'))
270.     RPN_FMEA.columns=['R( $\mu$ )']
271.     RPN_FMEA=identification.mul(RPN_FMEA).sum(axis=0)
272.     RPN_FMEA.to_frame()
273.
274.     MTX=pd.DataFrame([25,19,13,7,1], index=list('ABCDE'))
275.     MTX.columns=['R( $\mu$ )']
276.     MTX=identification.mul(MTX).sum(axis=0)
277.     MTX.to_frame()
278.
279.     p=RPN_FMECA.append(RPN_FMEA, ignore_index=True)
280.     present=p.append(MTX, ignore_index=True)
281.     present.index=['RPN Fmeca', 'RPN Fmea','Risk matrix']
282.     results.columns=['Values']
283.
284.     return present
```

Prilog broj 5 – Datoteka sa kodom za vizuelizaciju modela procene rizika

```

1.     import Risk_evaluation
2.
3.     import pandas as pd
4.     import streamlit as st
5.     import numpy as np
6.     import matplotlib.pyplot as plt
7.
8.     st.set_page_config(layout="wide")
9.
10.    st.title("""Model za procenu rizika""")
11.
12.    st.subheader("Ulazni podaci")
13.
14.    col1, col2 = st.columns(2)
15.
16.    col1.subheader("Ulazne ocene za rangiranje parcijalnih indikatora")
17.    AHP_input=col1.file_uploader("Unesi AHP ulazni .csv dokument")
18.
19.    col2.subheader("Ulazne ocene rizika za slaba mesta")
20.    fuzzy_input=col2.file_uploader("Unesi Fuzzy ulazni .csv dokument")
21.
22.    col3, col4 = st.columns(2)
23.
24.    col3.subheader("Rezultati težina parcijalnih indikora")
25.    if AHP_input is not None:
26.        AHP_input=pd.read_csv(AHP_input)
27.        AHP_weight = Risk_evaluation.ahp_calculation(AHP_input)
28.        AHP_weight_results=pd.DataFrame({"parameters":AHP_weight.index, "Wi":AHP_weight.values})
29.
30.        AHP_weight_results=AHP_weight_results.set_index("parameters")
31.    col3.table(AHP_weight_results)
32.
33.    col4.subheader("Provera konzistentnosti donosioca odluke AHP metode")
34.    CR_test = Risk_evaluation.ahp_consistecny_check(AHP_input, AHP_weight)
35.    col4.write('Izračunata vrednosti **Random Consistency Index (**CR**)** je ' + str(CR_test))
36.
37.    if CR_test < 0.1:
38.        col4.write("""Konzistentnost je u dozvoljenim granicama (**CR<0.1**) !""")
39.    else:
40.        col4.write("Konzistentnost je iznad dozvoljenih granica (**CR>0.1**)! Proverite ulazne
podatke")
41.
42.    fuzzy_s=Risk_evaluation.fuzzy_proposition()
43.    fuzzy_input=pd.read_csv(fuzzy_input)
44.    fuzzy_input=fuzzy_input.set_index(AHP_input.columns)
45.
46.    col5, col6 = st.columns(2)
47.
48.    col5.subheader("Result of risk model: risk distribution on levels")
49.    if fuzzy_input is not None:
50.        fuzzy_propos=Risk_evaluation.fuzzification(fuzzy_s, fuzzy_input)
51.        R=Risk_evaluation.composition_TOPSIS(fuzzy_propos, AHP_weight)
52.        identifikation=Risk_evaluation.fuzzy_identifikation(R, fuzzy_s)
53.        rslt=Risk_evaluation.comments(identifikation)
54.        rslt.columns=['R( $\mu$ ) - raspodela vrednosti rizika', 'linguistički opis']
55.    col5.table(rslt)
56.
57.    col5.subheader("Vrednost rizika")
58.    results =Risk_evaluation.defuzification(identifikation)
59.    col5.table(results)

```

```
60.  
61.     col5.subheader("Mapirane vrednosti na različite skale rizika")  
62.     present =Risk_evaluation.risk_values(identification)  
63.     col5.table(present)  
64.  
65.     col6.subheader("Grafički prikaz rezultata")  
66.     col6.pyplot(Risk_evaluation.chart(identification))
```

BIOGRAFIJA

Stevan Đenadić, master inženjer rudarstva i master inženjer mašinstva, rođen je 28.07.1993. u Lazarevcu, gde je završio osnovnu školu i gimnaziju na prirodno-matematičkom smeru.

Osnovne akademske studije završio je 2017. na Univerzitetu u Beogradu, na Rudarsko-geološkom fakultetu, na modulu Površinska eksploatacija ležišta mineralnih sirovina, prosečnom ocenom 9,48 (devet i 48/100), a 2018. na modulu Mehanizacija u rudarstvu master studije, prosečnom ocenom 10,00 (deset, 00/100). Kao odličan student, tokom osnovnih i master studija, bio je stipendista Republike Srbije i grada Lazarevca. Nagrađen je za najboljeg studenta master studija u generaciji i za akademski projekat na Međunarodnom sajmu Energetike u Beogradu.

Doktorske akademske studije na Univerzitetu u Beogradu, na Rudarsko-geološkom fakultetu, na studijskom programu Rudarsko inženjerstvo, upisao je 2018. Položio je sve ispite prosečnom ocenom 10,00 (deset, 00/100).

Master akademske studije na Univerzitetu u Nišu, na Mašinskom fakultetu, na studijskom programu Mašinske konstrukcije, razvoj i inženjering, upisao je 2019., a u februaru 2021. završio prosečnom ocenom 9,22 (devet i 22/100).

Decembra 2018., izabran je za asistenta na Rudarsko-geološkom fakultetu, na Katedri za Mehanizaciju rudnika, za užu naučnu oblast „Mehanizacija u rudarstvu i energetici“.

Učesnik je projekta koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (TR035040). Član je organizacije SOMP (*Society of Mining Professors*).

Položio je stručni ispit za obavljanje poslova pri eksploataciji mineralnih sirovina, propisan Zakonom o rudarstvu.

Koautor je udžbenika „Mašine i pomoćni radovi na površinskim kopovima“. Objavio je 31 rad u domaćim i istaknutim međunarodnim časopisima. Učestvovao je u izradi nekoliko studija, projekata i tehničkih kontrola.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Стеван Ђенадић

Број индекса P704/18

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Развој синтезног модела управљања ризиком код роторних багера

- 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 Стеван Ђенадић

Број индекса P704/18

Студијски програм Рударско инжењерство

Наслов рада Развој синтезног модела управљања ризиком код роторних багера

Ментор др Предраг Јованчић, редовни професор

др Милош Танасијевић, редовни професор

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

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

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

Потпис аутора

У Београду, _____

Изјава о коришћењу

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

Развој синтезног модела управљања ризиком код роторних багера

која је моје ауторско дело.

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

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

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

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

Потпис аутора

У Београду, _____
