UNIVERZITET U BEOGRADU
RUDARSKO-GEOLOŠKI FAKULTET

Ivan V. Janković

OPTIMIZACIJA KONCEPTA ŽIVOTNOG VEKA POMOĆNE MEHANIZACIJE NA POVRŠINSKIM KOPOVIMA LIGNITA

doktorska disertacija

Beograd, 2020.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MINING AND GEOLOGY

Ivan V. Janković

OPTIMISATION OF THE LIFE CYCLE CONCEPT OF AUXILIARY MACHINERY AT LIGNITE OPEN-PIT MINES

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2020

KOMISIJA

Mentor:

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

Članovi komisije:

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

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

dr Tomislav Šubaranović, docent
Uža naučna oblast: Površinska eksploatacija ležišta mineralnih sirovina
Univerzitet u Beogradu – Rudarsko-geološki fakultet

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

Datum odbrane: _____

OPTIMIZACIJA KONCEPTA ŽIVOTNOG VEKA POMOĆNE MEHANIZACIJE NA POVRŠINSKIM KOPOVIMA LIGNITA

SAŽETAK

Veliki broj različitih mašina pomoćne mehanizacije na površinskim kopovima lignita sa kontinualnim radnim procesom, kao i veliki troškovi rada, i posebno imajući u vidu relativno kratak period korišćenja imperativno nameću potrebu za optimizacijom upravljanja životnim vekom ovih mašina. Budući da se ovde radi o serijskim mašinama, svakako najvažniji period je period eksploatacije koji sa svoje strane ima definisane periode počev od probnog rada, preko redovne eksploatacije pa do otpisa. U okviru eksploatacije postoje takođe jasno definisani periodi počev od „ekonomskog životnog veka“ pa do „fizičkog“ životnog veka između kojih su velike razlike u troškovima eksploatacije i dobiti koja se ostvaruje radom ove mehanizacije.

Zadatak upravljanja životnim vekom pomoćnih mašina je ostvarivanje maksimalnog mogućeg profita, što se postiže kroz ostvarivanje maksimalnih proizvodnih kapaciteta uz adekvatno upravljanje troškovima. Upravljanje životnim vekom podrazumeva sveobuhvatnu analizu rada i troškova eksploatacije i održavanja, kao i praćenje osnovnih pokazatelja rada kako bi se izvršila optimizacija životnog veka pomoćne mehanizacije na površinskim kopovima lignita. Međutim, u pogonskim uslovima često je praćenje troškova neažurno i nije moguće dobiti tačne troškove, a mašine se koriste do kraja životnog veka, pri čemu oni rastu daleko preko granice prihvatljivih troškova, a sa druge strane raspoloživost opada, što za posledicu ima veliki broj mašina na stanju a često nedovoljan broj mašina u radu.

Razvoj modela upravljanja životnim vekom pomoćne mehanizacije sadrži dva interaktivna modula, koji kao izlaz daju ocenu raspoloživosti dobijenu na bazi ekspertskog modela, i trendove raspoloživosti i troškova rada dobijene na bazi statističke obrade odgovarajućih ulaznih podataka. Ekspertski model, koji je ovde izvorno i originalno razvijen predstavlja rezultat fazi logičkog zaključivanja sa korekcijom ishoda dobijenog rangiranjem (AHP metoda). Verifikacija ekspertskog modela izvršena je korelacijom sa rezultatima dobijenim statističkom analizom vremenske slike stanja.

Rezultati rada ovog istraživanja mogu se primeniti na površinskim kopovima lignita u cilju brzog i efikasnog određivanja optimalnog vremena zamene i pravilnog izbora mašina pomoćne mehanizacije. Na osnovu predloženog modela mogu se doneti zaključci o vrsti mašina koji najbolje odgovaraju konkretnim uslovima radne sredine bez obzira na početna investiciona ulaganja jer se tokom životnog veka različite mašine različito ponašaju u funkciji pada raspoloživosti i rasta troškova.

Primenjena metoda može unaprediti upravljanje životnim vekom i znatno uticati na smanjenje operativnih troškova kao i smanjenje inventarskog parka mašina, odnosno, manja investiciona ulaganja. Takođe, može se odrediti kakav je trend pada raspoloživosti i koja mašina je najekonomičnija.

Predloženi model je verifikovan kroz studiju slučaja koja je urađena za najvažnije pomoćne mašine dozere, cevopolagače i hidraulične bagere. Dobijeni rezultati su pokazali da je model veoma prihvatljiv za dozere kod kojih je utvrđena velika korelacija između vremena rada i pada raspoloživosti, kao i vremena rada i rasta troškova. Kod cevopolagača i hidrauličnih bagera gde nije utvrđena pomenuta korelacija nisu dobijeni zadovoljavajući rezultati. Razlog za ovo leži u značaju, načinu i vremenu korišćenja, održavanja i metodologiji vođenja podataka vezanih za raspoloživost i troškove.

Ključne reči: životni vek, pomoćna mehanizacija, raspoloživost, fazi zaključivanje, AHP metoda, troškovi.

Naučna oblast:

Rudarsko inženjerstvo

Uža naučna oblast:

Mehanizacija u rudarstvu i energetici.

Površinska eksploatacija ležišta mineralnih sirovina.

UDK:

519.245:519.863(043.3)
536.7:553.9
622:007.5:622.23.05
622.271(043.3)

OPTIMISATION OF THE LIFE CYCLE CONCEPT OF AUXILIARY MACHINERY AT LIGNITE SURFACE MINES

ABSTRACT

A large number of different auxiliary machines on lignite surface mines with continuous working process, as well as high labour costs, and especially given the relatively short period of use, strongly impose the need to optimise the life cycle management of these machines. Since these are serial machines, certainly the most important period is the period of exploitation, which in turn has defined periods starting from trial run, through regular exploitation to write-off. Within the scope of exploitation, there are also clearly defined periods, starting from the "economic life cycle" to the "physical" life cycle, between which there are large differences in the costs of exploitation and the benefit generated by the operation of this machinery.

The task of managing the life cycle of auxiliary machines is to maximise profits, which is achieved by maximising production capacities with adequate cost management. Lifecycle management involves a comprehensive analysis of exploitation and maintenance costs, as well as the monitoring of basic performance indicators in order to optimise the life cycle of auxiliary machinery at lignite surface mines. However, in operating conditions, cost monitoring is often un time lyand exact costs cannot be obtained, while machines are used until the end of their life cycle, with them growing far beyond the acceptable cost limit. On the other hand, availability declines, resulting in a large number of machines in stock and often not enough machines in operation.

The development of the life cycle management model for the auxiliary machinery contains two interactive modules, which provide an output in the form of estimate of the availability obtained on the basis of the expert model, as well as trends of availability and labour costs obtained through the statistical processing of the relevant input data. The expert model, which is originally developed here, is the result of fuzzy logical reasoning with an outcome correction obtained by ranking (AHP method). Verification of the expert model was performed by correlation with the results obtained by the statistical analysis of the time image of the situation.

The results of this study can be applied to lignite surface mines in order to quickly and efficiently determine the optimal replacement time and the correct selection of auxiliary machinery. Based on the proposed model, conclusions can be drawn about the type of machines that best fits the specific working environment, regardless of the initial investment, because over their life cycle, different machines behave differently in terms of availability decline and cost increase.

The applied method can improve life cycle management and significantly reduce operating costs as well as reduce inventory of machinery, i.e., reduce investments. In addition to that, it is possible to determine the trend of availability reduction and which machine is the most economical.

The proposed model was verified through a case study that was done for the most important auxiliary machines dozers, pipelayers and hydraulic excavators. The results obtained show that the model is very acceptable for dozers with a high correlation between running time and availability decline, as well as running time and rising costs. In the case of pipelayers and hydraulic excavators where no such correlation was found, satisfactory results were not obtained. The reason for this lies in the importance, manner and time of use, maintenance and methodology of keeping data related to availability and cost.

Keywords: life cycle, auxiliary machinery, availability, fuzzy logic, AHP method, costs

Scientific field:

Mining engineering

Scientific subfield:

Machinery in mining and energy,

Surface exploitation of mineral deposits

UDC:

519.245:519.863(043.3)
536.7:553.9
622:007.5:622.23.05
622.271(043.3)

SADRŽAJ

1. UVOD 1
1.1. Predmet istraživanja 8
1.2 Cilj istraživanja 8
1.3. Osnovne hipoteze 9
1.4. Metodologija istraživanja i primenjene metode istraživanja 9
1.5. Naučni doprinos disertacije 11
1.6. Primenljivost rezultata disertacije 11
1.7. Struktura disertacije sa kratkim pregledom poglavlja 11
2. POMOĆNI RADOVI I PRIMENJENA POMOĆNA MEHANIZACIJA NA POVRŠINSKIM KOPOVIMA LIGNITA 13
2.1. Obim i struktura pomoćnih radova na površinskim kopovima lignita 13
2.2. Primenjena mehanizacija za obavljanje pomoćnih radova na površinskim kopovima lignita 17
3. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA U OBLASTI UPRAVLJANJA ŽIVOTNIM VEKOM RUDARSKE MEHANIZACIJE 19
3.1 Pregled istraživanja u Srbiji i svetu 19
4. ŽIVOTNI VEK RUDARSKIH MAŠINA 27
4.2. Pokazatelji životnog veka rudarskih mašina 29
4.2.1 Pouzdanost i pogodnost održavanja 30
4.2.2. Raspoloživost i sigurnost funkcionisanja 36
4.2.3. Kritička analiza tehničkih pojmova životnog veka 39
4.3 Troškovi životnog veka 40
4.3.1 Procena troškova životnog veka 41
4.3.2 Troškovi vlasništva 42
4.3.3 Operativni troškovi 44
4.3.3 Troškovi radne snage 47
5. MODELI EKONOMSKE TEORIJE ZAMENE RUDARSKIH MAŠINA 48
5.1 Minimiziranje (smanjenje) troška 49
5.2 Maksimiziranje (povećavanje) profita 50
5.3. Teorija limita popravke 51
5.4 Model kumulativnog troška 52
6. EKSPERTSKI MODELI PRAĆENJA ŽIVOTNOG VEKA RUDARSKIH MAŠINA 55
6.1 Višektirerijumski modeli 55
6.1.1 Analitičko hijerarhijski proces (AHP) 55
6.2 Fazi teorija 58

6.2.1 Osnovni pojmovi iz teorije fazi skupova 59
6.2.2 Fazi broj 64
6.2.3 Lingvistička vrednost i lingvistička promenjiva 68
6.2.4 Fazi relacije 70
7. RAZVOJ MATEMATIČKOG I KONCEPCIJSKOG MODELA PRAĆENJA ŽIVOTNOG VEKA RUDARSKIH MAŠINA 72
7.1. Ekspertski fazi AHP sintezni model 73
7.1.1 Fazi zaključivanje u sinteznom modelu 73
7.1.2. AHP model rangiranja 77
7.2 Određivanje trenda pada raspoloživosti postojećih mašina 79
7.3 Ekonomski modeli praćenja – određivanje optimalnog vremena zamena preko troškova eksploatacije 79
7.3.1 Određivanje optimalnog vremena zamena TE (ekonomski život sa profitom) 79
7.3.2 Određivanje optimalnog vremena zamena TP (ekonomski život sa maksimalnim profitom) 80
7.4 Primenjene metode za analizu zavisnosti 82
7.4.1 Fitovanje 82
7.4.2 Metoda najmanjih kvadrata 83
7.4.3 Korelacija 84
8. STUDIJA SLUČAJA 86
8.1. Opšta analiza ekonomskih i tehničkih pokazatelja izabranih mašina pomoćne mehanizacije 86
8.2. Model optimalnog vremena zamene dozera 88
8.2.1. Model procene raspoloživosti na bazi ekspertskih modela 88
8.2.2 Model za procenu ekonomskog životnog veka mašine sa maksimalnim profitom t_1 95
8.2.3. Model za procenu ekonomskog života mašina t_2 - Analiza troškova izabranih mašina na bazi empirijskih podataka 99
8.2.4. Model za procenu životnog veka mašina t_3 - Analiza raspoloživosti izabranih mašina na bazi empirijskih podataka 101
8.2.5 Sintezna analiza za dozere 104
8.3. Model optimalnog vremena zamene cevopolagača 107
8.3.1 Model procene raspoloživosti na bazi ekspertskih modela 107
8.3.2. Model za procenu ekonomskog životnog veka mašine sa maksimalnim profitom t_1 109
8.3.3 Model za procenu ekonomskog života mašina t_2 - Analiza troškova izabranih mašina na bazi empirijskih podataka 114
8.2.4 Model za procenu životnog veka mašina t_3 - Analiza raspoloživosti izabranih mašina na bazi empirijskih podataka 116
8.3.5 Sintezna analiza za cevopolagače 118
8.4. Model optimalnog vremena zamene hidrauličnih bagera 120

8.4.1 Model procene raspoloživosti na bazi ekspertskih modela 120
8.4.2. Model za procenu ekonomskog životnog veka mašine sa maksimalnim profitom t_1 122
8.4.3 Model za procenu ekonomskog života mašina t_2 - Analiza troškova izabranih mašina na bazi empirijskih podataka 127
8.4.4 Model za procenu životnog veka mašina t_3 - Analiza raspoloživosti izabranih mašina na bazi empirijskih podataka 129
8.3.5 Sintezna analiza za hidraulične bagere 131
9. ZAKLJUČAK 134
10. LITERATURA 138
BIOGRAFIJA 143

SPISAK SLIKA

Broj	*Naziv slike*	*Strana*
Slika 1.1.	*Raspoloživost pomoćne mehanizacije u 2013. godini za RB Kolubara* [1]	3
Slika 1.2.	*Radni sati prema % očekivanog radnog veka za RB Kolubara: dozeri 28.100 mh, cevopolagači 15.700 mh, hidraulični bageri 12.250 mh*[1]	3
Slika 1.3	*Relacija između efektivnog radnog vremena i profita koji se ostvaruje tokom životnog veka* [7]	5
Slika 1.4.	*Zavisnost efektivnog vremena rada i ukupnih radnih troškova dozera D8R, PR752, TD 25M na površinskim kopovima u RB Kolubara* [1]	5
Slika 1.5.	*Zavisnost efektivnog vremena rada i vremena planiranih i neplaniranih zastoja snažnih dozera na površinskim kopovima u RB Kolubara* [8]	5
Slika 1.6.	*Dijagram određivanja granične vrednosti troškova snažnih dozera na površinskim kopovima u RB Kolubara* [1]	6
Slika 1.7	*Prosečni troškovi za različite tipove dozera u RB Kolubara* [1]	6
Slika 1.8.	*Trend pada koeficijenta raspoloživosti dozera Shanghai PD 320Y-1 u kolubarskom basenu za prvih deset godina korišćenja* [1]	7
Slika 1.9.	*Koeficijent raspoloživosti dozera u kolubarskom basenu za prvih deset godina korišćenja* [1]	7
Slika 1.10	*Operativni troškovi pomoćne mehanizacije u RB Kolubara za period 2004-2017. (troškovi goriva, maziva, rezervnih delova i sirovina);*	7
Slika 1.11	*Algoritam istraživanja*	10
Slika 2.1.	*Prikaz osnovnih i pomoćnih radova na površinskom kopu* [3]	13
Slika 4.1.	*Kriva kade*	28
Slika 4.2.	*Prikaz uspostavljanja stacionarnog stanja sistema* [29] *Kriva 1. – otkazi prve generacije, kriva 2. – otkazi druge generacije, itd.*	28
Slika 4.3.	*Shematska zavisnost korišćenih pojmova vezanih za životni ciklus mašine*	29
Slika 4.4.	*Ponašanje funkcije intentiteta otkaza u zavisnosti od pouzdanosti*	32
Slika 4.5	*. Pogodnost održavanja i struktura njenih komponenti*	33
Slika 4.6.	*Konstrukcijska pogodnost održavanja i njena obeležja*	34
Slika 4.7.	*Funkcije pouzdanosti i pogodnosti održavanja*	34
Slika 4.8	*. Vremenska slika stanja* [17]	36
Slika 4.9.	*Odnos pouzdanosti R(t) i raspoloživosti A(t)* [17]	38
Slika 4.10.	*Troškovi životnog veka* [14]	40
Slika 4.11.	*Klasifikacija ukupnih troškova pomoćne mehanizacije*	41
Slika 4.12.	*Procentualno učešće sklopova u ukupnim kvarovima na dozerima u RB Kolubara* [1]	45
Slika 4.13.	*Rast troškova popravke i kretanje prosečnih troškova popravke* [1]	46
Slika 5.1.	*Model minimiziranja troška* [14]	49
Slika 5.2.	*Model maksimiziranja profita* [24]	50
Slika 5.3.	*Model limita popravke* [46, 47] *(posle Drinkwater-a i Hastings-a, 1967.)*	52
Slika 5.4.	*Model kumulativnog troška* [49]	53
Slika 6.1	*Shematski prikaz AHP metode* [16]	56
Slika 6.2.	*Satijeva skala relativnog odnosa*	57
Slika 6.3.	*Grafički (Venov dijagram) prikaz skupova A i B, za slučaj kada jesu i kada nisu fazi skupovi*	59
Slika 6.4.	*Funkcija pripadnosti $\mu(x)$ fazi skupova A-E koji definišu klase raspoloživosti [17]*	61

Slika 6.5.	*Primer normalnog i sub-normalnog fazi skupa*	61
Slika 6.6.	*Fazi skup na levoj strani je konveksan, dok na desnoj strani nije*	62
Slika 6.7.	*Unija fazi skupova A i B*	63
Slika 6.8.	*Presek fazi skupova A i B*	63
Slika 6.9.	*Komplement fazi skupa A*	63
Slika 6.10.	*Zakon isključenja trećeg u klasičnoj teorij skupova važi (gornja slika) ali u teoriji fazi skupova ne važi (donja slika)* [64]	64
Slika 6.11	*. Fazi skupovi koji jesu (A i B) i koji nisu fazi brojevi (C – ne ispunjava uslov normalnosti i D ne ispunjava uslov konveksnosti)*	65
Slika 6.12.	*Fazi broj, interval poverenja i stepen sigurnosti*	65
Slika 6.13.	*Trouglasta funkcija pripadnosti*	66
Slika 6.14.	*Trapezoidna funkcija pripadnosti*	66
Slika 6.15.	*Interval kao funkcija pripadnosti*	67
Slika 6.16.	*Gausova funkcija pripadnosti*	67
Slika 6.17.	*Operatori modifikacije* [64]	70
Slika 7.1.	*Algoritam fazi modela*	74
Slika 7.2.	*Zavisnost lingvističke promenljive i funkcije pripadnosti, opšti oblik* [17]	75
Slika 7.3	*Saaty skala*	78
Slika 7.4.	*Troškovi eksploatacije mašine* [74]	81
Slika 7.5 .	*Empirijska formula i interpolacioni polinom* [75]	83
Slika 8.1.	*Grafički prikaz ocena raspoloživosti (skala 0-5) primenom Fazi-AHP metode za dozere*	94
Slika 8.2.	*Funkcija kumulativnih troškova održavanja f(t) i ukupnih troškova eksploatacije za mašinu Liebherr PR752/754*	95
Slika 8.3.	*Funkcija prosečnih troškova za mašinu Liebherr PR752/754*	96
Slika 8.4.	*Prvi i drugi izvod funkcije prosečnih troškova za mašinu Liebherr PR752/754*	96
Slika 8.5.	*Funkcija kumulativnih troškova održavanja f(t) i ukupnih troškova eksploatacije za mašinu Caterpillar D8R*	97
Slika 8.6.	*Funkcija prosečnih troškova za mašinu Caterpillar D8R*	97
Slika 8.7.	*Prvi i drugi izvod funkcije prosečnih troškova za mašinu Caterpillar D8R*	97
Slika 8.8.	*Funkcija kumulativnih troškova održavanja f(t) i ukupnih troškova eksploatacije za mašinu Dressta TD25M*	98
Slika 8.9.	*Funkcija prosečnih troškova za mašinu Dressta TD25M*	99
Slika 8.10.	*Prvi i drugi izvod funkcije prosečnih troškova za mašinu Dressta TD25M*	99
Slika 8.11.	*Trend rasta empirijske funkcije troškova i postupak određivanja kritične tačke za slučaj 70 = f (t_2), za mašinu Liebherr PR752/754*	100
Slika 8.12.	*Trend rasta empirijske funkcije troškova i postupak određivanja kritične tačke za slučaj 70 = f (t_2), za mašinu Caterpillar D8R*	100
Slika 8.13.	*Trend rasta empirijske funkcije troškova i postupak određivanja kritične tačke za slučaj 70 = f (t_2), za mašinu Dressta TD25M*	101
Slika 8.14.	*Trend pada empirijske funkcije raspoloživosti i postupak određivanja kritične tačke za slučaj 0,8 = f (t_3), za mašinu Liebherr PR752/754*	102
Slika 8.15.	*Trend pada empirijske funkcije raspoloživosti i postupak određivanja kritične tačke za slučaj 0,8 = f (t_3),za mašinu Caterpillar D8R*	103
Slika 8.16.	*Trend pada empirijske funkcije raspoloživosti i postupak određivanja kritične tačke za slučaj 0,8 = f (t_3),za mašinu Dressta TD25M*	103
Slika 8.17.	*Postupak aproksimacije ekspertskih ocena raspoloživosti sa kritičnim vrednostima t_1, t_2 i t_3 za mašinu Liebherr PR752/754*	104

Slika 8.18.	*Postupak aproksimacije ekspertskih ocena raspoloživosti sa kritičnim vrednostima t_1, t_2 i t_3 za mašinu Caterpillar D8R*	105
Slika 8.19.	*Postupak aproksimacije ekspertskih ocena raspoloživosti sa kritičnim vrednostima t_1, t_2 i t_3 za mašinu Dressta TD25M*	105
Slika 8.20.	*Uporedni prikaz aproksimativnih pravih linija raspoloživosti sa referentnim vrednostima A_i i t_1, t_2 i t_3 za sve analizirane dozere*	106
Slika 8.21.	*Grafički prikaz rezultata primene Fazi-AHP metode za cevopolagače*	109
Slika 8.22.	*Funkcija kumulativnih troškova održavanja f(t) i ukupnih troškova eksploatacije za mašinu Dressta TD25 CS-3*	110
Slika 8.23.	*Funkcija prosečnih troškova za mašinu Dressta TD25 CS-3*	110
Slika 8.24.	*Prvi i drugi izvod funkcije prosečnih troškova za mašinu Dressta TD25 CS-3*	111
Slika 8.25.	*Funkcija kumulativnih troškova održavanja f(t) i ukupnih troškova eksploatacije za mašinu Dressta SB60*	112
Slika 8.26.	*Funkcija prosečnih troškova za mašinu Dressta SB60*	112
Slika 8.27.	*Prvi i drugi izvod funkcije prosečnih troškova za mašinu Dressta SB60*	112
Slika 8.28.	*Funkcija kumulativnih troškova održavanja f(t) i ukupnih troškova eksploatacije za mašinu Liebherr RL52*	113
Slika 8.29.	*Funkcija prosečnih troškova za mašinu Liebherr RL52*	113
Slika 8.30.	*Prvi i drugi izvod funkcije prosečnih troškova za mašinu Liebherr RL52*	114
Slika 8.31.	*Trend rasta empirijske funkcije troškova i postupak određivanja kritične tačke za slučaj 70 = f (t_2), za mašinu Dressta TD25 CS-3*	114
Slika 8.32.	*Trend rasta empirijske funkcije troškova i postupak određivanja kritične tačke za slučaj 70 = f (t_2), za mašinu Dressta SB60*	115
Slika 8.33.	*Trend rasta empirijske funkcije troškova i postupak određivanja kritične tačke za slučaj 70 = f (t_2), za mašinu Liebherr RL52*	115
Slika 8.34.	*Trend pada empirijske funkcije raspoloživosti i postupak određivanja kritične tačke za slučaj 0,8 = f (t_3), za mašinu Dressta TD25 CS-3*	116
Slika 8.35.	*Trend pada empirijske funkcije raspoloživosti i postupak određivanja kritične tačke za slučaj 0,8 = f (t_3), za mašinu Dressta SB60*	117
Slika 8.36.	*Trend pada empirijske funkcije raspoloživosti i postupak određivanja kritične tačke za slučaj 0,8 = f (t_3), za mašinu Liebherr RL52*	117
Slika 8.37.	*Postupak aproksimacije ekspertskih ocena raspoloživosti sa kritičnim vrednostima t_1, t_2 i t_3 za mašinu Dressta TD25 CS-3*	118
Slika 8.38.	*Postupak aproksimacije ekspertskih ocena raspoloživosti sa kritičnim vrednostima t_1, t_2 i t_3 za mašinu Dressta SB60*	118
Slika 8.39.	*Postupak aproksimacije ekspertskih ocena raspoloživosti sa kritičnim vrednostima t_1, t_2 i t_3 za mašinu Liebherr RL52*	119
Slika 8.40	*Uporedni prikaz aproksimativnih pravih linija raspoloživosti sa referentnim vrednostima A_i i t_1, t_2 i t_3 za sve analizirane cevopolagače*	119
Slika 8.41.	*Grafički prikaz rezultata primene Fazi-AHP metode za hidraulične bagere*	122
Slika 8.42.	*Funkcija kumulativnih troškova održavanja f(t) i ukupnih troškova eksploatacije za mašinu 14 Oktobar BGH 1000*	123
Slika 8.43.	*Funkcija prosečnih troškova za mašinu 14 Oktobar BGH 1000*	123
Slika 8.44.	*Prvi i drugi izvod funkcije prosečnih troškova za mašinu 14 Oktobar BGH 1000*	124
Slika 8.45.	*Funkcija kumulativnih troškova održavanja f(t) i ukupnih troškova eksploatacije za mašinu Caterpillar 323 DLH*	125
Slika 8.46.	*Funkcija prosečnih troškova za mašinu Caterpillar 323 DLH*	125
Slika 8.47.	*Prvi i drugi izvod funkcije prosečnih troškova za mašinu Caterpillar 323 DLH*	125

Slika 8.48.	*Funkcija kumulativnih troškova održavanja f(t) i ukupnih troškova eksploatacije za mašinu New Holland E 215B*	126
Slika 8.49.	*Funkcija prosečnih troškova za mašinu New Holland E 215B*	127
Slika 8.50.	*Prvi i drugi izvod funkcije prosečnih troškova za mašinu New Holland E 215B*	127
Slika 8.51.	*Trend rasta empirijske funkcije troškova i postupak određivanja kritične tačke za slučaj 40 = f (t_2), za mašinu 14 Oktobar BGH1000*	128
Slika 8.52.	*Trend rasta empirijske funkcije troškova i postupak određivanja kritične tačke za slučaj 40 = f (t_2), za mašinu Caterpillar 323 DLH*	128
Slika 8.53.	*Trend rasta empirijske funkcije troškova i postupak određivanja kritične tačke za slučaj 40 = f (t_2), za mašinu New Holland E 215B*	129
Slika 8.54.	*Trend pada empirijske funkcije raspoloživostii postupak određivanja kritične tačke za slučaj 0,8 = f (t_3) za mašinu 14 Oktobar BGH 1000*	130
Slika 8.55.	*Trend pada empirijske funkcije raspoloživostii postupak određivanja kritične tačke za slučaj 0,8 = f (t_3) za mašinu Caterpillar 323 DLH*	130
Slika 8.56.	*Trend pada empirijske funkcije raspoloživostii postupak određivanja kritične tačke za slučaj 0,8 = f (t_3) za mašinu New Holland E 215B*	131
Slika 8.57.	*Postupak aproksimacije ekspertskih ocena raspoloživosti sa kritičnim vrednostima t_1, t_2 i t_3 za mašinu 14 Oktobar BGH 1000*	132
Slika 8.58.	*Postupak aproksimacije ekspertskih ocena raspoloživosti sa kritičnim vrednostima t_1, t_2 i t_3 za mašinu Caterpillar 323 DLH*	132
Slika 8.59.	*Postupak aproksimacije ekspertskih ocena raspoloživosti sa kritičnim vrednostima t_1, t_2 i t_3 za mašinu New Holland*	132
Slika 8.60	*Uporedni prikaz aproksimativnih pravih linija raspoloživosti sa referentnim vrednostima A_i i t_1, t_2 i t_3 za sve analizirane hidrauličnе bagere*	133

SPISAK TABELA

Broj	*Naziv tabele*	*Strana*
Tabela 1.1.	Pokazatelji rada pomoćne mehanizacije i ostvarene proizvodnje u RB Kolubara	2
Tabela 2.1.	Pomoćni transport na površinskim kopovima [2]	15
Tabela 2.2.	Tabelarni prikaz procentualnog učešća pojedinih pomoćnih radova u ukupnim pomoćnim radovima [3]	16
Tabela 2.3.	Klasifikacija pomoćnih radova i pregled pomoćnih mašina za obavljanje ovih radova	17
Tabela 2.4.	Pregled potrebne pomoćne mehanizacije i njihova primena na površinskim kopovima lignita	18
Tabela 4.1.	Preporuka proizvođača *Caterpillar* o radnom veku dozera u zavisnosti od uslova rada [44]	43
Tabela 4.2.	Odnos faktora opterećenja motora prema uslovima rada [44]	44
Tabela 4.3.	Opseg potrošnje goriva prema uslovima rada različitih tipova dozera [44]	45
Tabela 4.4.	Aktivnosti na malom i velikom servisu kod motora sa unutrašnjim sagorevanjem	46
Tabela 6.1.	Opis Satijeve skale relativnog odnosa [16]	57
Tabela 6.2.	Zavisnost slučajnog indeksa RI od broja analiziranih objekata n [63]	58
Tabela 7.1.	Zavisnost slučajnog indeksa RI od broja analiziranih objekata n [63]	78
Tabela 7.4	*Pearson*-ovi koeficijenti [75]	85
Tabela 8.1.	Brojno i procentualno stanje analiziranih mašina	86
Tabela 8.2.	Tehnička raspoloživost razmatrane mehanizacije	87
Tabela 8.3.	Ulazni podaci za dozere stare dve godine	88
Tabela 8.4.	Ulazni podaci za dozere stare pet godine	89
Tabela 8.5.	Ulazni podaci za dozere stare osam godine	89
Tabela 8.6.	Ulazni podaci za AHP metodu rangiranja indikatora	90
Tabela 8.7.	Ulazni podaci za AHP metodu za dozere stare pet odnosno osam godina	91
Tabela 8.8.	Rang indikatora raspoloživosti	91
Tabela 8.9.	Rezultati primene AHP-Fazi modela za izračunavanje raspoloživosti dozera	94
Tabela 8.10.	Rezultati sintezne analize za dozere	104
Tabela 8.11.	Ulazni podaci za cevopolagače stare dve godine	107
Tabela 8.12.	Ulazni podaci za cevopolagače stare pet godine	107
Tabela 8.13.	Ulazni podaci za cevopolagače stare osam godine	108
Tabela 8.14.	Ulazni podaci za AHP metodu za sve cevopolagače	108
Tabela 8.15.	Rang indikatora raspoloživosti cevopolagača	108
Tabela 8.16.	Rezultati primene AHP-Fazi modela za izračunavanje raspoloživosti dozera	109
Tabela 8.17.	Rezultati sintezne analize za cevopolagače	118
Tabela 8.18.	Ulazni podaci za hidraulične bagere stare dve godine	120
Tabela 8.19.	Ulazni podaci za hidraulične bagere stare pet godine	120

Tabela 8.20. Ulazni podaci za hidraulične bagere stare osam godine 121
Tabela 8.21. Ulazni podaci za AHP metodu za sve hidraulične bagere 121
Tabela 8.22. Rang indikatora raspoloživosti hidrauličnih bagera 121
Tabela 8.23. Rezultati primene AHP-Fazi modela za izračunavanje raspoloživosti dozera 122
Tabela 8.24. Rezultati sintezne analize za hidraulične bagere 131

1. UVOD

Na površinskim kopovima lignita u Srbiji osnovni proizvodni proces po pravilu se obavlja kontinualnim mašinama (na otkopavanju, transport i odlaganju jalovine koriste se tehnološki kompleksi tzv. BTO sistemi (rotorni bageri ili vedričari – transporteri sa gumenom trakom – konzolni odlagači), a na eksploataciji uglja BTD ili BTU sistemi (rotorni bageri ili vedričari – transporteri sa gumenom trakom – utovarna mesta ili drobilična postrojenja). Uporedo sa odvijanjem osnovnog proizvodnog procesa prisutni su brojni i veoma raznovrsni pomoćni radovi koji veoma često presudno utiču na efektivnost rada osnovne opreme kao i održavanje iste u punoj tehničkoj ispravnosti a koji se izvršavaju mašinama pomoćne mehanizacije [1].

Na našim površinskim kopovima još uvek preovlađuje praksa, kao proizvod pogrešnih shvatanja o mogućim "uštedama" u investicionim ulaganjima i to na račun ušteda u nabavci pomoćne mehanizacije, što se kasnije višestruko sveti korisnicima preko brojnih tehničko-tehnoloških problema koji se javljaju kao posledica nedostatka ovih mašina. Za nabavku jednog BTO sistema ulaže se i do 100 miliona €, a štedi se nekoliko miliona na pomoćnoj mehanizaciji. Ovo je svakako pogrešna logika, jer se relativno veliki troškovi nabavke i eksploatacije pomoćne mehanizacije vrlo brzo kompenzuju visokim stepenom korišćenja osnovne mehanizacije. Zadovoljavajuće vremensko i kapacitetno iskorišćenje tehnoloških kompleksa na površinskim kopovima moguće je samo pod pretpostavkom da se obezbede optimalni uslovi za njihov rad. Svakako, jedan od najvažnijih preduslova je blagovremeno i kvalitetno izvršavanje svih pomoćnih radova, što naravno, pretpostavlja potrebu da površinski kop raspolaže odgovarajućom pomoćnom mehanizacijom (po vrsti, broju, kapacitetu, snazi, itd.)[2].

Na površinskim kopovima sa primenom mehanizacije kontinuiranog dejstva na pomoćnim radovima angažovano relativno veliki procenat od ukupnog broja zaposlenih radnika. Ovako visok stepen angažovanosti ljudstva na pomoćnim radovima može se objasniti smanjenim potrebama u radnoj snazi na osnovnom procesu kao posledica visoke mehanizovanosti i automatizovanosti ovog procesa sa jedne strane, ali i nedostatkom odgovarajućih specijalizovanih mašina i uređaja za uspešno obavljanje brojnih i specifičnih pomoćnih radova. Povećanje efektivnosti pomoćnih radova, smanjenje učešća teškog fizičkog rada i poboljšanje uslova rada moguće je samo pravilnim izborom pomoćnih mašina prema kriterijumima broja, vrste, kapaciteta, snage, i sl. Uz puno respektovanje specifičnih uslova radne sredine na konkretnom površinskom kopu [3].

Trenutno na površinskim kopovima EPS-a je angažovano preko 330 teških mašina (guseničara) i 460 vozila. Ukupna vrednost ove opreme je preko 120 miliona €. Pored toga vek trajanja ovih mašina je 5-10 godina tako da je u životnom veku kopa neophodno nekoliko puta zameniti kompletnu opremu.

Troškovi nabavke i rada pomoćne mehanizacije su relativno veliki i u ukupnim troškovima se kreću od 13 do 18%, odnosno jednu tonu iskopanog uglja opterećuju sa oko 1,5-2 €[1].

Svakako jedan od osnovnih ciljeva na površinskim kopovima lignita u Srbiji je podizanje sadašnjeg iskorišćenja rudarske mehanizacije (oko 30 – 40%) na nivo rudnika uglja u centralnoj Evropi. Trenutno iskorišćenje BTO sistema na nivou od oko 50% za kapacitetno iskorišćenje i oko 50% za vremensko iskorišćenje. Na ovaj procenat jedan od najvećih uticaja ima pravilno i efikasno korišćenje pomoćne mehanizacije, jer na našim površinskim kopovima lignita u primeni je visokoproduktivna mehanizacija kontinualnog dejstva za čiji uspešan rad je neophodna odgovarajuća priprema tj. izvođenje brojnih pomoćnih radova na izradi puteva, planiranju, čišćenju, transportu, održavanju itd. Izostanak ili neodgovarajući broj ove mehanizacije, tj. loše i neblagovremeno izvođenje pomoćnih radova u znatnoj

meri otežava rad osnovne mehanizacije, utiče na pad vremenskog i kapacitetnog iskorišćenja sistema na eksploataciji, a često dovodi u pitanje i ukupnu bezbednost mehanizacije i ljudstva koje istu opslužuje [1].

Neophodno je da kop raspolaže ne samo dovoljnim brojem mašina, već je neophodno i da one uvek budu raspoložive za rad i da taj rad obavljaju efikasno i ekonomično. Međutim, problem i sa obezbeđenjem sredstava za pravovremenu zamenu, problem i sa nabavkom rezervnih delova (javne nabavke) i drugo, uslovio je da su mašine u proseku stare 11 godina, a da je njihova raspoloživost oko 50 - 60% (u zavisnosti od vrste mašine). Analizom rada i troškova dokazana je zavisnost godina eksploatacije sa raspoloživošću i troškovima rada. Zbog toga je neophodno naći optimalno vreme zamene ovih mašina odnosno, mora se pravilno upravljati njihovim životnim vekom.

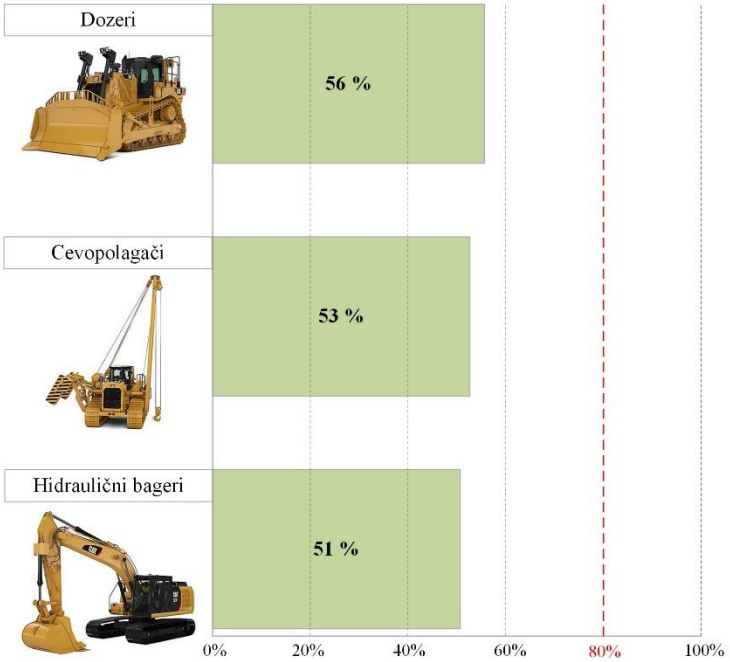
Da bi se dobila što potpunija slika o uticaju potrebnog broja mašina, odnosno vremena rada i uticaja na proizvodnju, izvršena je analiza rada pomoćnih mašina u RB Kolubara za četiri godine: 1989. godinu kada su površinski kopovi raspolagali dovoljnim brojem pomoćnih mašina, solidnom materijalnom osnovom i snabdevenošću rezervnim delovima, 1995. godina kada su zbog sankcija OUN prema našoj zemlji bile već iscrpljene sve materijalne rezerve, a u isto vreme onemogućena nabavka novih mašina i rezervnih delova kao i za 2005. kada su nakon sankcija kopovi snabdeveni novim mašinama i za 2016. godinu [1].

Tabela 1.1. Pokazatelji rada pomoćne mehanizacije i ostvarene proizvodnje u RB Kolubara

		dozeri	cevopolagači	hidraulični bageri	utovarači	Proizvodnja (t/god)	Proizvodnja (m^3/god)	Koeficijent Vremenskog iskorišćenja		Koeficijent Kapacitetnog iskorišćenja	
								ugalj	jal.	ugalj	jal.
1989	sati rada	227742	54108	31742	41488	26.233.657	62.925.927	0,40	0,54	0,39	0,35
1995	sati rada	132274	36296	38440	31328	26.627.000	34.608.003	0,38	0,25	0,41	0,29
2005	sati rada	133000	29000	29000	34700	27.604.940	65.818.080	0,39	0,46	0,46	0,40
2016	sati rada	172000	32300	55000	13000	28.542.454	58.769.931	0,35	0,50	0,30	0,32
1989	K_{sa}	0,50	0,46	0,37	0,42						
1995	K_{sa}	0,32	0,34	0,32	0,31						
2005	K_{sa}	0,42	0,61	0,32	0,30						
2016	K_{sa}	0,60	0,71	0,45	0,29						

I pored toga što je instalisani kapacitet opreme na otkopavanju 1989. godine bio daleko manji, ostvarena je ista proizvodnja kao i 2016. godine, ali je 1989. godine angažovanje pomoćne mehanizacije bilo daleko veće, što je uslovilo i bolje iskorišćenje BTO i BTD sistema.

Raspoloživost pomoćne mehanizacije na površinskim kopovima EPS-a je sada daleko ispod ciljanih (u svetskoj praksi minimalno zahtevanih) 80%, usled lošeg upravljanja životnim vekom mašina, pre svega zato što se ne vrši zamena mašina u optimalnom roku. Na slici 1.1 dat je dijagram raspoloživosti pomoćne mehanizacije (80% je minimalna granica) [1].



Slika 1.1. Raspoloživost pomoćne mehanizacije u 2013. godini za RB Kolubara [1]

Na slici 1.2 dat je odnos ostvarenih radnih sati prema % očekivanog radnog veka na osnovu podataka zaključno sa 2017. godinom za RB Kolubara.



Slika 1.2. Radni sati prema % očekivanog radnog veka za RB Kolubara: dozeri 28.100 mh, cevopolagači 15.700 mh, hidraulični bageri 12.250 mh[1]

Površinski kop lignita sa kontinualnim radnim procesom zahteve mašine pomoćne mehanizacije koja su raspoloživa, pouzdane, koje pouzdano izvršavaju svoju funkciju i da su pri tome troškovi tokom eksploatacije niski [4].Na odluku o nabavci ne utiče samo investicioni trošak nabavke mašine pomoćne mehanizacije (koji je različit za različite proizvođače u istoj klasi), već isto tako i očekivani operativni trošak mašine tokom njenog veka trajanja na površinskom kopu (operativni trošak je daleko manji kod kvalitetnijih mašina), kao i kakav je trend pada raspoloživosti tokom godina eksploatacije (koji je za kvalitetnije mašine daleko manji). Zbog toga je neposredni zadatak korisnika mašine pomoćne

mehanizacije da nabavi mašinu koja je pouzdana i ima konkurentnu cenu, što se postiže optimizacijom troškova nabavke i troškova vlasništva. Korisnici mašina pomoćne mehanizacije na površinskim kopovima moraju održavati balans između proizvodnje i troškova u cilju postizanja maksimalne proizvodnje pri najnižim mogućim troškovima.

Dakle, za uspešan rad površinskog kopa je jedan od najvažnijih uslova za rad osnovne mehanizacije da je da kop raspolaže dovoljnim brojem (i vrstom) pomoćnih mašina, a drugi je da ta mehanizacija ima zahtevanu raspoloživost i treći da su troškovi životnog veka pomoćne mehanizacije niski. To podrazumeva pravilan i zbog po vrsti i tehničkim karakteristikama imajući pri tome i u vidu kvalitet mašina (odnosno proizvođača), ali i upravljanje životnim vekom, posebno određivanju optimalnog vremena zamene tih mašina, odnosno da se odredi trenutak kada istekne profitni radni vek mašine ili kada raspoloživost mašina pomoćne mehanizacije padne ispod nivoa koji je preporučen.

Životni vek mehanizacije se odnosi na trajanje mehanizacije, odnosno trajanje mehanizacije koje počinje neposredno posle faze projektovanja i proizvodnje mehanizacije. Otuda je to period u kojem je mehanizacija u funkcionalnom stanju, odnosno koristi se za rad [5].

Životni vek jedne mašine, postrojenja ili bilo kog drugog tehničkog sistema, ima složenu strukturu, on zahvata niz posebnih, ali međusobno povezanih i vremenski usklađenih grupa aktivnosti. Tehnički sistem se koristi samo u jednom delu svog životnog veka, što znači da je vreme korišćenja manje od njegovog trajanja. Životni ciklus, predstavlja širi pojam od životnog veka i obuhvata sledeće faze:

- idejni koncept/projektni zahtevi;
- idejni projekat;
- glavni projekat - projektovanje/konstruisanje;
- proizvodnja/gradnja;
- eksploatacija/proces rada; i
- otpis.

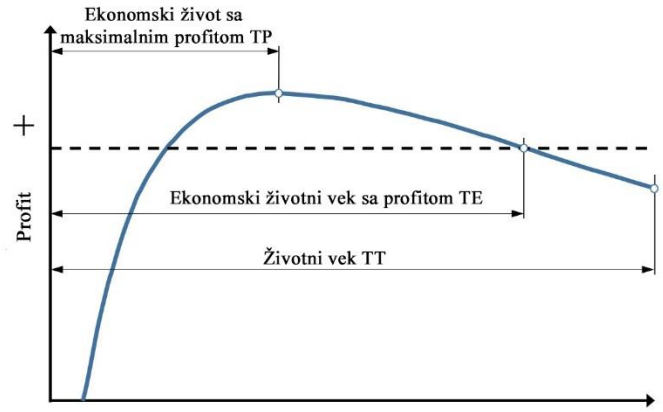
Takođe radni vek može bit definisan kao:

- Tehnički radni vek – period u kojem mehanizacija zadovoljava projektovane kriterijume i ispunjava garantovane kapacitete.
- Ekonomski radni vek – period koji je određen amortizacijom uloženih investicija, odnosno upoređenjem neto sadašnje vrednosti, budućih rashoda i budućih prihoda. Ekonomski vek obično istekne pre tehničkog i zahteva ulaganje u revitalizaciju mehanizacije.
- Licencni radni vek – određuje dozvola za rad, ili promena regulativa vezana za dozvolu.
- Tehnološki radni vek – određen je zastarevanjem ugrađene tehnologije. Produžava se rekonstrukcijom ili modernizacijom kroz investiciono održavanje.

Eksploatacioni životni vek se može definisati i kao (slika 1.3) [6, 7]:

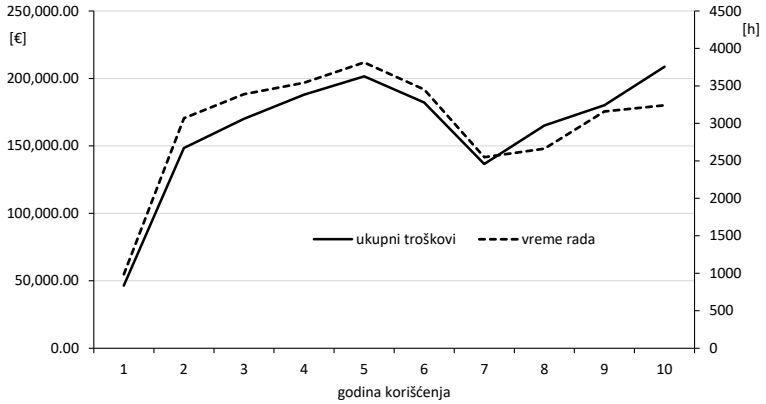
- fizički životni vek (eksploatacioni radni vek mašine dok ona radi);
- profitni ekonomski životni vek (period eksploatacije mašine dok donosi profit); i
- ekonomski život sa maksimalnim profitom (period eksploatacije dok donosi najveći profit).

Tokom životnog veka period rada sa velikim profitom relativno mali. U tom periodu mašina usled relativno malih ulaganja u održavanje zarađuje najviše. Naredni period karakteriše povećanje troškova ali je mašina i dalje profitabilna. Nakon tog perioda mašina može i dalje fizički da radi ali su troškovi održavanja veliki, pouzdanost opada i nismo sigurni kada mašina može biti na raspolaganju i mašinu treba zameniti.

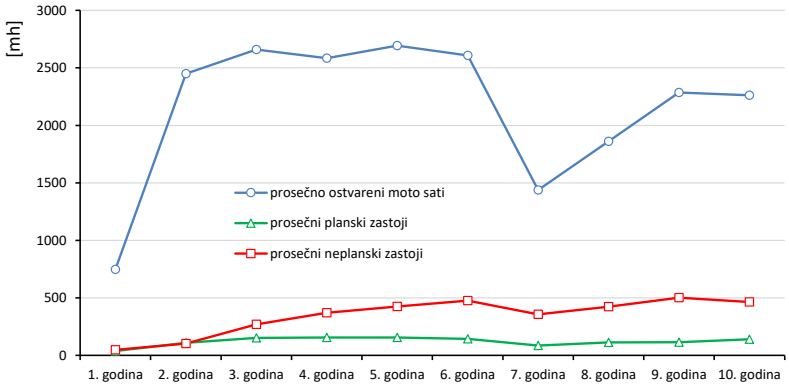


Slika 1.3 Relacija između efektivnog radnog vremena i profita koji se ostvaruje tokom životnog veka [7]

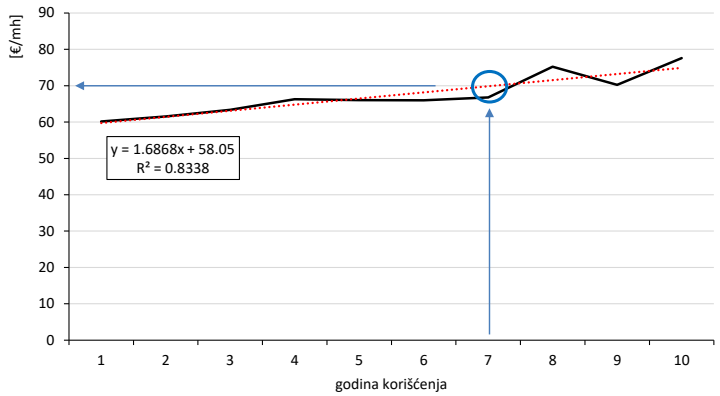
Troškovi eksploatacije mašina pomoćne mehanizacije zbog povećanja troškova održavanja kontinualno rastu sa godinama eksploatacije. Na slici 1.4 prikazan je uporedni dijagram ukupnih troškova i vremena rada za dozere *D8R, PR752, TD 25M* u RB Kolubara. Sa dijagrama jasno je uočljiv trend porasta troškova po godinama eksploatacije. Tokom pete godine dostiže se maksimum prosečnog vremena rada i troškova kada počinje pad, ali posle sedme godine troškovi počinju brže da rastu od prosečnog vremena rada. Razlog rasta troškova najbolje se može sagledati sa slike 1.5 sa koje pokazuje trend rasta neplaniranih zastoja sa godinama eksploatacije. Ako bi se poštovao princip profitnog života dozere je potrebno zameniti nakon 6 - 7 godina eksploatacije, odnosno u ovom slučaju nakon ostvarenih oko 20.000 časova efektivnog rada (slika 1.6). Granični trošak je 70 €/mh



Slika 1.4. Zavisnost efektivnog vremena rada i ukupnih radnih troškova dozera D8R, PR752, TD 25M na površinskim kopovima u RB Kolubara [1]

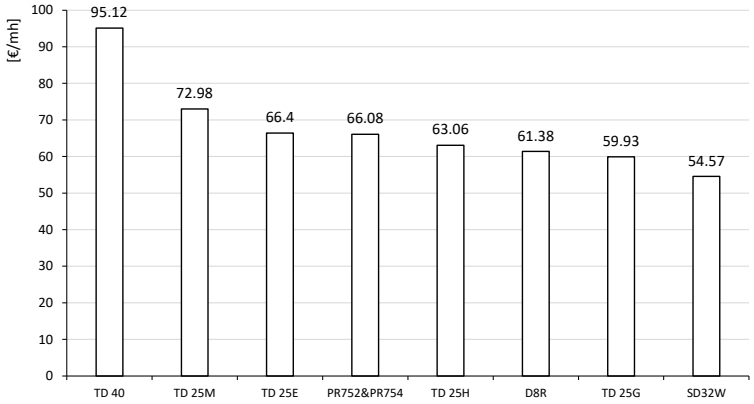


Slika 1.5. Zavisnost efektivnog vremena rada i vremena planiranih i neplaniranih zastoja snažnih dozera na površinskim kopovima u RB Kolubara [8]



Slika 1.6. Dijagram određivanja granične vrednosti troškova snažnih dozera na površinskim kopovima u RB Kolubara [1]

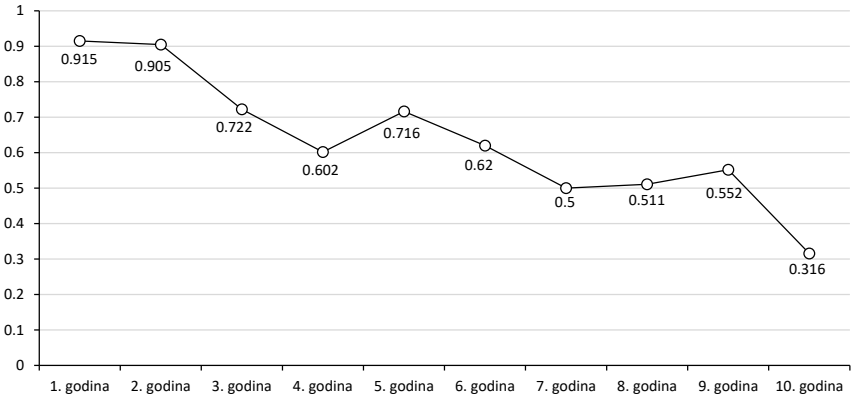
Takođe, različite vrste dozera u funkciji kvaliteta proizvođača svoj profitni životni vek dostižu znatno ranije (neke mašine i posle 3 godine). Na slici 1.7 prikazani su prosečno ostvareni troškovi eksploatacije dozera u RB Kolubara. Sa slike se može videti velika razlika u ostvarenim prosečnim troškovima, a neke mašine koje su skuplje i za 25% u odnosu na druge, u svom životnom veku ostvarili su niži prosečni trošak.



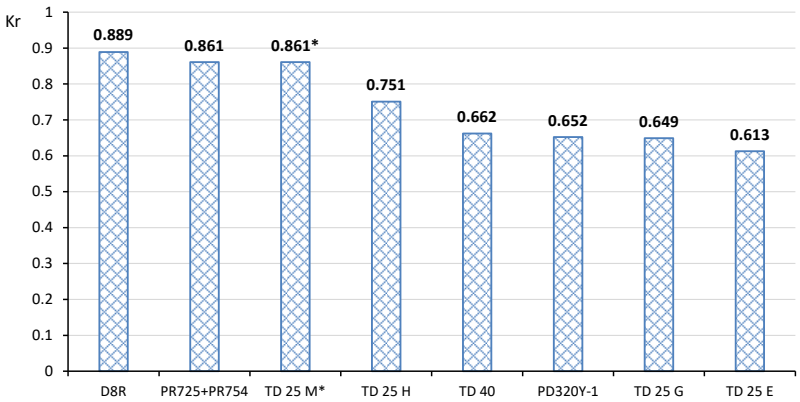
Slika 1.7 Prosečni troškovi za različite tipove dozera u RB Kolubara [1]

Vrednost raspoloživosti koja predstavlja donju granicu za zamenu mašina pomoćne mehanizacije prema svetskim iskustvima je 0,80. To je granična vrednost koja je ograničavajuća za linearnu zavisnost vremenskih kategorija – vreme rada, vreme planskih i neplanskih zastoja. U slučaju da je raspoloživost ispod ove granice neophodno je da kop raspolaže sa većim brojem mašina na stanju što povećava troškove, a u slučaju da ne postoji dovoljan broj mašina neće se izvršavati planirani pomoćni radovi što utiče na efektivnost rada kontinualnih sistema. Kao ekstremni primer može se prikazati trend pada raspoloživosti dozera *Shanghai* PD 320Y-1 i optimalnog vremena zamene koja je u ovom slučaju tokom treće godine (slika 1.8).

Kao i kod troškova i kod raspoloživosti njihov trend je različit kod različitih proizvođača, pa neke mašine vrednost raspoloživosti od 0,8 dostignu već 3 godine rada neke to dostignu posle 10 godina rada.



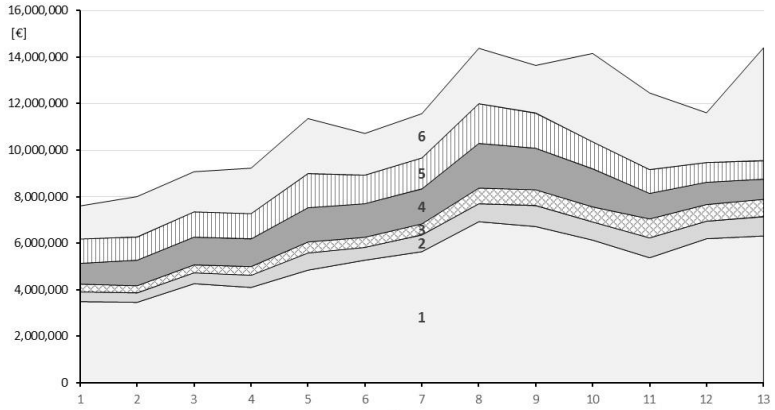
Slika 1.8. Trend pada koeficijenta raspoloživosti dozera Shanghai PD 320Y-1 u kolubarskom basenu za prvih deset godina korišćenja [1]



Slika 1.9. Koeficijent raspoloživosti dozera u kolubarskom basenu za prvih deset godina korišćenja [1]

Napred navedena analiza ukazuje da je upravljanje životnim vekom mašina za različite tipove u zavisnosti od proizvođača različito.

Takođe, na površinskim kopovima lignita se koriste veoma raznovrsne mašine (dozeri, cevopolagači, utovarači, hidraulični bageri, dizalice, valjci, grejderi, transportna mehanizacija i dr) ali prema istraživanjima (slika 1.9) najveći su za dozere gotovo 50%, a zatim za teške pomoćne mašine cevopolagači (oko 6%) i hidraulični bageri (oko 5%) [1].



Slika 1.10 Operativni troškovi pomoćne mehanizacije u RB Kolubara za period 2004-2017. (troškovi goriva, maziva, rezervnih delova i sirovina); 1.dozeri – 46,4%; 2.cevopolagači – 5,9%; 3.hidraulički bageri – 4,7%; 4.putničko-terenska vozila – 11,5%; 5.teretna vozila – 10,3%; 6.ostali – 21,2%.

1.1. Predmet istraživanja

Veliki broj mašina kao i veliki troškovi eksploatacije, i posebno imajući u vidu relativno kratki vek eksploatacije imperativno nameću potrebu za optimizacijom upravljanja životnim vekom ovih mašina. Budući da se ovde radi o serijskim mašinama, svakako najvažniji period je period eksploatacije koji sa svoje strane ima definisane periode počev od probnog rada, rada i garantnom periodu, preko redovne eksploatacije pa do završetka radnog veka. U okviru eksploatacije postoje takođe jasno definisani periodi počev od „ekonomskog životnog veka“ pa da „fizičkog“ životnog veka između kojih su velike razlike u troškovima eksploatacije i dobiti koja se ostvaruje radom ove mehanizacije.

Najvažniji zadaci u životnom veku mašina pomoćne mehanizacije su:

- da se u fazi nabavke mašina izvrši njen optimalni izbor kako po vrsti tako i po tehničkim karakteristikama kako bi se tokom projektovanja i izrade proizvela mašina koja će najbolje odgovoriti konkretnim uslovima radne sredine na površinskim kopovima lignita,
- da se u fazi eksploatacije mašina optimalno koristi i da se odredi optimalno vreme njihove zamene kako se stanovišta troškova eksploatacije i održavanja, tako i sa stanovišta zamene kada su koeficijenti raspoloživosti i kvara još uvek u optimalnim granicama
- da se mašina otpiše (proda) kada je rezidualna vrednost velika.

Svi navedeni zahtevi podrazumevaju sveobuhvatnu analizu rada i troškova eksploatacije i održavanja, kao i praćenje osnovnih pokazatelja rada kako bi se izvršila optimizacija životnog veka pomoćne mehanizacije na površinskim kopovima lignita.

Prikazani troškovi (slika 1.10) kao i važnost korišćenja pomoćnih mašina na površinskim kopovima uslovili su da se od velikog broja mašina koje se koristi analiza izvrši na onim najvažnijim (dozerima, cevopolagačima i hidrauličnim bagerima) i po tri proizvođača za svaki tip mašina.

1.2 Cilj istraživanja

Osnovni cilj istraživanja koji postavlja tema je da se analizom teoretskih i statističkih podataka izradi jedinstven i upotrebljiv model ocene raspoloživosti, i da se izvrši analiza životnog veka mašina pomoćne mehanizacije u smislu određivanja optimalnog vremena zamene, komparativna analiza mašina i izbora istih, kao i ocena upotrebnog kvaliteta mašina uopšte.

Primenjenom metodologijom su obuhvaćeni iskustveni podaci i dosadašnja istraživanja, savremeni postupci i metode istraživanja u ovoj oblasti, a algoritmom istraživanja treba da se omogući da se uz primenu adekvatnih metoda akvizicije podataka i njihove obrade na bazi sistemskih nauka obezbedi ukupan istraživački tok do optimalnog izbora.

Sprovedena istraživanja su definisala jedinstvenu metodologiju koja se može koristiti za određivanje optimalnog vremena zamena mašina pomoćne mehanizacije a čiji rezultat treba da bude postizanje pozitivnih ekonomskih efekata u proizvodnji i obezbeđivanje da površinski kop uvek raspolaže dovoljnim brojem mašina pouzdanih u radu a da se pri tome ne mora raspolagati detaljnim podacima o troškovima koji nastaju tokom radnog veka mašina pomoćne mehanizacije.

1.3. Osnovne hipoteze

Istraživanje u ovoj disertaciji je zasnovano na sledećim hipotezama:

- u naučno – stručnoj literaturi i inženjerskoj praksi ne postoji standardizovani model upravljanja životnim vekom kao ni model optimizacije životnog veka u odnosu na preostale mogućnosti tehničkog sistema.
- troškovi rada, nivo raspoloživosti, struktura otkaza, povećanje koeficijenta kvara su pokazatelji životnog veka tehničkih sistema koji se mogu inicijalno koristiti u proceni optimalnog vremena zamene tehničkog sistema.
- nivo raspoloživosti je u korelaciji sa rastom troškova, korišćenja i održavanja mašine.
- očekivani pad raspoloživosti i rast troškova definišu period optimalne zamene.
- mašine pomoćne mehanizacije na površinskim kopovima predstavljaju specifične tehničke sisteme, koji zahtevaju originalni model optimizacije životnog veka za svaku vrstu mašina.
- parcijalni pokazatelji životnog veka predstavljaju procese u kojima preovladava neizvesnost, višeznačnost, subjektivnost, neodređenost i dr.

1.4. Metodologija istraživanja i primenjene metode istraživanja

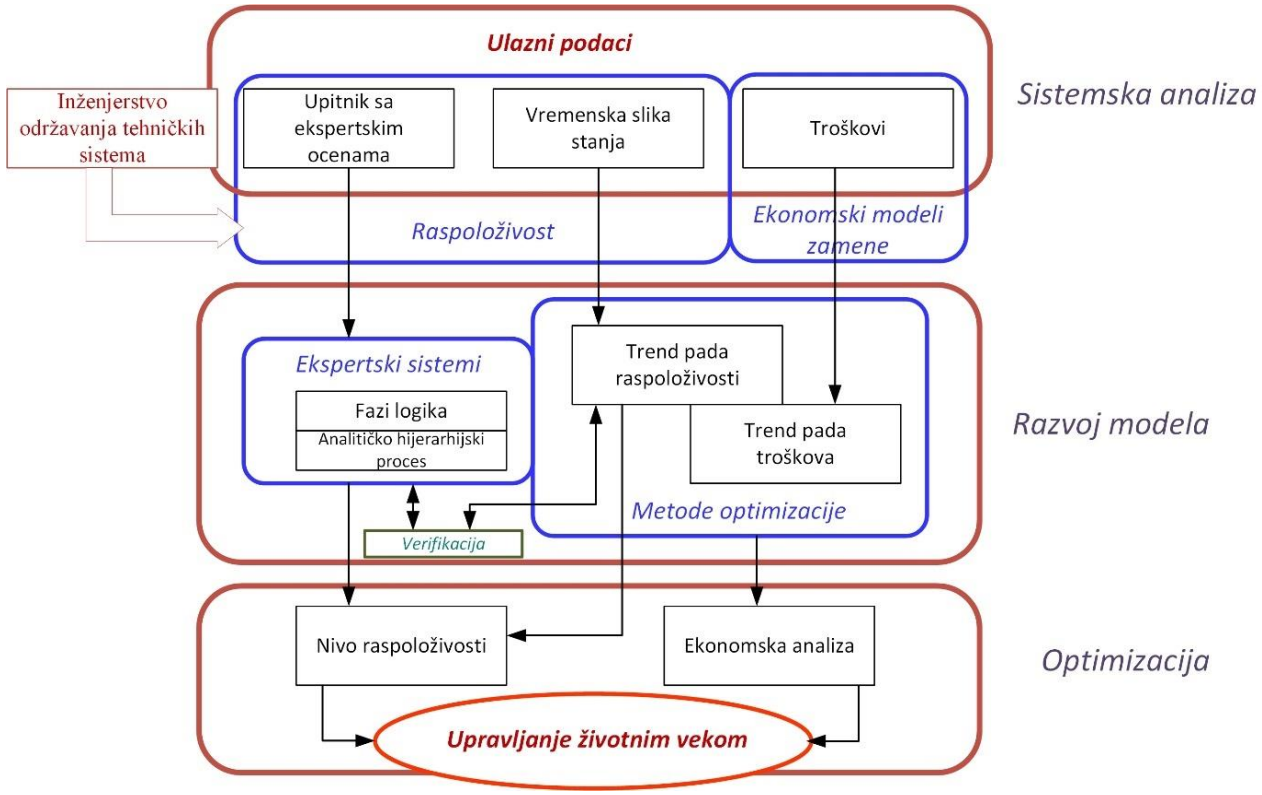
Metodologija istraživanja je prikazana na slici 1.11 i sastoji se iz tri faze:

- sistemske analize,
- modeliranja, i
- optimizacije.

Sistemska analiza obuhvata dva modula koji definišu ulazne podatke neophodne za dalji razvoj modela. Prvi modul je vezan za ulazne podatke koje definišu raspoloživost; ekspertske ocene kao podloga za brzu evaluaciju raspoloživosti i vremenska slika stanja koja u sebi sadrži višegodišnju istoriju vremena u radu i u zastoju posmatranog tehničkog sistema. Drugi segment sistemske analize bili su troškovi rada i posedovanja pomoćnih mašina. Sistemska analiza se bazira na teorijski razvijenim modelima koji su definisani kroz inženjerstvo održavanja tehničkih sistema.

Razvoj modela sadrži dva interaktivna modula, koji kao izlaz daju ocenu raspoloživosti dobijenu na bazi ekspertskog modela, i trendove raspoloživosti i troškove dobijene na bazi statističke obrade odgovarajućih ulaznih podataka. Ekspertski model, koji je ovde izvorno i originalno razvijen predstavlja rezultat fazi logičkog zaključivanja sa korekcijom ishoda dobijenog rangiranjem (AHP metoda). Verifikacija ekspertskog modela izvršena je korelacijom sa rezultatima dobijenim statističkom analizom vremenske slike stanja.

Optimizacija predstavlja postupak sinteze statističkih dobijenih trendova pada raspoloživosti i rasta troškova u smislu dobijanja optimalnog vremena zamene mašine i ekspertske ocene mašine. Na ovaj način se u ekspertski model uvodi kritična vrednost raspoloživosti, koja definiše prelomnu tačku u upravljanju životnim vekom mašina u odnosu na preostale mogućnosti mašine.



Slika 1.11 Algoritam istraživanja

U disertaciji će biti korišćene sledeće naučne metode u cilju istraživanje optimalnog životnog veka pomoćnih mašina:

- analiza dosadašnjeg rada pomoćne mehanizacije sa aspekta ostvarenog vremena angažovanja, efektivnog vremena rada, vremena zastoja, struktura otkaza po sklopovima,
- statistička obrada podataka,
- metode izbora pomoćnih mašina (softver POMEH),
- metode ekonomske analize troškova posedovanja i rada mašina pomoćne mehanizacije,
- metode određivanja optimalnog radnog veka pomoćne mehanizacije i promene ekonomske efektivnosti, na bazi metoda optimizacije i zamene,
- teorija fazi logike u cilju formiranja fazi modela optimizacije životnog veka pomoćnih mašina,
- istraživanje metoda rangiranja u cilju korekcije ishoda fazi kompozicije (AHP metoda),
- u cilju analize rezultata i predviđanja njihovog kretanja biće korišćene matematičke metode za predviđanje i uspostavljanje zavisnosti.

Specifičnost rada je formiranje modela analize parcijalnih pokazatelja karakteristika životnog veka od kojih je svaki ima svoje specifičnosti s obzirom na prirodu fenomena koji se posmatra i s obzirom na radne uslove; formiranje sinteznog modela koji će objediniti ekonomske i tehničke pokazatelje rada; analiza trenda dobijenih rezultata na parcijalnom i sinteznom nivou i njihova adaptacija u cilju definisanja momenta otpisa mašina i optimalnog izbora.

Kao najpogodniji matematički i koncepcijski model za analizu i sintezu parcijalnih pokazatelja životnog veka sa stanovišta tehničkih i ekonomskih pokazatelja planira se korišćenje fazi logike. Korekcija ishoda fazi kompozicije planira se nekom od metoda rangiranja (AHP). Za ekonomsku analizu koristiće se model zamene bez diskontnog faktora i sa delimičnim otpisom.

Metode za predviđanje biće korišćene u završnoj fazi analize rezultata u cilju definisanja tendencije istih i u cilju predviđanja ponašanja tehničkog sistema. U stručnom smislu rezultati ovog rada biće korišćeni za definisanje optimalnog trenutka za zamenu ili otpis mašine, generalnog remonta kao i pri izboru mašine.

1.5. Naučni doprinos disertacije

Tema disertacije je aktuelna, naučni doprinos se ogleda u formiranju modela optimizacije životnog veka mašina pomoćne mehanizacije na površinskim kopovima lignita na bazi teorije fazi logike i na bazi rangiranja parcijalnih pokazatelja životnog veka. Na ovaj način biće ostvaren naučni doprinos u oblasti:

- sistemskih nauka (inženjerstvo održavanja tehničkih sistema, teorija pouzdanosti) u smislu razvoja modela optimizacije životnog veka i sistematizaciji i analizi postojećih koncepata analize životnog veka;
- teorije fazi logike, u smislu razvoja modela propozicije i fazifikacije ulaznih podataka u predmetni koncepcijski model;
- metoda optimizacije u smislu sinteze tehničkih, eksploatacionih, ekonomskih i drugih pokazatelja životnog veka predmetnih mašina;
- teorije odlučivanja u smislu analize trenda ponašanja pokazatelja životnog veka mašina i u smislu donošenja odluka vezano za izbor i otpis mašina.

Ovako koncipiran naučno-istraživački rad ima naučnu opravdanost i može predstavljati značajan naučni i inženjerski doprinos, te da će rezultati biti primenjeni za dalji razvoj i unapređenje u oblasti:

- modela upravljanja životnim vekom pomoćnih rudarskih mašina;
- inženjerstva održavanja tehničkih sistema;
- sistemskog pristupa u izboru i korišćenju mašina pomoćne mehanizacije; kao i za
- sveobuhvatnu analizu operativnih troškova mašina pomoćne mehanizacije na kopovima EPS-a i određivanju optimalnog vremena njihove zamene i izbora.

1.6. Primenljivost rezultata disertacije

Rezultati rada ovog istraživanja mogu se primeniti na površinskim kopovima lignita u cilju brzog i efikasnog određivanja optimalnog vremena zamene i optimalnog izbora mašina pomoćne mehanizacije. Na osnovu predloženog modela mogu se doneti zaključci o vrsti mašina koji najbolje odgovaraju konkretnim uslovima radne sredine kao i izboru najboljeg proizvođača opreme bez obzira na početna investiciona ulaganja, jer se tokom životnog veka različite mašine različito ponašaju u funkciji pada raspoloživosti i rasta troškova.

Primenjena metoda može uticati na znatno smanjenje operativnih troškova kao i smanjenje inventarskog parka mašina odnosno manja investiciona ulaganja.

1.7. Struktura disertacije sa kratkim pregledom poglavlja

Osnovni ciljevi i na osnovu njih određena metodologija istraživanja su opredelili i sadržaj disertacije, koji je struktuiran u 10 poglavlja.

U uvodnom poglavlju dato je objašnjenje značaja rada pomoćne mehanizacije na površinskim kopovima lignita, trend pada raspoloživosti i rast troškova rada pomoćne mehanizacije. Predstavljene su osnovne hipoteze od kojih se polazi, metodologija istraživanja, naučni doprinos i primenljivost rezultata istraživanja.

U drugom poglavlju dat je pregled pomoćnih radova na površinskim kopovima i pregled pomoćne mehanizacije koja se koristi za obavljanje pomoćnih radova.

U trećem poglavlju dat je pregled dosadašnjih istraživanja i iskustava u oblasti vezanoj za izbor i održavanje pomoćne mehanizacije na površinskim kopovima lignita, upravljanje životnim vekom rudarskih mašina i optimalno vreme njihove zamene, kao i za radove vezane za primenu AHP i metoda i fazi logike kao i hibridnih metoda i radove vezane za pouzdanost rada pomoćnih mašina.

U četvrtom poglavlju dat je teoretski prikaz životnog veka rudarskih mašina sa posebnim osvrtom na pokazatelje životnog veka (raspoloživost, pouzdanost i pogodnost održavanja, sigurnost funkcionisanja i troškove životnog veka).

U petom poglavlju dat je teoretski prikaz ekonomskih modela praćenja životnog veka koji se mogu koristiti u određivanju optimalnog veka zamene rudarskih mašina (minimiziranje troškova, maksimizacija profita, teorija limita popravke i dr).

U šestom poglavlju dat je teoretski prikaz ekspertskih modela koji se mogu koristiti u određivanju optimalnog životnog veka i dobijanju ulaznih vrednosti za optimizaciju kroz prikaz višekriterijumskih modela sa posebnim osvrtom na AHP metodu, kao i kroz prikaz fazi teorije i analizu mogućnosti korišćenja za formiranje jedinstvenog modela.

U sedmom poglavlju prikazan je razvoj matematičkog i koncepcijskog modela praćenja životnog veka rudarskih mašina kroz formiranje Fazi-AHP sinteznog modela, ekonomskog modela i na kraju komparativne analize.

U osmom poglavlju prikazana je Studija slučaja praćenja životnog veka pomoćnih rudarskih mašina na površinskim kopovima lignita na primeru dozera, cevopolagača i hidrauličnih bagera sa različitim tipovima mašina.

U devetom poglavlju dat je zaključak i smernice za dalja istraživanja.

U desetom poglavlju prikazana je literatura koja je korišćena.

2. POMOĆNI RADOVI I PRIMENJENA POMOĆNA MEHANIZACIJA NA POVRŠINSKIM KOPOVIMA LIGNITA

2.1. Obim i struktura pomoćnih radova na površinskim kopovima lignita

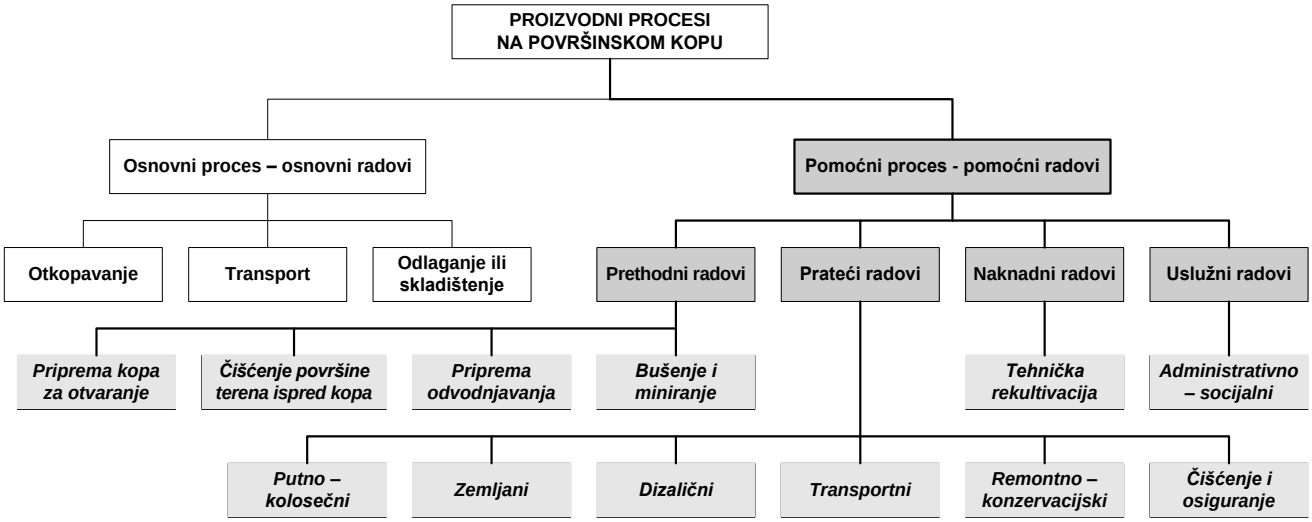
Savremeni površinski kopovi lignita su po pravilu opremljeni mašinama velikog jediničnog kapaciteta za obavljanje osnovnog tehnološkog procesa (otkopavanja, transporta i odlaganja jalovine, odnosno otkopavanja, transporta, drobljenja ili utovara korisne supstance). Primenom krupnih tehnoloških sistema na otkrivci - BTO i uglju BTU ili BTD, ostvaruje se velika koncentracija proizvodnje i visoka produktivnost rada [3].

Međutim, pored osnovnog tehnološkog procesa koji se obavlja gabaritnom mehanizacijom kontinualnog dejstva (rotornim bagerima i vedričarima, transporterima sa gumenom trakom i odlagačima) na površinskom kopu su prisutni brojni i veoma raznovrsni pomoćni radovi koji se efikasno mogu obavljati samo specijalnim mašinama, u rudarskoj tehnologiji nazvanim pomoćnim mašinama.

Naravno, pojam "pomoćne mašine" treba shvatiti uslovno, imajući u vidu kapacitete i mase ovih mašina, kao i da ima ne mali broj površinskih kopova, gde osnovnu mehanizaciju predstavljaju isključivo mašine iz ove grupe (najčešće dreglajni, dozeri, skreperi i dr).

Jedan od najvažnijih preduslova za visoko vremensko i kapacitetno iskorišćenje BTO i BTD sistema na površinskim kopovima, upravo leži u blagovremenom i kvalitetnom izvršavanju pomoćnih radova od kojih treba posebno istaći sledeće: radove na planiranju etaža na otkopavanju i odlaganju, radove na čišćenju, radove na oblikovanju kosina, radove na pomeranju, produžavanju, skraćivanju ili prenošenju transportera, radovi na izradi i održavanju pristupnih puteva, platoa, rampi, raznih nasipa i useka, kanala i vodosabirnika za odvodnjavanje kopa, radovi na oblikovanju odlagališnih prostora u fazi tehničke rekultivacije, radove iz domena tekućeg i investicionog održavanja opreme, itd. [3].

Na slici 2.1 dat je šematski prikaz osnovnih i pomoćnih radova na površinskom kopu na kojem se eksploatacija vrši krupnim tehnološkim kompleksima kontinuiranog dejstva [3].



Slika 2.1. Prikaz osnovnih i pomoćnih radova na površinskom kopu [3]

Prethodni pomoćni radovi se obavljaju u prostoru u vremenu pre nailaska osnovne mehanizacije. Neki prethodni radovi se obavljaju jednom u životnom veku kopa, dok se drugi radovi (kao na primer čišćenje terena) obavljaju neprekidno tokom životnog veka kopa. U prethodne radove spadaju:

- priprema kopa za otvaranje, (priprema kopa za otvaranje, čišćenje površine terena ispred otkopnog fronta kopa, priprema za proces odvodnjavanja kopa, i bušenju i miniranju);
- čišćenje površine terena ispred otkopnog fronta kopa;
- priprema za proces odvodnjavanja kopa; i
- bušenje i miniranje.

U radove „**Priprema kopa za otvaranje**" spadaju:

- izrada useka otvaranja,
- izrada montažnih placeva,
- izgradnja infrastrukture i objekata za smeštaj radnika,
- montaža osnovnih mašina,
- izrada trasa (useka, nasipa i sličnih zemljanih radova) za transport osnovnih mašina (rotornih bagera i odlagača) od montažnih placeva do radnog mesta.

Čišćenje površine terena ispred kopa. Površina terena ispred otkopnog fronta tj. prve jalovinske etaže, a u zavisnosti od brzine napredovanja etaže, mora biti uvek odgovarajuće pripremljena, odnosno očišćena kako bi se stvorili svi potrebni uslovi za normalan rad osnovne mehanizacije. Sa površine terena treba ukloniti ili izmestiti sve prepreke koje se ne mogu otkopavati rotornim bagerima, kao što su: razni građevinski objekti (kuće, putevi, bunari, cevovodi, dalekovodi, itd), rastinje, rečni tokovi, itd.

Priprema kopa za odvodnjavanje. Odbrana površinskog kopa od voda se izvodi kroz zaštitu kopa od površinskih i podzemnih voda. Odbrana kopa od površinskih voda zasniva se na sprečavanju dotoka voda u kop, a ako vode već dospeju sa slivnog područija ili direktno padnu na površinu kopa vrši se njihovo prikupljanje pomoću mreže kanala i usmeravanje ka odgovarajućim mestima (vodosabirnicima), odakle se pomoću pumpnih postrojenja i cevovoda odvode van granica kopa. Odbrana kopa od podzemnih voda zasniva se na obaranju nivoa podzemnih voda i presecanju njihovih tokova.

Bušenje na površinskim kopovima lignita vrši se za sledeće potrebe:

- za izradu istražnih bušotina,
- za izradu flterskih bunara,
- za izradu minskih bušotina, i
- za potrebe geofizičkih i geomehaničkih israživanja.

Prateći radovi na površinskim kopovima izvode se uporedo sa odvijanjem osnovnog proizvodnog procesa, što posebno nameće potrebu da se ovi radovi izvode brzo i efikasno kako bi se maksimalno smanjili zastoji u radu osnovne mehanizacije i obezbedili uslovi za njen što kvalitetniji i bezbedniji rad. U ovu grupu pomoćnih radova mogu se svrstati:

- putno - kolosečni radovi,
- zemljani radovi,
- dizalični radovi,
- transportni radovi,
- remontno-konzervacijski radovi, i
- čišćenja i obezbeđenja.

Putno-kolosečni radovi obuhvataju sve radove na izgradnji, stabilizaciji i održavanje putne mreže i železničkih pruga (ako ih ima) na površinskim kopovima, kao i radove na montaži, demontaži, pomeranju, regulisanju, produžavanju i skraćivanju transportera sa gumenom trakom.

Zemljani radovi, u okviru ukupnih pomoćnih radova na površinskim kopovima, imaju izuzetno veliko učešće i značaj. Obavljaju se u svim fazama radova na površinskom kopu i obuhvataju:

- u domenu prethodnih radova (izradu useka, trasa, pripremu površine terena ispred fronta otkopnih radova, regulaciju vodotokova, itd),
- u domenu pratećih radova (nivelisanje otkopnih i odlagališnih ravni, oblikovanje kosina, ripovanje, izradu kanala, itd),
- u domenu naknadnih radova (planiranje i oblikovanje odlagališnih površina, itd.).

Dizalični radovi. Eksploataciju lignita na površinskim kopovima obavezno prati čitav niz pomoćnih radova koji zahtevaju primenu dizaličnih uređaja i pretovarne mehanzacije. Svi ovi radovi se mogu podeliti:

- *demontažno-montažne radove* koji obuhvataju demontažu i montažu delova i sklopova u fazi montaže i remonta osnovnih mašina (rotornih bagera, vedričara, odlagača i transportera sa gumenom trakom),
- *skladišno-magacinske radove,* koji obuhvataju pretovar masivnih tereta i rezervnih delova koji se na kop dopremaju vagonima ili kamionima,
- *pretovarne radove*, koji obuhvataju pretovar na magacinskim placevima, u magacinima i radionicama, i
- *specijalne radove*, koji obuhvataju zadizanje bagera i odlagačau cilju pregleda ili opravke kao i brojne slične radove.

Pomoćni transport. Pored osnovnog transporta koji na površinskim kopovima lignita sa kontinualnim radnim procesom podrazumeva transport uglja i jalovine transporterima sa trakom u pomoćni transport ljudi i vode, goriva i svih rezervnih delova i repromaterijala (tabela 2.1) [3].

Tabela 2.1. Pomoćni transport na površinskim kopovima [2]

Vrsta transporta	Materijal koji se prevozi	Nasipna masa	Mehanizacija koja se primenjuje
Osnovni transport	Jalovina (pesak, glina); Lignit.	γ = 1.4-2.2 t/m^3 γ = 0.8-1.2 t/m^3	Transporteri sa širinama traka B = 1400, 1600, 1800 i 2000 mm
	Elementi velikih dimenzije (rezervni delovi osnovnih mašina i energetskih postrojenja); Pomoćne mašine (dozeri, hidraulični bageri, valjci i sl.).	Do 50 t.	Platok kola nosivosti 500 kN.
	Elementi srednjih dimenzija (bubnjevi, trake, reduktori).	Do 10 t.	Kamioni nosivosti do 150 kN.
Pomoćni transport	Elementi manjih dimenzija za bagere, transportere, uređaje za odvodnjavanje, energetsku opremu, građevinske materijale.	Do 5 t.	Kamioni sa kranom, putari.
	Sipki građevinski materijali (kamen, šljunak, pesak).	γ = 1.5-2.5 t/m^3	Kamioni kiperi nosivosti 10-15 t.
	Tečni materijali (ulje, gorivo, voda).	–	Cisterne zapremine 2500-5000 lit.
	Ljudi	–	Terenska vozila sa 4-8 mesta, kamioni sa nadgradnjom sa 20-30 mesta.
	Specijalni prevoz	–	Vozila hitne pomoći, protivpožarna kola, pokretne radionice.

Naknadni radovi osnovnih rudarskih radova na određenom prostoru, i uglavnom obuhvataju sve radove vezane za dovođenje degradiranih površina u prvobitno stanje. Naknadni radovi slede posle završetka radova na određenom prostoru.

Uslužni i ostali radovi: Dislokacija naselja i puteva, vodovodnog i električnog napajanja kao i drugi uslužni radovi koji se obavljaju u cilju pripreme terena za buduća naselja (izrada infrastrukturnih objekata, preseljenje određenih objekata, izmeštanje puteva, vodovodnih i električnih vodova, snabdevanje naselja pijaćom vodom i sl.) zahtevaju angažovanje pomoćne mehanizacije u veoma velikom obimu. Za izvođenje ovih radova najviše se koriste: dozeri, utovarači, transportna mehanizacija i dr.

Učešće pojedinačnih pomoćnih radova u ukupnim pomoćnim radovima

Procentualno učešće pojedinačnih pomoćnih radova u ukupnim pomoćnim radovima na površinskom kopu je veoma različito. Međutim, evidentno je da po svom obimu i značaju preovladavaju radovi na: planiranju, čišćenju, transportu, kopanju i utovaru, pomeranju i podešavanju, montaži i opravkama, ripovanju i krčenju. Zbog nepotpune i neažurne evidencije o angažovanju pomoćnih mašina na pojedinačnim pomoćnim radovima na našim površinskim kopovima lignita, nemoguće je tačno odrediti procentualno učešće pojedinačnih u ukupnim pomoćnim radovima na kopu. Međutim, brojna opažanja i analize upućuju na zaključak da se procentualno učešće karakterističnih pomoćnih radova i u okviru njih elementarnih radova, dobro uklapaju u publikovane podatke sa površinskog kopa "Fortuna" – Nemačka, što je dato u tabeli 2.2.

Tabela 2.2. Tabelarni prikaz procentualnog učešća pojedinih pomoćnih radova u ukupnim pomoćnim radovima [3]

Podgrupe pomoćnih radova	%	Elementarni pomoćni radovi	%
Radovi na planiranju	32,2	- planumi za bagere i odlagače, - planumi za transportere sa gumenom trakom, - kosine, - planumi za tehničku rekultivaciju, - rampe, - trase za puteve i transport opreme, - ostalo.	49,1 12,3 1,4 12,5 6,0 12,4 5,1
Radovi na čišćenju	21,5	- čišćenje traka, - ostali radovi na čišćenju.	99,4 0,6
Radovi na transportu	20,6	- radovi na povlačenju, - transport materijala, - transport konstrukcija za transportere, - transport zastornog materijala.	10,3 46,9 5,6 37,2
Radovi na kopanju i utovaru	13,6	- radovi na kopanju, - radovi na utovaru.	43,3 56,7
Radovi na pomeranju i podešavanju	7,4	- radovi na pomeranju, - radovi na podešavanju.	93,8 6,2
Radovi na montaži i opravkama	4,2	- opravka transportera, - opravka bagera, odlagača i ostalih uređaja.	50,1 49,9
Radovi na ripovanju i krčenju	0,5	- radovi na ripovanju, - radovi na krčenju.	51,2 48,8

U tabeli 2.2 uočljivo je da u ukupnim pomoćnim radovima na površinskom kopu, sa svojim učešćem dominiraju radovi na planiranju sa 32,2 %, radovi na čišćenju sa 21,5 % i radovi na transportu sa 20,6% [3].

Pregled osnovnih grupa, podgrupa i elementarnih pomoćnih radova na površinskim kopovima kao i pomoćnih mašina koje ove radove obavljaju ili mogu uspešno obavljati, dat je u tabeli 2.3 [3].

Tabela 2.3. Klasifikacija pomoćnih radova i pregled pomoćnih mašina za obavljanje ovih radova

Osnovne grupe i podgrupe pomoćnih radova		*Elementarni pomoćni radovi*	*Primenjena pomoćna mehanizacija*
Prethodni radovi	Priprema kopa za otvaranje	Izrada useka otvaranja, izrada montažnih placeva, izgradnja naselja, montaža mašina.	Dreglajni, dozeri, valjci, dizalice, derik-kranovi.
	Čišćenje površine terena ispred kopa	Rušenje i uklanjanje građevinskih objekata, seča šuma i vađenje panjeva, uklanjanje niskog rastinja.	Hidraulični bageri, utovarači, dozeri, kamioni.
	Priprema odvodnjavanja	Regulacija vodotokova, izrada useka odvodnjavanja, izrada vodonepropusnih ekrana, postavljanje cevi, izrada filterskih bunara.	Dreglajni, dozeri, hidraulični bageri, cevopolagači, mašine za bušenje.
	Bušenje i miniranje	Bušenje bunara, istražnih i minskih bušotina i punjenje minskih rupa eksplozivom.	Mašine za bušenje i punjenje eksplozivom.
Prateći radovi	Putno-kolosečni	Izgradnja i održavanje puteva pomerljivih i prenosivih, stabilizacija tla na etažama, pomeranje i regulisanje transportera, produžavanje i skraćivanje transportera, premeštanje elektro napajanja, prevlačenje elementa konstrukcije i objekata.	Mašine za polaganje putnog zastora, mašine za stabilizaciju tla (valjci), cevopolagači sa glavom za pomeranje, dozeri.
	Zemljani	Nivelisanje terena otkopnih i odlagališnih etaža (izrada planuma), čišćenje krovine uglja, oblikovanje kosina kopa i odlagališta, rastresanje (ripovanje) terena, kopanje kanala, rupa za ankere, propuste, vodosabirnika, utovar materijala.	Bageri sa jednim radnim elementom (dreglajni), dozeri sa riperom, skreperi, grejderi, hidraulični bageri.
	Dizalični	Skladištenje, pretovar materijala, demontaža i montaža mašina.	Viljuškari, mosni kranovi, dizalice, montažni kranovi, cevopolagači.
	Transportni	Prevoz ljudi, mašina, materijala, goriva i vode, delova konstrukcija.	Terenski automobili, dostavna, vatrogasna vozila, cisterne za vodu i gorivo, traktori, kamioni, plato kola.
	Remontno-konzervacijski	Zamena mehaničkih i elektro delova bagera, odlagača i transportera, vulkanizacija traka, podmazivanje i zamena ulja u okviru tekućih remonata, servisa i investicionih popravki.	Uređaji za zamenu kašika, valjaka i lanaca, prese za vulkanizaciju, pokretne radionice, aparati za zavarivanje, generatori, kompresori, kontejneri, dizalice, cevopolagači, transportna sredstva.
	Čišćenje i obezbeđenje	Čišćenje presipnih mesta, odstranjivanje otpadaka, zagrevanje (odmrzavanje), postavljanje ograda, uklanjanje snega.	Utovarači, specijalni čistači (wigeri) ili traktori sa teleskopskim uređajem, uređaji za odmrzavanje, grejderi, mašine za čišćenje puteva.
Naknadni radovi	Tehnička rekultivacija	Ravnanje površina odlagališta, oblikovanje kosina, izrada kanala, pristupnih puteva.	Dozeri, dreglajni, hidraulični bageri.
Uslužni radovi	Tehnička infrastruktura	Priprema terena za raseljavanje, izrada puteva, vodovodnih i električnih vodova, preseljenje objekata, snabdevanje vodom i dr.	Dozeri, grejderi, valjci, hidraulični bageri, utovarači, transportna sredstva.

2.2. Primenjena mehanizacija za obavljanje pomoćnih radova na površinskim kopovima lignita

Za obavljanje veoma raznovrsnih pomoćnih radova na površinskim kopovima lignita neophodna je primena velikog broja raznovrsnih mašina: dreglajni, dozeri, utovarači na gusenicama i pneumaticima, cevopolagači, samohodne transportne platforme, hidraulični bageri, grejderi, skreperi, kamioni, cisterne, terenska vozila, itd.

Pomoćne mašine koje se koriste za izvršavanje pomoćnih radova su veoma različite kako po funkciji, tako i tehničkim karakteristikama. Neke od navedenih mašina imaju usko specijalizovanu namenu i mogu se koristiti za obavljanje samo jedne vrste radova. S druge strane neke mašine imaju višenamensku primenu. Izuzimajući transportna sredstva, dozeri, cevopolagači i hidraulični bageri predstavljaju najvažnije i najzastupljenije pomoćne mašine na površinskim kopovima, pa su upravo zbog te činjenice stavljene u prvi plan ovih istraživanja. Naime, ilustracije radi može se navesti primer: na površinskom kopu godišnjeg kapaciteta oko 10 miliona tona uglja i oko 30 miliona kubnih metara jalovine, neophodno je da u stalnom radu bude najmanje 20 dozera, odnosno oko 24 raspoloživih dozera, pri čemu broj manjih

mašina kao što su valjci ili grejderi retko prelazi nekoliko komada. U tabeli 2.4 dat je pregled pomoćne mehanizacije i njihova primena na površinskim kopovima [3].

Tabela 2.4. Pregled potrebne pomoćne mehanizacije i njihova primena na površinskim kopovima lignita

Pomoćne mašine	**Primena**
Dozeri	Izrada planuma za transport bagera i odlagača, guranje prosutih masa u zonu dejstva rotornog točka, razbijanje "venaca" odloženog materijala, kopanje i guranje i sabijanje mekih stenskih materijala, planiranje trasa za saobraćajnice (puteve, pruge, transportere), izrada rampi i obrada kosina, čišćenje etaža i transportnih puteva, izrada montažnih platoa, planiranje zemljišta za potrebe rekultivacije, vuča pogonskih, povratnih stanica, kliznog voza i utovarnih kolica pri pomeranju transportera, vuča vulkanizerskih kućica, trafo stanica, ripovanje uglja i čvršćih stena, vađenje panjeva, rušenje raznih objekata, itd.
Cevopolagači	Pomeranje transportera, montaža i demontaža transportera, nivelacija transportera, dizalični radovi, utovar, istovar, postavljanje cevi, montažni radovi, prenos i vuča različitih konstrukcionih elemenata, itd.
Utovarači	Otkopavanje i utovar različitih materijala u mekom i rastresitom stanju, čišćenje terena oko pogonskih i povratnih stanica, čišćenje terena podešavanje pontona prilikom pomeranja transportera, čišćenje etaža i utovar otpadnog materijala posle izvršenih servisa i investicionih opravki i dr.
Hidraulični bageri	Izrada i održavanje (čišćenje) kanala za odvodnjavanje, otkopavanje i utovar raznog materijala, čišćenje oko pogonskih, povratnih stanica i duž transportera, montaža transportera, izrada rupa za ankere i stubove, rušenje raznih objekata, vađenje panjeva i sl.
Grejderi	Izgradnja i održavanje puteva, izrada i čišćenje kanala, planiranje montažnih platoa, fino planiranje trase transportera (kada vremenski uslovi to dozvoljavaju), čišćenje snega u zimskih uslovima i dr.
Valjci	Kompaktiranje terena prilikom izrade placeva za montažu i investicione popravke, izgradnja i održavanje puteva i dr.
Čistači traka	Čišćenje prosutog materijala duž transportera.
Mašine za bušenje	Bušenje istražnih bušotina, bunara za odvodnjavanje i minskih bušotina (ako ima potrebe).
Kamioni kiperi	Prevoz sipkog građevinskog materijala i rezervnih delova.
Kamioni sa kranom	Utovar, prevoz i istovar rezervnih delova i konstrukcionih elemenata i sklopova manjih dimenzija i masa do 5 t.
Cisterne	Prevoz tečnih materijala (vode, goriva i drugog).
Dizalice	Utovar, istovar i montažno-demontažni radovi.
Terenska vozila	Prevoz ljudi.
Transportne platforme	Transport pogonskih stanica i drugih krupnih negabaritnih elemenata
Plato kola	Transport rezervnih delova većih dimenzija i masa do 40 t, prevoz pomoćnih mašina i dr.
Dostavna vozila	Transport elemenata masa do 2 tone.
Viljuškari	Utovar i istovar raznih materijala i konstruktivnih elemenata u radionicama i na magacinskim placevima.

Izboru pomoćnih mašina za površinske kopove treba po pravilu da prethodi [2]:

- definisanje strukture i obima pomoćnih radova na konkretnom površinskom kopu;
- definisanje zahteva koje treba da ispuni pomoćna mehanizacija u složenim uslovima radne sredine na površinskom kopu;
- definisanje tehničkih karakteristika pomoćnih mašina koje mogu uspešno obaviti sve pomoćne radove (konstrukcija radnog organa, potrebna vučna sila, snaga, masa, specifični pritisak na tlo, nosivost, kapacitet, brzina, prohodnost i dr.).

3. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA U OBLASTI UPRAVLJANJA ŽIVOTNIM VEKOM RUDARSKE MEHANIZACIJE

Izbor, primena, efikasnost rada kao i optimalno vreme zamene pomoćne mehanizacije na površinskim kopovima lignita je predmet stalnih istraživanja. Mnogobrojna istraživanja su rađena u naučnim ustanovama kao i kompanijama koje se bave proizvodnjom pomoćnih mašina i rudnicima koje koriste iste.

Istraživanja uvek idu u pravcu poboljšanja performansi, sa ciljem povećanja njegove produktivnosti i smanjenja troškova eksploatacije. Posebna pažnja se poklanja istraživanjima koja imaju za cilj upravljanje životnim vekom, odnosno određivanje optimalnog vremena zamene ovih mašina u cilju povećanja pouzdanosti i smanjenja troškova eksploatacije.

Istraživanja su uglavnom usmerena na:

- istraživanja vezana za izbor, održavanje i osnovne i pomoćne mehanizacije;
- istraživanja vezana za pouzdanost rada osnovne i pomoćne mehanizacije;
- istraživanja vezana za sigurnost funkcionisanja rudarske opreme;
- istraživanja vezana za upravljanje životnim vekom rudarskih mašina i optimalno vreme zamene;
- istraživanja vezana za ekonomičnost rada pomoćnih mašina; i
- istraživanja vezana za primenu ekspertskog zaključivanja, AHP i metoda i fazi logike kao i hibridnih metoda.

3.1 Pregled istraživanja u Srbiji i svetu

U disertaciji (**Sigurnost funkcionisanja rotornih bagera**, **Miloš Tanasijević** RGF 2007) [9] korišćen je standardizovan pojam performanse sigurnosti funkcionisanja kao najkomleksnijeg pokazatelja upotrebnog kvaliteta sistema, sa ciljem evaluacije rotornog bagera u odnosu na njegovo trenutno stanje i mogućnosti predikcije preostalih mogućnosti. Karakteristično je da sigurnost funkcionisanja na teorijskom nivou u potpunosti apsorbuje fenomene vezane za konstrukcijske i logističke karakteristike sistema, odnosno: pouzdanost, pogodnost održavanja i podršku održavanja. U ovoj disertaciji je razvijen i izložen koncepcijsko-matematički pristup u proceni upotrebnog kvaliteta rotornog bagera odnosno mehaničkih komponenti kao najuticajnijih na isti. Pristup se bazira na evaluaciji performanse sigurnosti funkcionisanja, korišćenjem teorijskih osnova fazi skupova u smislu analize stanja nižih hijerarhijski struktura tehničkog sistema i teorijskih osnova činjeničnog zaključivanja u smislu sinteze do viših nivoa hijerarhijske strukture sistema. Poseban kvalitet ovakvoj proceni daje apsorpcija ekspertskih procena datih u lingvističkom obliku, na bazi znanja i iskustava zaposlenih u fazi konstruisanja, eksploatacije i održavanja mašine. Pri tome je osnovni zahtev u izloženom evaluacijskom procesu pre svega kvalitetna sistematizacija svih znanja i iskustava sa posmatranog sistema kao i objektivno sagledavanje postojećih pokazatelja u cilju apsorpcije navedenih znanja i iskustava. Konačna ocena sigurnosti funkcionisanja za određeni bager se na kraju dobija u lingvističkom obliku, u formi promovisanih lingvističkih promenljivih i stepena pripadnosti.

U doktorskoj disertaciji "Metode utvrđivanja preostalih mogućnosti rotornih bagera u eksploataciji i revitalizaciji" (RGF 2011) [10] **Dragan Polovina** kao i u radu sa koautorima Slobodanom Ivkovićem, Draganom Ignjatovićem i Milošem Tanasijevićem „REMAINING OPERATIONAL CAPABILITIES EVALUATION OF BUCKET WHEEL EXCAVATOR BY APPLYING EXPERT ASSESSMENT METHOD WITH EMPIRICAL CORRECTION FACTOR„ [11] prikazuje koncept ocenjivanja rotornih

bagera na bazi ekspertskog mišljenja. Ekspertsko ocenjivanje formirano na osnovu sinteze znanja i iskustva kao rezultata obavljenih merenja i statistički obrađenih podataka o vremenu provedenom u radu i vremenu provedenom u zastoju. S obzirom da u fazi projektovanja mašine nije moguće izvršiti precizan proračun o veku trajanja mašine i potrebi za revitalizacijom, neophodno je definisati alternativni pravac u analizi ovih mašine. U ovom radu je definisan pristup na bazi Fazzy skupova i Fazzy logike u analizi i sintezi uticajnih parametara na kvalitet tehničkog sistema. Ekspertska ocena daje se u lingvističkom obliku, pogodnom za Fazzy skupove, gde je formiran model od sedam lingvističkih ocena prema različitim stanjima ocenjivanog bagera. Lingvističke ocene su opisnog karaktera: odličan, vrlo dobar, solidan, dobar, zadovoljavajući, loš i kritičan. Ocene su dodeljivane za stanje noseće konstrukcije i sistema za kopanje, a potom ocene dalje ulaze u analizu koštanja revitalizacije i modernizacije razmatranih mašina. Međusobni uticaj parametara se definiše kompozicijom sa tkz. „ako-onda“ pravilima.

Radmila Živojinović je u doktorskoj disertaciji "Matermatičko-modelski pristupi determinacije optimalnog eksploatacionog veka opreme na rudnicima" (RGF 2001) [12] razmatrala problem određivanja eksploatacionog veka rudarske opreme sa aspekta izbora matematičko - modelskih pristupa kreiranja modela za rešavanje predmetnog problema. Istraživački postupak sadržao je dva dela. Težišni deo istraživanja odnosio se na izbor matematičko - modelskog pristupa čemu je prethodio dug istraživački proces sistematizovanja i njihovog selektiranja. Primenjivost i adaptabilnost fokusiranih metoda i njihova kompatabilnost sa realnim sistemom, bio je drugi važan cilj ovih istraživanja. U tom smislu, istraživanjem se došlo do saznanja i sugerisana je podela rudarskih mašina, na način koji deli rudarsku opremu na dugovečnu i kratkovečnu opremu, uz uvažavanja realno postojećeg stanja na rudarskim objektima Elektroprivrede Srbije. Imajući u vidu heterogenost rudarske opreme, kako po strukturi tako i po starosti, istraživanjem su identifikovani odgovarajući pristupi bazirani na dinamičkom programiranju. Disertacija je identifikovala problem validnosti ulaznih informacija neophodnih u postupku ocene eksploatacionog veka rudarske opreme. Rešenje načina i postupka u prevazilaženju ovog raskoraka, bio je drugi bitan segment ovog istraživanja. Disertacijom je predložena ocena tehničkog stanja kao egzaktna podloga za sumarnu informaciju o stvarnim troškovima, u eksploataciji, koji konkretna rudarska mašina ima, jer veličina troškova opredeljuje dalju politiku preduzeća prema toj mašini. Iz celokupnog istraživačkog postupka proisteklo je više značajnih rešenja, koja se generalno sastoje u sledećem:

- Izvršen je izbor, dat je pregled mogućih pristupa zasnovanih na dinamičkom programiranju i ukazano na određene nedostatke u njihovoj primeni.
- Data je moguća sistematizacija rudarske opreme prema strukturi i amortizovanosti.
- Dat je originalan bazni model utvrđivanja stepena degradiranosti tehničkih performansi kapitalne rudarske opreme.
- Dat je mogući model utvrđivanja tehničkog stanja rudarske opreme kao relevantnog postupka za davanje "inputa" u metode zamene opreme, čija rešenja opredeljuju eksploatacioni vek rudarskih mašina.

Radiša Đurić je u svojoj doktorskoj disertaciji "Koncept raspoloživosti pri definisanju efikasnog održavanja pomoćne mehanizacije na površinskim kopovima (RGF 2016) [13] je formirao matematički i koncepcijski model za podršku donošenju odluka u procesu održavanja opreme, pre svega u oblasti rudarske mehanizacije koja radi na površinskim kopovima uglja, na bazi pokazatelja raspoloživosti. U tom smislu izvršena je analiza postojećih koncepcija održavanja, pre svega održavanja prema pouzdanosti kao najznačajnijeg parcijalnog pokazatelja raspoloživosti i predložen je model unapređenja pokazatelja pouzdanosti pokazateljima koji oslikavaju upotrebni kvalitet kroz nivo održavanja i kroz

funkcionalnu adaptivnost sistema u odnosu na radno okruženje. Kao ogledni primer u ovom istraživanju korišćeni su buldozeri koji rade na površinskim kopovima EPS-a.
Za razvoj matematičkog aparata korišćena je teorija fazi skupova u cilju identifikacije navedena tri pokazatelja i teorija fazi zaključivanja, odnosno max-min kompozicija u cilju njihove kompozicije (sinteze). Pri tome su paralelno razvijena dva pristupa, na bazi ekspertskih procena i na bazi izmerenih ulaznih podataka. Dobijeni rezultati u modelu ukazali su na postojanje velikog broja mogućnosti za korekciju odluka koje se donose u segmentu upravljanja imovinom, upravljanja procesom održavanja pa i samom eksploatacijom. Predloženim modelom obuhvaćena je analiza međusobnog odnosa vremena u radu, vremena u otkazu (zastoju) i funkcionalnih karakteristika tehničkog sistema, odnosno njegovoj prilagodljivosti radnom okruženju.

- Predloženi fazi koncepcijski model procene raspoloživosti tehničkih sistema pruža mogućnost računanja sa hibridnim podacima.
- Parcijalni pokazatelji raspoloživosti za koje ne postoje numerički podaci uvedeni su u model procene raspoloživosti uključujući ekspertska mišljenja, odnosno znanje i iskustvo zaposlenih radnika na održavanju i eksploataciji.
- Predloženi model procene raspoloživosti omogućuje uvođenje pokazatelja koji do sada nisu analizirani, a pre svega se misli na radni učinak.

Snežana Savković je u svom magistarskom radu "Upravljanje životnim vekom rudarske mehanizacije na površinskim kopovima" (RGF 2007) [14] analizirala ekonomske modele za optimizaciju životnog veka rudarskih mašina. Dokazano je da kriva životnog veka se razlikuje za osnovnu i pomoćnu mehanizaciju. Dokazano je da za rotorni bager važi takozvana testerasta kriva, dok se kod kamiona i buldozera važi kriva kade. Takođe, dokazano je da za osnovnu mehanizaciju ima smisla ulaganja u revitalizaciju i modernizaciju dok to nije moguće kod mašina pomoćnih mašina.

D. Nurock i C. Porteous u radu "METHODOLOGY TO DETERMINE THE OPTIMAL REPLACEMENT AGE OF MOBILE MINING MACHINES" [15] formirali su metodologiju za procenu troškova diskontinualnih mašina u podzemnim rudnicima sa ciljem optimizacije trenutka njihove zamene. Svoj model bazirali su na osnovi koju je razvila kompanija *Sandvik* i čije podatke su koristili. Osnovna problematika koja se pojavljuje kada mašine nisu u adekvatnom trenutku zamenjene je da se generisalo u povećanje operativnih troškova rada mašine i povećanje vremena provedenog u zastoju (otkazu), što dalje stvara korelaciju sa činjenicom da ovakav tip mašina nije jednostavno nabaviti i dopremiti u rudnike što indukuje značajne i indirektne troškove. Tri osnovna cilja koja su obrađena u ovom radu su: predviđanje zamene mašine (kao motivacija vlasnicima kompanija da na vreme organizuju svoja kapitala ulaganja i olakšaju zamenu mašina kada dođe vreme za to), optimizacija visine troškova životnog veka i stvaranje adekvatne osnove za buduće procene životnog veka drugih mašina. Autori su analizirali postojeće tradicionalne metode za evaluaciju isplativosti rada mašina sa ciljem da se iste unaprede. Tradicionalne metode na koje se oslanjaju su: procena troškova mašine svedena na proizvedenu tonu materije, posmatranje toka novca koji je vezan za mašinu (analiziranje vremenske vrednosti novca – izračunavanje anuiteta različitih alternativa), teorija o zameni mašine zasnovanoj na padu kapitalne vrednosti investicije kroz vreme i povećanju operativnih troškova. U okviru svog modela prilikom procene optimalnog trenutka zamene mašine, autori formiranju faktore koji utiču na zamenu: operativne troškove (troškovi održavanja, potrošnog materijala i tečnog materijala), kapitalne troškove (uz uvođenje amortizacione vrednost na opremu i poreskih povlastica za zamenu) i indirektne troškove koji bi uključivali posledice neadekvatnog rada mašine. Kumulativno sabrani troškovi kroz životni vek mašine bi potom bili svedeni na svaki sat koja mašina napravi u radu i kao takvi bi mogli biti uporedivi.
U takvim okolnostima za početne kratke intervale zamene preovlađuje uticaj kapitalnih troškova dok kod dužih intervala zamene do izražaja dolaze operativni i indirektni troškovi. Autori su napravili u

međusobnu analizi dva indikatora: optimalno vreme zamene i novčani anuitet. Došli su do zaključka da je prema indikatoru anuiteta pogodan period zamene razmatranog primera 4000 radnih sati dok je prema metodi autora o optimalnom vremenu zamene rezultat 5000 radnih sati što je bila potvrda mogućnosti primene njihove metode.
Nastavak analize autori vide u upoređivanju uticaja prolongiranja vremena zamene na NPV. Kroz analizu osetljivosti uzeti su u obzir rizici na promene koji bi mogli imati uticaj a to su: promena cene proizvoda koji se otkopava, promene kapitalne vrednosti mašine, promene diskontne stope otpisa i promene u intenzitetu godišnjeg korišćenja mašine. Promenljiva u analizi osetljivosti bila bi optimalno vreme zamene. Pomeranjem intervala zamene menjali bi se troškovi po radnom satu mašine.
U zaključnom razmatranju model je potvrđen na više različitih utovarača niskog profila koji se primenjuju u podzemnim rudnicima gde je za različite mašine prema uslovima rada izračunato optimalno vreme zamene sa srednjom vrednošću na oko 12 000 radnih sati.

Ivan Janković sa saradnicima (D. Ignajtović, S. Đenadić, M. Tanasijević, P. Jovančić i dr) je u radovima:**,** "MULTI-CRITERIA APPROACH FOR SELECTING OPTIMAL DOZER TYPE IN OPEN-CAST COAL MINING" [16]**,** "DEVELOPMENT OF THE AVAILABILITY CONCEPT BY USING FUZZY THEORY WITH AHP CORRECTION, A CASE STUDY: BULLDOZERS IN THE OPEN-PIT LIGNITE MINE" [17] i "ANALIZA PRIMENE VIŠEKRITERIJUMSKIH METODA U OPTIMIZACIJI IZBORA HIDRULIČNIH BAGERA NA POVRŠINSKIM KOPOVIMA UGLJA" [18] obrađivao izbor, raspoloživost, ekonomičnost rada i analizu primene pomoćne mehanizacije na površinskim kopovima

U radu "MULTI-CRITERIA APPROACH FOR SELECTING OPTIMAL DOZER TYPE IN OPEN-CAST COAL MINING" [16] data je analiza raspoloživosti i troškova životnog veka. Parametri koji su obuhvaćeni analizom u ovom radu podeljeni su na: tehničke, ekonomske, eksploatacione i anketne. Svaki od ovih kriterijuma sadrži i podkriterijume. Naime, tehnički parametri su: snaga motora, vučna sila, tip hodnog stroja i vrsta transmisije; Ekonomske parametre autori su podelili na: troškove posedovanja, operativne troškove i troškove angažovanja ljudstva; Eksploatacioni parametri pokazali su trend prethodnog rada i aktivnosti u održavanju ovih mašina, i oni su podeljeni na: prosečno vreme rada, vreme rada do generalne popravke, prosečne intervencije na 1.000 moto sati rada i tehnička raspoloživost. Kako bi se kompletirala analiza poslednji kriterijum koji su obradili bilo je vezano za anketiranje ljudi koji su u stalnom kontaktu sa analiziranom mehanizacijom prilikom čega su pitanja definisana sa ciljem pravilnog rukovanja i održavanja mašinom. S obzirom da podaci koji su izračunati nisu međusobno merljivi (uporedivi) iskorišćena je matematička metoda sa višekriterijumskim pristupom AHP. I pored toga što je reč o tradicionalnoj metodi, autori su pokazali da je višeatributivnim razmatranjem moguće doći do rezultata koji pokazuju sve prednosti i nedostatke prilikom izbora mehanizacije. Metoda koja je dokazana pokazala je da, uz manje prilagođavanje parametara, može biti primenjena na sve pomoćne mašine.

U radu "DEVELOPMENT OF THE AVAILABILITY CONCEPT BY USING FUZZY THEORY WITH AHP CORRECTION, A CASE STUDY: BULLDOZERS IN THE OPEN-PIT LIGNITE MINE" [17] autori su formirali model za definisanje raspoloživosti pomoćne mehanizacije koji se oslanja na Fazi teoriju i višekriterijumsku metodu u ocenjivanju AHP. Osnova rada predstavlja ekspertsko ocenjivanje formiranih indikatora (fenomena) koji ulaze u strukturu raspoloživosti. Konvencionalne metode za izračunavanje raspoloživosti predstavljaju matematičku relaciju vremena sa vremenske slike stanja mašine (vreme u radu, vreme u planskom i neplanskom otkazu i sl.). U ovom radu struktura raspoloživosti se konstituiše u vidu tri indikatora koja imaju direktan uticaj, a to su: pouzdanost (*Reliability*), pogodnost održavanja (*Maintainability*) i podrška u održavanju (*Supportability*). U razmatranje su uzete ocene od četiri analitičara (eksperta), koji su svaku od tri analizirane mašine

ocenjivali iz oblasti prethodno definisana tri indikatora dodeljivanjem ocena – lingvističkih promenjivih (’*A*’ – najbolja ocena, ’*B*’, ’*C*’, ’*D*’, ’*E*’ – najlošija ocena) koje imaju svoje funkcije pripadnosti klasa. Analitičari su donosili odluke o dodeljivanju ocena na osnovu datog deskriptivnog opisa ponašanja mašine. Analiza je urađena za dva stanja mašine, kada su korišćene 2 godine (nove tj. u garantnom periodu) i kada su mašine korišćene sedam godina (stare tj. pred rashodovanje). Dobijene podatke o ekspertskom mišljenju autori su iskoristili za formiranje Fazi modela sa MAX-MIN kompozicijom. Sled aktivnosti u modelu bazira na unosu ocena eksperata potom sledi identifikacija, kompozicija, fazifikacija i na kraju se defazifikacijom dobijaju krajnje numeričke vrednosti. AHP metoda iskorišćena je za međusobni rang indikatora (R, M, S) prema značajnosti u strukturi raspoloživosti za razmatranu mašinu u definisanom trenutku. Za studiju slučaja su uzeti buldozeri koji rade na površinskim kopovima uglja u Republici Srbiji. Verifikacija modela urađena je upoređivanjem sa konvencionalnim načinom predstavljanja raspoloživosti.

Rad "Analiza primene višekriterijumskih metoda u optimizaciji izbora hidrauličnih bagera na površinskim kopovima uglja" [18] sadrži analizu osnovnih parametara hidrauličnih bagera prema pet različitih višekriterijumskih metoda u odlučivanju. U početnoj interakciji definisano je 12 parametra koji karakterišu rad hidrauličnih bagera a koji će biti uzeti u analizu. Alternative koje su analizirane su tri različite vrste hidrauličnih bagera koji su u radu na Površinskom kopu uglja Kolubara. Hidraulični bageri koji su analizirani su: *14 Oktobar* oznake BGH 1000 (*Srbija*), *Caterpillar* 323 DLH (*USA*) i *New Holland* E 215B (*USA*). Potom je predstavljeno pet najčešće primenjenih metoda višekriterijumske analize AHP, VIKOR, PROMETHEE, TOPSIS i ELECTREE. U prvom delu za međusobno poređenje kriterijuma iskorišćena je AHP metoda u obliku matrice 12×12. Potom su sve alternative analizirane sa sopstvenim vrednostima u okviru pojedinačnih kriterijuma, primenom svih pet metoda. Težine kriterijuma preuzete su za sve metode iz početne AHP interakcije. Metode su pojedinačno prikazale, kao numeričke vrednosti, koja je mašina najpogodnija prema kriterijumima. Potom je rang svih metoda sjedinjen u srednju vrednost i prikazan je rezultat najpogodnijeg izbora (najmanji rang) prema svim metodama.

Amit Sharma, Rajesh K. Bawa u radu "A MULTILEVEL HYBRID APPROACH FOR SELECTION OF AGILE DEVELOPMENT METHOD USING AHP, PROMETHEE AND FUZZY LOGIC" [19] prikazuje primenu hibridnih višekriterijumskih metoda AHP, PROMETHEE i Fazi logike u izboru metode agilnog razvoja za potrebe konkretnog projekta. Broj agilnih metoda tokom 80-tih godina se udvostručio i broj takvih i danas raste. S toga su u ovom radu uzete u obzir najčešće korišćene agilne metode kao alternative u rangiranju: *Crystal Clear*, *Extreme Programming* (XP), *Scrum*, *Dynamic Software Development Method* (DSDM), *Lean development* i *Feature-driven Development* (FDD). Razlike koje se javljaju među metodama definisale su i određivanje kriterijuma prema kojima će biti izvršena analiza. U osnovi strukture analize u ovom radu vrši se rangiranje agilnih metoda primenom AHP, Fuzzy AHP, PROMETHEE i Fuzzy PROMETHE metoda. U sledećem koraku se koriste metode združivanja ranga kako bi se svi rezultati iz četiri pristupa sjedinili u konačan rang. Najniža vrednost u okviru srednjih vrednost 4 primenjene metode prikazuje najpogodniju alternativu u izboru. Zaključna razmatranja u radu baziraju se na prikazu mogućnosti primene pouzdanih metoda u izboru agilnih metoda razvoja sa prosperitetom da se na ovakav pristup nadoveže primena Veštačkih Neuronskih mreža koje su posebno pogodne u slučaju nepreciznih unosa ili nedostatka podataka.

Barringer je u svom radu [20] pokušao da prikaže kako se postiže poboljšanje mehanizacije korišćenjem troškova životnog veka i principa pouzdanosti. Poboljšanja mehanizacije zasnivaju se na finansijskim detaljima i alternativama. Poboljšanje mehanizacije zahteva poznavanje: 1) kada se stvari kvare, 2) kako se kvare, i 3) kako se kvarovi pretvaraju u novčane iznose. Principi Teorije pouzdanosti definišu kad i kako se stvari kvare da bi se obezbedili podaci za poređenje troškova životnog veka. Tehnologija pouzdanosti daje saznanje o vremenu kvara i modulima kvara.

Prevencija kvarova košta, kao što i opravka kvarova košta. Tako da aktivnosti obeju oblasti i pouzdanosti i održavanja, upravljaju troškovima u smislu donošenja odluka. Otkaz mehanizacije i proces koji se dešava je prirodan rezultat zakona fizike i promene entropije sistema. Mehanizacija se lako uništava. Teško je obezbediti njen opstanak. Postoje tri režima vezana za otkaze mehanizacije:

- smrtnost odojčadi,
- period konstantne stope otkaza i
- period istrošenosti mašine, kada stopa otkaza raste.

Period smrtnosti odojčadi i period istrošenosti mašine su periodi u kojima su veće šanse za otkaze što se može pratiti na krivoj "kada" koja predstavlja krivu učestanosti otkaza. Ova idealizovana kriva može se retko primeniti na opremu – tako da veći deo mehanizacije mora biti analiziran u malim uzorcima korišćenjem vrlo praktične tehnike pouzdanosti u Vejbulovoj analizi za svaki modalitet otkaza. U mnogim slučajevima se koristi jednostavna aritmetička tehnika - MTBF (srednja aritmetička vrednost trajanja funkcionisanja između tehničkih neispravnosti) pri razmatranju mnogobrojnih modaliteta otkaza koji se dešavaju. Bez alata za definisanje života/smrti mehanizacije teško je definisati troškove životnog veka.

Troškovi životnog veka (LCC) se odnose na sve udružene troškove zajedno sa nabavkom i vlasništvom proizvodnog sistema u toku celog životnog veka. Uobičajena je upotreba neto sadašnje vrednosti (NPV). U svakom zadatku troškova životnog veka konflikti su očevidni:

- Inženjeri projektanti žele da smanje kapitalne troškove;
- Računovođe žele da povećaju neto sadašnju vrednost;
- Akcionari žele da povećaju cene dividendi/akcija;
- Proizvođači žele da povećaju sate raspoloživog vremena;
- Inženjeri održavanja žele da smanje sate opravke;
- Inženjeri pouzdanosti žele da izbegnu otkaze.

Modeli pouzdanosti, na osnovu aktuelnih podataka o otkazima i vremenu opravke daju raspoloživost, pouzdanost i pogodnost održavanja i druge detalje sistema koji omogućavaju razmatranje troškova [14].

Barkhuizen u svojoj doktorskoj disertaciji [5], objavljenoj 2002. godine je razmatrao upravljanje životnim vekom mehanizacije i održavanje mehanizacije. Razmatrao je utovarače i bušilice. Pokušao je da poveže pouzdanost i rizik, uveo je matricu rizika, registar rizika i akcioni plan rizika. Zaključio je da je kriva troškova životnog veka mehanizacije ista kao kriva učestanosti otkaza, takozvana kriva "kada". Strategija održavanja nikad nema fiksni model, nego se menja od kompanije do kompanije. Barkhuizen je plan održavanja uporedio sa izgradnjom kuće. U osnovi kuće su promene koje su izazvane promenama zahteva za održavanjem. Zahteve za održavanjem je potrebno ispoštovati jer treba na toj osnovi izgraditi i zidove i krov. Troškovi održavanja u rudarskoj industriji su prilično visoki, kao što je sve veće učešće osoblja koje radi na održavanju u ukupnom broju zaposlenih [14].

D. Ignjatović i saradnici (P. Jovančić, M. Tanasijević) u Studiji "Optimizacija organizacije, sredstava i troškova pomoćne mehanizacije u cilju povećanja stepena iskorišćenja jalovinskih i ugljenih sistema na površinskim kopovima EPS-a**"** [1] su se bavili određivanjem optimizacije primene pomoćne mehanizacije na površinskim kopovima lignita. Izvršena je analiza dosadašnjeg rada i definisanje potrebnog broja pomoćnih mašina za narednih 5 godina. Proračunom troškova i raspoloživosti određeno je optimalno vreme zamene mašina pomoćne mehanizacije za različite vrste mašina pomoćne mehanizacije na površinskim kopovima Elektroprivrede Srbije. Predložene su mere za optimizaciju organizacije kao i za povećanje efikasnosti rada pomoćne mehanizacije na površinskim kopovima EPS-a.

D. Ignjatović je u svojoj doktorskoj disertaciji [3] "Metodologija izbora pomoćne mehanizacije za površinske kopove lignita", definisao metodologiju izbora pomoćne mehanizacije za površinske kopove

lignita sa aspekta izbora po vrsti, tehničkim karakteristikama i potrebnom broju. Prilikom izbora potrebnog broja mašina za rad na konkretnom površinskom kopu razmatra se raspoloživost mehanizacije i izrađen je softver za izbor potrebnog broja mašina.

S. Vujić i njegovi saradnici su 2004. prezentirali su nekoliko matematičko-modelskih i metodoloških pristupa za rešavanje problema optimalnog eksploatacionog veka rudarskih mašina [21]. Rešenje su našli u Dinamičkom programiranju, odnosno modelima zamene sa ograničenim i neograničenim intervalima. Modeli zamene sa neograničenim intervalima su primenljivi kod optimizacije eksploatacionog veka dugovečnih rudarskih mašina, kao što su bageri, odlagači, transporteri, dok su modeli zamene sa ograničenim intervalom prikladni za optimizaciju eksploatacionog veka rudarskih mašina, čiji je životni vek kraći, kao što su damperi, buldozeri, utovarivači i skreperi [14].

Gavrilov Leonid i Gavrilov Natalia su 2005. godine objavili knjigu [22] u kojoj su povezali Teoriju pouzdanosti i starenje. Prema istraživanjima koja su vršena u SAD-a kriva "kada" za mehanizaciju je slična istoj krivoj za ljudsku populaciju. Ljudi stare sličnije mašinama koje su napravljene od velikog broja neispravnih delova a manje slično onima koje su napravljene od prastarih komponenti. Kako broj loših komponenti, odnosno opterećenje usled inicijalne štete raste (odozdo na gore), stopa otkaza počinje da podražava stopu smrtnosti ljudi [14].

Taylor je 1923. godine objavio rad [23] koji predstavlja jezgro današnje ekonomske teorije zamene. Definisao je korisni (ekonomski) život mašine kao period u kome se smanjuju jedinični troškovi proizvodnje za tu mašinu. Ukoliko se mašina proda pre ili posle isteka tog vremena, prosečni jedinični trošak proizvodnje će biti veći od optimalnog jediničnog troška.

Hotelling je 1925, prvi predložio maksimiziranje profita [24]. Nije predložio maksimiziranje profita kao zamenu za minimiziranje troška, već je ponudio kao alternativu. Veličina koju je Hotelling želeo da maksimizira je vrednost izlaznog (prihoda) bez troškova vezanih za proizvodnju i korisnu vrednost mašine. Nazvao je vrednost mašine. Hotelling je koristio tehnike diskontovanog toka novca da bi odredio ovu vrednost. Redefinisao je Taylor-ov pristup na više načina. Uveo je integralni račun kao pravilo za proračun. Prvi je diskutovao zastarelost mašine – iako je tada bilo nejasno kako se proračunavaju troškovi zastarelosti. Poput Taylora, Hotelling je razvio svoju metodologiju u nadi da će bolje definisati koncept deprecijacije – određivanje korisnog života mašine, je bilo samo opisano kao daleki cilj [14].

Preinreich je 1940, revidirao Taylor-ovu i Hotelling-ovu teoriju; dajući svoj doprinos [25]. Bavio se generalno industrijskom opremom. Za razliku od Taylora i Hotellinga, bavio se zamenom mehanizacije umesto deprecijacijom. Prema njegovim rečima: "*Zamena je osnovni problem, zbog toga što zaista utiče na slaganje i proizvodnju u fabrici. Proračuni deprecijacije su samo veličine u knjigama, njihov značaj zavisi isključivo od mesta upotrebe*". Preinreich je prepoznao da problemi zamene nisu uvek jednostavni, kao u slučaju kada se jedna mašina menja mašinom istog tipa. On je opseg odluka o zameni podelio na pet kategorija:

- pojedinačna mašina,
- konačni lanac zamena mašina,
- beskonačan lanac zamena mašina,
- brojni paralelni lanci
- ogromno postrojenje se menja brojnim malim mašinama.

Kategorija koja je imala najveći uticaj je beskonačan lanac zamena. Kod konačnog lanca, pretpostavlja se da će postojati potreba za specifičnom mašinom i da će sve što se menja na toj mašini imati sličan vek i troškove. Što znači da ekonomski život aktuelnog Zaštitnika utiče na ekonomiju budućeg Zaštitnika (ili

Izazivača). Preinreich je takođe prilično jasno objasnio kako se radi proračun za tehnološko obezbeđenje mašine (Izazivač). Kako bilo, njegova metoda nije doprinela donošenju odluka izbora između Zaštitnika i Izazivača – prema njegovoj metodi može se pretpostaviti da je Zaštitnik zastareo, a da je Izazivač jedina moguća opcija za zamenu [14].

George Terborgh je 1949, sa minimiziranjem troška otišao korak dalje [26]. Bolje je definisao koncepte deterioracije i zastarelosti, dopunjujući pomenuti koncept Zaštitnik/Izazivač. Deterioracija je mera slabljenja performansi Zaštitnika u odnosu na novog Izazivača kako mehanizacija stari. Zastarelost je mera nižih performansi u odnosu na novog Izazivača. Deterioracija i zastarelost uzete zajedno čine Stepen inferiornosti. Stepen inferiornosti je u suštini Terborgh-ova verzija operativnog troška.

Douglas je 1975, napisao knjigu [6] koja je bila posvećena upravljanju opremom. Opisao je tri načina na donošenje odluka o zameni: intuicija, minimiziranje troška i maksimiziranje profita. Intuicija je, rekao je, je preovlađujući metod za donošenje odluka o zameni. Upotreba ove metode nema osnovu u ekonomskim principima, umesto toga oslanja se na prosuđivanje i iskustvo osobe koja donosi odluku. Dobro rasuđivanje i bogato iskustvo su veoma poželjne karakteristike za onoga koji upravlja opremom. Postoje neki menadžeri u industriji koji mogu konzistentno izabrati prave stvari na osnovu dobrog osećaja. Analitičke metode mogu dopuniti intuitivne sposobnosti. Douglas nije isticao vrednost odluka donesenih na osnovu intuicije. Objasnio je da mnogi menadžeri mehanizacije, koji donose odluke na osnovu intuicije to rade više na osnovu inicijalne nabavne cene, nego na osnovu dugotrajnih operativnih troškova i pouzdanosti.
Drugi Douglas-ov metod je metod minimiziranja troška. Ekonomski život je definisao za osnovni model minimiziranog troška. Zamena se naravno dešava onog momenta kada prosečni kumulativni trošak Zaštitnika prekorači minimalni prosečni kumulativni trošak Izazivača. Iako je Douglas u potpunosti razvio primer problema koji koristi metod minimiziranja troška, koristio je sledeći iskaz ”ovaj (metod minimizacije troška) je lak način da se dobiju i razmotre neke malo više naučničke metode od onih koje podrazumeva (intuicija)”. Douglas je razumeo kretanja minimiziranja troška, ali tome nije pridavao važnost. Smatrao je da onaj koji se bavi teorijom minimiziranja troška, ne razmatra ostale troškove.
Na kraju je, Douglas opisao metod maksimiziranja profita. Godišnji troškovi se oduzimaju od godišnjih prihoda da bi se dobili godišnji profiti. Računa se prosečni kumulativni profit za svaku godinu. Kad je profit maksimalan, optimalni ekonomski život se definiše u godini u kojoj je prosečni kumulativni profit maksimiziran. Douglas je preporučivao maksimiziranje profita pre nego minimiziranje troška ili intuiciju. Smatrao je da je maksimiziranje profita bolje za posao od minimiziranja troška. Otišao je i dalje, rekavši da, je politika minimiziranja troška korisna onda kada se profit ne može adekvatno odrediti [14].

B.S. Dhilon je 2008. godine izdao knjigu “Mining Equipment, Reliability, Maintainability and Safety” [27]. U knjizi su razmatrana pouzdanost, pogodnost održavanja i bezbednost rudarskih mašina. Data je detaljna analiza troškova i koncept troškova životnog veka sa preporukama za primenu. Predložena su dva modela proračuna troškova životnog veka za rudarsku mehanizaciju.

4. ŽIVOTNI VEK RUDARSKIH MAŠINA

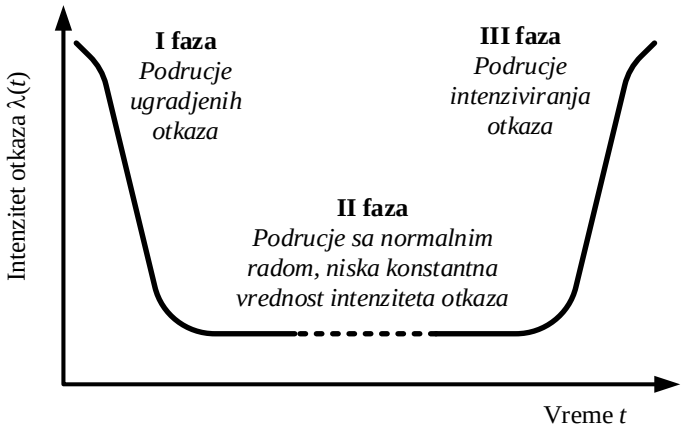
Životni ciklus tehničkog sistema čine pet vremenskih faza [28]:

1. Koncepcijsko i idejno rešenje;
2. Razvoj i projektovanje (konstruisanje);
3. Proizvodnja i postavljanje (puštanje u rad);
4. Korišćenje i održavanje;
5. Rashodovanje.

Mašina je sa stanovišta korisnika interesantna samo tokom četvrte faze njenog životnog ciklusa, odnosno faze korišćenja i održavanja. Ostale faze direktno utiču na fazu korišćenja i održavanja, a sa druge strane ova faza putem odgovarajućih povratnih informacija modelira prve tri faze u cilju eventualnog daljeg razvoja novih generacija iste mašine [9]. Konstruisanje mašina podrazumeva aktivnosti koje počinju idejom da se stvori novi proizvod a završavaju ispitivanjem prototipa. Međutim, delatnost konstruisanja postoji i u fazi eksploatacije kod mnogih mašina i to najčešće u procesu održavanja, pošto se permanentno ukazuje potreba za manjim ili većim izmenama konstrukcije pojedinih komponenti, sklopova i sl. [29]. Povezanost konstruisanja i održavanja je očigledna. Konstruktor nove mašine mora, kao značajne, da ima zahteve koji se odnose na lakše i jeftinije održavanje. Takođe, njemu kao značajna podloga pri konstruisanju služe informacije o eksploatacionim osobinama mašine u odnosu na performanse, pouzdanost, pogodnost za održavanje i sl. Najveći broj ovih informacija imaju službe održavanja.

Prve tri faze mogu da budu i sastavni deo četvrte faze životnog ciklusa određene mašine. Tokom rekonstrukcije mašine odnosno revitalizacije i modernizacije, postojeća mašina koja se nalazi u navedenoj četvrtoj vremenskoj fazi životnog ciklusa, dodatno se koncepcijski i idejno razvija [9]. Mašina se pušta u rad sa nizom prisutnih slabosti odnosno nedovoljno razrađenih funkcija i konstruktivnih detalja, koje se odmah u početku ispoljavaju u radu u vidu tzv. dečijih bolesti. Na bazi navedenih povratnih informacije pre svega iz službe održavanja, mašina se uvodi u stacionarni režim rada, kada je pojava otkaza svedena na minimum, koji je opet određeno vreme konstantan. U praksi se ovi postupci rekonstrukcije često nazivaju i konstruisanje u održavanju [29]. Na kraju, mašina neminovno ulazi u fazu povećanja intenziteta pojave otkaza, što je kraj životnog veka mašine. Ovaj proces, odnosno životni vek mašine, često se prikazuje tzv. krivom kade (slika 4.1.). Pojam životni vek u ovom kontekstu se odnosi na četvrtu fazu životnog ciklusa mašine. Navedena kriva je načelna i zato je kontinualna, a za konkretnu mašinu ona bi imala manje ili veće uspone i padove, između ostalog i iz već navedenog razloga rekonstruktivnih mera, odnosno odgovarajućih poboljšanja na postojećoj konstrukciji [9].

Tokom životnog veka mašina, u određenom trenutku dolazi do pojave stacionarnog stanja otkaza, odnosno do fenomena kada broj otkaza na posmatranom sistemu postaje približno konstantan u jedinici vremena [29]. Oscilacije postoje oko neke srednje vrednosti, jer pojava ima statistički karakter. Ova zakonitost da je broj otkaza u jedinica vremena približno konstantan, ima svoja ograničenja i posebno uslov da održavanje neprestano dovodi sve dotrajale elemente sistema u potpuno ispravno stanje. Karkteristično je da otkazi na koje se odnosi stacionarno stanje otkaza mogu da se okarakterišu kao predvidivi u najvećoj meri. Za razliku od onih u u prvoj i trećoj fazi životnog veka mašine (slika 4.1.), mogu da se okarakterišu kao iznenadni u najvećoj meri.

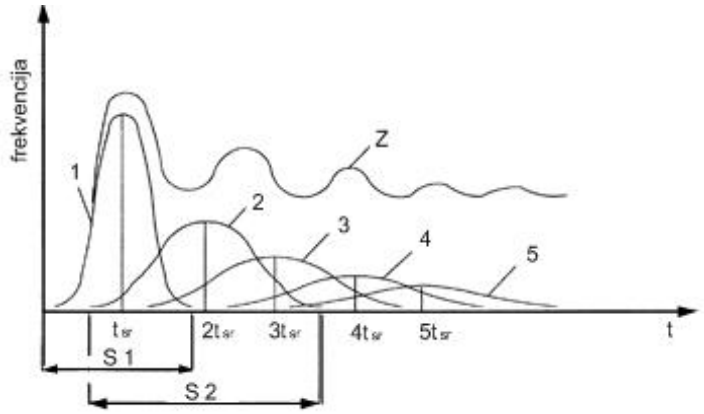


Slika 4.1. Kriva kade

Kriva kade prikazana je na slici 4.1 i predstavlja hipotetički prikaz kretanja stope kvarova u vremenu (eng. *The Bathub curve*). Jasno su odvojena tri perioda u eksploataciji tehničkog sistema:

- I faza – Razrada (dečije bolesti), opadanje stope kvarova (eng. *Infant mortality*);
- II faza – Normalan rad, niska konstantna vrednost stope kvarova (eng. *Normal life* (*useful life*));
- III faza – Kraj životnog veka, porast stope kvarova tj. povećana frekvencija kvarova zbog dotrajalaosti tehničkog sistema (eng. *End of life wear-out*).

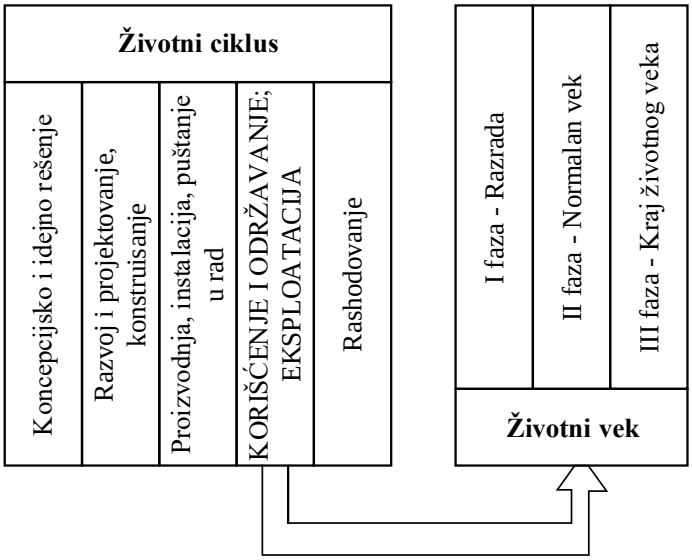
Model uspostavljanja stacionarnog stanja otkaza [29] može da se prikaže na pojednostavljenom modelu koji se sastoji od *N* elemenata istog tipa, pri čemu je raspodela otkaza normalna, a elementi se pri pojavi kvara zamenjuju elementima istog tipa. Neka su parametri normalne raspodele srednje kvadratno odstupanje *S* i srednja vrednost vremena trajanja t_{sr}. Dijagram na sl. 4.2 prikazuje frekvenciju otkaza zavisno od vremena rada. Kriva 1. na dijagramu daje raspodelu otkaza za prvu generaciju elemenata, tj. za one otkaze koji su ugrađeni u sistem kada je pušten u rad. Pošto se pri pojavi kvara svakog elementa prve generacije ugrađuje element druge generacije, vremena početka rada elementa druge generacije nisu ista, tj. neki stupaju u rad kratko vreme posle puštanja sistema kada dođe do prvih kvarova elemenata prve generacije, a neki mnogo kasnije, kada se kvare poslednji elementi prve generacije. Zbog toga je srednje kvadratno odstupanje *S*2 za elemente druge generacije mnogo veće nego *S* = *S*1, za prvu generaciju, što znači da je rasipanje oko srednje vrednosti veće, što prikazuje kriva 2 na dijagramu. Ovo je još izraženije za elemente treće generacije (kriva 3). Na složenim sistemima dugogodišnje upotrebe postoje i četvrta, peta generacija, itd., pri čemu je rasipanje oko srednje vrednosti sve veće.



Slika 4.2. Prikaz uspostavljanja stacionarnog stanja sistema [29]
Kriva 1. – otkazi prve generacije, kriva 2. – otkazi druge generacije, itd.

Ukupna frekvencija pojavljivanja otkaza posmatranog sistema predstavlja zbir svih otkaza na sistemu, što znači da se moraju sabrati otkazi svih generacija elemenata na dijagramu, što prikazuje kriva *Z*. Sa slike 4.2. se vidi da kriva *Z* sa protokom vremena eksploatacije sve manje osciluje oko neke srednje vrednosti, tj. da broj otkaza sistema u jedinici vremena postaje sve više konstanta, što se i naziva stacionarnim stanjem otkaza.

Na slici 4.3 daje se dijagram odnosa životnog veka i životnog ciklusa tehničkih sistema.



Slika 4.3. Shematska zavisnost korišćenih pojmova vezanih za životni ciklus mašine

4.2. Pokazatelji životnog veka rudarskih mašina

Analiza životnog veka nekog tehničkog sistema, može da se svede i na pitanje kojim konceptom/pojmom na najpotpuniji način mogu da se izraze određene osobine jednog tehničkog sistema u pogledu izvršavanja njegovog zadatka, odnosno postavljene funkcije cilja. Sa početkom razvoja sistemskih nauka, praktično od posle II Svetskog rata, u odgovarajućoj tehničkoj literaturi se tragalo za navedenim pojmom. U tom smislu definisani su pojmovi koji predstavljaju ponašanje tehničkog sistema tokom određenog vremena u toku njegovog životnog veka pa i samog životnog ciklusa:

- pouzdanost (engl. *Reliability*),
- pogodnost održavanja (engl. *Maintainability*),
- podrška održavanju (engl. *Maintenance support*),
- raspoloživost (engl. *Availability*),
- sigurnost funkcionisanja (eng. *Dependability*), i dr.

Ukupna svojstva tehničkog sistema u savremenoj tehničkoj literaturi najčešće se izražavaju pojmom upotrebni kvalitet (engl. *Quality of service*), odnosno pojmom koji obuhvata osobine sistema vezane za njegov rad, kao i elemente podrške nužne da bi sistem mogao uspešno da radi. Opšte prihvaćena definicija pojma upotrebni kvalitet glasi: *ukupni efekat radnih performansi koji određuje stepen zadovoljenja korisnika* [28]. Ovakav prilaz omogućava da se ukupna svojstva tehničkog sistema iskažu na način koji više odgovara korisniku. Karakteristično je da se tehnički sistem pri tome sagledava kompleksno, odnosno sa gledišta sistema u celini. Posmatra se praktično kroz sve faze životnog ciklusa, sa stanovišta raznih tehničkih i tehnoloških disciplina. Ovakav. sinergetski prilaz razmatranju sistema u cilju određivanja upotrebnog kvaliteta, počiva na kompleksnom i zajedničkom razmatranju svih

problema na nivou kako sistema u celini tako i konkretnih fenonomena i elemenata, obuhvatajući sve osobine, svojstva, performanse sistema i njihove međusobne uticaje. Pri tome, na nivou značajno višem u odnosu na nivo koji bi dalo razmatranje samo tehničkog stanja mašine.

4.2.1 Pouzdanost i pogodnost održavanja

Pojmovi, tj performanse pouzdanosti i pogodnosti održavanja su najrazvijeniji i po pitanju naučnug i matematičkog tumačenja i po pitanju same primene. Sa njihovog stanovišta tehnički sistem može da se objasni kao organizovani skup elemenata objedinjenih zajedničkom funkcijom cilja [30]. Pri tome, osnovna karakteristika funkcije cilja je da zavisi od vremena tj. izvršenje funkcije cilja ostvaruje se u nekom periodu vremena [31]. Da bi se kvaliteno sagledao tehnički sistem sa stanovišta neke od ove dve performanse, one moraju da se postave kao funkcije u vremenu a ne kao statistički pokazatelji [9].

Analiza vremenskog karaktera ponašanja tehničkog sistema najbolje se prikazuje vremenskom slikom stanja (o kojoj će detaljno biti pisano u glavi 4.2.2), na kojoj se vremena rada, smenjuju sa vremenima u otkazu.

Pouzdanost se odnosi na verovatnoću rada bez otkaza i direktno zavisi od dužine vremena / intervala rada [29].

Pouzdanost može da se prikaže na osnovu sledećeg eksperimenta. Posmatra se skup od N potpuno jednakih elemenata koji rade pod istim uslovima. Posle izvesnog vremena otkazaće prvi element iz skupa. Dalje će otkazati drugi i tako redom do poslednjeg elementa. Ako se napiše: posle vremena t otkazalo je ukupno N_1 elemenata a u radu je ostalo N_2 elemenata, pouzdanost se računa kao:

$$R(t) = \frac{N - N_1(t)}{N} = \frac{N_2(t)}{N} \tag{4.1}$$

Pri čemu je u svakom trenutku: $N = N_1 + N_2$.

Ovako prikazana pouzdanost može da se objasni kao verovatnoća rada bez otkaza. Sa druge stane, verovatnoća otkaza može da se napiše u vidu funkcije otkaza, kao:

$$F(t) = \frac{N_1(t)}{N} \tag{4.2}$$

Očigledno je: $R(t) + F(t) = 1$. Sa porastom vremena t sve je više elemenata u otkazu (u kvaru), odnosno funkcija pouzdanosti će opadati a funkcija otkaza će rasti.
Može da se napiše i:

$$F(t) + R(t) = \frac{N - N_1(t)}{N} + \frac{N_{21}(t)}{N} = 1 \tag{4.3}$$

Diferenciranjem navedenog izraza po vremenu, dobija se:

$$\frac{dF(t)}{dt} + \frac{dR(t)}{dt} = 0 \tag{4.4}$$

Pri čemu je gustina verovatnoće pojave otkaza označena sa *f(t)* i predstavlja verovatnoću otkaza u jedinici vremena:

$$\frac{dF(t)}{dt} = f(t) \tag{4.5}$$

Gustina verovatnoće bezotkaznog rada posmatranog sistema može da se prikaže u odnosu na funkciju pouzdanosti kao:

$$\frac{dR(t)}{dt} = r(t) \tag{4.6}$$

Ukoliko se promene posmatraju kao konačne tj. prekidne, funkcije navedenih gustina raspodela mogu se izraziti na sledeći način:

$$f(t) \cong \frac{N_1(t)}{\Delta t \cdot N}, \qquad r(t) \cong \frac{N_2(t)}{\Delta t \cdot N} \tag{4.7}$$

gde je Δt interval vremena posmatranja.

Kumulativna funkcija gustine pojave stanja u radu (do trenutka t_1) ili funkcija bezotkaznog rada predstavlja pouzdanost sistema i može da se izrazi na sledeći način:

$$R(t) = \int_0^{t_1} r(t)dt \tag{4.8}$$

Na isti način može da se definiše i odgovarajuća funkcija gustine pojave stanja u otkazu (od trenutka t_1 do trenutka t_2):

$$F(t) = \int_{t_1}^{t_2} f(t)dt \tag{4.9}$$

Intenzitet otkaza, predstavlja odnos funkcije gustine pojave stanja u otkazu i kumulativne gustine pojave stanja u radu, i za kontinualne promene stanja može da se izrazi:

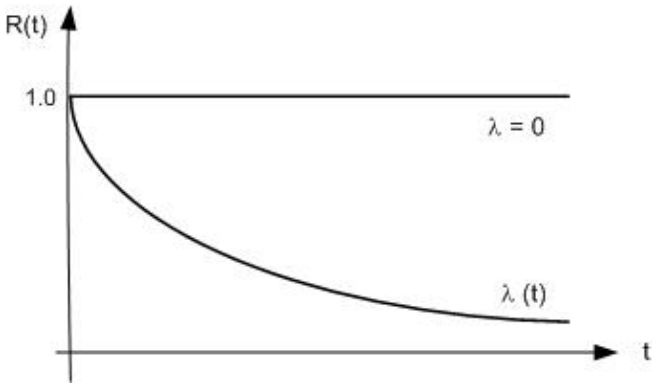
$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \tag{4.10}$$

Za konačne promene stanja biće:

$$\lambda(t) \cong \frac{N_2(t) - N_2(t + \Delta t)}{\Delta t \cdot N_2(t)} \tag{4.11}$$

Grafički, intenzitet otkaza λ može da se predstavi u zavisnosti od vremena, krivom na slici 4.1. Navedena kriva predstavlja karakterističnu krivu toka funkcije intenziteta pojava stanja u otkazu, sa tri karakteristična područja, o čemu je već pisano. Različite vrednosti intenziteta stanja u otkazu uslovljavaju

različite vrednosti kumulativne funkcije gustine intervala u radu. Promena vrednosti $R(t)$ sa promenom intenziteta otkaza može da se prikaže kao na slici 4.4.



Slika 4.4. Ponašanje funkcije intentiteta otkaza u zavisnosti od pouzdanosti sistema

Na osnovu zabeleženih vremena u radu datog sistema može da se definiše i srednje vremem u radu, odnosno srednje vreme između otkaza (*MTBF – engl. Mean Time Between Failure*) [32]. Ovaj pojam je koherentan sa pojmom pouzdanost, ali se izražava kao numerička vrednost i predstavlja srednju vrednost odgovarajućih vremena i spada u pokazatelj statističke prirode, za razliku od *F(t)* koja je vremenski zavisna funkcija.

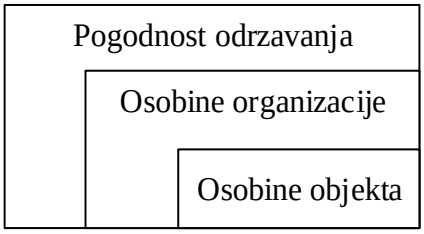
Pogodnost odžavanja vezuje se za određeni sistem održavanja i određenu strategiju održavanja, realizovanu sa određenom koncepcijom, tehnologijom i organizacijom i uslovljenu opremom, ljudstvom i drugim značajnim činiocima logističke podrške [33]. U principu osobine posmatranog sistema, od kojih zavisi pogodnost održavanja mogu da se posmatraju kao: tehničke i kao organizacione. Ovakva podela često se definiše kao konstrukcijska i logistička pogodnost održavanja [9]. U konstrukcijsku grupu spadaju: složenost konstrukcije za izvođenje popravki, struktura i kompozicija sistema u smislu povezanosti elemenata sistema, unifikacija, standardizacija, prilagođenost dijagnostici, kvalitet izrade, težina, i drugi [30]. Logistički pokazatelji pogodnosti održavanja odnose se na sledeće elemente podrške: osposobljenost i kvalifikacija radnika, opremljenost prostora i radionica, snabdevenost rezervnim delovima, organizacije i koncepta održavanja, tehničke dokumentacije, i drugo [30]. Na osnovu izloženog, pogodnost održavanja može da se definiše kao svojstvo sredstva koje se odnosi na lakoću i jednostavnost, ekonomočnost, sigurnost (ljudi, sredstva i opreme) kao i tačnost (ispravnost podataka i postupaka održavanja) u sprovođenju preventivnih i korektivnih akcija održavanja, uz predviđenu podršku u: osoblju (znanje i veština), opremi za održavanje, rezervnim delovima i potrošnom materijalu, radionicama (prostor i infrastruktura) i dokumentaciji (tehničkoj i organizacionoj) [30].

Analiza pokazatelja pogodnosti održavanja, odnosno vremena u otkazu ili vremena potrebnog za obavljanje određenih akcija održavanja, odnosi se na ukupno dejstvo svih činilaca koji utiču na sistem održavanja i njegov kvalitet. Nedostatak takve analize je nemogućnost izdvojenog dejstva pojedinih činilaca, pa ni uticaja kvaliteta same konstrukcije posmatranog tehničkog sistema na dužinu vremena u otkazu [9]. Nije sporno da sama konstrukcija utiče u velikoj meri na pogodnost održavanja, što se najbolje dokazuje posmatranjem po funkciji sličnih sistema ali različitog konstrukcijskog izvođenja. Razlike u parametrima pogodnosti održavanja mogu u tom slučaju da budu dosta velike. Pogodnost održavanja posmatrana kao skup konstrukcijskih karakteristika koje utiču na vreme otklanjanja otkaza ili na vreme obavljanja drugih postupaka održavanja, predstavljaju ‘‘unutrašnje’’ svojstvo datog tehničkog sistema. Tako da se ova funkcija naziva i konstrukcijska pogodnost održavanja ili popravljivost [30]. Konstrukcijska pogodnost održavanja jednog tehničkog sistema u najvećoj meri utiče na samu

tehnologiju održavanja, odnosno na primenjene alate i uređaje, broj izvršilaca, postupke rada itd. Komponente pogodnosti održavanja suštinski mogu da se posmatraju kroz osobine organizacije održavanja i osobine tehničkog sistema – objekta koji se održava (slika 4.5.)

Vreme u otkazu sistema u realnim uslovima sadrži vremena: pripreme, trajanja intervencije održavanja i čekanja:

- vreme pripreme obuhvata defektažu i postupak projektovanja intervencije održavanja,
- vreme trajanja same intervencije održavanja predstavlja vreme vršenja samih radova neposredno vezanih za održavanje (opravka, zamena, demontaža i sl.),
- vreme čekanja je određeno organizacionim uslovima, uslovima nabavke rezervnih delova i drugim uticajima.



Slika 4.5. Pogodnost održavanja i struktura njenih komponenti

Konstrukcijska pogodnost održavanja može da se opiše kroz niz obeležja (slika 4.6). Obeležja konstrukcijske pogodnosti održavanja mogu da se objasne: primena delova, materijala, samim tim i alata u velikoj meri standardizuju sam postupak održavanja, odnosno pojedine radnje održavanja. U najvećoj meri se to reflektuje na obim i strukturu nabavke rezervnih delova i na obučenost i uvežbanost radnika održavaoca. Drugim rečima, visok stepen unifikacije i standardizacije daje veću raspoloživost, uz manje troškove. Tehnologija indentifikacije i lociranja nastalog otkaza, odnosno prepoznavanje stanja koje traži postupke održavanja – dijagnostika, predstavlja osnovni preduslov kvalitetnog održavanja, u smislu brzine otklanjanja otkaza. Tehnološka prilagođenost tehničkog sistema održavanju se ogleda pre svega u pristupačnosti mestima na kojima je potrebno nešto raditi, stepenu složenosti operacija rasklapanja i sklapanja, mogućnost primene agregatne zamene pojedinih delova, i slično. Ovi uticaji su višestruki, kako u vezi sa trajanjem procesa održavanja, tako i u odnosu na potrebne kvalifikacije radnika, njihovu obučenost, itd. Alati i oprema su jedno od osnovnih sredstava pojedinih operacija postupka održavanja. U principu, sa gledišta pojedinačnih operacija održavanja, treba težiti specijalno prilagođenim alatima, mada se to kosi sa zahtevima standardizacije opreme, odnosno što niže cene iste. Konstrukcijske karakteristike sistema koje omogućuju njegov transport, prenošenje, pre svega na relaciji mesto eksploatacije – radionica, nazivaju se manipulativnost. Ona posebno dolazi do izražaja u strogoj hijerarhijskoj strukturi sistema održavanja, sa centralnom radionicom odnosno službom održavanja [30].

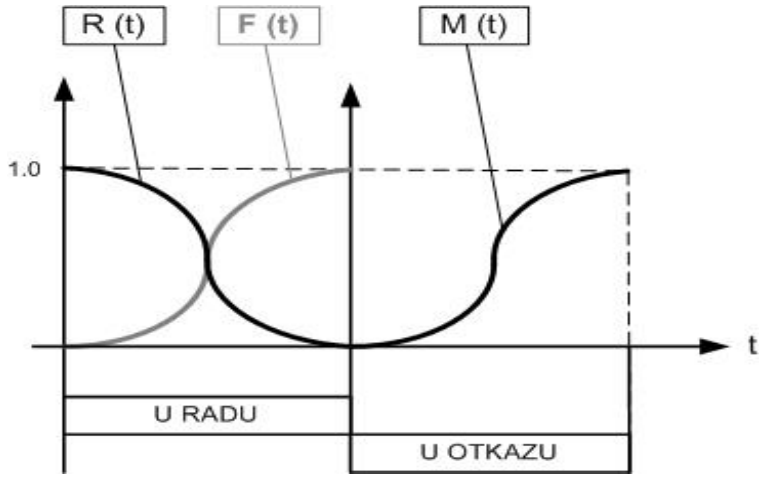
Primećuje se da navedena obeležja konstrukcijske pogodnosti održavanja u velikoj meri utiču jedna na druge, i da njihova dejstva teško ponekad mogu da se razgraniče [9]. Sigurno je da da su strogo konstruktivnog karaktera i da o njima treba razmišljati još u postupku projektovanja tehničkog sistema, eventualno u postupku rekonstrukcije, te da se njihovo dejstvo u najvećoj meri reflektuje na organizacione karakteristike sistema održavanja datog tehničkog sistema [29].



Slika 4.6. Konstrukcijska pogodnost održavanja i njena obeležja

Eksploataciju tehničkih sistema redovno prate promenljivi radni uslovi, intenzitet opterećenja, kvalitet korišćenja i održavanja, koji posredno ili neposredno utiču na pokazatelje pogodnosti održavanja. U svetu se danas razvija veliki broj metoda i tehnika za predviđanje pokazatelja pogodnosti održavanja kao i pouzdanosti. Kao primer mogu se navesti neki autori [34] koji predviđaju vreme opravki na tekućem održavanju modeliranjem jednačina regresije, kao funkcije više faktora kao: masa, udeo vitalnih sklopova u dispoziciji sistema, snaga i vrsta pogonskih agregata, godine starosti i drugo. Kao efikasniji model za predviđanje pokazatelja pogodnosti održavanja primenjuje se analiza uticajnih faktora na bazi teorije verovatnoće, dužine vremena trajanja stanja u otkazu, odnosno operacija održavanja. Primenom ovakve analize omogućava da se sa dozvoljenom tačnošću mogu prognozirati vremena postupaka održavanja. U slučajevima kada nema dovoljno podataka iz prakse, mogu se dobiti rezultati koji pokazuju tendencije pokazatelja pogodnosti održavanja, čija je analiza neophodna za dalju organizaciju upravljanja radom posmatranog tehničkog sistema.

Vreme u otkazu, odnosno neposredno trajanje održavanja tehničkog sistema, predstavlja slučajnu veličinu, koja podleže nekom zakonu raspodele. Navedena raspodela predstavlja karakteristiku celog sistema održavanja i dobro karakteriše sve uticajne činioce i njihovo dejstvo, a time i primenjenu strategiju održavanja. Praktikuje se da se raspodela vremena trajanja postupaka održavanja izražava kao jedna od funkcija verovatnoće, na indentičan način kao i u teoriji pouzdanosti odnosno nepouzdanosti. Ovo je prikazano na slici 4.7. u logičnoj kombinaciji sa odgovarajućom slikom stanja nekog tehničkog sistema. Nedostatak funkcije pogodnosti održavanja, na bazi raspodele verovatnoća, je identičan kao i za pominjane statističke pokazatelje pogodnosti održavanja. Odnosno , što ne ukazuje direktno na uzroke koji definišu funkciju, već samo na kompleks uticaja, tj. praktično ukazuje na posledice neispravnosti [9].



Slika 4.7. Funkcije pouzdanosti i pogodnosti održavanja

Funkcija pogodnosti održavanja direktno se odnosi na vreme u otkazu određenog sistema, odnosno na trajanje akcija održavanja. Najčešće se definiše kao: sposobnost tehničkog sistema da u datim uslovima korišćenja bude u stanju u kome može da izvršava zahtevanu funkciju, ili da se može ponovo dovesti u takvo stanje, a u slučaju da se održavanje sprovodi pod datim uslovima, po utvrđenim postupcima i na datim resursima. Kvantitativno se može prikazati kao: verovatnoća da će se postupak održavanja obaviti za neko vreme t_0 pod određenim uslovima, gde je vreme održavanja t_0 slučajna veličina. Ova raspodela dobro karakteriše ceo sistem održavanja, sve uticajne činioce i njihovo dejstvo, tako da daje ocenu primenjene strategije održavanja. Funkcija pogodnosti održavanja se po definicija izražava kao:

$$M(t) = \int_0^t f(t)dt \tag{4.12}$$

gde je:

t_o – vreme trajanja postupka održavanja,

$f(t)$ – funkcija gustine verovatnoće novog vremena zastoja zbog održavanja tehničkog sredstva.

Funkcija pogodnosti održavanja kao funkcija verovatnoće, predstavlja monotono rastuću fukciju. U vreme van trajanja postupka održavanja $t_0 = 0$, funkcija pogodnosti održavanja ima vrednost jednaku nuli. Ukoliko je i vreme održavanja duže i vrednost funkcije pogodnosti održavanja biće veća. Pri poređenju dva sistema održavanja, bolji je onaj koji za isto vreme trajanja procesa održavanja ima veću vrednost funkcije pogodnosti održavanja. Drugim rečima sistem koji ima veću vrednost funkcije za neko vreme, bolji je utoliko što se u njemu većina postupaka održavanja obave za to vreme, odnosno postupak održavanja se obavlja brže.

Funkcija pogodnosti održavanja može da se definiše za ceo sistem ili za pojedine podsisteme, pa čak i za pojedinačne postupke održavanja. Analizom složenijih struktura sistema a naročito ako se takvi sistemi međusobom upoređuju, dobijaju se dosta relativni pokazatelji. Osim u slučaju kada se odgovarajući složeni sistem izmeni odnosno poboljša u nekom segmentu, te se upoređuje sa prethodnim stanjem. Pri analizi pogodnosti održavanja jednostavnijih sistema, najčešće podsistema, dobijaju se kvalitetniji rezultati, koji mogu da se upoređuju jer su sagledivi svi uticaji pod kojima se došlo do rezultata. I u slučaju navedenih jednostavnijih sistema, važi konstatacija za analizu odgovarajućih izmena na sistemu.

Konstrukcijske i logističke karakteristike pogodnosti održavanja sadrže elemente koji doprinose smanjenju vremena zastoja, odnosno istovremeno povećavaju sposobnost odgovarajućeg sistema da pouzdano izvrši postavljeni zadatak. Isto tako karakteristike pouzdanosti mogu da doprinesu poboljšanju pokazatelja pogodnosti održavanja.

Pogodnost održavanja teorijski se analizira kroz funkciju verovatnoće ali i kroz odgovarajuće kvantitativne zahteve (pomoćne karakteristike), koji mogu da se prikažu na sledeći način:

- Vreme aktivnog održavanja i to kao: srednje ili maksimalno i kao korektivno ili preventivno;
- Periodičnost preventivnog održavanja;
- Vreme zastoja zbog održavanja;
- Cena održavanja po satu rada uređaja;
- Broj sati održavanja po satu rada uređaja;
- Broj osoblja po akciji održavanja;
- Troškovi održavanja za životni ciklus;

Aktivno vreme popravki predstavlja karakteristiku održavanja koja se češće u literaturi svodi na srednje vreme popravki odnosno korektivnog održavanja. U tom slučaju označava se sa *MTTR* (engl. *Mean Time To Repair*). Srednje vreme trajanja postupka održavanja predstavlja matematičko očekivanje posmatrane slučajno promenljive veličine ili aritmetičku srednju vrednost svih njenih pojedinačnih realizacija. Ako se teži preciznijem određenju, pored srednjih vrednosti trajanja postupaka održavanja mogu da se daju i odgovarajuće standardne devijacije ili disperzije. Obično se računa za određeni sastavni deo mašine koji može da otkaže. Analogno iznesenom može da se definiše i srednje vreme preventivnog održavanja odnosno srednje aktivno vreme preventivnog održavanja. Najčešće se računa za određenu radnju preventivnog održavanja.

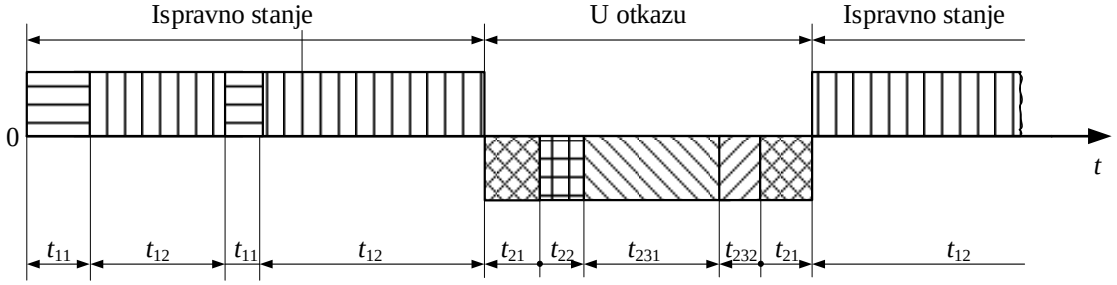
Srednje vreme aktivnog održavanja predstavlja srednje vreme trajanje postupka održavanja i to samo aktivnog rada na održavnju, isključujući sve logističke, administrativne i druge zastoje. Po pravilu se definiše za sve sprovedene postupke preventivnog i korektivnog održavanja. Najčešće se u literaturi označava sa Θ ili M.

Srednje vreme između održavanja predstavlja prosečno vreme između svih postupaka održavanja, preventivnih i korektivnih. U načelu je približno jednako srednjem vremenu između otkaza, kao karakteristike pouzdanosti, mada su moguća i izvesna odstupanja (zbog kombinovanih otkaza, preventivnih mera, itd.). Ova karakteristika se često koristi kod ocene sistema održavanja, posebno na zahteve raspoloživosti. Za srednje vreme između održavanja koristi se oznaka *MTBM*.

U sklopu priče o zahtevanim uslovima koje postavlja performansa pogodnosti održavanja mogu se definisati i kvalitativni zahtevi, kao: kvalifikacije osoblja za održavanje; potrebe za specijalnom opremom (bilo za rad bilo za održavanje); potrebe za podešavanjem; pristupačnost za nadzor pri radu i za preventivno održavanje; standardizacija delova (sklopova i elemenata); vizuelni ili zvučni nadzor funkcija ili otkaza; raščlanivost uređaja na manje celine (module, sklopove); ugrađena ispitna oprema; označavanje elemenata; tehnička upustva; ograničenost ljudskim faktorom (znanja, obuka); i dr.

4.2.2. Raspoloživost i sigurnost funkcionisanja

Raspoloživost se izračunava na osnovu vremenske slike stanja [29], na kojoj se vremena u ispravnom stanju, smenjuju sa vremenima u otkazu [17]. Vremenska slika stanja može da se prikaže na slici 4.8. Vreme kada je sistem u ispravnom stanju može da se podeli na neaktivno vreme odnosno vreme dok sistem čeka na rad (t_{11}) i vreme kada je sistem u radu (t_{12}). Vreme kada je sistem u otkazu, deli se na: organizaciono vreme (t_{21}), logističko vreme (t_{22}) i aktivno vreme popravke (t_{23}) koje može biti vreme za korektivne popravke (t_{231}) i vreme za preventivne popravke (t_{232}). Vremena t_{21} i t_{22} odnose se na: defektažu, projektovanje intervencije, administrativne poslove, nabavku rezervnih delova, alata, kvalifikovane radne snage i sl. Aktivno vreme popravke obuhvata samu opravku, montažu, demontažu, zamenu i sl. Raspored vremena nije uvek isti. Prikaz na slici 4.8 je samo jedan od mogućih primera.



Slika 4.8. Vremenska slika stanja [17]

U suštini raspoloživost predstavlja sposobnost tehničkog sistema da bude u stanju u kome može da izvršava zahtevanu funkciju, pod datim uslovima i u datom trenutku vremena a pod pretpostavkom da je obezbeđeno potrebno snabdevanje (spoljni resursi). Raspoloživost može da se izrazi i kao verovatnoća da će sistem u bilo kom trenutku (kalendarskog) vremena biti raspoloživ, odnosno da će biti u stanju da radi ili da se uključi u rad. Raspoloživost sistema predstavlja meru stanja sistema u smislu efikasnosti stupanja u dejstvo i ostvarivanja izlaznih veličina sistema na nivou područja dozvoljenih odstupanja postavljenje funkcije kriterijuma u određenom datom vremenu i datim uslovima okolne. Raspoloživost se određuje u zavisnosti od funkcije bez-otkaznog rada (pouzdanosti) i funkcije pogodnosti održavanja.

Sigurnost funkcionisanja je zajednički termin koji se koristi da opiše raspoloživost i faktore koji na nju utiču: pouzdanost, pogodnost održavanja i nivo podrške održavanju [30]. Pojam raspoloživost se uobičajeno koristi kao mera sigurnosti funkcionisanja [31]. Raspoloživost se izražava u kvantitativnim pokazateljima, te kao takva predstavlja meru sigurnosti funkcionisanja a time i meru kvaliteta u upotrebi [28]. Performansa raspoloživosti ima presudan uticaj na sigurnost funkcionisanja i kvalitet u upotrebi zbog poznate činjenice da mašinu pre svega treba imati raspoloživu za rad, kako bi se i ostale performanse realizovale [9]. Postizanje zadovoljavajuće vrednosti rasploživosti mašine u fazi korišćenja zavisi u velikoj meri od odgovarajućih postupaka održavanja, od logističke podrške kao i od obezbeđenosti odgovarajućih sredstava za održavanje. Ukupni napori za smanjenje aktivnog vremena održavanja moraju da budu praćeni i nastojanjima da se smanji neaktivno vreme u procesu održavanja, koje je prouzrokovano odgovarajućim tehničkim, logističkim i administrativnim čekanjima. Ovo zahteva odgovarajuće napore u pravcu planiranja i stvaranja realističke koncepcije održavanja, kritičku analizu planova održavanja (nivoi održavanja, identifikacija potreba, ciljevi), definisanje zahteva za sredstva logističke podrške (ljudstvo, obuka, priručnici, ispitni i pomoćni instrumenti, rezervni delovi, itd.).

Raspoloživost se određuje kao količnik ukupnog vremena tokom koga je sistem u ispravnom stanju i ukupnog vremena koje čini vreme u ispravnom stanju i vreme u otkazu [33]:

$$A(t) = \frac{\sum t_{11}, t_{12}}{\sum t_{11}, t_{12}, t_{21}, t_{22}, t_{231}, t_{232}} \tag{4.13}$$

Navedeni prikaz se često naziva i operativna raspoloživost i označava sa $A(t) = A_o(t)$.

Ako se pri određivanju raspoloživosti za vreme u otkazu uzme samo u obzir aktivno vreme korektivnog i preventivnog održavanja, govori se o ostvarenoj raspoloživosti $A_a(t)$:

$$A_a(t) = \frac{\sum t_{11}, t_{12}}{\sum t_{11}, t_{12}, t_{231}, t_{232}} \tag{4.14}$$

Unutrašnja raspoloživost dobija se kada se u obzir uzme samo aktivno vreme korektivnog održavanja $A_i(t)$:

$$A_i(t) = \frac{\sum t_{11}, t_{12}}{\sum t_{11}, t_{12}, t_{231}} \tag{4.15}$$

Raspoloživost može da se prikaže na osnovu odnosa pokazatelja *MTBF* i *MDT*,

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MDT} \tag{4.16}$$

Npr. za eksponencijalnu funkciju pouzdanosti $R(t) = e^{-\lambda t}$ i pogodnosti održavanja $M(t) = 1 - e^{\mu t}$, poznato je:

- intenzitet otkaza: $\lambda = \frac{1}{MTBF} = const.$
- intenzitet održavanja: $\mu = \frac{1}{MDT} = const.$

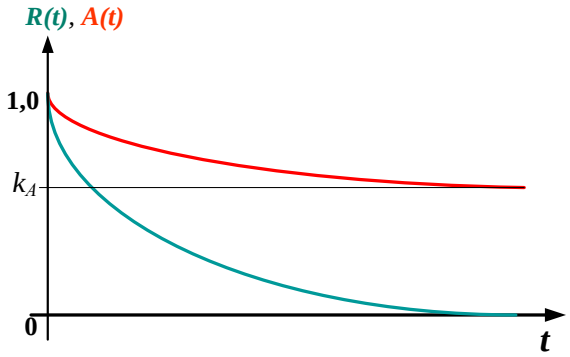
Funkcija raspoloživosti $A(t)$ u ovom slučaju može da se dobije kao:

$$A(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot e^{-(\lambda+\mu)\cdot t} \tag{4.17}$$

Odakle se stacionarna vrednost raspoloživosti dobija kao:

$$A = k_A = \lim_{t\to\infty} A(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{1}{1 + \frac{\lambda}{\mu}} = \frac{1}{1 + B} \tag{4.18}$$

Veličina k_A naziva se koeficijent raspoloživosti i dobija se kada se računa $A(t)$ za $t \to \infty$, odnosno kada vrednost raspoloživosti postane stacionarna (slika 4.9) [33].



Slika 4.9. Odnos pouzdanosti R(t) i raspoloživosti A(t).

Na slici 4.9 prikazan je odnos funkcija raspoloživosti i pouzdanosti. Vidi se da je zahtev raspoloživosti mnogo stroži nego zahtev pouzdanosti, $R(t) \leq A(t)$.

U realnim uslovima eksploatacije i održavanja tehničkih sistema, raspoloživost se prikazuje na odgovarajući način (4.13), (4.14), (4.15) u zavisnosti od podataka koji su evidentirani. Retko kada su ispunjeni uslovi da se analitički može odrediti funkcija raspoloživosti u obliku (4.16), (4.17). Takođe, ne može se generalizovati u kojoj meri pojedini vremenski pokazatelji rada utiču na raspoloživost kao i koji delovi sistema utiču na raspoloživost sistema. U literaturi se pominju sledeći parcijalni vremenski pokazatelji:

- *MTBM – mean time between maintenance*, srednje vreme u ispravnom stanju, odnosno između održavanja koje obuhvata vremena: t_{11}i t_{12}

- *MDT –mean down time,* srednje vreme u otkazu koje obuhvata vremena: t_{21}, t_{22}, t_{231} *i* t_{232}
- *MRT – mean redens time*, srednje vreme čekanja na rad koje obuhvata vreme t_{11}
- $\bar{M}$ *– mean maintenance active repair,* srednje preventivno i korektivno vreme aktivnog održavanja, aktivno vreme popravke koje obuhvata vremena: t_{231} i t_{232}
- *MTBF – mean time between failure*, srednje vreme između otkaza, odnosno između korektivnog održavanja koje obuhvata sva vremena izuzev t_{231}
- *MTTR – mean time to repair,* srednje korektivno vreme aktivnog održavanja odnosno popravke koje obuhvata vreme t_{231}

Sigurnost funkcionisanja je zajednički termin koji se koristi da opiše performansu raspoloživosti i faktore koji na nju utiču: performansa pouzdanosti, performansa pogodnosti održavanja i performansa podrške održavanju. Ovde je očigledno da se odvojeno posmatraju konstrukcijska pogodnost održavanja koja je imenovana samo kao pogodnost održavanja i logistička pogodnost održavanja koja je imenovana sa podrška održavanju. Razdvojeno posmatranje navedene dve performanse održavanja, potpuno je logično, s obzirom na daleko složeniju strukturu vremena u otkazu u odnosu na vreme u radu koje reperezentuje pouzdanost, o čemu je već pisano.

Performanse pouzdanosti i pogodnosti održavanja su u najvećem broju slučajeva najvažnije karakteristike proizvoda (opreme) odnosno presudne u sprečavanju neželjenih efekata, bilo troškova, šteta ili eventualno ozleda. Međutim, proizvođač može da isporuči proizvod koji zadovoljava sve postavljene zahteve u odnosu na pouzdanost i pogodnost održavanja, ali on može biti neraspoloživ ukoliko nije obezbeđena adekvatna logistička podrška. Ovim pitanjima bave se standardi serije IEC 300 [35]. Zato su oni i postali žiža interesovanja u pravcu obezbeđenja sigurnosti funkcionisanja, a time i suštinska dopuna seriji već dovoljno poznatih standarda ISO 9000, koji se ovim pitanjima na ovakav način ne bave. Podizanje nivoa razjašnjenja pominjanih pojmova, prvenstveno sigurnosti funkcionisanja i ranije definisanog upotrebnog kvaliteta, na nivo standarda proizašlo je iz savremenih potreba u razvoju upravljanja industrijskim sistemima i korišćenja tehničkih resursa. Naime, u poslednjoj deceniji prošlog veka, način razmišljanja gde se na kvalitet proizvoda gleda samo sa nivo prizvođača, odnosno na nivou proizvodno-tehnološkog procesa pre početka korišćenja proizvoda, postao je i više nego zastareo ili u najmanjoj meri nepotpun.

Mašine ili oprema se isporučuju (prodaju ili iznajmljuju) sa ugovorima i garancijama za sve karakteristika sigurnosti funkcionisanja. Logistička podrška održavanju od strane isporučioca, danas postaje možda i najvažniju deo ugovora, proizvođač ili njegov lokalni zastupnik preko aranžmana podrške opremi garantuje raspoloživost na određenom nivou, odnosno po ugovorenom nivou održavanja [28]. Očigledno je da odgovornosti za obezbeđenje sigurnosti funkcionisanja snose i isporučilac i kupac.

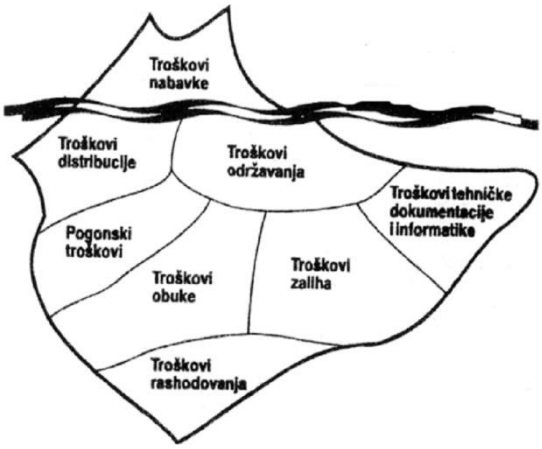
4.2.3. Kritička analiza tehničkih pojmova životnog veka

U poslednjim decenijama XX veka, koncept upravljanja sigurnošću funkcionisanja [35] razvijen je od strane Međunarodne elektrotehničke komisije, kako bi obezbedio integrisani pristup upravljanju i obezbeđivanju: sigurnosti funkcionisanja, raspoloživosti, pouzdanosti, pogodnosti održavanja i performansi sistema za podršku održavanja. Ovaj koncept je takođe označen kao međunarodni standard IEC 300. Standard između ostalog, navodi da performansa sigurnosti funkcionisanja uključuju raspoloživosti, kao svoju meru. Sigurnost funkcionisanja je definisana u [36] kao "*mogućnost da se izbegnu otkazi u radu koji su češći i ozbiljniji nego što su za korisnika prihvatljivi*". U [37] sigurnost funkcionisanja je prokazana kao drvo koje ima tri grane. Prvu čine atributi koji pored „*raspoloživosti, pouzdanosti i pogodnosti održavanja*“ obuhvataju: *sigurnost, poverljivost, integritet*. Druga grana sadrži načine da se otkazi kontrolišu, i tu su svrstani: *sprečavanje otkaza, tolerancija otkaza, uklanjanje i prevencija otkaza*.

Treća grana predstavlja "*opasnost": greške i otkazi (kvarovi)*. Iako u istom duhu, neki autori su donekle drugačije odredili međuzavisnost sigurnost funkcionisanja - raspoloživost. U [37] sigurnost funkcionisanja je definisana kao *indikator "inžinjering održavanja",* koji uključuje: pouzdanost, sigurnost, pogodnost održavanja, bezbednost, nivo rizika i kvalitet. U [38] su dodati i pokazatelji kao što su: vreme održavanja, rad na održavanju, učestalost održavanja, odnosno pominju se: *aktivno vreme održavanja, vreme kašnjenja zbog logistike, administrativno vreme kašnjenja.* Prethodno pomenuta vremena definišu *raspoloživo vreme* kao pokazatelj raspoloživosti. U radu [39] autori prave literaturni pregled gde navode radove gde se pominje i *efikasnost* i *efektivnost* kao koncepti bliski raspoloživosti i koji direktno zavise od pouzdansoti. U svakom slučaju, sigurnost funkcionisanja kao mera raspoloživosti je samo standardizovan, sveobuhvatni koncept, koji opisuje tehničke sisteme sa stanovišta: dizajna, rada i održavanja [40]. Evidentno je da standard daje definiciju sigurnosti funkcionisanja deskriptivno, lingvistički bez formalnog računanja. Samim tim i raspoloživost kao njena mera ostaje matematički i koncepcijski nedorečena. U radu [41], [42] primećeno je da parametri koji definišu upotrebni kvalitet mašine nisu konzistentni, u sebi imaju dosta neodređenosti i ne mogu da se izraze kvantitativno, pa je razvijen model njihove integracije na bazi teorije fazi skupova . Korišćena je max-min kompozicija, gde su ishodi definisani kao srednja vrednost. U radu [43] takođe je korišćena fazi teorija za sintezu parametara raspoloživosti ali su pouzdanost i pogodnost održavanja, prikazani su na bazi teorije verovatnoće. Zbog toga je ovde uveden pojam fazifikacije kumultivne funkcije. Na osnovu dosadašnjih radova se može zaključiti da na raspoloživost utiče veliki broj parcijalnih indikatora koji se među sobom preklapaju i čiji uticaj nije isti kod svih tehničkih sistema, kao i kod istog tehničkog sistema u različitim vremenskim (starost mašine) i prostornim (radno i servisno okruženje) koordinatama. Parcijalni pokazatelji su: pouzdanost, pogodnost održavanja sa konstrukcijske strane, pogodnost održavanja sa logističke strane, funkcionalnost i adaptivnost, bezbednost (nivo rizika po radnu i životnu sredinu).

4.3 Troškovi životnog veka

Svaka aktivnost i svaki segment životnog ciklusa, zahteva ulaganje određenih materijalnih sredstava. Troškovi životnog ciklusa dele se na troškove koje se javljaju jednom i troškove koji se ponavljaju [27]. Troškovi koji se ne ponavljaju uglavnom su vezani za period pre nabavke mašine (istraživanje i razvoj, konstruisanje i dr) i na troškove koji se ponavljaju tokom eksploatacije mašine (troškovi održavanja, rukovanja, goriva i dr).



Slika 4.10. Troškovi životnog veka [14]

Na slici 4.10, troškovi životnog veka su prikazani u obliku ledenog brega, gde je vidljiv samo jedan deo (troškovi nabavke), dok su ostali troškovi pod vodom (nevidljivi) [14].

Ukupni troškovi životnog veka određuju prodajnu cenu proizvoda, odnosno posmatranog tehničkog sistema, kao i nivo početnih ulaganja. Pored tih troškova, postoje druga nužna ulaganja, koja su vezana na održavanje, koji često čine veći deo ukupnih troškova. Mehanizacija se uglavnom nabavlja na bazi troška životnog veka, odnosno održavanje se zasniva na troškovima životnog veka, što je predstavljeno na krivoj "kada". Prema krivoj koja se bazira na stopama otkaza u zavisnosti od vremena, više održavanja je potrebno kada je mehanizacija duže korišćena (slika 1.5). Rudarska mehanizacija je u opštem slučaju kombinacija električnih i mehaničkih komponenti, pri čemu je završetak ekonomskog životnog veka određen mehaničkim komponentama u skladu sa eksponencijalnim rastom troška održavanja u završnoj fazi korišćenja [5]

4.3.1 Procena troškova životnog veka

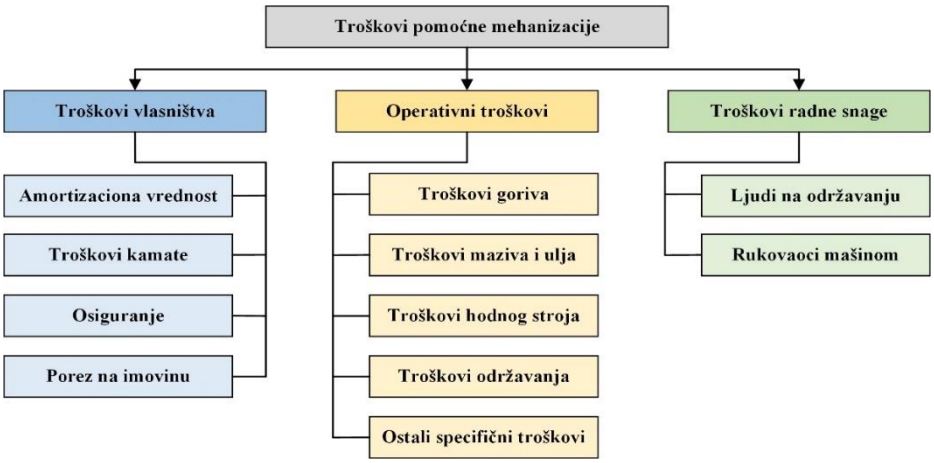
Efektivnost uloženih sredstava, odnosno efektivnost ukupnih troškova životnog veka – *Cost Effectiveness* zavisi od više elemenata, vezanih za tehnički sistem i njegovu okolinu, konstrukciju sistema i logističku podršku. Efektivnost uloženih sredstava je efektivnost tehničkog sistema svedena na jedinicu uloženih sredstava, računajući pri tome sredstva koja su ulagana tokom svih faza njegovog životnog ciklusa**.**

Analiza troškova se radi za ceo životni vek, mada ima slučajeva da se radi samo za jedan deo, npr, procena troškova održavanja.

Postoji mnogo metoda za procenu troškova životnog veka, a najpoznatija je Procena troškova životnog veka – koncept, postupak i primena, prema standardu IEC-a, koja podrazumeva:

- identifikovanje svih vrsta troškova i mesta njihovog nastanka, i
- uporedno procenjivanje pojedinih troškova za različite varijante tehničkog sistema koji se posmatra.

U konkretnim okolnostima površinskog kopa ukupni troškovi generišu se iz tri pravca. Prvi činilac ukupnih troškova su troškovi vlasništva mašine koji predstavljaju amortizacionu vrednost otpisa investicionog ulaganja vlasnika kompanije kroz period korišćenja mašine. Operativni troškovi su drugi segment u ukupnim troškovima i generišu se svakodnevnim korišćenjem mašine. Dok je treći deo ukupnih troškova trošak angažovanja radne snage tj. troškovi ljudstva na održavanju i rukovanju mašinom.



Slika 4.11. Klasifikacija ukupnih troškova pomoćne mehanizacije

4.3.2 Troškovi vlasništva

Bilo da je reč o velikoj ili maloj kompaniji, nabavka nove mašine predstavlja značajno investiciono ulaganje. Menadžment kompanije teži da zaštiti svoje investiciono ulaganje u opremu, tako što će svoje ulaganje povratiti kroz period rada i profit ostvaren primenom opreme. Ta vrednost jednaka je zbiru gubitka na samu opremu (kroz vreme), troškovima posedovanja, kamate, osiguranja i poreza. Gubici koji predstoje se unapred uračunavaju a opravdavaju se uspostavljanjem amortizacionog perioda prema korišćenju opreme.

Period vlasništva izražava se u: godinama, radnim satima rada po godini korišćenja i u ukupnim radnim satima koje je mašina u svom radnom veku napravila. To je osnovni parametara u odnosu na koji zavise troškovi vlasništva. Najčešći oblik izračunavanja troškova postavlja se relacijom između broja godina i očekivanih radnih sati koje će mašina napraviti. Na osnovu toga se definišu parametri za amortizaciju.

Troškovi vlasništva mogu da variraju u širokom opsegu zbog velikog broja faktora koji imaju uticaj na rad mašine. Neki od tih faktora su: vrsta posla koju mašina obavlja, uslovi rada, period projektovanog korišćenja, intenzitet angažovanja, lokalni standard države i sl.

Za definisanje troškova vlasništva neophodni su sledeći podaci [44]:
- cena isporuke / nabavke mašine,
- preostala vrednost pri zameni mašine ili njenog otpisa (posle amortizacionog perioda),
- vrednost koju treba obnoviti kroz rad (razlika cene isporuke i preostale vrednosti mašine).
- troškovi koji se trebaju obnoviti kroz rad svedeni na radni sat,
- troškovi kamate,
- troškovi osiguranja,
- troškovi poreza na imovinu.

Cena isporuke uključuje troškove instaliranja mašine prema zahtevima korisnika, transport do lokacije korišćenja kao i sve takse i poreze. Postoji mogućnost u organizovanju nabavke dodatnih elemenata opreme koji su podložni habanju (npr. hodni stroj) koji bi bili rezervni delovi a bili bi uključeni u cenu isporuke mašine.

Preostala vrednost pri zameni mašine definiše se u slučaju da se mašina u nekom trenutku preprodaje kako bi se obezbedila sredstva za nabavku nove ili u trenutku kada je mašina otpisana ali i dalje ima neku svoju vrednost. Faktori koji imaju najveći uticaj na definisanje vrednosti mašine pri preprodaji: godine starosti mašine, broj napravljenih radnih sati do trenutka procene, vrsta posla koje je mašina radila, uslovi u kojima je radila i fizičko stanje mašine. Preprodajna vrednost mašina istog tipa često je različita među državama.

Vrednost koju treba obnoviti kroz rad predstavlja razliku između cene nabavke i preostale vrednosti pri zameni mašine. Ove vrednosti se potom svode na radne sate mašine čime se dobija vrednost koja se treba povratiti prema svakom satu. Postoji dva slučaja izračunavanja vrednosti amortizacije, prvi je kada se mašina „preprodaje“ i tada je vrednost amortizacije jednaka ceni isporuke umanjenoj za preostalu vrednost mašine pri zameni.

Drugi slučaj je kada se mašina u potpunosti koristi i nakon toga njen funkcionalni rad nije moguć i tada je amortaziciona vrednost jednaka ceni isporuke [44].

Prilikom definisanja vremenskog perioda za koje će se izvršiti amortizacija u zavisnosti od raspoloživosti podataka postoje dve mogućnosti analize:

- analiza posredstvom sopstvenih podataka sa površinskog kopa, ili
- analiza primenom preporuke proizvođača.

Za period primene pomoćne mehanizacije najčešće se usvaja u opsegu od 7 do 15 godina u zavisnosti od mašine i tipa poslova kojima će se mašina baviti. Na primer za dozere koji rade na površinskim kopovima uglja, često se za amortizacioni period usvaja 10 godina tako da se pri trenutnoj analizi sa postojećim podacima za mašine koje ne ispunjavaju pomenuti uslov od 10 godina korišćenja, usvaja koeficijent amortizacije. Koeficijent amortizacije za taj period je 0,1 i ta vrednost se primenjuje u predstojećoj jednačini za redukovanje cene isporuke *P'* [1, 44].

$$P' = \left[1-(B-N)\cdot a\right]\cdot P \quad [€] \tag{4.19}$$

gde je:

P – Cena isporuke mašine, [€] ;
B – Definisani period korišćenja mašine, [god] (za dozere najčešće je *B* = 10 god);
N – Broj godina korišćenja mašine, [god] ;
a – Koeficijent amortizacije, [%].

Preporuke koje proizvođač daje definisane su na osnovu uslova rada i poslova koje mašina obavlja. Kao reprezentativan primer u tabeli 1 prikazana je preporuka kompanije *Caterpillar* gde su za tri klase uslova rada (laki, srednji i teški) prikazani očekivani radni moto sati dozera i grejdera u toku njihovog životnog veka [44].

Tabela 4.1. Preporuka proizvođača *Caterpillar* o radnom veku dozera u zavisnosti od uslova rada [44]

DOZERI			
	*Uslovi*	*Opis posla*	*Preporuka (mh)*
	Laki	- Vuča skrepera, poljoprivredni poslovi; - Planiranje zemljišta.	18000 - 30000
	Srednji	- Kopanje, doziranje i ripovanje mekih stena, - Guranje skrepera; Čišćenje terena.	10000 - 18000
	Teški	- Kopanje, doziranje i ripovanje veoma čvrstih stena.	8000 - 15000

Preporuke proizvođača su samo grube smernice za definisanje amortizacije. Najznačajniji faktor koji imaju uticaj na radni vek mašine su uslovi rada, brzina prikupljanja sredstava u fond amortizacije od strane vlasnika mašine, ekonomski lokalitet okruženja gde mašina radi, ali pre svega i kvalitet održavanja mašine. Adekvatnim preventivnim i korektivnim održavanjem mašine produžiće se njen radni vek, dok sa druge strane loše održavanje negativno utiče na mašinu, ubrzava njeno zastarevanje i skraćuje joj radni vek.

Interesna kamata je deo koji investitori pri kupovini nove mašine treba da obračunaju bilo da se ulaganje finansira iz sopstvenih izvora ili bankarskim kreditom. U oba slučaja vrednost interesne kamate bi trebalo uračunati u ukupne troškove vlasništva. **Osiguranje i takse na vlasništvo** su različite u državama i preračunavaju se na preostalu vrednost koja je razlika cene isporuke i trenutnog amortizovanog iznosa s toga se ove vrednosti smanjuju svake godine. U nastavku je dat primer proračuna za troškova osiguranja svedenih na jedinicu euro po radnom (moto) satu mašine [44]:

$$I = \frac{\frac{P\cdot(N+1)+S\cdot(N+1)}{2N}\cdot\frac{i}{100}}{C} \quad \left[\frac{€}{mh}\right] \tag{4.20}$$

gde je:

I – Troškovi osiguranja, [€/mh];
S – Vrednost mašine u trenutku zamene (preprodajna vrednost), [€];
C – Prosek godišnjeg angažovanja mašine [mh/god];
i – Koeficijent osiguranja [%].

Prema istom principu računaju se i vrednosti interesne kamate (kreditno zaduženje) i takse vlasništva (porez) sa razlikom u procentnoj visini definisanih koeficijenata.

4.3.3 Operativni troškovi

Troškovi koji se generišu prilikom rada i održavanja mašine često su veći od osnovnog troška investicionog ulaganja tj. troškova vlasništva. S toga je prilikom analize ukupnih troškova neizbežna i analiza operativnih troškova na osnovu podataka prikupljenih sa razmatranog površinskog kopa ili preporuke proizvođača opreme.

Osnovni činioci operativnih troškova su [1]:

- Troškovi goriva,
- Troškovi maziva (ulja i masti) i filtera,
- Troškovi hodnog stroja (pneumatici ili gusenični tip),
- Troškovi održavanja (preventivno, korektivno održavanje),
- Ostali specifični troškovi.

Potrošnja goriva je u direktnoj korelaciji sa faktorom opterećenja motora. Faktor opterećenja motora definiše trenutno opterećenje motora u odnosu na njegov maksimalni kapacitet. Kada motor kontinualno koristi potpunu (konjsku) snagu u radu njegov faktor opterećenja je 100% i tada je i najveća potrošnja goriva. Takav rad je karakterističan u kraćim vremenskim intervalima. Situacije u kojima motor ima smanjeno iskorišćenje svoje snage su: *kretanje u praznom hodu, kretanje u povratnom smeru, kretanje nizbrdo, kada radni organ nije opterećen, u periodu manevrisanja i sl.* [44].

Osnovna jednačina za procenu časovne potrošnje goriva: časovna potrošnja pomnožena sa lokalnom cenom goriva.

Najpouzdaniji podaci o potrošnji goriva dobijaju se direktnim merenjem na površinskom kopu, ali ipak u slučaju nedostatka podataka, postoji preporuka proizvođača mašine o potrošnji goriva u zavisnosti od tipa mašine i uslova u kojima radi odnosno faktora opterećenja motora. U tabeli 4.2 dat je primer klasifikacija uslova rada prema faktoru opterećenja motora dozera u zavisnosti od tipa posla koji izvršava dok je u tabeli 4.3 dat opseg potrošnje goriva dozera proizvođača *Caterpillar*.

Tabela 4.2. Odnos faktora opterećenja motora prema uslovima rada [44]

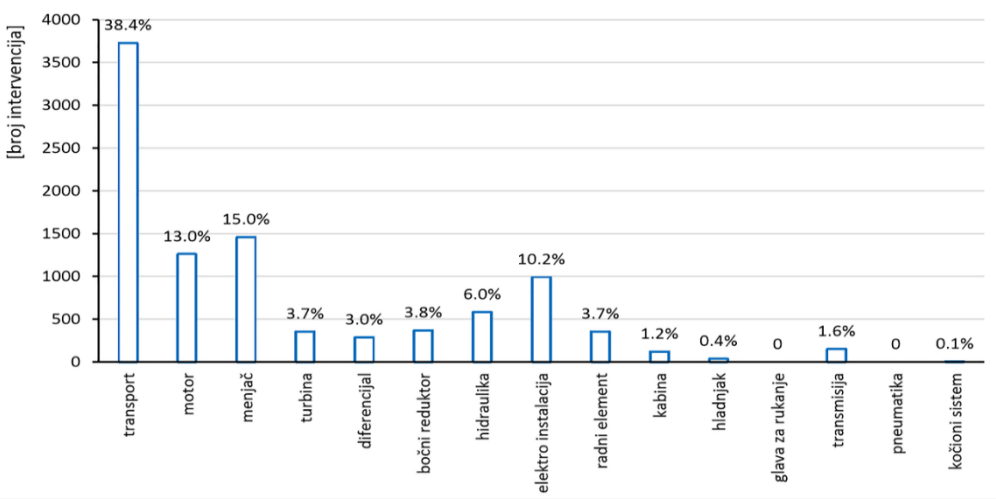
DOZERI			
	*Uslovi*	*Opis posla*	*Faktor opterećenja*
	Laki	- Kretanje mašine koje se uglavnom sastoji u praznom hodu bez opterećenja na radni organ;	35 – 50 %
	Srednji	- Zemljani radovi; Vuča skrepera ili neke druge operacije guranja.	50 – 65 %
	Teški	- Ripovanje, vuča i guranje teških mašina ili materijala, kontinualan rad bez odmora pri punom iskorišćenju snage motora;	65 – 80 %

Tabela 4.3. Opseg potrošnje goriva prema uslovima rada različitih tipova dozera [44]

Tip dozera	*Laki*	*Srednji*	*Teški*
D7E	14,8 – 20,8	20,8 – 27,2	27,2 – 34,5
D7G	16,0 – 22,5	22,5 – 29,0	29,0 – 35,5
D7R (serije 2)	-	24,6 – 31,4	31,4 – 39,0
D8R	22,5 – 32,0	32,0 – 41,5	41,5 – 51,0
D8T (Tier 3)	23,5 – 33,7	33,7 – 43,5	43,9 – 53,7
D9T (Tier 3)	30,3 – 43,1	43,1 – 56,4	56,4 – 69,3
D10T	42,8 – 60,1	60,1 – 79,5	79,5 – 97,7
D11R	61,0 – 87,0	87,0 – 113,0	113,0 – 139,5
D11T	59,0 – 84,4	84,4 – 109,8	109,8 – 135,1

Isti princip primenjuje se i pri proceni **troškova maziva i ulja**. Najpreciznije vrednosti potrošnje dobijaju pri merenju intervala između podmazivanja. Ipak, uslovi rada često ne ostavljaju mogućnost precizne analize na konkretnom površinskom kopu s toga se kao i kod potrošnje goriva, korisnik često oslanja na preporuku proizvođača. Jednačina koja se primenjuje kod izračunavanja ista je kao kod goriva gde uzima u obzir časovnu potrošnju (ulja, maziva) i cenu.

Prema analizi o broju intervencija podeljenu na sklopove iz primera dozera na RB Kolubara na slici 4.12, može se uočiti da je daleko najveći broj intervencija izvršen na hodnom stroju. Pored toga što je intenzitet prijavljenih kvarova najveći, troškovi zamene transportnog sistema bilo da je reč o pneumatskom ili o guseničnom su veoma visoki [1].



Slika 4.12. Procentualno učešće sklopova u ukupnim kvarovima na dozerima u RB Kolubara [1]

Održavanje rudarskih mašina definisano u dva osnovna pravca: kao preventivno i korektivno održavanje. Preventivno održavanje predstavlja planske aktivnosti koje definiše proizvođač opreme ili politika kompanije u kojoj mašina radi. Realizuje se kroz vremenski definisan mali i veliki servis ili prema preporukama proizvođača opreme. Preventivno održavanje ima za cilj da spreči pojavu kvara, održava stanje mašine na visokom nivou, omogući što veću raspoloživost i uspori njeno zastarevanje.

„On-line“ praćenje, dijagnostičke analize, inspekcije indikatora stanja od vitalnog su značaja za određivanje optimalne tačke održavanja a na taj način postižu se smanjenja troškova održavanja po moto satu rada.

Aktivnosti na malom i velikom servisu pri preventivnom održavanju prikazane su u tabeli 4.4.

Tabela 4.4. Aktivnosti na malom i velikom servisu kod motora sa unutrašnjim sagorevanjem

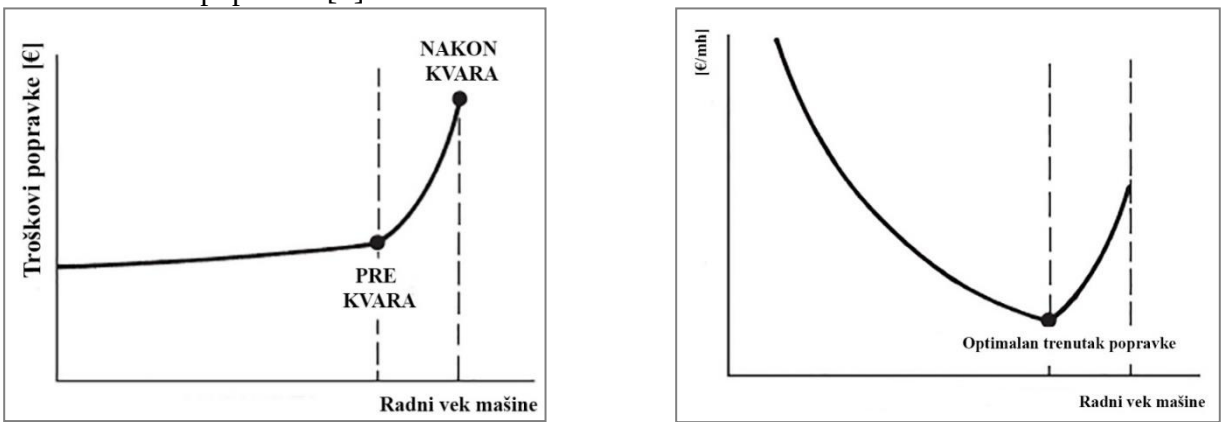
Mali servis	Veliki servis
- zamena ulja u motoru	- zamena ulja u motoru
- zamena filtera za ulje	- zamena ulja u transmisiji
- zamena filtera za gorivo	- zamena ulja u hidraulici
- čišćenje ili zamena filtera za vazduh	- zamena ulja u bočnom reduktoru
- zamena filtera za vodu	- zamena filtera za ulje
- provera nivoa tečnosti i maziva u svim sklopovima	- zamena filtera transmisije
- provera elektro-instalacija	- zamena filtera hidraulike
- provera svih sklopova	- zamena filtera za gorivo
- podmazivanje mašine	- zamena filtera za vazduh
	- zamena filtera za vodu
	- podešavanje motora (ventila i injekora)
	- provera nivoa tečnosti
	- provera elektro-instalacija
	- provera svih sklopova
	- podmazivanje mašine

Na troškove preventivnog održavanja utiču troškovi svih potrošnih materijala (filtera, ulja, masti) kao i troškovi angažovanja ljudi na održavanju. Veliki uticaj na visinu troškova ima cena potrošnog materijala kao i standard države koji definiše visinu bruto zarade radnika. Zbirni troškovi potrošnog materijala i angažovana ljudi u toku trajanja servisa svode se na radne sate između dve aktivnosti preventivnog održavanja čime se dobijaju troškovi po radnom (moto) satu mašine.

Neplanske aktivnosti sprovode se usled prijavljenih kvarova, havarija ili oštećenja koji su prouzrokovali zastoj mašine. Period korektivnog održavanja mora biti što kraći. Najčešća podela intervencija je prema sklopovima i to na: agregat, transmisiju, hidrauliku, elektro instalaciju, radni element i hodni stroj.

Sa aspekta troškova korektivnog održavanja, najveći uticaj imaju uslovi rada, vlasnički period, životni vek komponenti i kvalitet prethodnog održavanja. Sprečavanjem pojave kvara mogu se značajno smanjiti ukupni troškovi popravke.

Troškovi popravke mašine u početku radnog veka su niski i kumulativno rastu sa vremenom u toku rada mašine. Dijagram prikazan na slici 4.13 pokazuje kretanje troškova pre pojave kvara i nakon pojave kvara. Na istoj slici vidi se i dijagram kretanja prosečnih troškova u toku radnog veka mašine sa optimalnim trenutnom popravke [1].



Slika 4.13. Rast troškova popravke i kretanje prosečnih troškova popravke [1]

Proračun troškova održavanja mašine radi se na osnovu pristupačnosti podataka sa konkretnog površinskog kopa ili iskustveno uz preporuke proizvođača. Metodološki pristup organizaciji aktivnosti održavanja zavisi od politike kompanije pa je isto tako i način proračuna troškova različit.

Proračunom svih prethodno definisanih troškova definiše se granica isplativosti primene određene mašine. Trenutak kada troškovi prevaziđu definisanu granicu isplativosti, preporučene se zamena mašine odnosno nabavka nove.

4.3.3 Troškovi radne snage

Troškovi radne snage dele se na troškove radne snage na rukovanju mašinama i troškove radne snage na održavanju mašina. Oni u osnovi pripadaju operativnim troškovima rada pomoćne mehanizacije. Troškovi su u funkciji lokalne cene rada i zavise od načina organizacije rada pomoćne mehanizacije na konkretnom kopu (trosmenski rad, jednosmenski rad, povremeni rad i dr) kada su u pitanju troškovi radne snage na rukovanju mašinama, kao i načina organizacije službe održavanja.

5. MODELI EKONOMSKE TEORIJE ZAMENE RUDARSKIH MAŠINA

Zadatak upravljanja životnim vekom pomoćnih mašina je ostvarivanje maksimalnog mogućeg profita, što se postiže kroz ostvarivanje maksimalnih proizvodnih kapaciteta uz adekvatno upravljanje troškovima. Stalnim praćenjem i analiziranjem kretanja troškova moguće je obezbediti brzu i efikasnu reakciju. Ako se posmatra površinski kop, troškovi se manifestuju pri svakodnevnom radu kako osnovne, tako i pomoćne mehanizacije, izvođenju brojnih pomoćnih i pripremnih radova, kroz angažovanje ljudstva i sl. Kontrolom i smanjenjem troškova poboljšava se finansijski položaj rudnika i dobija se jeftiniji proizvod.

Osnovna klasifikacija troškova može se izvršiti na:
- direktne i
- indirektne.

Direktni troškovi su troškovi koji su vidljivi i merljivi. Realizuju se kroz gubitke tj. kroz ulaganja u proces rada, u održavanje ili zamenu određenih elemenata sistema i opreme. Ovi troškovi se relativno lako mogu pratiti i analizirati. Za razliku od njih veću dozu neizvesnosti i nepredvidivosti indukuju ***indirektni troškovi***. Oni se javljaju pri neplaniranom iznenadnom sledu događaja. Izazivaju ih zastoji u procesu rada i u rudarstvu se mogu izjednačiti sa gubitkom planirane proizvodnje. Pad kapaciteta može biti rezultat rada u otežanim uslovima kada dolazi samo do smanjenja kapaciteta ili može doći do otkaza mašine tj. do kvara koji izaziva kompletno obustavljanje rada do otklanjanja kvara. Zastoj u radu kontinualne mehanizacije indukuje veoma visoke indirektne troškove. Može se reći da prekid rada kontinualnog sistema od nekoliko časova stvara indirektne troškove od nekoliko desetina hiljada €.

Prilikom donošenja odluke o nabavci nove mašine, nije dovoljno posmatrati isključivo početno investiciono ulaganje. Veoma je čest slučaj da se operativni troškovi u konkretnim uslovima rada u značajnoj meri razlikuju između proizvođača i klasa mašina. Naime, kako bi se stvorila potpuna slika rada određene mašine sa ekonomskog pogleda, neophodno je analizirati i proračunati kako troškove investicionog ulaganja (troškove vlasništva) tako i operativne troškove koji se indukuju kroz operativni rad razmatrane mehanizacije u konkretnim uslovima radne sredine.

Odluke vezane za mehanizaciju moraju se bazirati na ispravnim ekonomskim principima, a ne na emocijama ili intuiciji [6]. Modeli ekonomske teorije zamene pokušavaju da daju odgovor na pitanje: ”Koliki je optimalni ekonomski vek ovog dela mehanizacije?” Cilj je iznalaženje optimalne dužine služenja za datu mašinu. Pošto to vreme istekne, tada se javlja barem jedna od mogućih alternativa (zamena, povlačenje, remont, i sl.) što je mnogo ekonomičnije od zadržavanja mašine u istom stanju. U modelima se pokušava doći do optimalne dužine životnog veka korišćenjem tehnika koje se zasnivaju na ekonomskim naukama [14].

Postoje tri osnovne teorije u oblasti ekonomije vezane za zamenu, koje su relevantne za razumevanje. To su: model smanjenja troška, model povećanja profita i model limita opravke. Postoje i mnogi drugi modeli zamene u literaturi [45], ali su mnogi od njih kategorični da su to ili smanjenje troškova ili povećavanje profita. Teorije smanjenja troška i povećanja profita su se razvijale paralelno početkom dvadesetih godina prošlog veka. Teorija limita popravke je relativno novija i prvi put se pojavljuje šezdesetih godina prošlog veka. Termine ”*Defender* – Zaštitnik” i ”*Challenger* – Izazivač” uveo je Terborgh, 1949 [26]. Zaštitnik je mašina koja je predmet posmatranja u kompaniji. Izazivač je nova mašina koja može služiti za istu namenu kao i Zaštitnik [14].

5.1 Minimiziranje (smanjenje) troška

Teorija minimiziranja troška može se objasniti grafički. Većina troškova koja se vezuje za mašine može se podeliti u dve kategorije: troškovi posedovanja i operativni troškovi. Prosečni trošak posedovanja za datu mašinu se smanjuje onoliko dugo koliko se mašina koristi. To je zbog toga što je većina kapitalnih troškova uključena u vlasništvo mašine jednaka kao i kad je kupljena. Kako vreme odmiče, prosečni troškovi opadaju. Prosečni operativni trošak za datu mašinu raste kako se mašina duže koristi. Na primer, kada je mašina nova, troškovi popravke su mali i retki. Kako mašina radi, popravke postaju češće a troškovi rastu. Minimiziranje troška teži uspostavljanju ravnoteže između opadajućih troškova posedovanja i rastućih operativnih troškova. Posmatramo tri krive: prosečni troškovi posedovanja, prosečni operativni troškovi i prosečni ukupni troškovi [14].

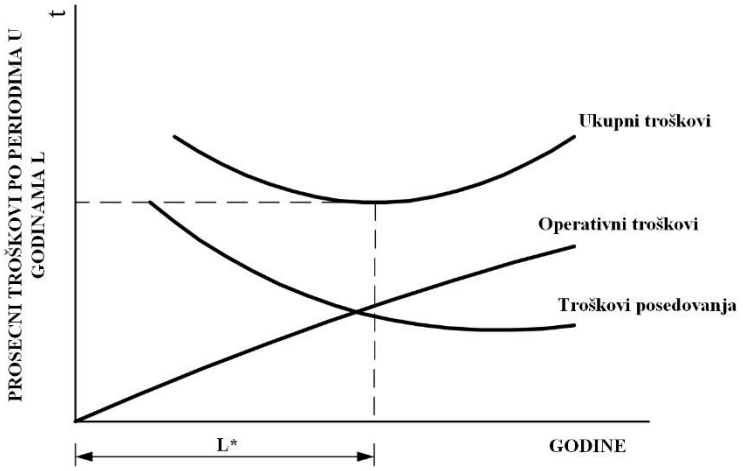
$$Prosečni\ troškovi\ posedovanja\ =\ \frac{P_o - S_t}{L_t} \qquad (5.1)$$

Prosečni operativni troškovi:

$$Prosečni\ operativni\ troškovi\ =\ \frac{\sum_{0}^{t} E_p}{L_t} \qquad (5.2)$$

gde su:

P_o – početna cena nabavke;
E_p – troškovi u periodu;
S_t – korisna vrednost u vremenu t ;
L_t – starost mašine u vremenu t .



Slika 5.1. Model minimiziranja troška [14]

$$L_t = \frac{P_o + \sum_{0}^{t} E_p - S_t}{L_t} \qquad (5.3)$$

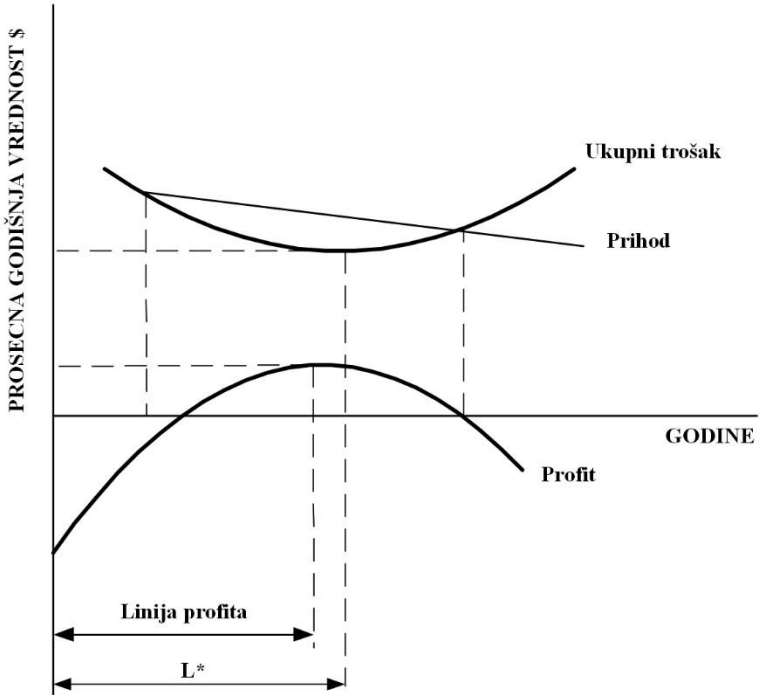
Prosečni troškovi se računaju tako što se uzimaju kumulativni troškovi u jednoj tački u vremenu i dele se sa starošću mašine. Kriva prosečnih troškova se razvija za troškove posedovanja i operativne troškove. Suma ove dve krive, kriva prosečnih ukupnih troškova, ima silaznu tendenciju kada su operativni

troškovi niski i prosečni trošak kapitala opada. Minimalna vrednost ukupnih prosečnih troškova je ***T***, tačka u kojoj je koeficijent nagiba krive nula. Optimalni ekonomski život, $\boldsymbol{L}^*$, je period koji se završava kada je suma troškova posedovanja i operativnih troškova dostigla minimum. Na apscisi je prikazana starost u godinama.

5.2 Maksimiziranje (povećavanje) profita

Metodu za rešavanje problema zamene maksimiziranjem profita je dao [24]. Na slici 5.2. je predstavljen model maksimiziranja profita. Ponovo su tri linije na grafiku. To su prosečni ukupni trošak, prosečni prihod, i prosečni profit. Prosečni prihod je prosečni iznos dohotka koji se stvara. Prosečni profit je određen oduzimanjem prosečnih troškova od prosečnog prihoda. Rezultat je kriva koja liči na lik u ogledalu krive prosečnog troška [14].

Optimalni ekonomski život dešava se na vrhu krive prosečnog profita. Ukoliko je prosečni prihod konstantan, kriva prosečnog profita može biti prava slika u ogledalu krive prosečnog troška i kriva maksimiziranja profita ekonomskog života može biti ista kao kriva minimiziranja troška ekonomskog života. Iznos prihoda koji se stvara često opada kako se mašina koristi, jer dolazi do pogoršanja i zastarelosti usled godina. Iz tog razloga, ekonomski život za maksimiziranje profita i minimiziranje troška nije uvek isti [6]. Jednačine koje važe za model su:



Slika 5.2. Model maksimiziranja profita [24]

$$Prosečni\ prihod = \frac{\sum_{0}^{t} R_p}{L_t} \tag{5.4}$$

Prosečni profit za vreme, gde su R_p – prihodi u toku perioda.
Minimalni prosečni godišnji trošak, **T**, i optimalni ekonomski život za minimiziranje troška, **L** su takođe prikazani na slici 5.2. Može se videti da je u slučaju opadanja prihoda, optimalni život za maksimiziranje profita (život profita) manji od **L**. Važi i obrnuto.

$$L_t = \frac{\sum_0^t R_p - (P_0 + \sum_0^t E_p - S_t)}{L_t} \tag{5.5}$$

5.3. Teorija limita popravke

Drugačiji način razmatranja ekonomskih odluka zamene je predstavljen kod Drinkwater-a [46] i Hastings-a [47] u njihovoj teoriji 1967. godine. Teorija limita zamene je definisana na sledeći način: "*Limit popravke je limit sume novca koji se može potrošiti na popravku sredstva u nekom određenom poslu. Vrednosti limita popravke zavise od tipa, starosti, i u nekim slučajevima od lokacije na kojoj se sredstvo nalazi*".

Teorija limita popravke se ne primenjuje dok se mašina ne pokvari. Koncept teorije je da postoji neki iznos, ro_t, ispod koga nije ekonomski opravdano popravljati mašinu. Ukoliko su procenjeni troškovi opravke veći od ro_t, popravka se neće vršiti, a mašina će biti odbačena ili zamenjena [14].

Sledeća jednačina predstavlja buduće troškove po godini ukoliko je mašina popravljena [46, 47]:

$$Budući\ troškovi\ po\ godini = \frac{r + m(t)}{g(t)} \tag{5.6}$$

gde su:

r – trošak popravke koja je u pitanju;
$m(t)$ – očekivani ukupni trošak budućih popravki za vreme t;
$g(t)$ – očekivani preostali život mašine u vremenu t;
t – vreme u životu mašine u kojem je izvršena evaluacija limita opravke.

Ukoliko je odbačena mašina izbačena iz upotrebe tada su budući troškovi po godini θ, koji se određuju preko prosečnog budućeg godišnjeg troška zamene sistema. Zamena sistema je i kopija Zaštitnika, ili je izabran drugačiji Izazivač. Vrši se poređenje jednačine sa θ.

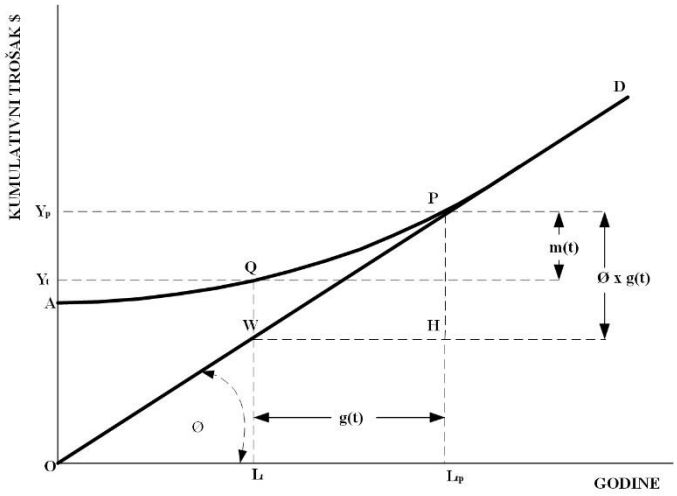
Ako je

$$\frac{r + m(t)}{g(t)} < \theta \tag{5.7}$$

mašina se može popraviti i vratiti u službu što je moguće pre. Ukoliko je nejednačna netačna, tada se mašina izbacuje iz upotrebe ili se menja drugom. Limit popravke je vrednost r za koju obe strane nejednačine postaju jednake [46, 47]:

$$r_0(t) = \left(\theta \times g(t)\right) - m(t) \tag{5.8}$$

kao što je prikazano na sledećoj slici 5.3 Drinkwater i Hastings su takođe predstavili krivu kumulativnog troška za ekonomske modele zamene. Linija OAD je odnos kumulativnog troška popravke i starosti mašine. Odnos OA predstavlja originalni kapitalni trošak. Kriva AQPD predstavlja kumulativne troškove popravke u toku vremena. Nagib, koeficijent θ, predstavlja prosečni trošak slične mašine na osnovu koje se prosuđuje.



Slika 5.3. Model limita popravke [46, 47] *(posle Drinkwater-a i Hastings-a, 1967.)*

Prosečni kumulativni trošak popravke u bilo kojoj tački krive je dat nagibom (koeficijentom pravca) linije koja je nacrtana.

U tački L_t, linija QW predstavlja limit popravke. Iza godina L_{tp}, je nula. Jednačine su:

$$g(t) = L_{tp} - L_t \tag{5.9}$$

$$m(t) = Y_p - Y_t \tag{5.10}$$

Teorija limita opravke je ograničena jer podržava samo jedan tip odluke. Ne može se primeniti dok se mašina ne pokvari. Reviziju teorije su radili [48] Mahon i Bailey, 1975, ali je osnovni princip ostao nepromenjen.

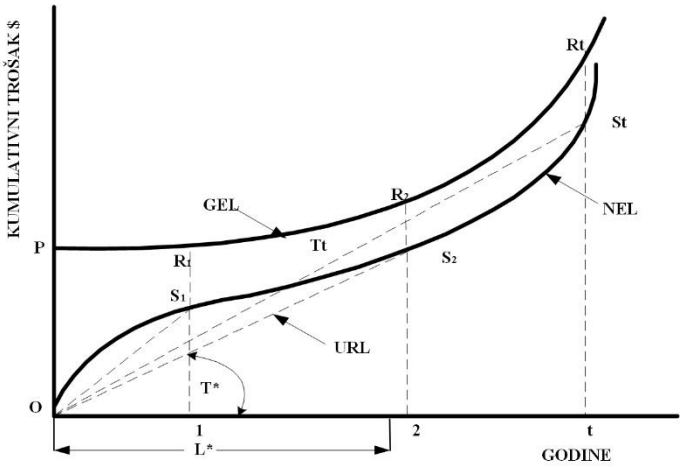
5.4 Model kumulativnog troška

Predstavljena su tri različita ekonomska modela. Svaki od njih ima poseban rezultat. Jedni teže da smanje troškove, drugi da povećaju profit, a treći da definišu funkciju koja će predstaviti trošenje na popravku u bilo kom momentu života mašine. Postoji i četvrti model - Model kumulativnog troška koji kombinuje sva tri koncepta, a razvio ga je [49].

Kumulativni model troška obezbeđuje validna numerička rešenja i intuitivni grafički prikaz problema koji se analizira. Obezbeđuje i ono što drugi modeli nisu mogli (promene ukupnih troškova, prosečne troškove, i marginalne troškove). Kumulativni model je jedini koji u sebi objedinjuje i klasičnu teoriju zamene i graničnu teoriju popravke. Kumulativni model troškova se može koristiti za smanjivanje troškova ili povećavanje profita – nijedna od metoda nema prednost. Moguće je takođe eksplicitno pokazati tri osnovna koraka, kupovanje, rad i prodaju u toku života mašine. Kumulativni model daje više od definicije ekonomskog života mehanizacije.

Na slici 5.4 je prikazan model kumulativnog troška, gde je na apscisi prikazano vreme, a na ordinati kumulativni trošak. Može se uzeti kalendarsko vreme, vreme u kumulativnim časovima rada, ili vreme u

jedinici proizvodnje. Ordinata je kumulativni trošak, predstavljen kao suma neto sadašnjih vrednosti. Svi troškovi posedovanja i operativni troškovi se mogu predstaviti preko CCM. GEL (*Gross Expenditure Line*) je linija ukupnog iznosa troška, a NEL (*Net Expenditure Line*) je linija neto troška. Linija GEL ide oštro na gore i prikazuje početnu nabavku mašine. Potom raste sporo kako se javljaju troškovi tokom života mašine. I konačno pada naglo onda kada se mašina proda ili kada se prodaja ima u vidu.



Slika 5.4. Model kumulativnog troška [49]

Razlog za rapidni pad korisne vrednosti u prethodnom periodu u životu, je predstavljen na NEL. Ako rezidualna vrednost opada, NEL konvergira ka GEL. Prema Drinkwater-u i Hastings-u, 1967 [46, 47], rezidualna vrednost mašine u bilo kom trenutku vremena može aproksimirati limit popravke. Minimum T_t se postiže kada je URL tangenta na NEL. Ovo je stepen T^*. Kumulativna starost je definisana bisekcijom (polovljenjem) NEL i URL, što daje L^*.

Ukupni trošak prikazuje sve komponente troškova posedovanja i operativnih troškova. problem nastaje kada se pojave uzastopni troškovi zastarevanja koji se mogu prihvatiti ali se teško mogu kvantifikovati [14].

Jedan od glavnih razloga za atraktivnost modela kumulativnog troška je činjenica da podržava veliki broj odluka dok se većina ostalih prikazuju samo jedan tip odluke. Opseg odluka koje podržava Kumulativni model troškova je [14] :

- **Nabavka**: To je inicijalna cena nabavke dela mehanizacije. Svrha nije zamena mehanizacije, nego ekspanzija mogućnosti, rast proizvodnog kapaciteta, ili obezbeđivanja onoga što sadašnja mašina (flota) nije u mogućnosti. Obično, se odluka mora doneti između dve ili više alternativnih mašina, svaka od njih sa jednim ili više načina finansiranja.
- **Održavanje**: Odluke vezane za održavanje su odluke koje se vezuju za novac koji se investira u preventivno održavanje, sa namerom da se smanje troškovi popravke ili poveća život mašine. Odluke o tipu i vremenskom rasporedu preventivnog održavanja donosi menadžer za svaki tip mašine, koji se poseduje.
- **Popravka**: Odluke o popravci su one odluke koje se bave pitanjem, da li ili ne, popraviti mašinu koja otkaže u toku rada. Popravke ne produžuju život mašini, one je samo vraćaju u operativno stanje.
- **Remont**: Odluke o remontu se razlikuju od odluka o popravci po tome što remont produžava život mašini. Remont se može raditi na celoj mašini, ili na kritičnim komponentama, kao što je recimo pogonska grupa. Obično remont predstavlja značajnu investiciju u mašinu. Kapital koji se potroši na remont može se delimično povratiti kroz deprecijaciju. Odluke o remontu se donose u određenom vremenu i nisu određene činjenicom da je mašina otkazala.

- **Zamena slično-za-slično**: Iako je ovo najčešća odluka koja se donosi, to ne znači da je i jedina, koja se može koristiti.
- **Zamena proizvodnog kapaciteta**: Zamena proizvodnog kapaciteta je druga odluka po učestanosti, koja se donosi. U ovom tipu problema zamene, mehanizacija jedne kategorije mehanizacije se menja sa mehanizacijom druge kategorije, što ne dovodi do neto promene u proizvodnom kapacitetu. Primer je zamena skrepera sa kamionom sa prikolicom jer je kombinacije kamiona i bagera mnogo prilagodljivija i troškovno efektivnija od kombinacije skreper/dozer. Problemi zamene proizvodnog kapaciteta su obično mnogo subjektivniji od problema zamene slično-za-slično. Kolateralni (sporedni) troškovi se moraju mnogo više uključiti prilikom donošenja odluka.
- **Povlačenje**: Odluke o povlačenju se donose onda kada je poželjno povući mašinu. Može biti pomeranje kompletne mehanizacije ili reinvestiranje u tipove mehanizacije koji nisu srodni. Stara mehanizacija se proda, i na taj način se pripremi novac za novu mehanizaciju.

Iako je moguće modifikovati upotrebu drugih modela tako da budu podesni, neke od odluka izuzev slično-za-slično, se ne mogu doneti bez upotrebe modela Kumulativnog troška. Da bi se odredio mehanizam za korišćenje CCM-a, potrebno je odrediti uticaj na profit [49]

6. EKSPERTSKI MODELI PRAĆENJA ŽIVOTNOG VEKA RUDARSKIH MAŠINA

Ekspertski sistemi predstavljaju specijalno projektovane i razvijene matematičke i koncepcijske modele koji imaju za cilj da rešavaju realne probleme korišćenjem naprednih tehnologija uz ljudsku ekspertizu. Pri tome se ostvaruje sinergetski efekat veštačke i prirodne inteligencije. Ekspertski sistemi moraju da imaju mogućnost rada sa hibridnim podacima i povratnu (kontrolnu) spregu koja ima funkciju verifikacije modela. U ovom radu razvijen je model koji koristi višekriterijumske modele odlučivanja i fazi logičko zaključivanje. Podaci koji se koriste predstavljaju vremensku sliku raspoloživosti u numeričkoj i lingvističkoj formi.

Kompleksna delatnost kakva je rudarstvo, generiše potrebu za stalnim donošenjem različitih odluka čiji se uticaj uočava u sadašnjem vremenu, ali je u budućem periodu još izraženiji. I pored složenih informacija kojima se raspolaže, donosilac odluke može biti samo čovek. Osnovni razlog kompleksnosti informacija je multidisciplinarnost rudarstva, u koju su generisani: rudarstvo, tehnologija, geologija, elektrotehnika, mašinstvo, i sl. Optimalna odluka može se doneti samo uz adekvatnu analizu svih uticajnih faktora. Tom prilikom najjednostavnije odluke postižu se uz primenu različitih sistema podrške u odlučivanju [50]. Donošenje odluke je identifikovanje i izbor među alternativama zasnovan na vrednostima i preferencijama donosioca odluke [51]. Da bi se odluka donela, moraju postojati alternative čije se različitosti uzimaju u razmatranje. Broj alternativa i njihovih karakteristika razlikuju se u skladu sa željama odnosno ciljevima i izlaznim vrednostima koje postavlja donosilac odluke.

6.1 Višektirerijumski modeli

Kompleksni kvantitativni i kvalitativni izbori predstavljaju višekriterijumski problem koji se može analizirati upravo uz podršku različitih Višekriterijumskih metoda analize (VKA). U proteklom periodu razvijene su različite VKA među kojima su najčešću praktičnu primenu pronašle sledeće metode:

- AHP (eng. *Analytical Hierarchy Process*),
- PROMETHEE (eng. *Preference Ranking Organization for Enrichment Evaluation*)
- TOPSIS (eng. *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*)
- VIKOR (eng. *Multicriteria Optimisation and Compromise Solution*)
- ELECTRE (eng. *Elimination and Choice Expressing Reality*)

Cilj primene VKA je rešavanje problema na konzistentan način. Čovek kao donosilac odluke suočen je sa kvantitativnim i kvalitativnim, kompleksnim informacijama u čemu VKA predstavlja koristan alat jer uključuje ekspertski i menadžerski nivo odlučivanja [52]. U metode rangiranja svrstavaju se AHP, PROMETHEE i ELECTREE dok su metode VIKOR i TOPSIS kvalifikovane kao metode kompromisa.

6.1.1 Analitičko hijerarhijski proces (AHP)

Analitičko hijerarhijski proces (AHP) je višekriterijumska metoda u odlučivanju i predstavlja jednu od najpoznatijih metoda koja omogućuje i kvantitativni i kvalitativni pristup u rešavanju kompleksnih problema [53]. Jednostavnost u upotrebi i fleksibilnost kvalifikovali su ovu metodu kao veoma koristan alat u nauci ali i praktičnoj primeni u različitim oblastima. Svoju primenu u rešavanju kompleksnih zadataka našla je u: medicini, saobraćaju, tehnici, i sl.

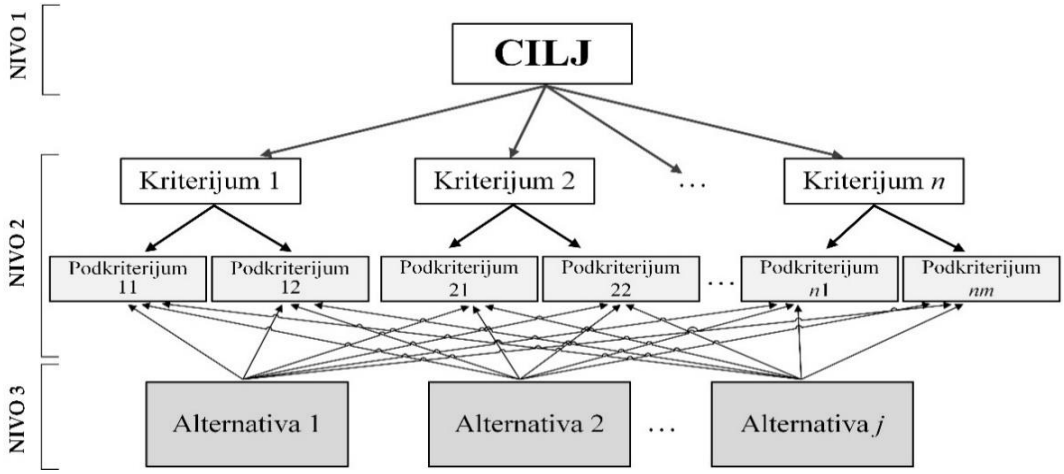
AHP metoda pruža mogućnost da se u procesu donošenja složenih odluka izmere i povezuju različiti faktori što olakšava kombinovanje delova u celinu [54]. Naime, osnovna prednost metode je ta da se kompleksni problem raščlani na proste činioce koji se potom primenom matematičke metode a na osnovu

kvantitativnih i kvalitativnih razlika međusobno upoređuju. Metoda bazira na merenju kroz upoređivanje u parovima i zavisi od procene eksperta za definisanje prioritetnih skala [55] Radi donošenja ispravne odluke, neophodno je u početnoj interakciji najpre definisati problem, svrhu odluke, kriterijume i podkriterijume za ocenjivanje alternativa, rezervne aktivnosti koje treba preduzeti kao i zainteresovanost strane na koju se odnosi odluka [56].

Mogućnost identifikovanja i analize nekonzistentnosti donosioca odluke u procesu definisanja različitih vektora prioriteta u hijerarhijskoj strukturi, je jedna od osnovnih prednosti ove metode.

Šematski prikaz AHP metode dat je na slici 6.1 [57]. Svaka odluka sačinjena je tri osnovne komponente, a to su: cilj, alternative i kriterijum tako da se hijerarhijska struktura metode obično i sastoji od tri nivoa. Na vrhu dijagrama nalazi se cilj (prvi nivo). Nakon cilja, na drugom nivou nalaze se kriterijumi u analizi iz kojih se, prema potrebi mogu izvoditi različiti podkriterijumi. Na osnovu kriterijuma i podkriterijuma vrši se analiziranje svake alternative u izboru koje se nalaze na poslednjem (trećem) nivo u hijerarhijskoj strukturi. Jedna od pogodnosti AHP metode je i ta da nije ograničen broj kriterijuma, podkriterijuma i alternativa a da pri tome nije neophodno da svaki kriterijum sadrži i svoj podkriterijum, niti da bude jednak broj podkriterijuma kod elemenata koji ih imaju. S toga može se zaključiti da donosilac odluke ima slobodu da konstruiše hijerarhijski model prema konkretnom problemu za čijim rešenjem traga. Šematski prikaz trebalo bi da omogući kvalitetniji uvid u problem, odnose između elemenata i pomogne u ispitivanju homogenosti elemenata na istom nivou [58].

U osnovi AHP metode je merenje relativnih težina [59]. Akcenat je stavljen na proporcionalnom međusobnom odnosu razmatranih kriterijuma (karakteristika) u odnosu na njihovu stvarnu pojedinačnu količinu [16]. Metoda bazira na tri osnovna principa [60]: identitetu i dekompoziciji; poređenju u parovima; i sintezi prioriteta. Suština problema je izbor alternative koja najbolje zadovoljava željene izlazne veličine odnosno cilj [61].



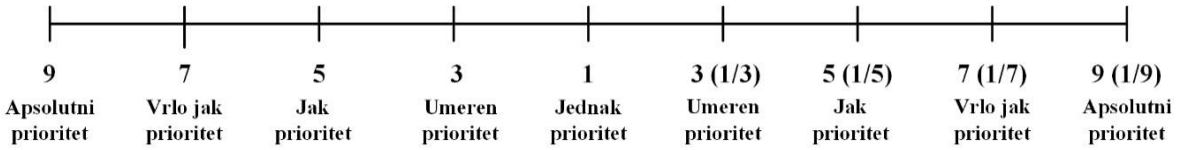
Slika 6.1 Shematski prikaz AHP metode [16]

Matematička osnova AHP metode sastoji se iz četiri koraka:

1. Identifikacija problema; Definisanje i identifikovanje parcijalnih indikatora problema koji se trebaju rešiti; Utvrđivanje kriterijuma i podkriterijuma; Određivanje alternativnih izbora; Formiranje hijerarhijske strukture;
2. Primena *Saaty* skale relativnog odnosa značajnosti za recipročno upoređivanje elemenata strukture u parovima (Tabela 6.1, Slika 6.2);

3. Računanje pojedinačnih težina vektora prioriteta kriterijuma, podkriterijuma i alternativa koji se potom matematički svode na ukupni proračun prema alternativama;
4. Provera konzistentnosti donosioca odluke (eksperta).

Kao što je prethodno pomenuto, prvi korak u primeni AHP metode je postavljanje hijerarhijske strukture modela i definisanje alternativa u izboru (slika 6.1). U sledećem koraku se postavljaju prioriteti. Oni se definišu parcijalno-parnim poređenjem svakog od njih u okviru istih nivoa hijerarhijske strukture. Tom prilikom, najjednostavnija poređenja se mogu izvršiti primenom *Saaty* skale prikazane na slici 6.2 [16].



Slika 6.2. Satijeva skala relativnog odnosa

Vrednosti prikazane na *Saaty* skali od 1 do 9 dodatno su opisane u tabeli 6.1.

Tabela 6.1. Opis Satijeve skale relativnog odnosa [16]

Nivo prioriteta	Numerička vrednost	Recipročna vrednost
Apsolutni prioritet	9	1/9 (0.111)
Vrlo jak do apsolutni prioritet	8	1/8 (0.125)
Vrlo jak prioritet	7	1/7 (0.143)
Jak do vrlo jak prioritet	6	1/6 (0.167)
Jak prioritet	5	1/5 (0.200)
Umeren do jak prioritet	4	1/4 (0.250)
Umeren prioritet	3	1/3 (0.333)
Jednak do umeren prioritet	2	1/2 (0.500)
Jednak prioritet	1	1 (1.000)

Rezultat međusobnog poređenja elemenata *i* sa elementima *j* je numerička vrednost relativnog težinskog koeficijenta elemenata (W_i). Nakon toga se stvara mogućnost formiranja matematičke matrice M (jednačina 6.2) čijim se izračunavanjem dobija rešenje prema određenom kriterijumu ili podkriterijumu.

$$W = \sum_{j=1}^{n} \frac{W_i}{W_j} = W_i \left(\sum_{j=1}^{n} \frac{1}{W_j} \right) \qquad i = 1, ..., n \tag{6.1}$$

$$M = \begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_1/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \tag{6.2}$$

Formirana matrica je primer konzistentne matrice. Konzistentna matrica je matrica kod koje bi npr. element 1 bio u prednosti u odnosu na element 2 tako da je u matrici vrednost težinskog koeficijenta a_{12} bila 2 dok bi vrednost težinskog koeficijenta a_{21} bila recipročna vrednost, odnosno ½ [58].

Poslednji (četvrti) korak u metodi AHP je provera greške tj. provera konzistentnosti donosioca odluke [62]. Osnovni uslov konzistentnosti je da izračunata vrednost stepena konzistentnost *CR* bude manja od 0,10 odnosno (10%). Matematička provera započinje se izračunavanjem indeksa konzistentnosti *CI*

primenom jednačine 6.3, ali je prethodno neophodno izračunati λ_{max} (jednačina 6.4) što je srednja vrednost koeficijenta λ_i koji se izračunava pomoću jednačine (6.5),

$$CI = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n-1)} \tag{6.3}$$

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \lambda_i \tag{6.4}$$

$$\lambda_i = \frac{\sum_{j=1}^{n}(a_{ij} \cdot W_i)}{W_i}, for \;\; i = . \tag{6.5}$$

gde je n – broj analiziranih objekata.

Stepen konzistentnosti *CR* predstavlja odnos indeksa konzistentnosti *CI* i slučajnog indeksa *RI* određuje i se primenom jednačine (6.6).

$$CR = \frac{CI}{RI} \tag{6.6}$$

Vrednost slučajnog indeksa *RI* zavisi od broja analiziranih objekata (tabela 6.2) i definisana je od strane *T.L.Saaty* pri formiranju AHP metode.

Tabela 6.2. Zavisnost slučajnog indeksa od broja analiziranih objekata [63]

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0,00	0,00	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49	1,51	1,53	1,56	1,57	1,59

U slučaju da je vrednost stepena konzistentnosti CR manja od 0,10 neophodno je ponovo analizirati rezultate i locirati razloge konzistentnosti rešenja. Ako se ne može jednostavno locirati greška, trebalo bi ponoviti čitav postupak a prethodno rešenje odbaciti kao nekonzistentno.

6.2 Fazi teorija

Teorija fazi skupova (engl. fuzzy - rasutih, rasplinutih, neizrazitih skupova), predstavlja matematički koncept za modeliranje različitih procesa u kojima dominira pre svega neodređenost i neizvesnost u relacijama, kao i višeznačnost i subjektivnost u definisanju fenomenima koji odredjuju navedeni proces. Korišćenje fazi skupova, kao i fazi logike, često se simbolično objašnjava i kao umeće stručnjaka [64] ili kvalitativni opis umeća, ili jednostavno kao računanje rečima. Koncept fazzy logike (skupova) prvi put se spominje u radu američkog profesora *Lofti Zadeh*-a, 1965. godine objavljenom pod nazivom „Fuzzy sets“ [65]. Od tada do danas, u svetu je objavljeno više stotina radova a održan je i veliki broj naučnih skupova sa tematikom razvoja fazi sistema. Izražavanje i rezonovanje zasnovano na „fazi“ načinu blizako je filozofskim postavkama kultura dalekog istoka, dok su nasuprot njima „crisp“ skupovi osnova zapadno-evropske filozofije [64].

Svoju primenu fazi skupovi dobili su pri modelovanju nedovoljno preciznih pojava kod kojih se ne mogu primeniti samo teorija verovatnoće ili intervalna matematika. Ideja koja stoji iza koncepta fazi logike je

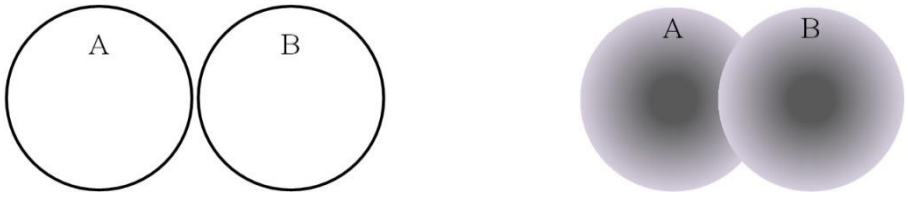
da ne postoji potreba za preciznošću, naročito ne do nivoa koji se obično zahteva kod korišćenja klasičnih tehnika u matematici [66]. Naime, neodređenost se može posmatrati kao pojava koja se modeluje u tri kategorije: *teorijom verovatnoće* - kada dati uslovi koji karakterišu pojam ne određuju jedinstveno očekivani rezultat; *intervalnom matematikom* - kada nije moguće, (a nije ni potrebno) precizno znati posmatrane vrednosti; *teorijom fazi skupova* - kada neodređenost potiče od nepreciznosti u komunikaciji (npr. visoka ili niska pouzdanost, dobro ili loše održavanje i sl.) [9].

Kod klasične teorije skupova, za elemente koji se analiziraju se vrlo jednostavno utvrđuje da li pripadaju nekom skupu ili ne pripadaju. S toga se može reći da kod klasične teorije skupova postoji dva karakteristična stanja „*pripada*“ – „*ne pripada*“. Fazi logika, nasuprot klasičnoj teoriji skupova, omogućuje korišćenje neodređenih i višeznačnih lingvističkih promenjivih koje se preslikavaju u fazi skupove. Elementi u fazi skupu nisu definisani prema binarnom modelu, već mogu imati „*veću*“ ili „*manju*“ pripadnost skupu, čime se može definisati njihov „stepen pripadnosti“. U takvim okolnostima fazi logika omogućuje korišćenje termina kao što su: dosta, srednje, malo, retko, često i sl.

Teorija fazi skupova, za razliku od višeatributivnog odlučivanja (6.1), svoj prinstup zasniva na lingvističkim (kvalitativnim) i numeričkim (kvantitativnim) promenjivim dok se izlazni rezultat dobija u kontinualnoj formi. U konkretnom primeru analizirana je raspoloživost rudarske mehanizacije primenom fazi teorije. Ulazne veličine koje definišu raspoloživosti su: pouzdanost, pogodnost održavanja i nivo podrške. Sve tri veličine mogu se izraziti u formi brojne vrednosti ili u formi vremenski zavisne funkcije ili u formi lingvističkog opisa sa odgovarajućim atributom. U ovom radu sve tri ulazne veličine analizirane su na bazi eksperskih modela, odnosno definisani su u obliku fazi broja. Njihova sinteza je urađena korišćenjem fazi kompozicije, gde su ulazne veličine definisane kao fazi relacije.

6.2.1 Osnovni pojmovi iz teorije fazi skupova

Fazi logika predstavlja način za generalizaciju klasičnih skupova [66]. Za razliku od klasične teorije skupova, koja bazira na binarnoj logici i precizno definiše granicu koja razdvaja elemente koji pripadaju različitim skupovima, teorija fazi skupova nedovoljno dobro definiše pomenutu granicu. Pripadnost elemenata kod klasičnih skupova može uzimati samo vrednosti 0 ili 1, dok kod fazi skupova elementi mogu imati pripadnost definisanu bilo kojom vrednošću u intervalu od 0 do 1 i ta numerička vrednost iz intervala definiše „stepen pripadnosti“ elementa skupu. Često se kaže da fazi skupovi sadrže elemente sa sličnim svojstvima, za razliku od diskretnih koji sadrže elemente sa istim svojstvima. Na slici 6.2 dat je grafički prikaz razlike skupova koji jesu i koji nisu fazi. Intenzitet sive boje na slici 6.2b predstavlja funkciju pripadnosti fazi skupu [9].



a) diskretni (Bulovi), „criso“ skupovi *b) „Fuzzy“ skupovi*

Slika 6.3. Grafički (Venov dijagram) prikaz skupova A i B, za slučaj kada jesu i kada nisu fazi skupovi

Ako u ekspertsku komunikaciju uvedemo pojmove (skupove) vrlo kvalitetna, srednje kvalitetna i nekvalitetna mašina, neizbežno je da se će se desiti da istu mašinu različiti eksperti kvalifikuju u različite skupove. Isto tako postoji verovatnoća da će ih kvalifikovati u isti skup, prilikom čega će im dodeliti različite stepene pripadnosti (npr. 30% vrlo kvalitetna; 70% srednje kvalitetna; i sl.)[9].

Osnovna obeležja fazi skupova prikazana su kroz predstojeće delu u kojima su date definicije i osnovna objašnjenja fazi skupova; osobine fazi skupova: normalnost, konveksnost i kardinalnost (broj elemenata); osnovna poređenja i operacije nad fazi skupovima uvedeni kao modifikatori funkcija pripadnosti, a to su: jednakost, inkluzija (podskup), unija, presek i komplement [67].

Fazi skup *A* se definiše kao skup uređenih parova (jednačina 6.7),

$$A = \{x, \mu_A(x)\}, \tag{6.7}$$

gde je: *x* konačan skup $x = \{x_1 , x_2 , ... , x_N\}$, a $\mu A(x)$ stepen (funkcija) pripadnosti.

Pripadnost elemenata *x* skupu *A* se u teoriji fazi skupova opisuje funkcijom pripadnosti $\mu A(x)$ na sledeći način:

$$\mu A(x) = \left\{ \begin{array}{l} 1, \text{ako i samo ako } x \text{ pripada skupu } A \\ 0, \text{ako i samo ako } x \text{ ne pripada skupu } A \end{array} \right\}$$

Osim krajnjih granica u teoriji fazi skupova, funkcija pripadnosti može da uzme i bilo koju drugu vrednost iz zatvorenog intervala [0,1]. Prema tome, definisani fazi skup *A* je uređeni par $A=\{x, \mu A(x)\}$, pri čemu je $\mu A(x)$ stepen pripadnosti elemenata *x* skupu *A*. Ukoliko je $\mu A(x)$ veće, utoliko ima više istine u tvrđenju da element *x* pripada skupu *A*.

U prilogu se može videti primer mašine Liebherr PR752/754 (B1-N) gde je raspoloživost izražena u konačanom obliku kao:

$$A = \mu_A / A,\ \mu_A / B,\ \mu_A / C,\ \mu_A / D,\ \mu_A / E$$

$$A_{B1-N} = 0.22922 / A,\ 0.28970 / B,\ 0.17108 / C,\ 0.15354 / D,\ 0.15645 / E$$

Veličina μ_A u pomenutom primeru raspoloživost rudarske mašine, predstavlja pripadnost različitim klasama raspoloživosti. Svaka klasa se vezuje za pripadajući fazi broj *A*… *E*, koji u opštem obliki predstavlja ocenu raspoloživosti. U datom primeru *A* definiše veoma visoku raspoloživost, *B* je visoka raspoloživost, C je srednja, *D* niska, dok je *E* veoma niska raspoloživost. [17]

Konačan skup elemenata definiše se jednačinom 6.8,

$$X = (x_1,\ x_2,\ \ldots,\ x_n) = \sum_{i=1}^{n} x_i \tag{6.8}$$

Jednačina 6.9 prikazuje fazi skup *A* definisan na skupu *X*,

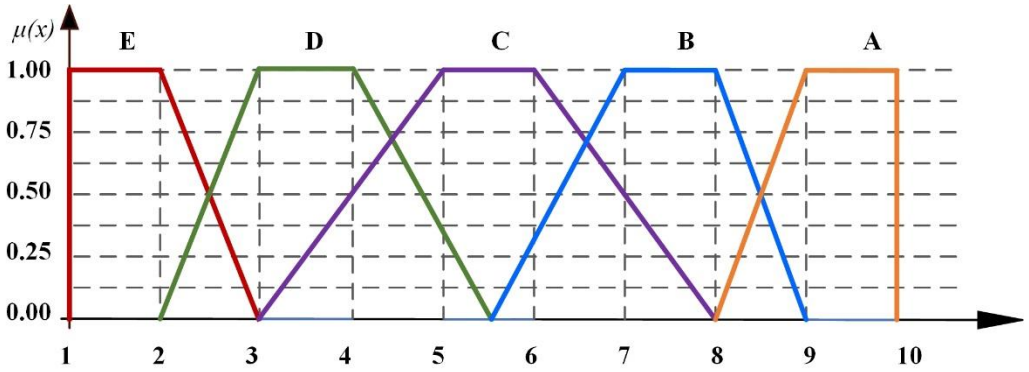
$$A = \frac{\mu_A(x_1)}{x_1} + \frac{\mu_A(x_2)}{x_2} + \ldots + \frac{\mu_A(x_n)}{x_n} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\mu_A(x_i)}{x_i} \tag{6.9}$$

gde simboli ‘‘+‘‘ i ‘‘Σ‘‘ imaju značenje unije ili nabrajanja.

U slučaju da *X* nije konačan skup, fazi skup *A* definisan na skupu *X* se izražava jednačinom 6.10:

$$A = \int \frac{\mu_A(x)}{x} \tag{6.10}$$

Primer fazi skupa i funkcije pripadnosti prikazan je na slici 6.4:



Slika 6.4. Funkcija pripadnosti μ(x) fazi skupova A-E koji definišu klase raspoloživosti [17]

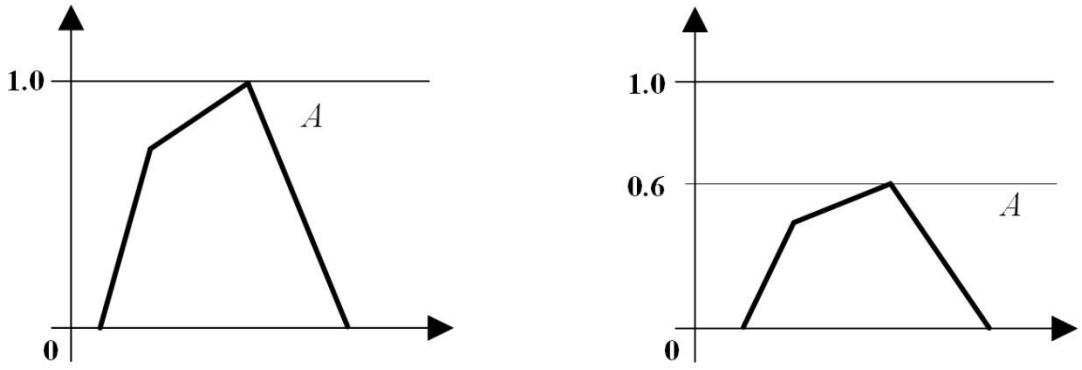
Za dati primer na slici 6.4, fazi skupovi su definisani na sledeći način [17]:

$$A = (0_{(1)},\ ...,\ 0_{(8)},\ 1_{(9)},\ 1_{(10)});$$
$$B = (0_{(1)},\ ...,\ 0_{(5)},\ 0.33_{(6)},\ 1_{(7)},\ 1_{(8)},\ 0_{(9)},\ 0_{(10)});$$
$$C = (0_{(1)},\ 0_{(2)},\ 0_{(3)},\ 0.5_{(4)},\ 1_{(5)},\ 1_{(6)},\ 0.5_{(7)},\ 0_{(8)},\ 0_{(9)},\ 0_{(10)});$$
$$D = (0_{(1)},\ 0_{(2)},\ 1_{(3)},\ 1_{(4)},\ 0.33_{(5)},\ 0_{(6)},\ ...,\ 0_{(10)});$$
$$E = (1_{(1)},\ 1_{(2)},\ 0_{(3)},\ ...,\ 0_{(10)}).$$

Fazi skup je <u>normalizovan</u> ako bar jedan element ima stepen pripadnosti jednak jedinici.

$$\max_{x \in X} \mu_A(x) = 1 \tag{6.11}$$

Normalan i sub-normalan fazi skup prikazani su na slici 6.5. Podelom svih vrednosti stepena pripadnsti najvećim stepenom pripadnosti, fazi skup koji je sub-normalan može se transformisati u normalan. Na slici 6.5 najveća vrednost i vrednost kojom se sve vrednosti u sub-normalnom skupu dele je 0.6. Ovakva operacija se naziva normalizacija.



Slika 6.5. Primer normalnog i sub-normalnog fazi skupa

Ako je *X* diskretan i konačan skup, onda se kardinalnost (broj elemenata) fazi skupa izražava zbirom stepena pripadnosti pojedinih elemenata fazi skupa:

$$|A| = \sum_{x \in X} \mu_A(x) \tag{6.13}$$

Ova definicija broja elemenata fazi skupa odgovara definicija broja elemenata diskretnog skupa. Ona se i svodi na tu definiciju kada je *A* diskretan skup, pošto se onda broj elemenata računa tako što se za svaki element računa stepen pripadnosti jednak jedinici.

Može da se definiše i pojam relativne kardinalnosti fazi skupa, koja bi se za diskretan i konačan skup *X* računala kao:

$$\|A\| = \frac{|A|}{|X|} \tag{6.14}$$

Relativna kardinalnost fazi skupa se dobija kada se kardinalnost tog fazi skupa podeli sa kardinalnošću domena *X* tog skupa. Ovaj broj može da se koristi kao pokazatelj koliko informacija sadrži fazi skup *A* [64].

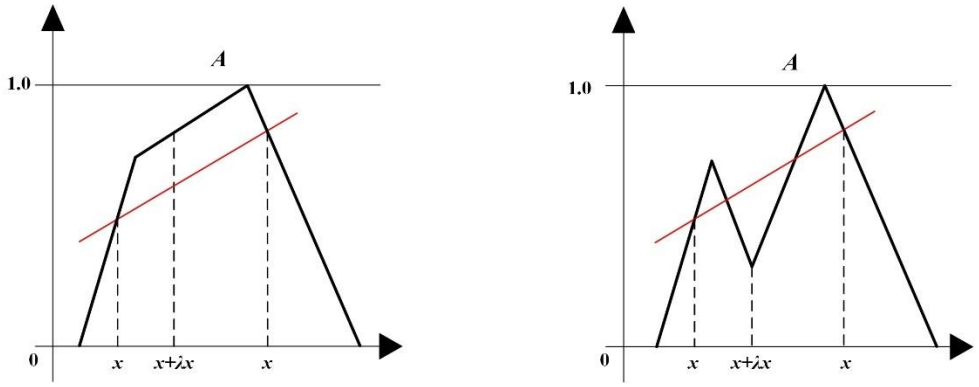
Fazi skupovi *A* i *B* su jednaki (*A*=*B*) ako i samo ako važi relacija $\mu_A(x) = \mu_B(x)$ za sve elemente *x* iz skupa *X*.

Ako je $\mu_A(x) \leq \mu_B(x)$ za sve elemente *x* iz skupa *X*, može se reći da je fazi skup *A* podskup fazi skupu *B*. Drugim rečima, ukoliko je za svako *x* stepen pripadnosti fazi skupa *A* manji ili jednak stepenu pripadnosti fazi skupa *B*, utoliko je $A \subset B$.

Unija fazi skupova *A* i *B* predstavlja najmanji skup u kome su istovremeno sadržani i skup *A* i *B*, i definiše je sledeća jednačina:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) \tag{6.15}$$

gde je $\vee$ logički operator " ili ", odnosno operator maksimuma.

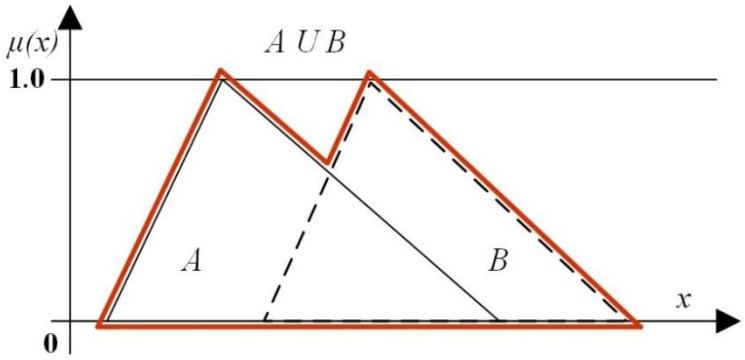


Slika 6.6. Fazi skup na levoj strani je konveksan, dok na desnoj strani nije

Za fazi skup A se može reći da je konveksan ako i samo ako važi sledeći uslov:

$$\mu_A(\lambda x_1 + (1-\lambda)x_2) \geq \min(\mu_A(x_1), \mu_A(x_2)), \tag{6.12}$$

gde za svako x_1, $x_2 \in X$, i za svako $\lambda \in [0,1]$.

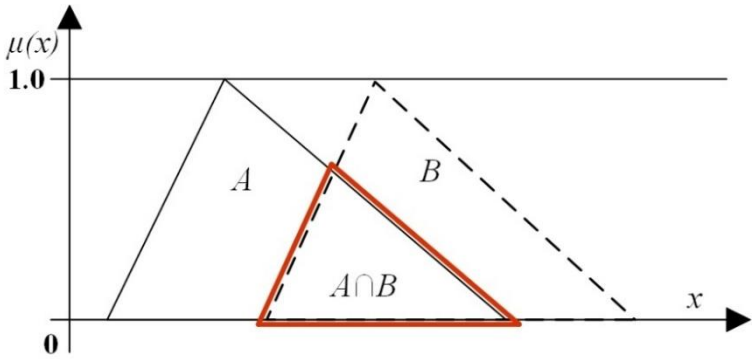


Slika 6.7. Unija fazi skupova A i B

Presek fazi skupova *A* i *B* je najveći fazi skup u kome su istovremeno sadržani zajednički elementi fazi skupa *A* i fazi skupa *B*. Predstavljen je jednačinom funkcije pripadnost:

$$\mu_{A\cap B}(x) = min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) \tag{6.16}$$

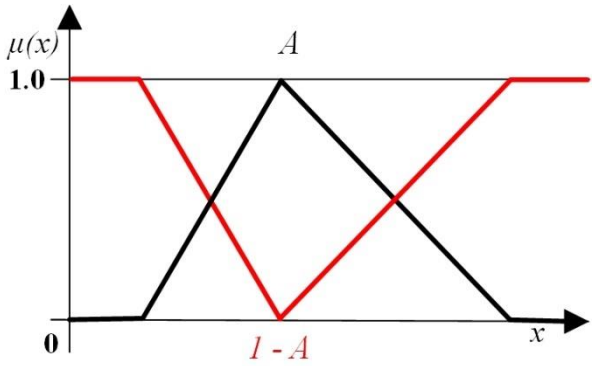
gde je $\wedge$ logički operator " i ", odnosno operator minimuma.



Slika 6.8. Presek fazi skupova A i B

Komplement fazi skupa predstavlja skup koji je suprotan fazi skupu. Definisan je jednačinom 6.17 gde je prikazan komplement fazi skupa *A*:

$$\overline{A} = 1 - A \quad \Rightarrow \quad \overline{\mu_A}(x) = 1 - \mu_A(x) \tag{6.17}$$



Slika 6.9. Komplement fazi skupa A

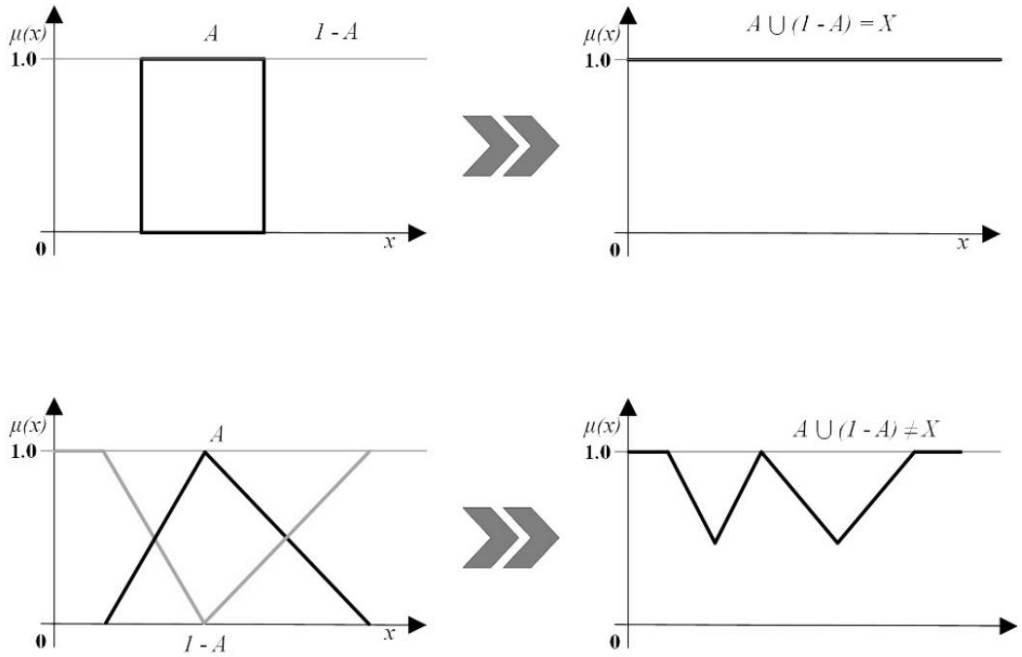
Najveći broj osobina koji važi za diskretne skupove, važi i za fazi skupove. Najzačajnije osobine koje važe i za fazi skupove su:

- idempotentnost: $A \cup A = A$, $A \cap A = A$
- komunikativnost: $A \cup B = B \cup A$, $A \cap B = B \cap A$
- asocijativnost: $A \cup (B \cup C) = (A \cup B) \cup C$, $A \cap (B \cap C) = (A \cap B) \cap C$
- distributivnost: $A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$, $A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$
- dvostruka negacija: $A = \tilde{\tilde{A}}$
- De Morganov zakon: $\overline{A \cup B} = \overline{A} \cup \overline{B}$ $\overline{A \cap B} = \overline{A} \cap \overline{B}$

Postoje i dve osobine koje ne važe za diskretne a važe za fazi skupove:

- zakon isključenja trećeg: $A \cup \tilde{A} \neq X$
- zakon kontradikcije: $A \cap \tilde{A} \neq \varnothing$

Ove dve osobine su osnova specifičnosti teorije fazi skupova u odnosu na klasične skupove. Odnosno matematička implementacija realnih mogućnosti kao npr. (u skladu sa već pominjanim primerom) da jedna mašina može da pripada istovremeno i skupu vrlo raspoloživih mašina i skupu srednje raspoloživih mašina itd, u zavisnosti od funkcije prpadnosti. Na slici 6.10 je prikazana ilustracija zakona isključenja trećeg za diskretne skupove (gornji deo), i ilustracija koja pokazuje da ovaj zakon ne važi za fazi skupove (donji deo). Dok se u prvom slučaju skup nadopunjuje svojim komplementom do celog skupa, u drugom slučaju se ne dopunjuje [64].



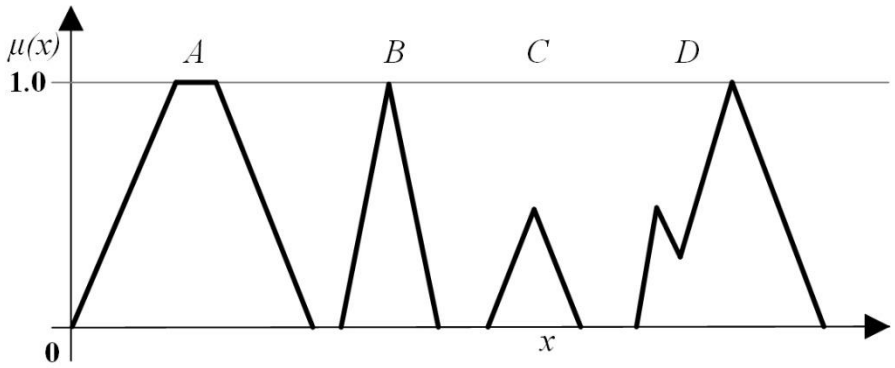
Slika 6.10. Zakon isključenja trećeg u klasičnoj teorij skupova važi (gornja slika) ali u teoriji fazi skupova ne važi (donja slika) [64]

6.2.2 Fazi broj

Jedan od osnovnih pojmova iz fazi aritmetike ili kako se često navodi osnovnih koncepata fazi sistema jeste fazi broj. Fazi broj *A* je fazi skup predstavljen funkcijom pripadnosti $\mu A(x)$ ako zadovoljava sledeće osobine:

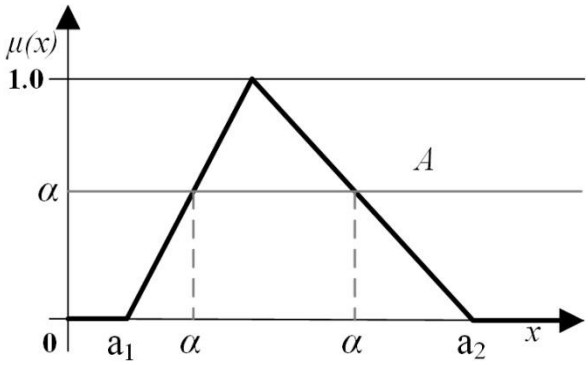
- $\mu_A(x)$ je definisana nad skupom Re;

- $\mu_A(x)$ je konveksna;
- $\mu_A(x)$ je normalna;
- $\mu_A(x)$ je deo po deo neprekidna funkcija.



Slika 6.11. Fazi skupovi koji jesu (A i B) i koji nisu fazi brojevi (C – ne ispunjava uslov normalnosti i D ne ispunjava uslov konveksnosti)

Prema tome, preduslov da bi fazi skupovi bili i fazi brojevi jeste da budu normalizovani i konveksni fazi skupovi-koje karakterišu još i interval poverenja [a_1, a_2] i stepen poverenja α. Autori *Kaufmann* i *Gupta* su 1985. godine u svom monografskom delu [68] predložili izražavanje fazi broja pomoću intervala i stepena poverenja. Na slici 6.12. prikazan je fazi broj *A* i odgovarajući interval poverenja i stepen poverenja.



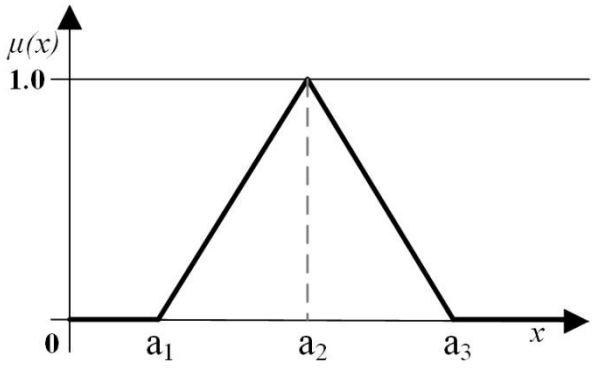
Slika 6.12. Fazi broj, interval poverenja i stepen sigurnosti

Posebnu klasu fazi brojeva čine tzv. trouglasti i trapezoidni fazi brojevi. Trouglasti fazi broj, uslovljen je oblikom funkcije pripadnosti i okarakterisan je sledećim oblikom:

$$A=(a_1, a_2, a_3), \tag{6.18}$$

gde je:

a_1 - donja (leva) granica fazi broja,
a_2 - vrednost fazi broja sa najvećim stepenom pripadnosti, i
a_3 - gornja (desna) granica fazi broja.



Slika 6.13. Trouglasta funkcija pripadnosti

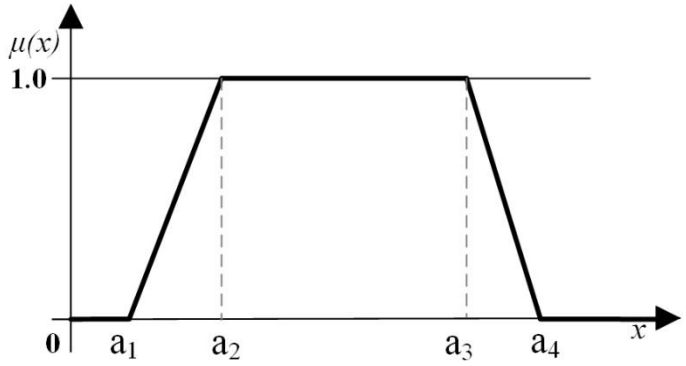
Funkcija pripadnosti trouglastog fazi broja A definisana je na sledeći način:

$$\mu_A(x)=\begin{cases} 0 & \textbf{za} \quad x \le a_1 \\ (x-a_2)/(a_2-a_1) & \textbf{za} \quad a_1 \le x \le a_2 \\ 0 & \textbf{za} \quad a_2 \le x \le a_3 \\ (a_3-x)/(a_3-a_2) & \textbf{za} \quad x \ge a_3 \end{cases}$$

Drugu klasu fazi brojeva čine trapezoidni fazi brojevi, okarakterisani sledećim oblikom:

$$A=(a_1, a_2, a_3, a_4), \tag{6.19}$$

Grafički prikaz trapezoidnog fazi broja uz karakteristične tačke prikazan je na slici 6.14.

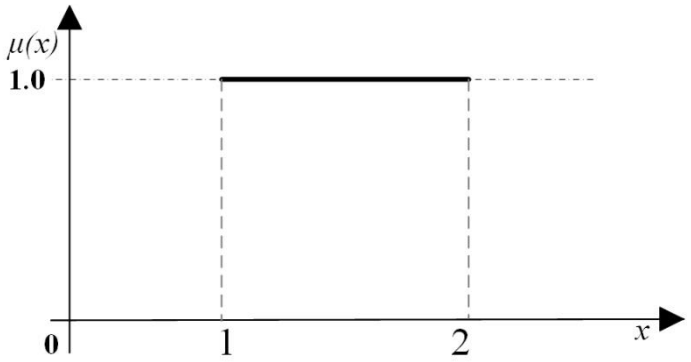


Slika 6.14. Trapezoidna funkcija pripadnosti

Funkcija pripadnosti trapeznog fazi broja A definisana je na sledeći način:

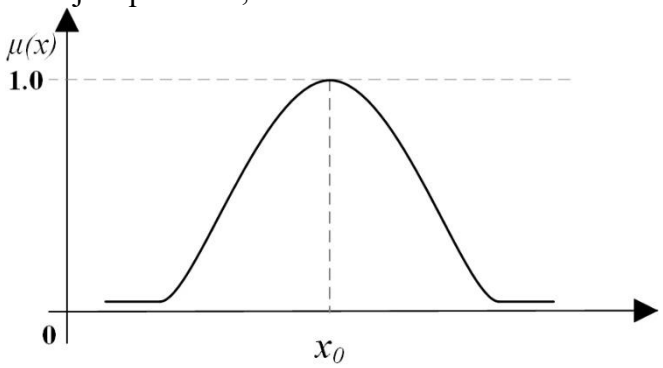
$$\mu_A(x)=\begin{cases} 0 & \textbf{za} \quad a_1 \ge x \ge a_4 \\ (x-a_1)/(a_2-a_1) & \textbf{za} \quad a_1 \le x \le a_2 \\ 1 & \textbf{za} \quad a_2 \ge x \ge a_3 \\ (a_4-x)/(a_4-a_3) & \textbf{za} \quad a_3 \le x \le a_4 \end{cases}$$

Pored trouglastog i trapeznog fazi broja, kao funkcija pripadnosti se može predstaviti i interval (slika 6.15), kao i Gausova funkcija (slika 6.16) [69].



Slika 6.15. Interval kao funkcija pripadnosti

Grafički prikaz primera Gausove funkcije za fazi skupove dat je na slici 6.16 sa odgovarajućom funkcijom u jednačini prikazanoj respektivno,



Slika 6.16. Gausova funkcija pripadnosti

$$\mu_A(x) = e^{\frac{-(x-x_O)^2}{d}}$$

Za fazi brojeve sa stepenom poverenja α, definisane su četri osnovne računske operacije: sabiranje, oduzimanje, množenje i deljenje. Jednačine 6.20 – 6.23 prikazuju osnovne operacije nad primerom dva fazi broja definisanog stepena poverenja $X\alpha = [x_1\alpha, x_2\alpha]$, i $Y\alpha = [y_1\alpha, y_2\alpha]$.

Svakom intervalu poverenja kod fazi brojeva odgovara određeni stepen poverenja, tako da se prilikom sabiranja fazi brojeva vrši sabiranje intervala poverenja koje nose ti fazi broj.

$$X\alpha + Y\alpha = [\, x_1\alpha + y_1\alpha, x_2\alpha + y_2\alpha] \tag{6.20}$$

Prilikom oduzimanja fazi brojeva, vrši se oduzimanje intervala poverenja sa istom vrednošću stepena poverenja. Ova oduzimanja su definisana za sve vrednosti stepena poverenja. Isti princip zastupljen i kod operacija množenja i deljenja, a jednačine koje to definišu prikazane su respektivno,

$$X\alpha - Y\alpha = [\, x_1\alpha - y_1\alpha, x_2\alpha - y_2\alpha] \tag{6.21}$$

$$X\alpha \cdot Y\alpha = [\, x_1\alpha \cdot y_1\alpha, x_2\alpha \cdot y_2\alpha] \tag{6.22}$$

$$X\alpha : Y\alpha = [\, x_1\alpha : y_1\alpha, x_2\alpha : y_2\alpha] \tag{6.23}$$

Pored osnovnih operacija nad fazi brojevima, u određenoj literaturi [64], [67], [70] se definišu i principi razlaganja i proširenja kao veza između fazi i diskretnih skupova. Ipak za potrebe analize raspoloživosti mehanizacije, korišćenje ovih principa nije neophodno s toga se i ne daje njihova teorijska osnova.

6.2.3 Lingvistička vrednost i lingvistička promenjiva

Način razmišljanja prosečnog čoveka u većini slučajeva bazira na slikama i šablonima pre nego na numeričkim vrednostima. U želji da se interpretira način čovekovog razmišljanja uvedene su veličine koje predstavljaju govorni jezik [71]. Promenjive čije su dozvoljene vrednosti reči prirodnog jezika nazivaju se lingvističkim promenjivim. Drugi naziv za lingvističku pomenjivu koji je u upotrebi je fazi promenjiva.

Uz (ispred) lingvističke promenjive često se dodaju modifikatori kao što su: vrlo, veoma, izrazito i sl. Modifikatori uz na primer termin raspoloživosti mehanizacije bili bi: vrlo visoka raspoloživost, visoka raspoloživost, zadovoljavajuća raspoloživost, niska raspoloživost.

Način na koji lingvistički modifikatori deluju na funkciju pripadnosti je proizvoljan. U gruboj analizi to delovanje se može podeliti u tri grupe kao [72]:

- jako dejstvo (jaki modifikatori) – pojačava značenje funkcije pripadnosti a time se smanjuje broj elemenata koji se nalaze u tom fazi skupu;
- slabo dejstvo (slabi modifikatori) – slabe funkciju pripadnosti i time uvećavaju broj elemenata u fazi skupu; i
- jednako dejstvo – dodatno slabi funkciju pripadnosti.

Kao što je prethodno pomenuto, lingvistički modifikatori se definišu u zavisnosti od njihove dalje upotrebe. Zbog toga se najčešće i primenjuje veliki broj različitih modifikatora. Nedostatak koji se javlja pri korišćenju tako velikog broja modifikatora odnosi se na jezičke manipulacije prvenstveno u kontekstu dvosmislenosti pojmova. Takvim složenim kombinovanjem može se izgubiti osnovna uloga promenjive ili modifikatora. U svakom slučaju trebalo bi definasati fazi promenljive, tj. nazive fazi skupova na način da se na najbolji način apsorbuju analizirani fenomeni. Pri tome treba uvek imati na umu da je lingvistička promenljiva praktično veza između računara i čoveka [9].

Za potrebe definisanja operatora modifikacije, uvodi se fazi skup kome je dodeljena oznaka A sa funkcijom pripadnosti $\mu A(x)$; $x \in X$, gde je X univerzalni skup i $A \subset X$.

Prva grupa modifikatora može se definisati na sledeći način [64]:

1. Množenje skalarom:	$\mu\alpha A(x) = \alpha\mu A(x)$;	$\alpha>0$, $\alpha \in Re$ i $\forall\, x \in X$ $\alpha\mu_A(x) \le 1$.
2. Stepenovanje:	$\mu A^{\alpha}(x) = (\mu A(x))^{\alpha}$;	$\alpha>0$, $\alpha \in Re$
3. Normalizacija:	$\mathrm{NORM}(A) = \dfrac{A}{\sup\limits_x \mu_A(x)}$;	$\sup\limits_x \mu_A(x) \neq 0$
4. Koncentrisanje:	$\mathrm{CONC}(A) = A^2$;	$\mu_{\mathrm{CONC}(A)} = (\mu A(x))^2$

5. Proširenje: $\mathrm{DIL}(A) = A^{0,5}$; $\mu_{\mathrm{DIL}(A)} = (\mu A(x))^{0,5}$

Druga grupa operatora modifikacije se može definisati na sledeći način:

1. Pojačavanje kontrasta – INT (A):

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

2. Fazifikacija fazi skupa A se vrši pomoću drugog fazi skupa $K(x_i)$ i definiše se na sledeći način:

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

gde se $K(x_i)$ naziva jezgro fazifikacije.

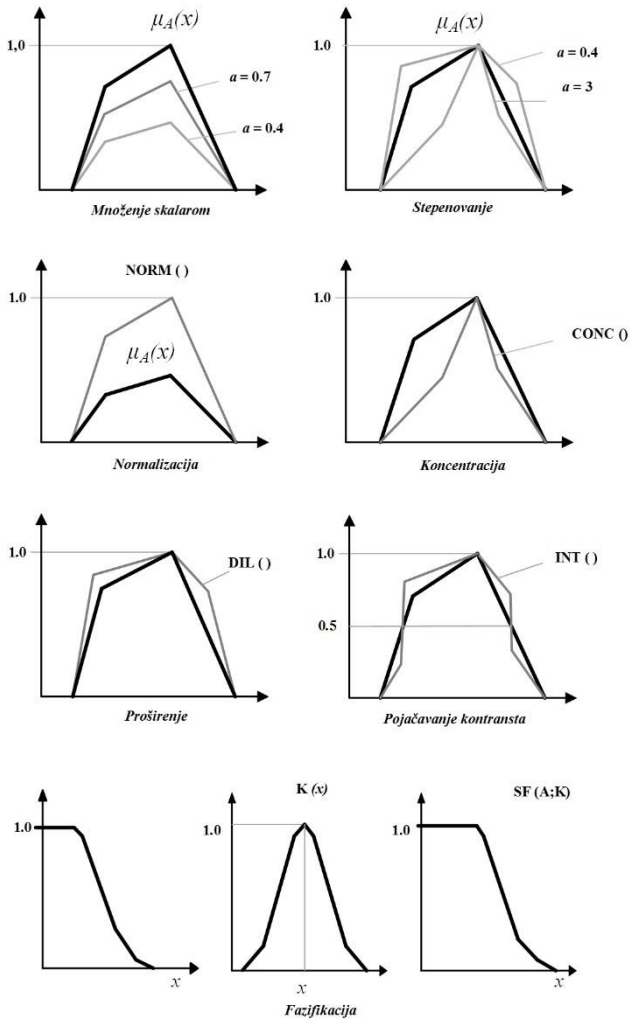
Navedeni opšte prihvaćeni modifikatori lingvističkih vrednosti se pridružuju operatoru modifikacije i to najčešće na sledeći način:

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

U opštem slučaju mogu da se definišu i veznici (i, ili, ne) u lingvističkim izrazima, koji opet mogu da se definišu na sledeći način:

- A i $B = A \cap B$;
- A ili $B = A \cup B$;
- ne $A = \tilde{A}$.

Za predstavljanje tvrđenja koja sadrže lingvističke vrednosti koristi se postupak fazi propozicije. Fazi propozicija je dakle postupak sagledavanja realnosti na načina da ona može da se predstavi, kako je ranije rečeno, u računaru. Slobodno se može reći da je postupak fazi propozicije najzahtevniji korak u formiranju konačne ocene na bazi fazi skupova. Zahtevnost se ogleda u kompleksnosti sistematizacije znanja, iskustava, zatim odgovarajućih merenja i sl.



Slika 6.17. Operatori modifikacije [64]

6.2.4 Fazi relacije

Fazi relacije opisuju neprecizne odnose izmedju dve veličine. Konkretno, neka su X i Y dva univerzalna skupa. Tada je $R = \{((x, y), \mu R(x, y)) \mid (x, y) \in X \times Y\}$ binarna fazi relacija. $\mu R(x, y)$ je dvodimenzionalna funkcija pripadnosti.

Uobičajene binarne fazi relacije su:

- x je blizu y (brojevi),
- x zavisi od y (dogadjaji),
- x liči na y (objekti),
- ako je x veliko y je malo (upravljanje, fazi sistemi zaključivanja).

Kompozicija fazi relacija

Neka su date dve binarne relacije R_1 i R_2 fazi relacije definisane u $X \times Y$ i $Y \times Z$, respektivno. Kompozicija relacija R_1 i R_2 se označava sa $R_1 \circ R_2$ i definisana je nad proizvodom $X \times Z$.

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

Kompozicija dve relacije može se posmatrati kao izračunavanje nove relacije $R_1 \circ R_2$ na osnovu datih relacija R_1 i R_2.
Najprepoznatljiviji i najčešće upotrebljavani princip fazi kompozicije je tzv. max-min kompozicija. U tom slučaju, kompozicija relacija R_1 i R_2, za date opšte uslove, definisana je na sledeći način:

$$R_1 \circ R_2 = \{[(x, y); \max_y \min (\mu_{R1}(x, y), \mu_{R2}(y, z)] \mid x \in X; y \in Y; z \in Z\}.$$

Odnosno za konkretna izračunavanja:

$$\mu_{R1 \circ R2}(x, z) = \{ \bigvee_y [(\mu_{R1}(x, y) \wedge \mu_{R2}(y, z)] \mid x \in X; y \in Y; z \in Z\},$$

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

Kada se R_1 i R_2 predstave u matričnom obliku, izračunavanje veoma liči na matrično množenje samo što se množenje i sabiranje menjaju sa $\vee$ i $\wedge$, respektivno. Iz tog razloga se max-min kompozicija često naziva i max-min proizvod.

Neka su R_1, R_2, R_3 binarne relacije na $X \times Y$ i $Y \times Z$ i $Z \times W$. Tada važi sledeće osobine max-min kompozicije:

- asocijativnost: $R_1 \circ (R_2 \circ R_3) = (R_1 \circ R_2) \circ R_3$;
- distributivnost u odnosu na uniju: $R_1 \circ (R_2 \cup R_3) = (R_1 \circ R_2) \cup (R_1 \circ R_3)$;
- slaba distributivnost u odnosu na presek: $R_1 \circ (R_2 \cap R_3) \subseteq (R_1 \circ R_2) \cap (R_1 \circ R_3)$;
- monotonost: $R_2 \subseteq R_3 \Rightarrow (R_1 \circ R_2) \subseteq (R_1 \circ R_3)$.

Primenom iste notacije kao i kod max-min kompozicija može da se definiše još jedna kompozicija, max-proizvod kompozicija

$$\mu_{R1 \circ R2}(x, z) = \bigvee_y [\mu_{R1}(x, y), \mu_{R2}(y, z)]$$

7. RAZVOJ MATEMATIČKOG I KONCEPCIJSKOG MODELA PRAĆENJA ŽIVOTNOG VEKA RUDARSKIH MAŠINA

Razvoj modela praćenja i analize životnog veka rudarskih mašina ima za cilj definisanje ključnih parametara odnosno dimenzija životnog veka i kriterijuma za donošenje odluka vezano za upravljanje životnim vekom. Prema izloženim teorijskim postavkama vezano za inženjerstvo održavanja tehničkih sistema i pojam upotrebnog kvaliteta, kao prva dimenzija životnog veka bira se funkcija raspoloživosti u vremenu a kao druga dimenzija funkcija troškova u vremenu. Životni vek svakog tehničkog sistema ima nekoliko prelomnih (kritičnih) tačaka koje određuju njegovu dalju sudbinu.

Prelomne tačke su definisane u odnosu na parametre i u odnosu na specifične kriterijume (Slika 1.3):

- Ekonomski vek sa maksimalnim profitom tehničkog sistema, trenutak ***TP*** (t_1) kada mašina više ne ostvaruje maksimalno mogući rast prihoda. Navedeni trenutak se određuje **modelom zamene bez diskontnog faktora i sa delimičnim otpisom.**
- Ekonomski vek tehničkog sistema, trenutak ***TE*** (t_2) kada specifični troškovi koje indukuje mašina tokom svoje egzistencije postaju veći od specifičnih troškova koje bi poslodavac imao kada bi iznajmljivao odgovarajuću mašinu. Navedeni trenutak se određuje na osnovu tržišnih parametara, koji u slučaju mašina pomoćne mehanizacije za radne uslove na kopovima EPS-a iznose 70 €/mh za buldozere i cevopolagače, odnosno 40 €/mh za hidraulične bagere.
- Tehnički vek predstavlja trenutak ***TT*** (t_3) kada mašina više nema očekivanu i potrebnu raspoloživost, odnosno kada pouzdanost i pogodnost održavanja padnu ispod kritične vrednosti. Navedeni trenutak se određuje na osnovu organizacionih parametara, gde se kao uslov postavlja da je minimalna raspoloživost 80%, odnosno da je neprihvatljivo da na 4 mašine koje rade mora da se angažuje > 1 mašine u rezervi.

U cilju upravljanja, potrebno je što preciznije i što efikasnije definisati navedene tačke u zavisnosti od vremena. U ovoj disertaciji, biće korišćen sledeći koncept definisanja navedenih tačaka:

i analizom troškova u periodu od 10 godina definisane su vremenske koordinate tačaka ***TP*** (t_1) i ***TE*** (t_2),

ii analizom koeficijenta raspoloživosti u periodu od 10 godina definisana je vremenska koordinata tačke ***TT*** (t_3)

iii na bazi fazi teorije definisan je ekspertski model ocene raspoloživosti sa hijerarhijskim rangiranjem ulaznih parametara (***A***)

iv na osnovu 10 godišnjeg empirijskog praćenja koeficijenta raspoloživosti, utvrđeno je da trend pada raspoloživosti u vremenu može da se aproksimira pravom linijom.

v na osnovu *iii* i *iv* linearnom aproksimacijom se računaju vrednosti ***A*** za vremena ***TP*** (t_1), ***TE*** (t_2) i ***TT*** (t_3) u intervalu 0 ... 1

Na osnovu navedenog koncepta dobija se mogućnost definisanja tri navedene tačke; i dobija se mogućnost efikasnog definisanja aktuelne vrednosti ***A*** *(iii)*. Na ovaj način u bilo kom trenutku životnog veka mašine može se odrediti na osnovu ekspertskog modela (*iii*) trenutni nivo raspoloživosti ***A*** = 0 ... 1 , i oceniti u kom intervalu životnog veka se nalazi posmatrana mašina u odnosu na tri referentne tačke, odnosno koliko je bliska navedenim tačkama.

U nastavku se daje detaljan prikaz ekspertskog modela (glava 7.1) koji ima za cilj da korišćenjem teorije fazi skupova, pravila fazi algebre i fazi logičkog zaključivanja sa korigovanim ishodom oceni aktuelnu raspoloživost pojedinačne mašine (***A***). Korekcija ishoda se vrši na osnovu rezultata rangiranja, gde je cilj da se za svaku mašinu i svako radno okruženje odredi prioritet uticaja ***R, M, S*** prema ***A*****.** Za rangiranje se

koristi AHP metoda više-kriterijumskog odlučivanja. Određivanje trenda pada raspoloživosti postojećih mašina obavlja se na bazi empirijskog modela u glavi 7.2. U tom smislu definisana je raspoloživost kao količnik ukupnog vremena u radu i ukupnog kalendarskog vremena. Ovim empirijskim postupkom dobija se veličina t_3. U glavi 7.3. prikazani su ekonomski modeli određivanja optimalnog vremena zamena preko troškova eksploatacije za ulov da mašina radi sa maksimalnim profitom (vreme t_1) i profitom odnosno da je zarada veća od troškova (vreme t_2). Navedeni ekonomski modeli su empirijskog karaktera. U glavi 7.4. opisane su teorijske postavke primenjene matematičke analize za obradu podataka u empirijskim modelima.

7.1. Ekspertski fazi AHP sintezni model

Raspoloživost suštinski zavisi od pouzdanosti, pogodnosti održavanja (konstrukcijska komponenta) i nivoa podrške koju pruža radno okruženje u tehničkom, funkcionalnom, pravno-administrativnom, finansijskom i bilo kom drugom smislu. Navedeni parcijalni indikatori raspoloživosti su podaci hibridnog karaktera. Neki mogu da se izraze brojčano, u obliku vremenski zavisne funkcije, a neki samo na bazi ekspertskih mišljenja. Među ovim indikatorima preovladava, neodređenost, subjektivnost, višeznačnost, nekonzistentnost, međusobno preklapanje. U naučnoj literaturi se rešavanje takvih koncepcijskih problema uobičajeno koristi fazi teorija [64, 65, 67, 72].

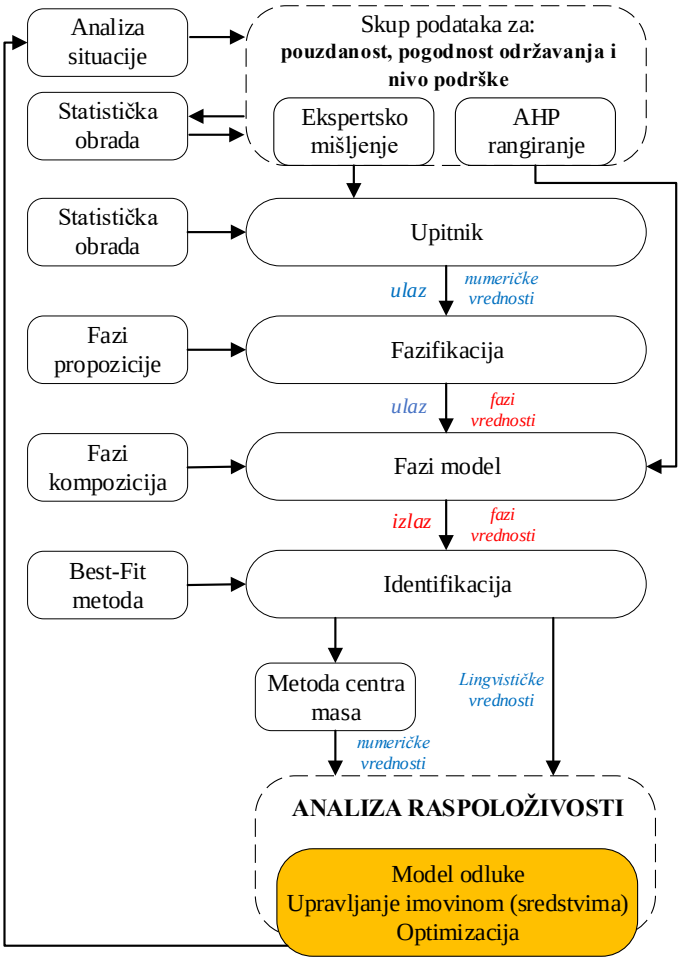
Ideja primene Fazi teorije u ovom radu je da se parcijalni indikatori raspoloživosti tretiraju kao ulazni podaci, odnosno fazi relacije, a da se njihova sinteza (optimizacija) obavi jednom od metoda fazi kompozicije. Pri tome se daje mogućnost korekcije rezultata kompozicije uvođenjem rangiranja ulaznih podataka. Osnovni razlog uvođenja rangiranja uticaja pouzdanosti, pogodnosti održavanja i nivoa podrške na raspoloživost je dobijanje mogućnosti primene ekspertskog modela za više različitih mašina i više različitih radnih okruženja.

Ekspertni model čine dva modula ekspertske analize. Jedan modul je predstavljen upitnikom koji se popunjava na osnovu lingvističkih opisa za svaki parcijalni indikator raspoloživosti. Lingvistički opisi su unapred definisani, ekspert ih evidentira funkcijom pripadnosti u intervalu 0 ... 1. Upitnici se statistički obrađuju i dalje prevode u fazi formu. Drugi modul ekspertske ocene predstavljen je međusobnim rangiranjem parcijalnih indikatora. U ovoj disertaciji rangiranje se vrši pomoću metode *Analytic Hierarchy Process* (AHP).

Fazi-AHP sintezni model predstavljen je preko modela fazi zaključivanja gde ulaze predstavljaju fazifikovane ocene parcijalnih indikatora, a pravila fazi kompozicije su definisana preko ishoda koji su korigovani na osnovu rangova [17].

7.1.1 Fazi zaključivanje u sinteznom modelu

Raspoloživost (u daljem tekstu označeno sa **A**) definiše se kao sveobuhvatni pojam koji u sebi sadrži sledeće fenomene: pouzdanost (engl. *Reliability*) (**R**), pogodnost održavanja (engl. *Maintainability*) (**M**), nivo podrške (engl. *Supportability*) (**S**). Postupak dobijanja fazi sinteznog ishoda sastoji se od propozicije, kompozicije i identifikacije (slika 7.1).



Slika 7.1. Algoritam fazi modela

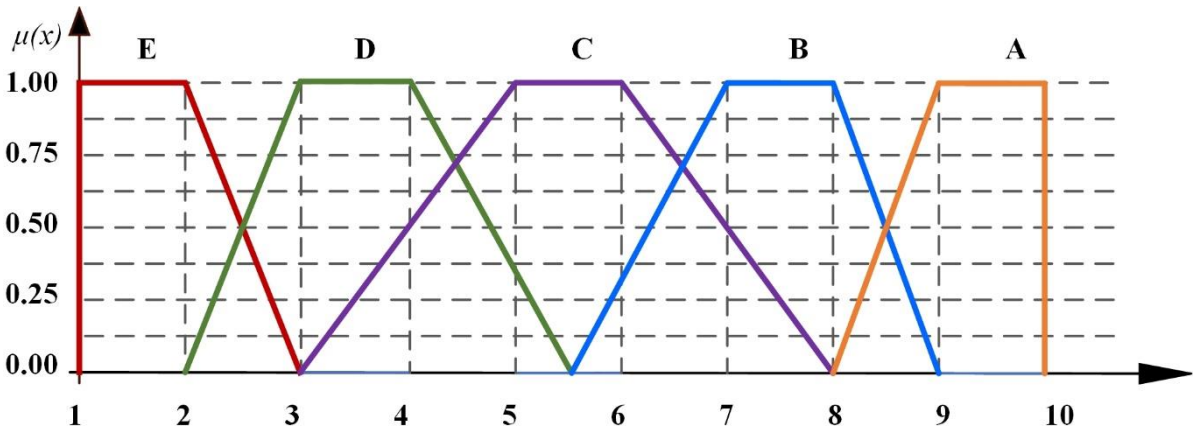
Propozicija parametara raspoloživosti

Prvi korak u formiranju sinteznog modela je propozicija raspoloživosti i njenih parcijalnih indikatora (**R**, **M**, **S**). Uvode se po pet lingvističkih promenljivih za svaki indikator, koje su definisane u koordinatnom sistemu funkcija pripadnosti (***μ***) i klasa kao reprezent jedinice mere indikatora (***j***). Lingvistička promenljiva (***LV***) generalno je definisana na sledeći način:

$$LV = \left(\mu_{(j=1)},\ \ldots,\ \mu_{(j=10)}\right) \tag{7.1}$$

Svaka lingvistička promenljiva konkretno je definisana na sledeći način (slika 7.2):

$$A = (0_{(1)},\ \ldots,\ 0_{(8)},\ 1_{(9)},\ 1_{(10)});$$
$$B = (0_{(1)},\ \ldots,\ 0_{(5)},\ 0.33_{(6)},\ 1_{(7)},\ 1_{(8)},\ 0_{(9)},\ 0_{(10)});$$
$$C = (0_{(1)},\ 0_{(2)},\ 0_{(3)},\ 0.5_{(4)},\ 1_{(5)},\ 1_{(6)},\ 0.5_{(7)},\ 0_{(8)},\ 0_{(9)},\ 0_{(10)});$$
$$D = (0_{(1)},\ 0_{(2)},\ 1_{(3)},\ 1_{(4)},\ 0.33_{(5)},\ 0_{(6)},\ \ldots,\ 0_{(10)});$$
$$E = (1_{(1)},\ 1_{(2)},\ 0_{(3)},\ \ldots,\ 0_{(10)}).$$



Slika 7.2. Zavisnost lingvističke promenljive i funkcije pripadnosti, opšti oblik [17]

Za svaki parcijalni indikator posebno se definiše opis svake lingvističke promenljive.

U nastavku se daju navedeni opisi [17]:

Pouzdanost:

- **AR** – Nisu zabeleženi iznenadni, neplanirani otkazi.
- **BR** – Javljaju se smetnje u radu. Zanemarljiv uticaj na vremensku sliku stanja tehničkog sistema.
- **CR** – Otkazi se dešavaju. U najvećem broju slučajeva su planirani. Intervencije su uglavnom planirane i otklanjaju se na licu mesta.
- **DR** – Učestala je pojava otkaza. Niska je pouzdanost mašine. Smanjena efikasnost u radu.
- **ER** – Konstantno su prisutni kvarovi. Mašina nije na potrebnom (željenom) radnom nivou.

Pogodnost održavanja:

- **AM** – Svaka intervencija može u potpunosti da se planira u smislu vremena trajanja i organizacije rada. Dijagnostika je jednostavna; Popravlja se brzo; Nema korozije; Nije velika masa elemenata; Moguće je planiranje vremena i organizacije rada.
- **BM** – Moguća je brza identifikacija slabosti (greške, kvara...). Konstruktivno jednostavno za popravku; Moguće su manje smetnje pri popravkama.
- **CM** – Moguće su poteškoće prilikom preventivnog i servisnog održavanja, iz razloga: konstruktivne prirode, nepristupačnosti delova; usled pojave korozije, mase elementa i sl.
- **DM** – Nije moguće planiranje vremena trajanja intervencije i organizacije rada. Prisutan veliki broj komplikacija prilikom demontaže i montaže.
- **EM** – Kvar se ne može otkloniti u prihvatljivom vremenu. Neophodno je mašinu isključiti iz radnog pogona na duži period.

Nivo podrške:

- **AS** – Svaki rad sa mašinom može u potpunosti da se planira u smislu vremena trajanja i organizacije. Ima rezervnih delova i alata; Ima obučenih majstora; Blizu je radionica; Nema administrativnih poteškoća.
- **BS** – Administrativno-logistička podrška je na zadovoljavajućem nivou. Brza nabavka rezervnih delova; Radionica na maloj udaljenosti; Moguća nabavka neophodne papirologije.
- **CS** – Sve aktivnosti vezane za podršku održavanju (rezervni delovi, alat, radionica, obučenost radnika i sl.) su na zadovoljavajućem nivou; Rad sa mašinom je u najvećem broju slučajeva korektan.

- **DS** – Otežana nabavka rezervnih delova; Neophodna dodatna obuka; Javljaju se administrativne poteškoće; Rad sa mašinom je nešto teži nego što se očekuje.
- **ES** – Nema rezervnih delova; Radnici nisu obučeni; Administrativni problemi; Udaljena radionica. Svaki rad sa mašinom pun je nepredvidivosti usled nedovoljne obuke ljudi, logističke podrške i sl. Nije moguće planiranje aktivnosti u kontekstu vremena trajanja i organizacije.

Kompozicija parametara raspoloživosti

Drugi korak u formiranju sinteznog modela je kompozicija parcijalnih parametara na nivo sinteznog. Suštinski kompozicja u fazi teoriji se predstavlja preko "IF-THEN" pravila. U konkretnim slučajevima koriste se izvedeni modeli kompozicija. U literaturi se najčešće pominju dva modela kompozicije. Max - min kompozicija, koja se naziva još i pesimističnom kompozicijom usled postupka kojim se izvodi. Sintezna ocena dobija se upotrebom reprezentativne parcijalne ocene koja se definiše kao najbolja moguća među najlošijim očekivanim pojedinačnim ocenama. Ova kompozicija koristi se za predstavljanje fenomena kao što je sigurnost funkcionisanja. Min - max kompozicija predstavlja model fazi kompozicije koja se deklariše kao optimistična kompozicija, jer kroz nju se sintezna ocena prikazuje kroz reprezentativnu parcijalnu ocenu koja je najlošija među najboljim očekivanim parcijalnim ocenama. Koristi se npr. za predstavljanje rizika. U nastavku će biti prikazan fazi max-min model kompozicije (koraci ***i* – *vii***).

$$A_i = \max\left\{\min(R_i,\ M_i,\ S_i)\right\} \tag{7.2}$$

(***i***) Definisana su tri fazi broja R_i, M_i i S_i preko funkcije pripadnosti μ i klase j = 1 do n:

$$\begin{aligned} R_i &= \left(\mu_{R(1)},\ ...,\ \mu_{R(j)},\ ...,\ \mu_{R(n)}\right); \\ M_i &= \left(\mu_{M(1)},\ ...,\ \mu_{M(j)},\ ...,\ \mu_{M(n)}\right); \\ S_i &= \left(\mu_{S(1)},\ ...,\ \mu_{S(j)},\ ...,\ \mu_{S(n)}\right). \end{aligned} \tag{7.3}$$

(***ii***) Funkcije pripadnosti mogu da formiraju $C = n^3$ kombinacija. Svaka kombinacija predstavlja praktično jednu moguću ocenu (*assessment*) A_i (7.2).

$$Ac = \left[\mu_{R(j=1,\ ...,\ n)},\ \mu_{M(j=1,\ ...,\ n)},\ \mu_{S(j=1,\ ...,\ n)}\right], \qquad \text{za svako } c = 1 \text{ do } C \tag{7.4}$$

(***iii***) Ako se u obzir uzmu samo vrednosti koje zadovoljavaju uslov $\mu_{R,M,S\,(j\,=\,1,...,\,n)} \neq 0$, dobijaju se ishodi (*outcomes*) o (o = 1 do O, gde je $O \leq C$). Svaki ishod ima odgovarajuće vrednosti (*iv*) i (*v*) koje ga dalje identifikuju za proračun.

(***iv***) U nastavku, za svaku kombinaciju c koja zadovoljava uslov da je ishod, računa se vrednost J_c i zaokružuje na celobrojnu vrednost, na sledeći način:

$$J_c = \left[\left(w_{Ri} \cdot j_{(\mu R)c}\right) + \left(w_{Mi} \cdot j_{(\mu M)c}\right) + \left(w_{Si} \cdot j_{(\mu S)c}\right)\right] \tag{7.5}$$

gde je:

- w_i uticajni faktor odgovarajućeg parcijalnog indikatora na raspoloživost koji se dobija na osnovu međusobnog rangiranja parcijalnih indikatora, pri čemu je: $w_{Ri}+w_{Mi}+w_{Si}= 1$;
- j_c klasa kojoj pripada odgovarajući fazi broj (7.3) za posmatranu funkciju pripadnosti i datu kombinaciju c, pri čemu je: $j_c = 1, ..., n$;

(***v***) Za svaki ishod traži se minimalna vrednost $\mu_{R,M,S}$ u vektoru A_c (7.4), na sledeći način:

$$MN_o = \min\left\{\mu_{R(j)o},\ \mu_{M(j)o},\ \mu_{S(j)o}\right\}, \qquad \text{za svako } o = 1 \text{ do } 0 \tag{7.6}$$

(***vi***) Ishodi se grupišu prema vrednosti J_c. Broj ovakvih grupa može biti 0 do n.

(***vii***) U svakoj grupi ishoda (*vi*) traži se maksimalna vrednost *MH* među identifikovanim minimumima (*v*). Maksimum koji korespondira *j*-toj (j^{th}) vrednosti, računa se kao:

$$MXj = \max\left\{MN_1,\ ...,\ MN_o,\ ...,\ MN_O\right\}_{Jc}, \qquad \text{za svako } j = o \tag{7.7}$$

Ocena raspoloživosti posmatranog tehničkog sistema (*engineering system*), konačno se dobija u formi koja je saglasna po svom zapisu sa (7.2, 7.4):

$$A = \left(MX_{j=1},\ ...,\ MX_{j=n}\right) = \left(\mu_{A(1)},\ ...,\mu_{A(j)},\ ...,\ \mu_{A(n)}\right) \tag{7.8}$$

Zapis (7.8) daje ocenu u zavisnosti od funkcije pripadnosti i klase. Korišćenjem neke od metoda identifikacije, zapis može biti izražen u zavisnosti od lingvističkih promenljivih *A, B, C, D, E*, u skladu sa slikom 7.2. U ovom radu biće korišćena Best-fit metoda. Ova metoda karakteristična je po tome što daje mogućnost preslikavanja funkcije pripadnosti klasama (7.8) u funkciju pripadnosti fazi brojevima (7.9). Odnosno preslikavnje funkcije pripadnosti određenoj konačnoj vrednosti u funkciju pripadnosti datoj površini. Model se bazira na računanju relativne udaljenosti između date konačne vrednosti funkcije pripadnosti dobijenog rezultata i funkcije pripadnosti fazi broja koji definiše lingvističku promenljivu A, ..., E. Detaljan prikaz biće dat u studiji slučaja.

$$A = \mu_A / \text{A},\ \ \mu_A / \text{B},\ \ \mu_A / \text{C},\ \ \mu_A / \text{D},\ \ \mu_A / \text{E} \tag{7.9}$$

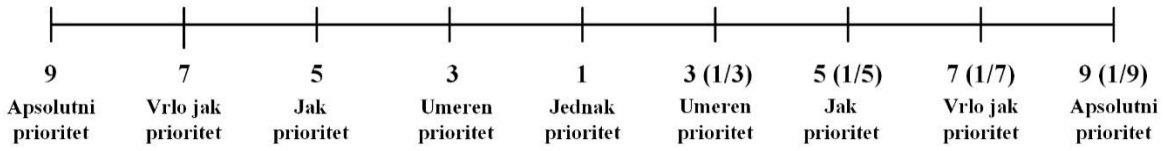
7.1.2. AHP model rangiranja

Analitičko hijerarhijski proces (AHP) predstavlja najčešće korišćenu matematičku metodu pri višekriterijumskom odlučivanju. Osmislio je *Tomas L. Saaty* [73], od samog pojavljivanja metoda je izazvala veliko interesovanje a danas spada u najpoznatije i najprimenjenije metode ove vrste i ima široku primenu.

Oslanja se na teoriju relativnog merenja težine faktora uticaja pri donošenju odluka. Predmet interesovanja nije tačno merenje pojedinih količina, već se akcenat stavlja na proporcionom odnosu između njih. Bazira na merenju kroz upoređivanje u parovima pri čemu zavisi od procene stručnjaka (eksperta) pri definisanju prioritetnih skala [54]. Jedna od prednosti AHP metode je njena sposobnost da identifikuje i analizira nedoslednost (*inconsistency*) donosioca odluke u procesu dodeljivanja prioriteta u hijerarhijskoj strukturi.

Prema saznanjima iz ljudske psihologije, najjednostavnije i najtačnije odluke donose se kada postoje samo dve alternative izbora pri jednoj interakciji. Upravo je to osnovni princip metode AHP. Složeni

problem se raščlani na proste činioce koji se zatim upoređuju u parovima. Svako upoređivanje u parovima, radi se primenom *Saaty*-jeve skale relativne važnosti prikazane na slici 7.3 [16].



Slika 7.3 Saaty skala

Rezultat upoređivanja elemenata je numerička vrednost koeficijenta značajnosti prioriteta (***W***). Prema jednačini 7.10 izračunavaju se koeficijenti značajnosti svakog od elementa, nakon čega se stvara mogućnost formiranja matematičke matrice ***M*** (7.11) čijim se izračunavanjem dobija rešenje prema određenom kriterijumu ili podkriterijumu [18].

$$W = \sum_{j=1}^{n} \frac{W_i}{W_j} = W_i \left(\sum_{j=1}^{n} \frac{1}{W_j} \right) \qquad i = 1, \ldots, n \tag{7.10}$$

$$M = \begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \ldots & w_1/w_n \\ w_1/w_1 & w_2/w_2 & \ldots & w_2/w_n \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \ldots & w_n/w_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \ldots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \ldots & a_{2n} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ a_{n1} & a_{n2} & \ldots & a_{nn} \end{bmatrix} \tag{7.11}$$

Poslednji korak u metodi AHP je provera greške tj. provera konzistentnosti donosioca odluke. Uslov konzistentnosti je da vrednost slučajnog indeksa konzistentnosti ***CR*** (7.14) bude manja od 10%. Matematička provera konzistentnosti vrši se izračunavanjem indeksa konzistentnosti (7.12),

$$CI = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n-1)}, \tag{7.12}$$

gde je λ_{max} maksimalna vrednost izračunate matrice (7.13), dok je ***n*** broj analiziranih objekata.

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \tag{7.13}$$

$$CR = \frac{CI}{RI}, \tag{7.14}$$

slučajni indeks ***RI*** zavisi od broja analiziranih objekata *n*, prikazanih u tabeli 7.1.

Tabela 7.1. Zavisnost slučajnog indeksa od broja analiziranih objekata [63]

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0,00	0,00	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49	1,51	1,53	1,56	1,57	1,59

7.2 Određivanje trenda pada raspoloživosti postojećih mašina

Na osnovu podataka o radu i zastoju mašina pomoćne mehanizacije na površinskim kopovima Elektroprivrede Srbije, za period prvih deset godina korišćenja (zbog ujednačenosti podataka koji definišu ispravnost poređenja), dobijeni su ostvareni moto sati, planirani i neplanirani zastoji. Funkcija raspoloživosti pored toga što neposredno opisuje odgovarajuća svojstva tehničkog sistema (u ovom mašina pomoćne mehanizacije), takođe predstavlja i karakteristiku sistema održavanja istog. Naime, raspoloživost zbirno pokazuje uticaj održavanja na efektivnost tehničkog sistema mašine, odnosno, raspoloživost povezuje osobine sistema mašine pomoćne mehanizacije u pogledu pouzdanosti i održavanja.

U ovom istraživanju, raspoloživost se računa kao odnos:

- vremena kada je sistem u ispravnom stanju odnosno vremena kada je sistem u radu;
- ukupnog vremena koje pored gore navedenog vremena kada je sistem u ispravnom stanju čini i vreme kada je sistem u otkazu a koje čini: organizaciono vreme, logističko vreme, vreme za korektivne popravke i vreme za preventivne popravke.

Trend pada raspoloživosti se određuje statističkom analizom na osnovu prikupljenih i razvrstanih podataka. Cilj je dobijanje prosečne raspoloživosti za svaku godinu eksploatacije za svaku grupu mašina i dobijanje trenda ponašanja navedenih vrednosti u vremenu. U ovom radu postupak aproksimacije biće obavljen metodom najmanjih kvadrata, kako jednom od najčešće korišćenih metoda eksperimentalne statistike i numeričke matematike. Ovakva analiza ima empirijski karakter.

7.3 Ekonomski modeli praćenja – određivanje optimalnog vremena zamena preko troškova eksploatacije

Zadatak upravljanja životnim vekom pomoćnih mašina je ostvarivanje maksimalnog mogućeg profita, što se postiže kroz ostvarivanje maksimalnih proizvodnih kapaciteta uz adekvatno upravljanje troškovima. Stalnim praćenjem i analiziranjem kretanja troškova moguće je odrediti značajna vremena za donošenje odluka vezanih za upravljanje životnim vekom.

Određivanje vremenskih koordinate tačaka ***TP*** (t_1) (ekonomski životni vek sa maksimalnim profitom) i ***TE*** (t_2) (ekonomski životni vek sa profitom) određeni su na osnovu ekonomskih modela opisanih u glavi 5.

7.3.1 Određivanje optimalnog vremena zamena TE (ekonomski život sa profitom)

Kako su troškovi eksploatacije ključni faktor zamene mašina, otvara se pitanje pouzdanosti evidentiranja istih vezano za njihovu procenu. Ovim procenama, bavi se metodologija kompanije "*Caterpillar*" [44], koju treba prihvatiti kao referentnu jer se radi o najrenomiranijem proizvođaču ove vrste mehanizacije u svetu. Prema ovoj metodologiji pravilnim izborom trenutka zamene mašine novom, treba otkloniti mogućnost njene eksploatacije sa troškovima koji prevazilaze nabavku nove mašine.

Caterpillar-ova metodologija je vrlo pragmatično postavljena [12] a njena filozofija počiva na konstataciji da vlasnik mašine treba da održava ravnotežu između njenih proizvodnih efekata i troškova rada u cilju postizanja "optimalnih performansi", to jest, postizanja željenog obima proizvodnje sa najnižim troškovima.

Predložena metoda prati nekoliko osnovnih principa [44]:

- Nikakvi troškovi se ne predviđaju za bilo koju stavku; za pouzdane procene, oni uvek treba da se dobijaju sa površinskih kopova.
- Izračunavanja se baziraju na kompletnoj mašini; pojedinačne procene nisu neophodne za osnovnu mašinu, dozer, kontrolu itd.

Troškovi vlasništva izračunati su na osnovu na osnovu preporuka i standarda koji se koriste na površinskim kopovima. Za period primene pomoćne mehanizacije najčešće se usvaja u opsegu od 7 do 15 godina u zavisnosti od vrste mašine i tipa poslova kojima će se mašina baviti. Na primer za dozere koji rade na površinskim kopovima uglja, često se za amortizacioni period usvaja 10 godina tako da se pri trenutnoj analizi sa postojećim podacima za mašine koje ne ispunjavaju pomenuti uslov od 10 godina korišćenja, usvaja koeficijent amortizacije. Koeficijent amortizacije za taj period je 0,1 i ta vrednost se primenjuje u predstojećoj jednačini (7.15) za redukovanje cene isporuke *P'*.

$$P' = \left[1-(B-N)\cdot a\right]\cdot P \quad [€] \tag{7.15}$$

gde je:

P – cena isporuke mašine, [€] ;
B – definisani period korišćenja mašine, [god];
N – broj godina korišćenja mašine, [god] ;
a – koeficijent amortizacije, [%].

Operativni troškovi izračunati su na osnovu podataka koji se vode u pogonskoj dokumentaciji Elektroprivrede Srbije - RB Kolubara gde su precizno vođeni podaci relevantni za određivanje ovih troškova:

- ostvareno efektivno vreme rada svake pojedinačne mašine;
- količina utrošenog goriva po svakoj mašini na osnovu čega je izračunat trošak goriva po ostvarenom moto satu;
- troškovi maziva (ulja i masti) i filtera, troškovi hodnog stroja, troškovi ostalih rezervnih delova i potrošnog materijala, na osnovu čega je izračunat trošak održavanja po ostvarenom moto satu;
- troškovi radne snage na eksploataciji i održavanju.

Proračunom svih prethodno definisanih troškova definiše se granica isplativosti primene određene mašine. Trenutak kada troškovi prevaziđu definisanu granicu isplativosti, preporučuje se zamena mašine odnosno nabavka nove.

Troškovi sa godinama rastu i za svaku godinu eksploatacije dobijena je prosečna vrednost troška po ostvarenom moto satu. U ovom modelu proračun je izvršen tako da je posmatran period od prvih 10 godina korišćenja mašine svake mašine ponaosob, bez obzira na trenutak tj. godinu kada je ona počela sa radom.

7.3.2 Određivanje optimalnog vremena zamena TP (ekonomski život sa maksimalnim profitom)

Za određivanje trenutka maksimalnog profita tokom ekonomskog životnog veka korišćen je **Model zamene bez diskontnog faktora i sa delimičnim otpisom** [74]. Za dobijanje optimalnog vremena zamene korišćene su vrednosti nabavne cene za različite vrste mašina, preostala vrednost mašine nakon 10 godina, kao i troškovi održavanja.

Model zamene bez diskontnog faktora i sa delimičnim otpisom [74]

Neka je u trenutku $t = 0$ kupljena mašina čija je nabavna vrednost K. Mašina tokom vremena gubi vrednost i $\phi(t)$ predstavlja faktor otpisa vrednosti mašine. Posle vremena dužine t vrednost mašine je $K\,\phi(t)$.

Funkcija $\phi(t)$ u trenutku $t = 0$ mora biti $\phi(0) = 1$ jer mašina je tek nabavljena i ima vrednost K. Tokom vremena vrednost mašine se smanjuje pa funkcija $\phi(t)$ mora biti monotono opadajuća i mora da teži nuli sa povećanjem vremena.

Funkcija f(t) predstavlja kumulativne troškove održavanja i u trenutku $t = 0$ mora biti $f(0) = 0$. Troškovi tokom vremena rastu pa je $f(t)$ monotono rastuća funkcija. Troškovi u nekom vremenskom periodu (t_1, t_2) mogu se dobiti kao $f(t_2) - f(t_1)$.

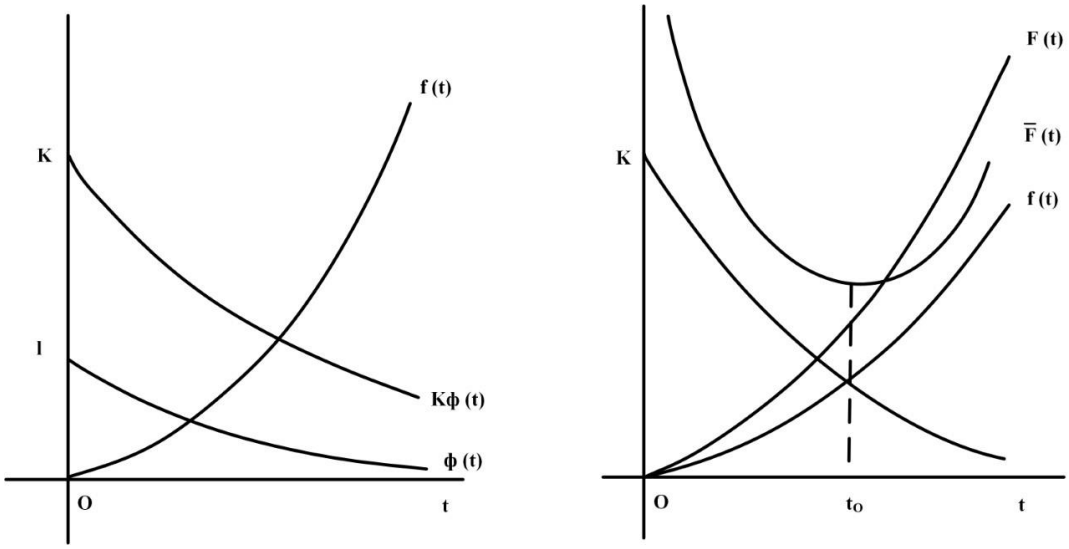
Ukupni troškovi eksploatacije mašine su nabavna vrednost mašine K, troškovi održavanja $f(t)$ umanjeni za vrednost mašine u trenutku t :

$$F(t) = K + f(t) - K \cdot \phi(t) \tag{7.16}$$

$$F(t) = K \cdot \left[1 - \phi(t)\right] + f(t) \tag{7.17}$$

$F(t)$ je monotono rastuća funkcija u vremenu t. Kako je $\phi(t)$ monotono opadajuća funkcija i uvek manja od 1, to je $1 - \phi(t)$ monotono rastuća funkcija i $1 - \phi(0) = 0$. Uz $f(0) = 0$ dobija se da je $F(0) = 0$.

Kad $t \to \infty$, $\phi(\infty) \to 0$ tj. $1 - \phi(\infty) \to 1$ pa u ukupne eksploatacione troškove ulazi neumanjena nabavna vrednost mašine (slika 7.4.).



Slika 7.4. Troškovi eksploatacije mašine [74]

Ukupni eksploatacioni troškovi nemaju ekstremnu vrednost budući da su predstavljeni monotono rastućom funkcijom, iz tog razloga se definišu prosečni troškovi kao:

$$\bar{F} = \frac{1}{t} \cdot K \cdot \left[1 - \phi(t)\right] + \frac{1}{t} \cdot f(t) \tag{7.18}$$

Prosečni troškovi $\bar{F}$ (t) biće opadajuća funkcija do nekog vremena t_0, posle čega će ovi troškovi rasti. Trenutak $t = t_0$ je vreme kada su prosečni troškovi u periodu [0, t_0] minimalni (slika 7.4.).

Dužina vremena eksploatacije [0, t_0] za koju su minimalni prosečni troškovi dobija se preko prvog izvoda funkcije $\bar{F}$ (t) kao:

$$\frac{d\bar{F}(t)}{dt} = \frac{1}{t^2} \cdot \left\{ \left[-K \cdot \phi'(t) + f'(t) \right] \cdot t - K \cdot \left[1 - \phi(t)\right] - f(t) \right\} = 0 \tag{7.19}$$

Prethodna jednačina može imati rešenje za $t = t_0$, tj. prosečni troškovi će biti minimalni ako je ispunjen uslov:

$$\frac{d^2\bar{F}(t)}{dt^2} > 0 \tag{7.20}$$

Na osnovu t_0 mogu se odrediti:

1. Troškovi eksploatacije:
$$F(t_0) = K \cdot \left[1 - \phi(t_0)\right] + f(t_0) \tag{7.21}$$

2. Prosečni troškovi eksploatacije:
$$F(t_0) = \frac{1}{t_0} \cdot K \cdot \left[1 - \phi(t_0)\right] + \frac{1}{t_0} \cdot f(t_0) \tag{7.22}$$

3. Vrednost mašine pri zameni:
$$K \cdot \phi(t_0) \tag{7.23}$$

4. Vrednost otpisanog dela mašine:
$$K \cdot \left[1 - \phi(t_0)\right] \tag{7.24}$$

7.4 Primenjene metode za analizu zavisnosti

Za potrebe analize zavisnosti *f(x)* raspoloživosti i troškova *y* od vremena rada *x*, dobijen je niz *n* tačaka $M_i(x_i, y_i)$, gde je $i = 1, 2, \ldots, n$.. Fitovanjem je dobijena zavisnost raspoloživosti i troškova od godina eksploatacije.

7.4.1 Fitovanje

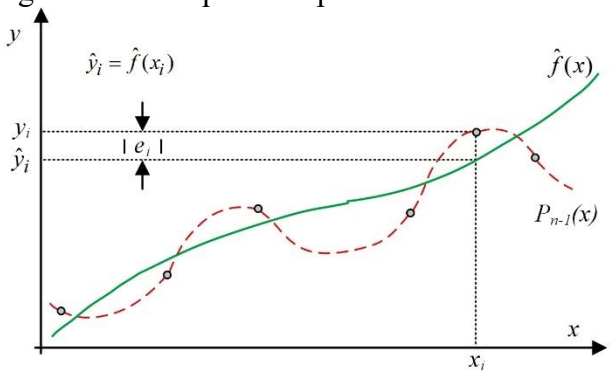
Fitovanje eksperimentalnih podataka je postupak kod kog se funkcija $\hat{f}(x)$ formuliše radi aproksimacije nepoznate zavisnosti *f(x)*, tako da je u određenom smislu malo odstupanje eksperimentalnih vrednosti od računarskih procena dobijenih iz nje (jednačina 7.25) [75].

$$e_i = y_i - \hat{f}(x_i), \qquad i = 1, 2, ..., n \tag{7.25}$$

Naime, funkcija $\hat{f}(x)$ naziva se empirijskom formulom i nju prilagođavamo (fitujemo, od engleske reči *fit*) eksperimentalnim podacima.

Interpolacioni polinom P_{n-1} predstavlja rezultat traženja empirijske formule u obliku polinoma prilikom čega je, kako bi se postiglo kvalitetno fitovanje, postavljen da uslov odstupanja (jednačina 7.25) bude jednako nuli. Ipak, interpolacioni polinomi nisu adekvatne empirijske formule jer:

- nema smisla tačno reprodukovati eksperimentalne tačke, koje svakako sadrže neizbežne slučajne greške merenja;
- empirijska formula čiji grafik ne prolazi ni kroz jednu eksperimentalnu tačku M_i, $i = 1, 2, ..., n$ izražava („uglačava“) lokalne nepravilnosti, koje potiču od grešaka merenja, za razliku od interpolacionog polinoma (slika 7.5). Interpolacioni polinomi, naročito visokog stepena (veliki broj eksperimentalnih tačaka) pokazuju ekstremne tačke, koje nisu rezultat stvarne veze između izmerenih veličina, nego zahteva da polinom prođe kroz sve tačke koje sadrže greške merenja;



Slika 7.5 .Empirijska formula i interpolacioni polinom [75]

za razliku od polinoma dobijenog interpolacijom koji nema teorijsku osnovu, pogodno odabrana empirijska formula često (približno) odražava stvarnu međuzavisnost posmatranih veličina. Parametri adekvatne empirijske formule imaju određeni fizički smisao za razliku od koeficijenta interpolacionog polinoma [75].

7.4.2 Metoda najmanjih kvadrata

Prilikom fitovanja eksperimentalnih podataka, problem koji se javljaju vezani su za dva zadatka [75]:

- **izbor tipa** (oblika) empirijske formule, i
- **određivanje nepoznatih parametara** u odabranoj formuli na osnovu usvojenog kriterijuma dobrog fitovanja.

Izbor empirijske formule $\hat{f}(x)$ podrazumeva da se kao pomoć koriste: *teorijska znanja o međuzavisnosti posmatranih veličina, grafički prikaz eksperimentalnih tačaka* i *numerički kriterijumi*.

Kao najprihvatljivija metoda definisana je **Metoda najmanjih kvadrata**

Ako je odabrana empirijska formula sa ukupno (k+1) parametara b_0, b_1, ..., b_k, oblika:

$$y = \hat{f}(x, b_0, b_1, ..., b_k) = \hat{f}(x, \mathbf{b}) \qquad (k+1 < n) \tag{7.30}$$

za meru odstupanja od eksperimentalnih tačaka, pogodno je uzeti sumu kvadrata odstupanja:

$$S(b) = \sum_{i=1}^{n} e_i^2 = \sum_{i=1}^{n} \left[y_i - \hat{f}(x_i, \mathbf{b}) \right]^2 \tag{7.31}$$

gde je: **b** – vektor parametara, **b** = [b_i], $i=0,1,...,5$.

Prema metodi najmanjih kvadrata, najbolje (optimalne) vrednosti parametara b_0, b_1, ..., b_k , u odabranoj empirijskoj formuli (7.30) su one za koje suma kvadrata odstupanja ima minimum (jednačina 7.32),

$$S(b) = \sum_{i=1}^{n} \left[y_i - \hat{f}(x_i, \mathbf{b}) \right]^2 \rightarrow \min \tag{7.32}$$

Nepoznati parametri se dobijaju iz neophodnog uslova minimuma funkcije S:

$$-2\sum_{i=1}^{n} \left[y_i - \hat{f}(x_i, b_0, b_1, ..., b_k) \right] \frac{\partial \hat{f}(x_i, b_0, b_1, ..., b_k)}{\partial b_j} = 0 \tag{7.33}$$

odnosno:

$$\sum_{i=1}^{n} \left[y_i - \hat{f}(x_i, b_0, b_1, ..., b_k) \right] \frac{\partial \hat{f}(x_i, b_0, b_1, ..., b_k)}{\partial b_j} = 0 \qquad j = 0,1,...,k \tag{7.34}$$

Dobijeni, (poslednji) oblik jednačine (7.34) naziva se normalnom jednačinom. U opštem slučaju, takve jednačine su nelinearne, dok u slučaju egzistencije više rešenja posmatranog sistema tj. više lokalnih minimuma funkcije S (b_0, b_1, ..., b_k) treba se odabrati ono rešenje koje daje najmanju vrednost minimuma (globalni minimum).

Kao mera kvaliteta fitovanja eksperimentalnih podataka, dobijenom empirijskom formulom, koriste se srednje kvadratno odstupanje formule od eksperimentalnih vrednosti, definisano kao:

$$s = \frac{\sum_{i=1}^{n} e_i^2}{n-(k+1)} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left[y_i - \hat{f}(x_i, \mathbf{b}) \right]^2}{n-(k+1)} \tag{7.35}$$

U imeniocu je data veličina koja predstavlja razlika broja eksperimentalnih tačaka i ukupnog broja parametara, ova razlika se naziva još i broj stepeni slobode. Ukoliko je vrednost s manja, utoliko neka empirijska formula bolje fituje eksperimentalne podatke, pa se oni koriste pri poređenju različitih empirijskih jednačina za iste eksperimentalne podatke [75].

7.4.3 Korelacija

Utvrđivanje postojanja korelacije između elemenata predstavlja ispitivanje postojanja zavisnosti između dva (ili više) obeležja. Jedna od mera povezanosti dva obeležja je *Pearson*-ov koeficijent oznake r_{xy}, definisan kao [75]:

$$r_{xy} = \frac{s_{xy}}{s_x s_y}, \tag{7.36}$$

pri čemu je:

- kovarijansa: $s_{xy} = \frac{\sum x_i y_i}{n} - \bar{x}\bar{y}$;
- varijansa prvog obeležja: $s_x = \frac{\sum x_i^2}{n} - \bar{x}^2$;
- varijansa drugog obeležja: $s_y = \frac{\sum y_i^2}{n} - \bar{y}^2$;
- sredina prvog obeležja: $\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$;
- sredina drugog obeležja: $\bar{y} = \frac{\sum y_i}{n}$;
- vrednosti prvog obeležja x_i;
- vrednosti drugog obeležja y_i;
- veličina uzorka n.

Pozitivan koeficijent r_{xy} ukazuje na postojanje tendencije da sa rastom vrednosti promenjive x_i raste i njima odgovarajuće vrednosti promenjive y_i. Negativan koeficijent r_{xy} ukazuje suprotnu situaciju, da sa rastom vrednosti promenjive x_i postoji tendencija da njima odgovarajuće vrednosti promenjive y_i opadaju ili obrnuto tj. da sa opadanjem vrednosti promenjive x_i, njima odgovarajuće vrednosti promenjive y_i raste.

Što je tendencija veća (u bilo kom pravcu), to je apsolutna vrednost koeficijenta korelacije bliža 1, pa je i linearna veza jača u nekom od pravaca – pozitivnom ili negativnom.

Treba napomenuti da *Pearson*-ov koeficijent ima primenu samo u slučajevima linearne korelacije. U situaciji da su podaci takvi da među njima postoji neka nelinearna veza, tada je moguće da vrednost *Pearson*-ovog koeficijenta bude bliska nuli, što može navesti na pogrešan zaključak da korelacije nema.

U tabeli 7.4 su dati *Pearson*-ovi koeficijenti koji se koriste kao alat za donošenje odluka prilikom statističkog zaključivanja:

Tabela 7.4 *Pearson*-ovi koeficijenti [75]

Interval kome pripada vrednost | *r* |	*Interpretacija*
[0,00 – 0,40)	slaba korelacija
[0,40 – 0,75)	umerena korelacija
[0,75 – 0,85)	dobra korelacija
[0,85 – 1,00)	odlična korelacija

Koeficijent determinacija je kvadrat *Pearson*-ovog koeficijenta r_{xy}^2 i on predstavlja pokazatelj koliko su promene jedne promenjive prouzrokovane promenama druge promenjive. Konvencija se izražava u procentima.

8. STUDIJA SLUČAJA

Studija slučaja predstavlja sinteznu analizu životnog veka najznačajnijih mašina pomoćne mehanizacije (dozeri, cevopolagači i hidraulični bageri) na površinskim kopovima sa kontinuiranim sistemima. U analitičkom delu prikazana je opšta analiza ekonomskih i tehničkih pokazatelja veznih za rad navedenih mašina. Dalje, prikazana je ekspertska analiza parcijalnih pokazatelja raspoloživosti kao i primena sinteznog modela raspoloživosti za izabrane mašine. U ovom delu je korišćen Fazi-AHP model procene raspoloživosti. Na bazi ekspertske procene dobijene su normalizovane ocene trenutnog nivoa raspoloživosti, normalizovane na nivo 0…1 i to za izabrane mašine starosti 2, 5 i 8 godina. U trećem delu ovog poglavlja izvršena je empirijska analiza raspoloživosti na bazi koeficijenta raspoloživosti u poslednjih deset godina. Značaj ovog dela je dvostruki. Prvo, kao verifikacioni model za ekspertsku procenu i drugo kao model koji će da omogući identifikaciju ekspertskih ocena sa odgovarajućom zakonitošću između trenda pada raspoloživosti i vremena eksploatacije. U ovom delu se dobija vreme koje definiše kritično vreme za povlačenje mašine iz upotrebe s obzirom na nisku raspoloživost, odnosno tehnički vek mašine. Četvrti deo daje empirijsku analizu ekonomskih pokazatelja rada izabranih mašina pre svega troškova u toku životnog veka. U ovom delu se dobijaju neophodna vremena koja definišu ekonomski vek sa maksimalnim profitom i ekonomski vek mašine.

8.1. Opšta analiza ekonomskih i tehničkih pokazatelja izabranih mašina pomoćne mehanizacije

Jedan od osnovnih preduslova za uspešan rad osnovne mehanizacije na površinskim kopovim sa kontinualnim sistemima je da se na vreme izvršavaju svi potrebni pomoćni radovi (čišćenje etaža na otkopavanju i odlaganju, pomeranje transportera, izrada puteva i dr). Ovo naravno podrazumeva da površinski kop raspolaže sa dovoljnim brojem mašina i da su one raspoložive za rad. Dokazana je direktna zavisnost između efikasnosti rada pomoćne mehanizacije i rada osnovne mehanizacije (rotorni bageri, transporteri sa trakom i odlagači). U slučaju niske raspoloživosti površinski kop mora imati veći broj jedinica ili neće biti dovoljno mašina za rad.

Prema strukturi i obimu pomoćnih radova na površinskim kopovima najzastupljeniji su zemljani radovi i radovi na pomeranju koji se obavljaju dozerima, cevopolagačima i hidrauličnim bagerima. Upravo iz tog razloga, analiza obuhvata pomenute mašine sa varijacijama u tri različita proizvođač, i to:

- Dozeri: *Liebherr* PR752/754 (u daljem tekstu oznaka D1), *Caterpillar* D8R (u daljem tekstu oznaka D2), *Dressta* TD25M (u daljem tekstu oznaka D3);
- Cevopolagači: *Dressta* TD 25 C-3 (u daljem tekstu oznaka C1), *Dressta* SB60 (u daljem tekstu oznaka C2) i *Liebherr* RL52 (u daljem tekstu oznaka C3); i
- Hidraulični bageri: *14 Oktobar* BGH 1000 (u daljem tekstu oznaka H1), *Caterpillar* 323 DLH (u daljem tekstu oznaka H2) i *New Holland* (u daljem tekstu oznaka H3).

Razmatrane mašine su različitih proizvođača ali iste klase, pri radu u istim uslovima. Mašine koje se analiziraju rade kao pomoćna mehanizacija na površinskom kopu Rudarskog basena Kolubara, Elektroprivrede Srbije. Ukupni broj pojedinačnih mašina koje su analizirane prikazan je u tabeli 8.1.

Tabela 8.1. Brojno i procentualno stanje analiziranih mašina

Tip mašine	Proizvođač	Oznaka	Broj	%
Dozeri	Liebherr	PR752/754	3	3,85
	Caterpillar	D8R	15	19,23
	Dressta	TD25M	14	17,95
		Ostalo:	46	58,97
		Ukupno:	78	100

Cevopolagači	Dressta	TD25 C-3	2	9,5
	Dressta	SB60	15	71,5
	Liebherr	RL52	4	19,0
		Ostalo:	0	0
		Ukupno:	21	100
Hidraulični bageri	14 Oktobar	BGH 1000	4	11,1
	Caterpillar	323 DLH	3	8,4
	New Holland	E215 B	10	27,8
		Ostalo:	19	52,7
		Ukupno:	36	100

Period korišćenja mašina podeljen je u tri faze. Prva faza predstavlja vremenski interval kada je mašina i dalje u garantnom roku a to je dve godine starosti. Druga faza je faza aktivnog korišćenja mašine a to je peta godina, dok je treća faza trenutak kada se mašina može smatrati da je u grupi starijih mašina a to je osma godina.

Tabela broj 8.2 prikazuje parametre koji utiču na tehničku raspoloživost mašina u kontekstu datom na slici 4.8 (vremenska slika stanja) i u relaciji sa jednačinom 4.13. Analizom podataka prikazanih u tabeli može se uočiti velika raspoloživost u prvim godinama rada. Takođe uočljivo je da raspoloživost opada sa starošću mašine. ($A_{(DN)} > A_{(DO)}$).

Tabela 8.2. Tehnička raspoloživost razmatrane mehanizacije

	Godine rada	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D1	t_1, h	519	1893	3372	4100	4325	3601	1438	2274	2288	2714
	t_2, h	20	92	334	498	431	449	234	432	393	487
	$A(t)$	0,962	0,954	0,910	0,892	0,909	0,889	0,860	0,840	0,853	0,848
D2	t_1, h	934	3004	3415	3631	4296	4127	2894	2417	3226	2811
	t_2, h	25	128	262	367	494	445	387	495	602	865
	$A(t)$	0,972	0,960	0,929	0,908	0,897	0,903	0,882	0,830	0,843	0,765
D3	t_1, h	753	3741	3476	3102	2635	2757	2008			
	t_2, h	37	290	384	572	622	664	343			
	$A(t)$	0,953	0,928	0,901	0,844	0,809	0,806	0,854			
C1	t_1, h	403	1425	1398	1333	1171	1439	1292	1261	1201	1088
	t_2, h	82	195	267	299	383	343	316	453	432	407
	$A(t)$	0,831	0,880	0,840	0,817	0,754	0,808	0,804	0,736	0,735	0,727
C2	t_1, h	639	1776	1836	1655	1480	1641	1758	1543	1242	1521
	t_2, h	37	105	232	262	349	330	319	269	287	280
	$A(t)$	0,945	0,944	0,888	0,863	0,809	0,833	0,846	0,852	0,812	0,844
C3	t_1, h	540	1371	1714	1204	1083	884	1422	2004	2172	
	t_2, h	23	83	91	237	182	215	338	227	256	
	$A(t)$	0,960	0,943	0,950	0,835	0,856	0,804	0,808	0,898	0,895	
H1	t_1, h	734	1457	1528	1623	1386	923	1747	1216	905	818
	t_2, h	23	79	278	345	376	263	299	278	198	327
	$A(t)$	0,970	0,948	0,846	0,825	0,787	0,778	0,854	0,814	0,820	0,714
H2	t_1, h	1314	2930	2823	2954	2368	509	750	1478	1586	
	t_2, h	44	111	339	393	261	106	198	170	292	
	$A(t)$	0,968	0,963	0,893	0,883	0,901	0,828	0,791	0,897	0,845	
H3	t_1, h	1069	2584	2801	2187	2557	1698	1698	1431	1264	
	t_2, h	27	103	213	324	287	165	183	146	156	
	$A(t)$	0,975	0,962	0,929	0,871	0,899	0,911	0,903	0,907	0,890	

U nastavku se daje proračun raspoloživosti na osnovu mišljenja i procene eksperata, primenom dve prethodno pomenute metode, fazi i AHP. Ekspertsko mišljenje formirano je za svaku od pomenutih mašina, u uporednom razmatranju kada je mašina stara dve, pet i osam godina. Identifikacija dobijenih rezultata, radi njihove jednostavnije interpretacije, kao i njihova uporedna (komparativna) analiza, biće prikazani na kraju [17].

8.2. Model optimalnog vremena zamene dozera

8.2.1. Model procene raspoloživosti na bazi ekspertskih modela

- **Formiranje upitnika**

Za svaku od mašina, neophodno je izvršiti ekspertsko anketiranje određenog broja zaposlenih koji rade na razmatranim mašinama. Postavljena pitanja sadrže višestruku mogućnost ocenjivanja u odnosu na lingvističke promenljive, za svaki od indikatora (fenomena): R (pouzdanost), M (pogodnost održavanja) i S (nivo podrške). Anketirani imaju mogućnost da dodele pripadnost jednoj oceni sa 100% ili je mogu raspodeliti na više ocena.

Anketa je obuhvatila po četiri ispitanika na površinskom kopu Rudarskog basena „Kolubara“. Ocene analitičara za dozere su prikazane u tabelama 8.3-8.5. Tabela 8.3 prikazuje dodeljene ocene za sve tri mašine u uslovima kada je ona u garantnom periodu tj. dok je stara 2 godine, tabela 8.4 sadrži ocene mašina koje su stare 5 godina dok tabela 8.5 sadrži ocene za mašine u osmoj godini svoje upotrebe.

Iz tabele 8.3 vidi se da je analitičar broj 1 pri ocenjivanju mašine D1-N za indikator R dodelio 70% oceni *A*, dok je preostalih 30% dodelio oceni *B*; za indikator M je dodelio 40% oceni *A* i 60% oceni *B*; dok je indikator S raspodelio takođe na ocenu *A* i *B* u odnosu 30% prema 70%. Prema istom principu ocenjene su i ostale mašine različitih proizvođača i rezultati su prikazani u tablama 8.3-8.4.

Tabela 8.3. Ulazni podaci za dozere stare dve godine

Analitičari		D1 – 2G					D2 – 2G					D3 – 2G				
		A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
1.	R	0,7	0,3				0,8	0,2					0,6	0,4		
	M	0,4	0,6				0,7	0,3					0,7	0,3		
	S	0,3	0,7				0,6	0,4					0,5	0,5		
2.	R	0,6	0,4				0,6	0,4					0,5	0,5		
	M	0,6	0,4				0,8	0,2					0,6	0,4		
	S	0,5	0,5				0,4	0,6					0,4	0,6		
3.	R		0,9	0,1			0,4	0,6					0,3	0,7		
	M	0,4	0,6				0,6	0,4				0,4	0,6			
	S	0,2	0,8				0,6	0,4				0,3	0,7			
4.	R	0,5	0,5				0,7	0,3					0,8	0,2		
	M	0,7	0,3				0,7	0,3				0,3	0,7			
	S		1					1					0,5	0,5		
Σ	R	0,450	0,525	0,025	0	0	0,625	0,375	0	0	0	0	0,550	0,450	0	0
	M	0,525	0,475	0	0	0	0,700	0,300	0	0	0	0175	0,650	0,175	0	0
	S	0,250	0,750	0	0	0	0,400	0,600	0	0	0	0,075	0,525	0,400	0	0

Za dozere u drugoj godini korišćenja, srednja vrednost ocena (A, B, C, D, E) četiri eksperta za reprezentativan primer mašine D1 (*Liebherr PR752/754*) za indikator *R* data je respektivno,

$$R_A = \frac{(1\cdot 0.7)+(1\cdot 0.6)+(1\cdot 0.5)}{4} = 0.450\ , \qquad R_B = \frac{(1\cdot 0.1)}{4} = 0.025\ ,$$

$$R_B = \frac{(1\cdot 0.3)+(1\cdot 0.4)+(1\cdot 0.9)+(1\cdot 0.5)}{4} = 0.525\ , \qquad R_D = 0\ ,$$

$$R_E = 0\ .$$

Prema istom principu izračunate su srednje vrednosti ocena (A, B, C, D, E) za ostale indikatore (M, S). Rezultati su prikazani poslednje tri kolone tabele 8.3. Kao što je prethodno pomenuto, tabele 8.4 i 8.5 prikazuju ocene analitičara za petu i osmu godinu korišćenja, dok su srednje vrednosti ocena prikazane u poslednje tri kolone tabela.

Tabela 8.4. Ulazni podaci za dozere stare pet godine

Analitičari		D1 – 5G					D2 – 5G					D3 – 5G				
		A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
1.	R	0,2	0,8				0,3	0,7						0,9	0,1	
	M	0,1	0,9				0,5	0,5					0,2	0,8		
	S	0,2	0,8				0,3	0,7					0,3	0,7		
2.	R	0,3	0,7					0,8	0,2				0,3	0,7		
	M	0,3	0,7					0,7	0,3				0,2	0,8		
	S		0,5	0,5			0,2	0,8						1		
3.	R		0,7	0,3				0,7	0,3					0,8	0,2	
	M			0,8	0,2		0,2	0,8					0,6	0,4		
	S		0,3	0,7				0,6	0,4				0,8	0,2		
4.	R		0,6	0,4			0,3	0,7					0,4	0,6		
	M		0,5	0,5			0,5	0,5					0,9	0,1		
	S		0,4	0,6				0,7	0,3				0,2	0,8		
Σ	R	0,125	0,700	0,175	0	0	0,150	0,725	0,125	0	0	0	0,175	0,750	0,075	0
	M	0,100	0,525	0,325	0,050	0	0,300	0,625	0,075	0	0	0	0,475	0,525	0	0
	S	0,050	0,500	0,450	0	0	0,125	0,700	0,175	0	0	0	0,325	0,675	0	0

Tabela 8.5. Ulazni podaci za dozere stare osam godine

Analitičari		D1 – 8G					D2 – 8G					D3 – 8G				
		A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
1.	R			0,6	0,4		0,1	0,9						0,3	0,7	
	M		0,4	0,6			0,4	0,6						0,6	0,4	
	S		0,5	0,5				0,5	0,5					0,8	0,2	
2.	R		0,2	0,8				0,5	0,5					0,5	0,5	
	M		0,5	0,5				0,8	0,2					0,7	0,3	
	S		0,2	0,8				0,6	0,4					0,4	0,6	
3.	R		0,5	0,5				0,3	0,7					0,2	0,8	
	M			0,6	0,4			0,7	0,3				0,5	0,5		
	S			0,7	0,3			0,5	0,5					0,6	0,4	
4.	R		0,4	0,6				0,2	0,8					0,6	0,4	
	M		0,3	0,7				0,5	0,5					0,7	0,3	
	S			0,8	0,2				1					0,3	0,7	
Σ	R	0	0,275	0,625	0,100	0	0,025	0,475	0,500	0	0	0	0	0,400	0,600	0
	M	0	0,300	0,600	0,100	0	0,100	0,650	0,250	0	0	0	0,125	0,625	0,250	0
	S	0	0,175	0,700	0,125	0	0	0,400	0,600	0	0	0	0	0,525	0,475	0

- **AHP korekcija uticaja indikatora raspoloživosti**

Za prvi vremenski interval (druga godina), smatra se da je mašina i dalje u garantnom periodu s toga je održavanje takvih mašina samo u delimičnoj nadležnosti razmatranog površinskog kopa. U takvim okolnostima kod međusobnog rangiranja (AHP) pojedinačnih indikatora (R, M, S) usvaja se da je rang isti kod sva tri proizvođača. Smatra se da na raspoloživost dozera u takvim okolnostima najveći uticaj ima S, potom M, dok najmanji ima R (tabela 8.6).

Tabela 8.6. Ulazni podaci za AHP metodu rangiranja indikatora

	D1-3 - 2G		
	R	M	S
R	1	1/2	1/3
M	2	1	1/2
S	3	2	1

Na osnovu vrednosti iz tabele 8.6 formirana je matrica:

$$M_{D1} = \begin{vmatrix} 1,00 & 0,50 & 0,33 \\ 2,00 & 1,00 & 0,50 \\ 3,00 & 2,00 & 1,00 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 1,00 & 0,50 & 0,33 \\ 2,00 & 1,00 & 0,50 \\ 3,00 & 2,00 & 1,00 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 3,000 & 1,667 & 0,917 \\ 5,500 & 3,000 & 1,667 \\ 10,00 & 5,500 & 3,000 \end{vmatrix} = \begin{matrix} 5,583 \\ 10,167 \\ 18,500 \end{matrix}$$

$$W_j = 5,583 + 10,167 + 18,500 = 34,250$$

a potom izračunate vrednosti težina pojedinačnih indikatora:

$$W_{R\ D1-2G} = \frac{5,583}{34,250} = 0,16302$$

$$W_{M\ D1-2G} = \frac{10,167}{34,250} = 0,29684$$

$$W_{S\ D1-2G} = \frac{18,500}{34,250} = 0,54015$$

Poslednji korak u AHP metodi za dozere stare dve godine je provera konzistencije donosioca odluke izračunavanjem vrednosti indeksa konzistencije CR:

$$\lambda_{\max} = 6,00 \cdot 0,16302 + 3,50 \cdot 0,29684 + 1,83 \cdot 0,5402 = 3,0073$$

$$CI = \frac{(3,0073 - 3)}{(3-1)} = 0,00365$$

$$CR = \frac{0,00365}{0,52} = 0,007019$$

Za razmatrani broj objekata pri rangiranju *n* vrednost *RI* je 0,52. Rezultat slučajnog indeksa konzistencije je 0,70% što je u granicama dozvoljenog (10%).

Kod drugog i trećeg slučaja, kada su mašine stare pet odnosno osam godina, indikatori R, M, S zavise direktno od razmatranog površinskog kopa. Rang preferencija indikatora prikazan je u tabeli 8.7.

Tabela 8.7. Ulazni podaci za AHP metodu za dozere stare pet odnosno osam godina

	D1-5G			D2-5G			D3-5G			D1-8G			D2-8G			D3-8G		
	R	M	S	R	M	S	R	M	S	R	M	S	R	M	S	R	M	S
R	1	1/3	1/2	1	1/2	1/3	1	2	3	1	1	1	1	1/2	1/2	1	2	3
M	3	1	2	2	1	1/2	1/2	1	2	1	1	1	2	1	1	1/2	1	2
S	2	1/2	1	3	2	1	1/3	1/2	1	1	1	1	2	1	1	1/3	1/2	1

Rezultati izračunatih preferencija indikatora primenom AHP metode dati su u tabeli 8.8.

Tabela 8.8. Rang indikatora raspoloživosti

	D1-5G	D2-5G	D3-5G	D1-8G	D2-8G	D3-8G
W_R	0,163	0,163	0,540	0,333	0,200	0,540
W_M	0,540	0,297	0,297	0,333	0,400	0,297
W_S	0,297	0,540	0,163	0,333	0,400	0,163
λ_{max}	3,0073	3,0073	3,0073	3	3	3,0073
CI	0,00365	0,00365	0,00365	0	0	0,00365
CR	0,00702	0,00702	0,00702	0	0	0,00702

- **MAX-MIN kompozicija fazi modela**

Kao reprezentativan primer izvedene kompozicije MAX-MIN dat je skraćeni proračun za mašinu *Liebherr* PR752/754 u drugoj godini korišćenja (D1-2G). Kompozicija će biti prikazana prema algoritmu definisanom u teorijskom delu kroz poglavlje 7.1.1.

Ulazni podaci su fazi relacije: $\mu_{RH1\text{-}2G}$, $\mu_{MH1\text{-}2G}$ i $\mu_{SH1\text{-}2G}$ (jednačina 7.2 - 7.4). U ovom slučaju moguće je formirati $C = 10^3 = 1000$ kombinacija. Kombinacije nose kodnu oznaku u opštem zapisu: j_R - j_M - j_S, za j = 1 ... 10. U ovom primeru moguće su sledeće kombinacije: 1-1-1; 1-1-2; 1-1-3; ...; 10-10-8; 10-10-9; 10-10-10. Među ovim kombinacijama, broj ishoda O = 175. Ishodi nose kodne oznake: 4-6-6; 4-6-7; 4-6-8; …; 7-6-6; 7-6-7; 7-6-8; …; 10-10-8; 10-10-9; 10-10-10.

Za svaki ishod se primenom jednačine 7.5 računa se vrednost J_c:

$$J_{4-6-6} = 4 \cdot 0{,}163 + 6 \cdot 0{,}297 + 6 \cdot 0{,}540 = 6$$
$$J_{4-6-7} = 4 \cdot 0{,}163 + 6 \cdot 0{,}297 + 7 \cdot 0{,}540 = 6$$
$$J_{4-6-8} = 4 \cdot 0{,}163 + 6 \cdot 0{,}297 + 8 \cdot 0{,}540 = 7$$
$$J_{4-6-9} = 4 \cdot 0{,}163 + 6 \cdot 0{,}297 + 9 \cdot 0{,}540 = 7$$
$$J_{4-6-10} = 4 \cdot 0{,}163 + 6 \cdot 0{,}297 + 10 \cdot 0{,}540 = 8$$
$$\ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots$$
$$J_{10-10-6} = 10 \cdot 0{,}163 + 10 \cdot 0{,}297 + 6 \cdot 0{,}540 = 8$$
$$J_{10-10-7} = 10 \cdot 0{,}163 + 10 \cdot 0{,}297 + 7 \cdot 0{,}540 = 8$$
$$J_{10-10-8} = 10 \cdot 0{,}163 + 10 \cdot 0{,}297 + 8 \cdot 0{,}540 = 9$$
$$J_{10-10-9} = 10 \cdot 0{,}163 + 10 \cdot 0{,}297 + 9 \cdot 0{,}540 = 9$$
$$J_{10-10-10} = 10 \cdot 0{,}163 + 10 \cdot 0{,}297 + 10 \cdot 0{,}540 = 10$$

gde je: $W_{R\ D1\text{-}2G} = 0{,}163$; $W_{M\ D1\text{-}2G} = 0{,}297$; $W_{S\ D1\text{-}2G} = 0{,}540$.

Potom se za svaki od 175 ishoda traži se najmanja (minimalna) vrednost funkcije pripadnosti:

$$MN_{4-6-6} = \min\{0,0125;\ 0,158333,\ 0,25\} = 0,0125$$
$$MN_{4-6-7} = \min\{0,0125;\ 0,158333;\ 0,75\} = 0,0125$$
$$MN_{4-6-8} = \min\{0,0125;\ 0,158333;\ 0,75\} = 0,0125$$
$$MN_{4-6-9} = \min\{0,0125;\ 0,158333;\ 0,25\} = 0,0125$$
$$MN_{4-6-10} = \min\{0,0125;\ 0,158333;\ 0,25\} = 0,0125$$
$$\ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots$$
$$MN_{10-10-6} = \min\{0,45;\ 0,525;\ 0,25\} = 0,25$$
$$MN_{10-10-7} = \min\{0,45;\ 0,525;\ 0,75\} = 0,45$$
$$MN_{10-10-8} = \min\{0,45;\ 0,525;\ 0,75\} = 0,45$$
$$MN_{10-10-9} = \min\{0,45;\ 0,525;\ 0,25\} = 0,25$$
$$MN_{10-10-10} = \min\{0,45;\ 0,525;\ 0,25\} = 0,25$$

Ishodi se grupišu prema vrednosti J_c:

- Za vrednost *Jc* = 6, postoji 14 kombinacije: 4-6-6; …; 9-6-6
- Za vrednost *Jc* = 7, postoji 51 kombinacije: 4-6-8; …; 10-8-6
- Za vrednost *Jc* = 8, postoji 65 kombinacije: 4-6-10; …; 10-10-7
- Za vrednost *Jc* = 9, postoji 39 kombinacije: 4-9-10; …; 10-10-9
- Za vrednost *Jc* = 10, postoji 6 kombinacije: 7-10-10; …; 10-10-10

Za ostale vrednosti J_c nisu zabeležene odgovarajuće kombinacije.

U svakoj od navedenih 5 grupa ishoda, traži se najveća (maksimalna) vrednost funkcije pripadnosti među odgovarajućim minimumima:

$$MN_{Jc=6} = \max\{0,0125;\ \ldots;0,25\} = 0,25$$
$$MN_{Jc=7} = \max\{0,0125;\ \ldots;0,475\} = 0,475$$
$$MN_{Jc=8} = \max\{0,0125;\ \ldots;0,525\} = 0,525$$
$$MN_{Jc=9} = \max\{0,0125;\ \ldots;0,525\} = 0,525$$
$$MN_{Jc=10} = \max\{0,25;\ \ldots;0,25\} = 0,25$$

Funkcija pripadnosti (A) koja se dobija za dozer D1-2G ima sledeći oblik:

$\mu_{A(D1\text{-}2G)}$ = (0; 0; 0; 0; 0; 0,25; 0,475; 0,525; 0,525; 0,25)

- **Identifikacija**

Za izračunavanje konačne A ocene, u procesu identifikacije se koristi metoda „*best-fit*“. Reprezentativan primer dat je za dozere D1-2G, dok su za ostale dozere rezultati prikazani u tabeli 8.9.

$$d_{1(A(D1-2G),A)} = \sqrt{\sum_{j=1}^{j=10} (\mu^{j}_{A(D1-2G)} - \mu^{j}_{A})^2}$$

$$= \sqrt{(0-0)^2 + ... + (0,25-0)^2 + (0,475-0)^2 + (0,525-0)^2 + (0,525-1)^2 + (0,25-1)^2} = 1,16270$$

$$d_{2(A(D1-2G),B)} = \sqrt{(0-0)^2 + ... + (0,25-0,33)^2 + (0,475-1)^2 + (0,525-1)^2 + (0,525-0)^2 + (0,25-0)^2} = 0,91996$$

$$d_{3(A(D1-2G),C)} = \sqrt{(0-0)^2 + ... + (0,25-1)^2 + (0,475-0,5)^2 + (0,525-0)^2 + (0,525-0)^2 + (0,25-0)^2} = 1,55784$$

$$d_{4(A(D1-2G),D)} = \sqrt{(0-0)^2 + ... + (0,25-0)^2 + (0,475-0)^2 + (0,525-0)^2 + (0,525-0)^2 + (0,25-0)^2} = 1,73580$$

$$d_{5(A(D1-2G),E)} = \sqrt{(0-1)^2 + ... + (0,25-0)^2 + (0,475-0)^2 + (0,525-0)^2 + (0,525-0)^2 + (0,25-0)^2} = 1,70349$$

Ako se usvoji da je $d_{min} = d_2$:

$$\mu_1 = \frac{d_{\min}}{d_1 \cdot \sum_{i=1}^{i=5} \frac{d_{\min}}{d_i}} = \frac{0,91996}{\left(1,16270 \cdot \left(\frac{0,91996}{1,16270} + \frac{0,91996}{0,91996} + \frac{0,91996}{1,55784} + \frac{0,91996}{1,73580} + \frac{0,91996}{1,70349}\right)\right)} = 0,22922$$

$$\mu_2 = \frac{0,91996}{\left(0,91996 \cdot \left(\frac{0,91996}{1,16270} + \frac{0,91996}{0,91996} + \frac{0,91996}{1,55784} + \frac{0,91996}{1,73580} + \frac{0,91996}{1,70349}\right)\right)} = 0,28970$$

$$\mu_3 = \frac{0,91996}{\left(1,55784 \cdot \left(\frac{0,91996}{1,16270} + \frac{0,91996}{0,91996} + \frac{0,91996}{1,55784} + \frac{0,91996}{1,73580} + \frac{0,91996}{1,70349}\right)\right)} = 0,17108$$

$$\mu_4 = \frac{0,91996}{\left(1,73580 \cdot \left(\frac{0,91996}{1,16270} + \frac{0,91996}{0,91996} + \frac{0,91996}{1,55784} + \frac{0,91996}{1,73580} + \frac{0,91996}{1,70349}\right)\right)} = 0,15354$$

$$\mu_5 = \frac{0,91996}{\left(1,70349 \cdot \left(\frac{0,91996}{1,16270} + \frac{0,91996}{0,91996} + \frac{0,91996}{1,55784} + \frac{0,91996}{1,73580} + \frac{0,91996}{1,70349}\right)\right)} = 0,15645$$

Krajnja ocena A u formi jednačine 7.9 za mašinu D1-2G, ima sledeći oblik:

$A_{(D1\text{-}2G)}$ = (0,22922/**A**; 0,28970/**B**; 0,17108/**C**; 0,15354/**D**; 0,15645 /**E**)

- **Defazifikacija**

Pri postupku defazifikacije krajnje ocene u modelu se koristi metoda težišta [76], gde je ocena za reprezentativan primer data respektivno,

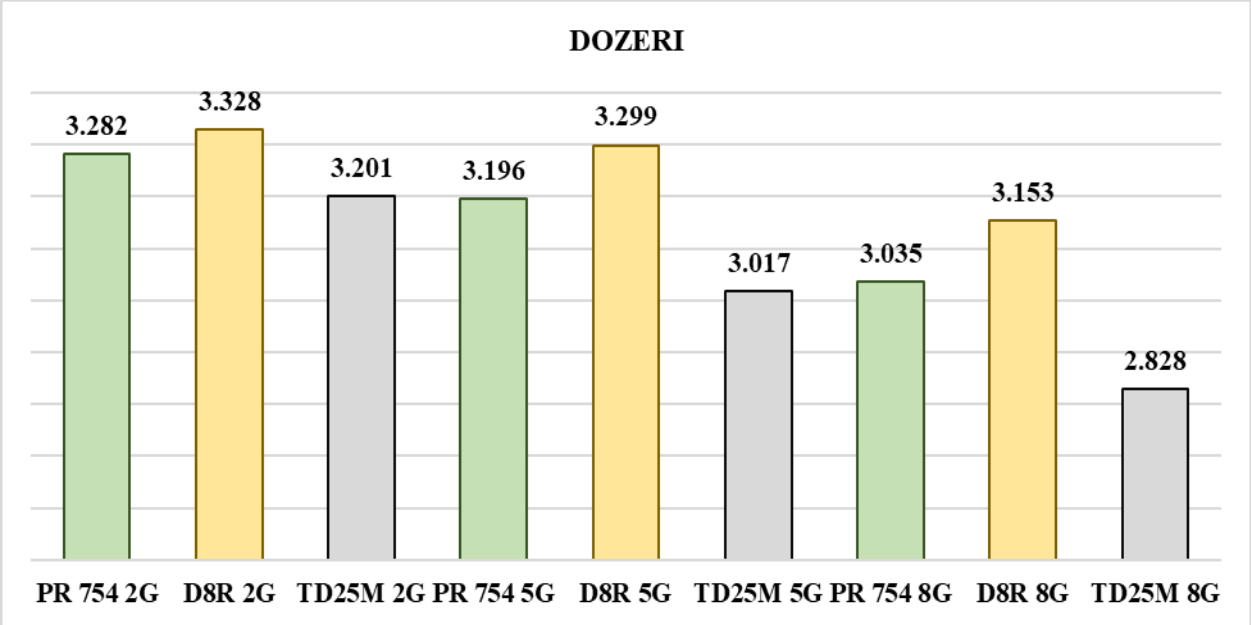
$$Z_{D1-2G} = \frac{\sum_{i=1}^{i=5} \mu_i \cdot I}{\sum_{i=1}^{i=5} \mu_i} = \frac{0,22922 \cdot 5 + 0,28970 \cdot 4 + 0,17108 \cdot 3 + 0,15354 \cdot 2 + 0,15645 \cdot 1}{0,22922 + 0,28970 + 0,17108 + 0,15354 + 0,15645} = 3,282$$

- **Zbirni rezultati**

U tabeli 8.9 prikazani su rezultati za sve dozere za sva tri slučaja (druga, peta i osma godina korišćenja). Ocene su prikazane u formi jednačine 7.9. Tabela sadrži i defazifikovane vrednosti kao i rang mašina u odnosu na razmatrani period analize.

Tabela 8.9. Rezultati primene AHP-Fazi modela za izračunavanje raspoloživosti dozera

	OCENE						RANG
	A	B	C	D	E		
D1-2G	0.229221	0.289705	0.171080	0.153541	0.156453	**3.282**	2
D2-2G	0.276287	0.249008	0.160090	0.155870	0.158744	**3.328**	1
D3-2G	0.146771	0.325494	0.245572	0.146770	0.135383	**3.201**	3
D1-5G	0.143404	0.334655	0.232710	0.152768	0.136462	**3.196**	2
D2-5G	0.156880	0.391423	0.179621	0.137740	0.134336	**3.299**	1
D3-5G	0.113276	0.162712	0.465395	0.145341	0.113276	**3.017**	3
D1-8G	0.121642	0.190052	0.411697	0.154966	0.121642	**3.035**	2
D2-8G	0.140771	0.290598	0.283796	0.150284	0.134552	**3.153**	1
D3-8G	0.133930	0.146668	0.267275	0.318197	0.133930	**2.828**	3



Slika 8.1. Grafički prikaz ocena raspoloživosti (skala 0-5) primenom Fazi-AHP metode za dozere

8.2.2 Model za procenu ekonomskog životnog veka mašine sa maksimalnim profitom t_1

- **Za mašinu *Liebherr* PR752/754 (D1)**

Funkcija kumulativnih troškova održavanja *f(t)* za mašinu ***Liebherr*** **PR752/754** :

$$f(t) = -0,00297 \cdot t^7 + 0,09001 \cdot t^6 - 0,98401 \cdot t^5 + 4,67785 \cdot t^4 - 10,46040 \cdot t^3 + 24,94660 \cdot t^2 - 9,05238 \cdot t + 0,02643$$

Funkcija ukupnih troškova eksploatacije mašine ***Liebherr*** **PR752/754**, ako je za nabavnu vrednost usvojena vrednost mašine od K = 420 000 €:

$$F(t) = K + f(t) - K \cdot \varphi(t) = 420,026 - 420 \cdot (1 - 0,28460 \cdot t^{0,5}) - 9,05238 \cdot t + 24,94660 \cdot t^2 - 10,46040 \cdot t^3 + 4,67785 \cdot t^4 - 0,98401 \cdot t^5 + 0,09001 \cdot t^6 - 0,00297 \cdot t^7$$

gde je faktor otpisa vrednosti mašine: $\varphi(t) = 1 - 0,28460 \cdot t^{0,5}$.

Funkcija otpisa vrednosti mašine je oblika $\varphi(t) = 1 - a \cdot t^{0,5}$. Koeficijent a se određuje iz uslova da je $\varphi(10) = 1 - a \cdot 10^{0,5} = 0,1$. To znači da je vrednost mašine posle 10 godina eksploatacije jednaka 10% od njene nabavne vrednosti. Odakle sledi da je a=0,28460.

Funkcija prosečnih troškova $\bar{F}(t)$:

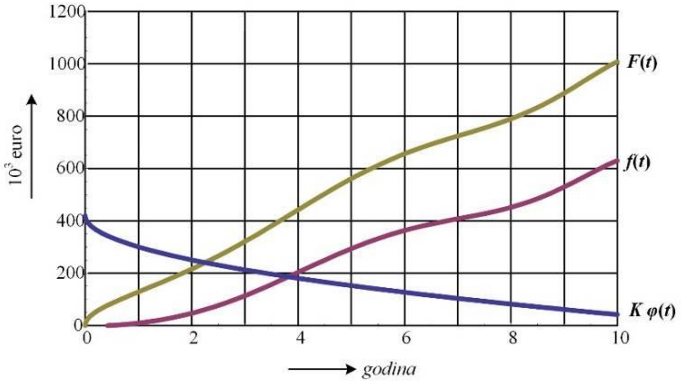
$$\bar{F}(t) = \frac{1}{t} \cdot K \cdot [1 - \varphi(t)] + \frac{1}{t} \cdot f(t) = -9,05238 + \frac{0,02643}{t} + \frac{119,5}{t^{0,5}} + 24,94660 \cdot t + 10,46040 \cdot t^2 + 4,67785 \cdot t^3 - 0,98401 \cdot t^4 + 0,09001 \cdot t^5 - 0,00297 \cdot t^6$$

Dužina vremena eksploatacije $[0, t_1]$ za koju su minimalni prosečni troškovi dobija se preko prvog izvoda funkcije $\bar{F}(t)$ kao:

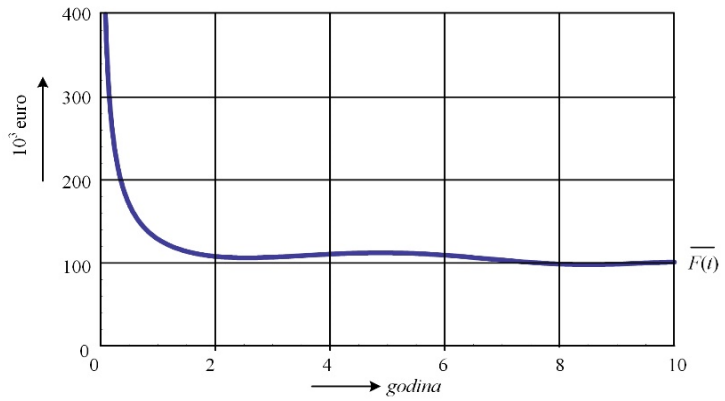
$$\frac{d\bar{F}(t)}{dt} = \frac{1}{t^2} \cdot \left\{ \left[-K \cdot \varphi'(t) + f' \cdot (t) \right] \cdot t - K \cdot [1 - \varphi(t)] - f \cdot (t) \right\} = 0$$

$$24,94660 - \frac{0,02643}{t^2} - \frac{59,76600}{t^{1,5}} - 20,92080 \cdot t + 14,03360 \cdot t^2 - 3,93604 \cdot t^3 + 0,45005 \cdot t^4 - 0,01782 \cdot t^5 = 0$$

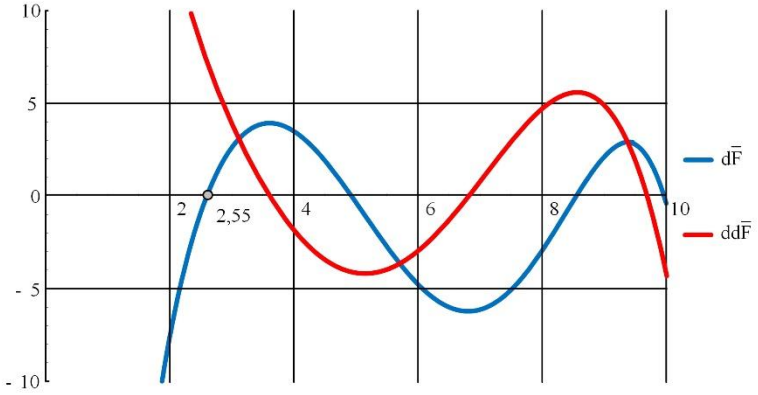
$$\rightarrow t_1 = 2,5484 \ \ godina$$



Slika 8.2. Funkcija kumulativnih troškova održavanja f(t) i ukupnih troškova eksploatacije za mašinu Liebherr PR752/754



Slika 8.3. Funkcija prosečnih troškova za mašinu Liebherr PR752/754



Slika 8.4. Prvi i drugi izvod funkcije prosečnih troškova za mašinu Liebherr PR752/754

- **Za mašinu *Caterpillar* D8R (D2)**

Funkcija kumulativnih troškova održavanja *f(t)* za mašinu ***Caterpillar D8R***:

$$f(t) = -0,00253 \cdot t^7 + 0,08847 \cdot t^6 - 1,17575 \cdot t^5 + 7,48052 \cdot t^4 - 24,60580 \cdot t^3 + 50,48850 \cdot t^2 - 17,59891 \cdot t + 0,08008$$

Funkcija ukupnih troškova eksploatacije mašine ***Caterpillar D8R***, ako je za nabavnu vrednost usvojena vrednost mašine od K = 460 000 €:

$$F(t) = K + f(t) - K \cdot \varphi(t) = 459,95 - 460 \cdot (1 - 0,28460 \cdot t^{0,5}) - 17,59891 \cdot t + 50,48850 \cdot t^2 - 24,60580 \cdot t^3 + 7,48052 \cdot t^4 - 1,17575 \cdot t^5 + 0,08847 \cdot t^6 - 0,00253 \cdot t^7$$

gde je faktor otpisa vrednosti mašine: $\varphi(t) = 1 - 0,28460 \cdot t^{0,5}$.

Funkcija prosečnih troškova $\bar{F}(t)$:

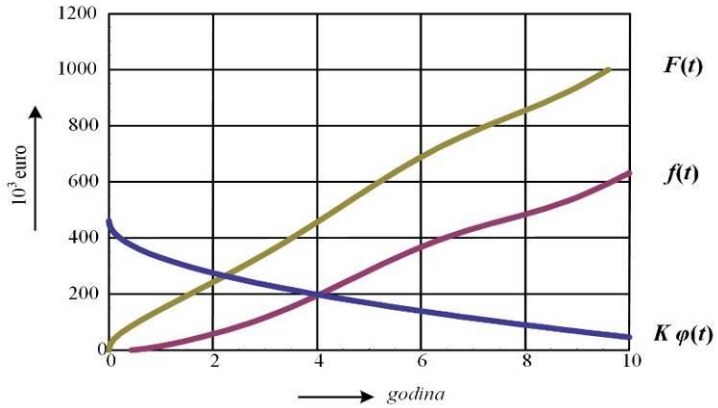
$$\bar{F}(t) = \frac{1}{t} \cdot K \cdot [1 - \varphi(t)] + \frac{1}{t} \cdot f(t) = -17,59891 + \frac{0,08008}{t} + \frac{130,9}{t^{0,5}} + 50,48850 \cdot t - 24,46040 \cdot t^2 + 7,48052 \cdot t^3 - 1,17575 \cdot t^4 + 0,08847 \cdot t^5 - 0,00253 \cdot t^6$$

Dužina vremena eksploatacije [0, t_1] za koju su minimalni prosečni troškovi dobija se preko prvog izvoda funkcije $\bar{F}(t)$ kao:

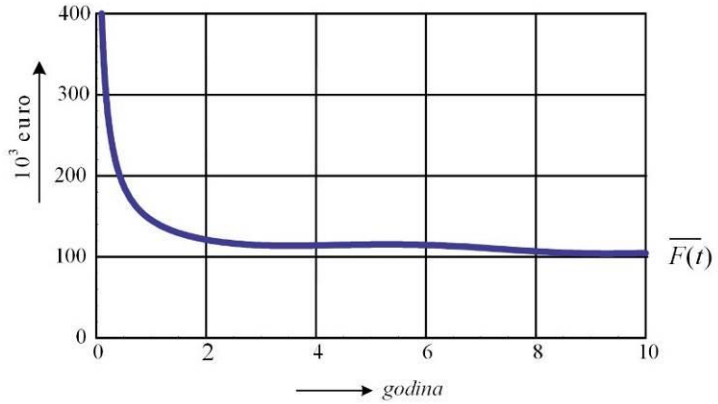
$$\frac{d\bar{F}(t)}{dt} = \frac{1}{t^2}\cdot\left\{\left[-K\cdot\varphi'(t)+f'\cdot(t)\right]\cdot t - K\cdot\left[1-\varphi(t)\right]-f\cdot(t)\right\} = 0$$

$$50,48850 - \frac{0,08008}{t^2} - \frac{65,48500}{t^{1,5}} - 49,21160\cdot t + 22,44160\cdot t^2 - 4,70300\cdot t^3 + 0,44237\cdot t^4 - 0,01520\cdot t^5 = 0$$

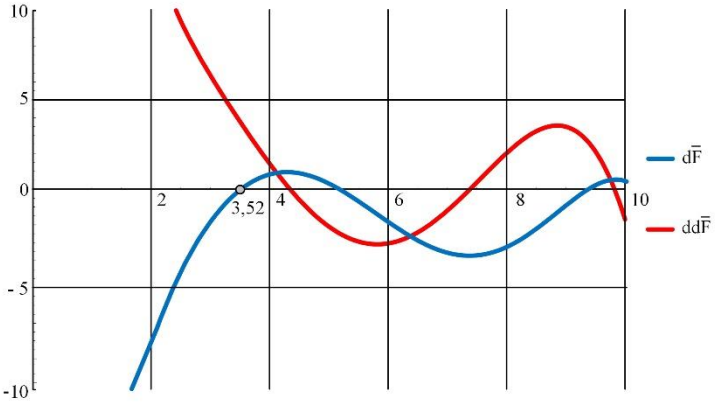
$$\rightarrow t_1 = 3,5204 \;\; godina$$



Slika 8.5. Funkcija kumulativnih troškova održavanja f(t) i ukupnih troškova eksploatacije za mašinu Caterpillar D8R



Slika 8.6. Funkcija prosečnih troškova za mašinu Caterpillar D8R



Slika 8.7. Prvi i drugi izvod funkcije prosečnih troškova za mašinu Caterpillar D8R

- **Za mašinu *Dressta* TD25M (D3)**

Funkcija kumulativnih troškova održavanja *f(t)* za mašinu ***Dressta TD25M***:

$$f(t) = 0,02691 \cdot t^7 - 0,64622 \cdot t^6 + 5,90970 \cdot t^5 - 25,18810 \cdot t^4 + 46,09310 \cdot t^3 - 7,26088 \cdot t^2 - 8,87452 \cdot t + 3,55271 \cdot 10^{-15}$$

Funkcija ukupnih troškova eksploatacije mašine ***Dressta TD25M***, ako je za nabavnu vrednost usvojena vrednost mašine od K = 340 000 €:

$$F(t) = K + f(t) - K \cdot \varphi(t) = 340 - 340 \cdot (1 - 0,28460 \cdot t^{0,5}) - 8,87452 \cdot t - 7,26088 \cdot t^2 + 46,09310 \cdot t^3 - 25,18810 \cdot t^4 + 5,90970 \cdot t^5 - 0,64622 \cdot t^6 + 0,02691 \cdot t^7$$

gde je faktor otpisa vrednosti mašine: $\varphi(t) = 1 - 0,28460 \cdot t^{0,5}$.

Funkcija prosečnih troškova $\bar{F}(t)$:

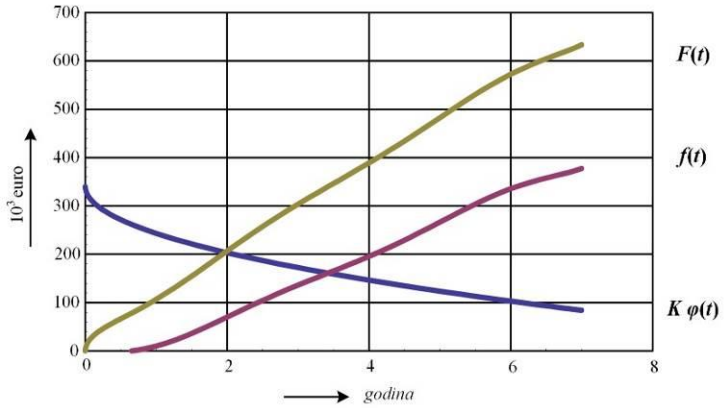
$$\bar{F}(t) = \frac{1}{t} \cdot K \cdot [1 - \varphi(t)] + \frac{1}{t} \cdot f(t) = -8,87452 + \frac{0}{t} + \frac{96,76}{t^{0,5}} - 7,62088 \cdot t - +46,09310 \cdot t^2 - 25,18810 \cdot t^3 + 5,90970 \cdot t^4 - 0,64622 \cdot t^5 + 0,02691 \cdot t^6$$

Dužina vremena eksploatacije [0, t_1] za koju su minimalni prosečni troškovi dobija se preko prvog izvoda funkcije $\bar{F}(t)$ kao:

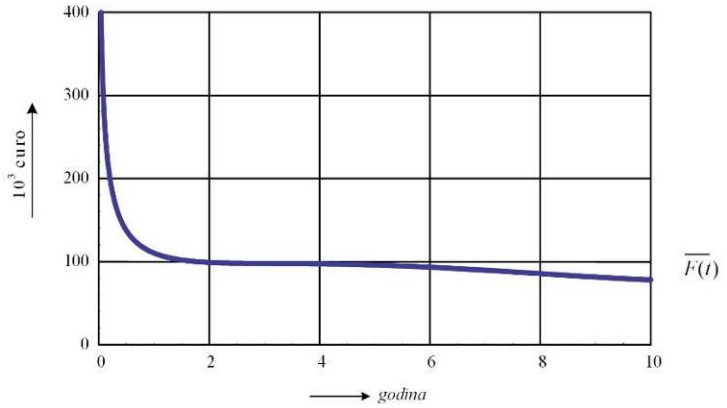
$$\frac{d\bar{F}(t)}{dt} = \frac{1}{t^2} \cdot \left\{ \left[-K \cdot \varphi'(t) + f' \cdot (t) \right] \cdot t - K \cdot [1 - \varphi(t)] - f \cdot (t) \right\} = 0$$

$$-7,26088 + \frac{0}{t^2} - \frac{48,38200}{t^{1,5}} + 92,18620 \cdot t - 75,56430 \cdot t^2 + 23,63880 \cdot t^3 - 3,23112 \cdot t^4 + 0,16149 \cdot t^5 = 0$$

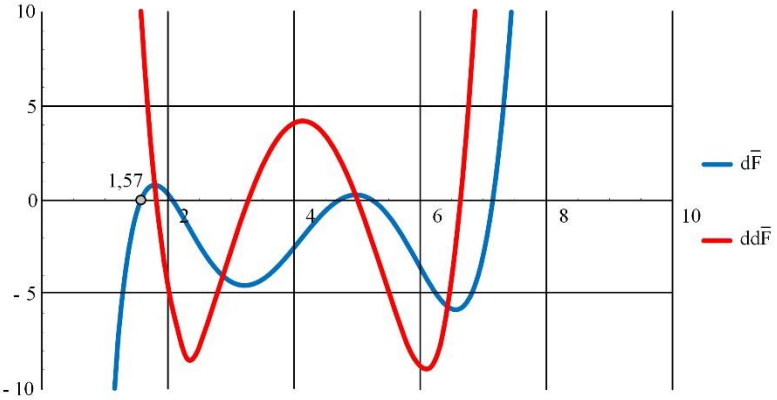
$$\rightarrow t_1 = 1,5691 \ \ godina$$



Slika 8.8. Funkcija kumulativnih troškova održavanja f(t) i ukupnih troškova eksploatacije za mašinu Dressta TD25M



Slika 8.9. Funkcija prosečnih troškova za mašinu Dressta TD25M



Slika 8.10. Prvi i drugi izvod funkcije prosečnih troškova za mašinu Dressta TD25M

8.2.3. Model za procenu ekonomskog života mašina t_2 - Analiza troškova izabranih mašina na bazi empirijskih podataka

Analiza troškova obuhvata praćenje troškova u apsolutnom i relativnom (specifičnom) iznosu tokom poslednjih deset godina korišćenja za izabrane mašine. Troškovi se mogu posmatrati na više načina. Na slikama 8.11 do 8.13 prikazan je trend pada troškova kao Zavisnost između ukupnih troškova i godina korišćenja dozera. Ukupni troškovi su ovde prikazani kao zbir troškova vlasništva, operativnih troškova (troškovi goriva, maziva i rezervnih delova) kao i troškova radne snage na eksploataciji i održavanju.

Iskustveno se pokazalo na bazi tržišta da su ukupni troškovi rada mašine prihvatljivi do 70 €/h. U svim ostalim slučajevima po kompaniju je jeftinije da iznajmi mašinu sa strane. Sa pomenutih dijagrama može se očitati trenutak u životnom veku t_2 kada mašina prelazi navedenu granicu (u ovom radu je korišćen pojam ekonomski vek sa profitom).

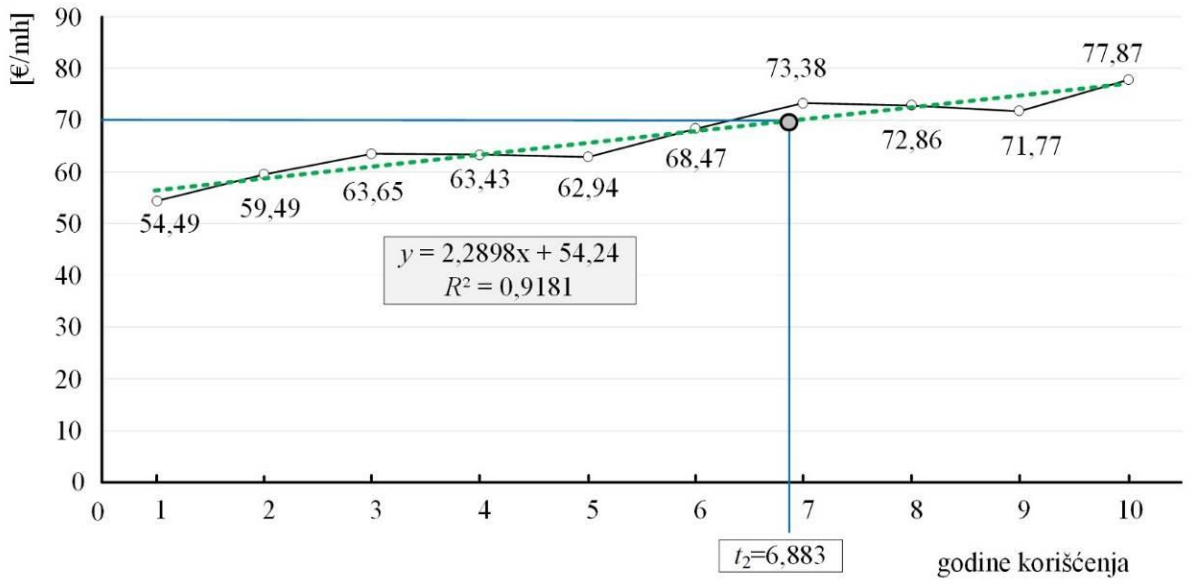
- **Za mašinu *Liebherr* PR752/754 (D1)**

Jednačina aproksimativne linije za mašinu *Liebherr* PR752/754, na osnovu dijagrama sa slike 8.11, prikazana je predstojećoj jednačini,

$$y = 2,2898 \cdot x + 54,24$$

gde je y = 70 [€/mh] i $x = t_2$, sledi:

$$70 = 2,2898 \cdot t_2 + 54,24 \quad \rightarrow \quad t_2 = 6,883 \; godina$$



Slika 8.11. Trend rasta empirijske funkcije troškova i postupak određivanja kritične tačke za slučaj 70 = f (t_2), za mašinu Liebherr PR752/754

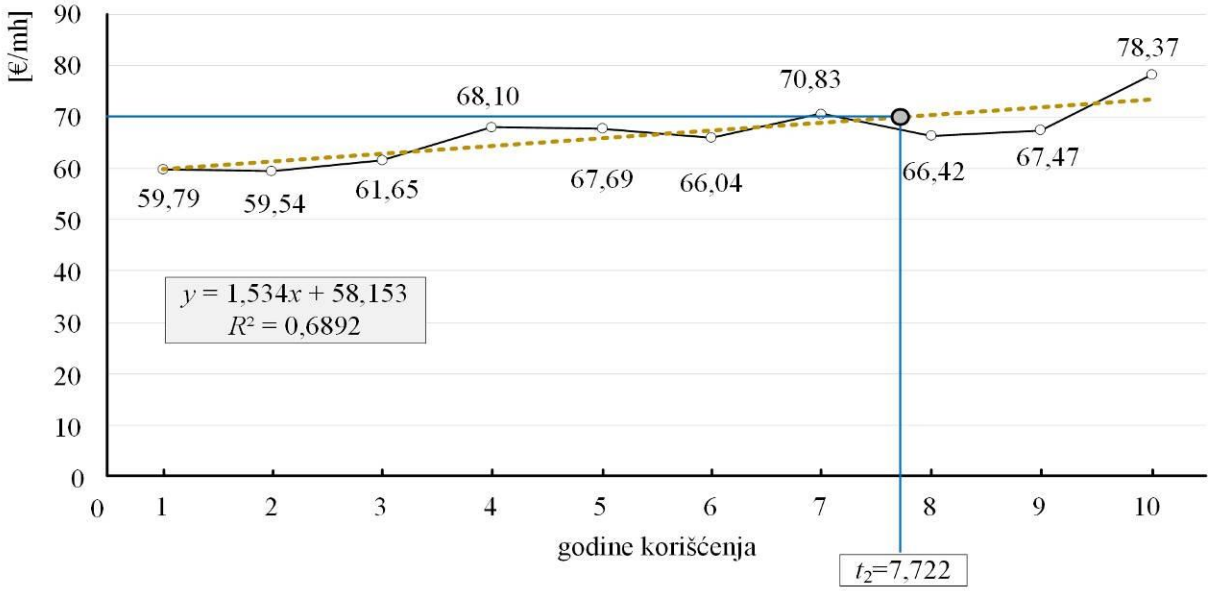
- **Za mašinu *Caterpillar* D8R (D2)**

Jednačina aproksimativne linije za mašinu *Caterpillar* D8R, na osnovu dijagrama sa slike 8.12, prikazana je predstojećoj jednačini,

$$y = 1,534 \cdot x + 58,153$$

gde je $y = 70$ [€/mh] i $x = t_2$, sledi:

$$70 = 1,534 \cdot t_2 + 58,153 \quad \rightarrow \quad t_2 = 7,722 \; godina$$



Slika 8.12. Trend rasta empirijske funkcije troškova i postupak određivanja kritične tačke za slučaj 70 = f (t_2), za mašinu Caterpillar D8R

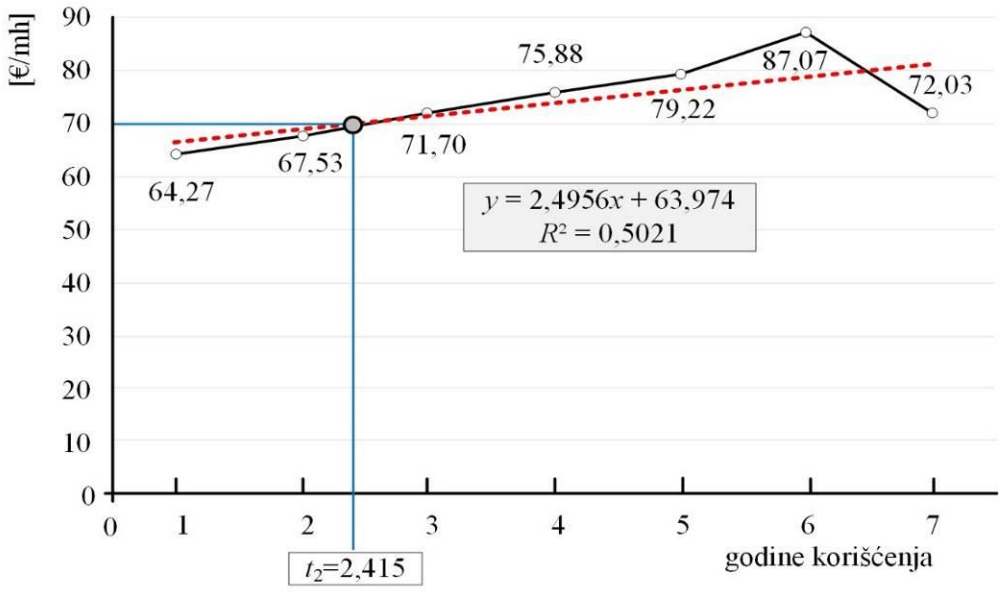
- **Za mašinu *Dressta* TD25M (D3)**

Jednačina aproksimativne linije za mašinu *Dressta* TD25M, na osnovu dijagrama sa slike 8.13, prikazana je predstojećoj jednačini,

$$y = 2,4956 \cdot x + 63,974$$

gde je y = 70 [€/mh] i $x = t_2$, sledi:

$$70 = 2,4956 \cdot t_2 + 63,974 \quad \rightarrow \quad t_2 = 2,4146 \; godina$$



Slika 8.13. Trend rasta empirijske funkcije troškova i postupak određivanja kritične tačke za slučaj 70 = f (t_2), za mašinu Dressta TD25M

8.2.4. Model za procenu životnog veka mašina t_3 - Analiza raspoloživosti izabranih mašina na bazi empirijskih podataka

U prethodnom periodu od deset godina praćeno je ponašanje izabranih mašina. Beleženo je vreme u radu i vreme kada je mašina bila u zastoju na osnovu čega je dobijen koeficijent raspoloživosti za svaku od posmatranih godina. Dijagrami su prikazani na slikama 8.14 - 8.16.

Značajno je primetiti sledeće:

- Trend raspoloživosti ima pad i može da se aproksimira pravom linijom opšteg oblika $y = kx + n$. Pri čemu je $k < 1$. Aproksimacija je urađena metodom najmanjih kvadrata.
- Koeficijent linearne korelacije R^2 ima vrednosti: 0,885; 0,910; 0,866; što znači da je korelacija „odlična“ za sve dozere.
- Pad raspoloživosti najviše je izražen za mašinu D3 - *Dressta* TD25M (k = - 0,026). Kod druge dve mašine padovi raspoloživosti su manje izraženi (slika 8.16).

Na osnovu prva dva zaključka dobijen je neophodan uslov za linearnu aproksimaciju tri tačke koje su dobijene ekspertskim modelom $A(t$=2god.), $A(t$=5god), $A(t$=8god)). Na osnovu trećeg zaključka izvršena je međusobna verifikacija dva modela.

Iskustveno se pokazalo da je neprihvatljiva raspoloživost < 0,8. Odnosno da na četiri mašine koje su radno aktivne kompanija ima jednu u rezervi. Vremenski trenutak kada raspoloživost padne ispod 0,8 predstavlja vreme t_3 i u ovom radu biće korišćen pojam tehnički vek. Sa dijagrama koji su prikazani može se očitati navedeno vreme. Rezultati prema ovom kriterijumu dati su respektivno.

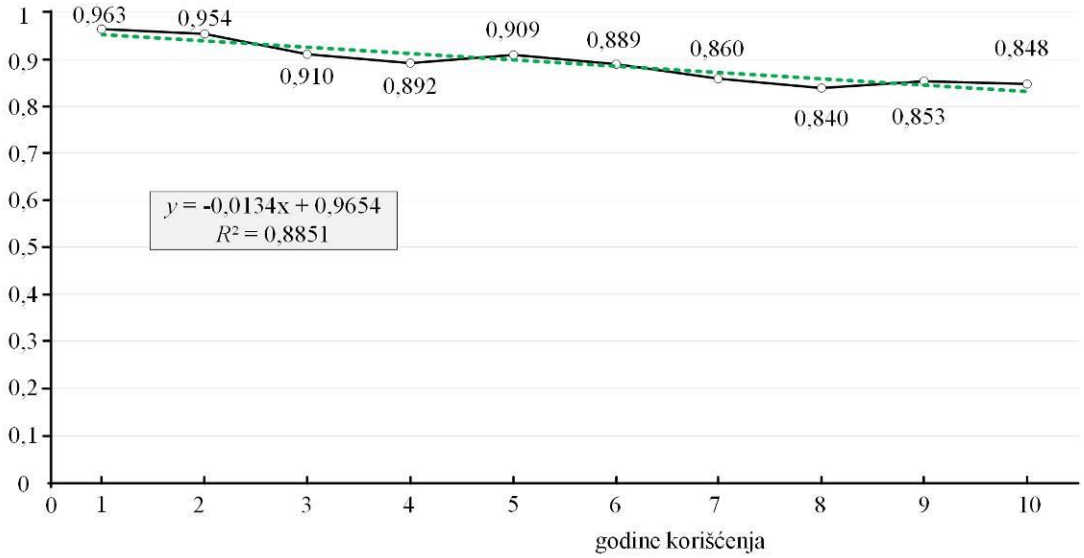
- **Za mašinu *Liebherr* PR752/754 (D1)**

Jednačina aproksimativne linije za mašinu *Liebherr* PR752/754:

$$y = -0,0134 \cdot x + 0,9654$$

gde je $y = 0,8$ i $x = t_3$, pa sledi:

$$0,8 = -0,0134 \cdot t_3 + 0,9654 \quad \rightarrow \quad t_3 = 12,343 \; godina$$



Slika 8.14. Trend pada empirijske funkcije raspoloživosti i postupak određivanja kritične tačke za slučaj 0,8 = f (t_3), za mašinu Liebherr PR752/754

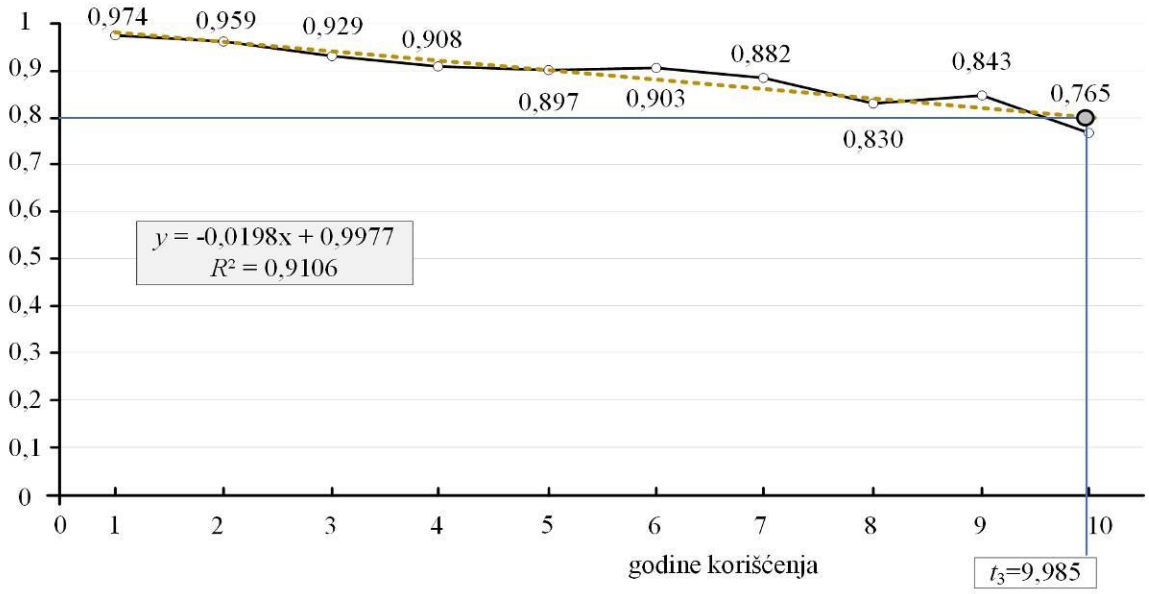
- **Za mašinu *Caterpillar* D8R (D2)**

Jednačina aproksimativne linije za mašinu *Caterpillar* D8R:

$$y = -0,0198 \cdot x + 0,9977$$

gde je $y = 0,8$ i $x = t_3$, pa sledi:

$$0,8 = -0,0198 \cdot t_3 + 0,9977 \quad \rightarrow \quad t_3 = 9,985 \; godina$$



Slika 8.15. Trend pada empirijske funkcije raspoloživosti i postupak određivanja kritične tačke za slučaj 0,8 = f (t_3),za mašinu Caterpillar D8R

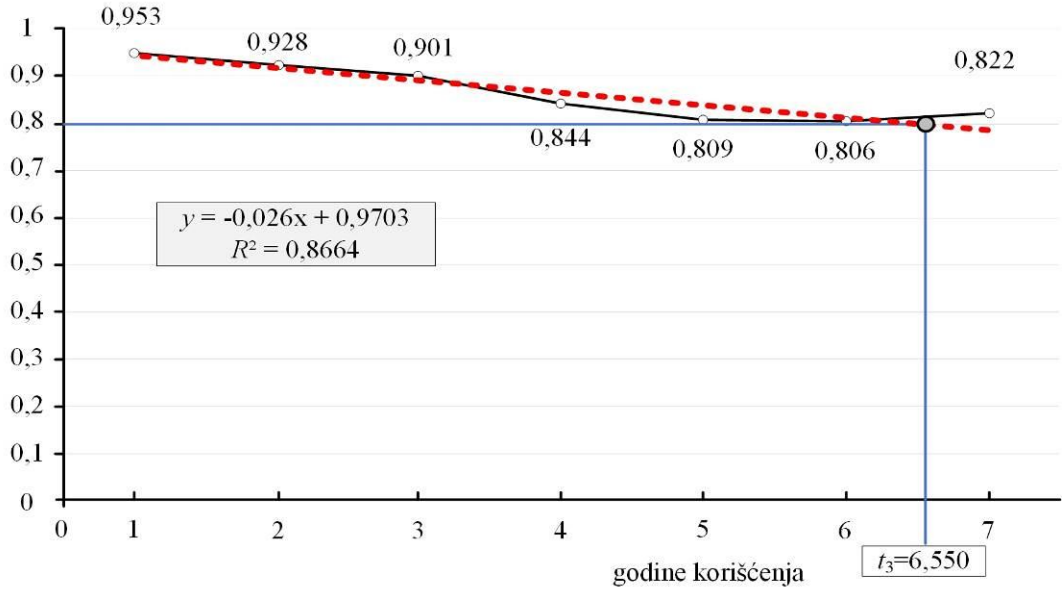
- **Za mašinu *Dressta* TD25M (D3)**

Jednačina aproksimativne linije za mašinu *Dressta* TD25M:

$$y = -0,026 \cdot x + 0,9703$$

gde je $y = 0,8$ i $x = t_3$, pa sledi:

$$0,8 = -0,026 \cdot t_3 + 0,9703 \quad \rightarrow \quad t_3 = 6,550 \; godina$$



Slika 8.16. Trend pada empirijske funkcije raspoloživosti i postupak određivanja kritične tačke za slučaj 0,8 = f (t_3),za mašinu Dressta TD25M

8.2.5 Sintezna analiza za dozere

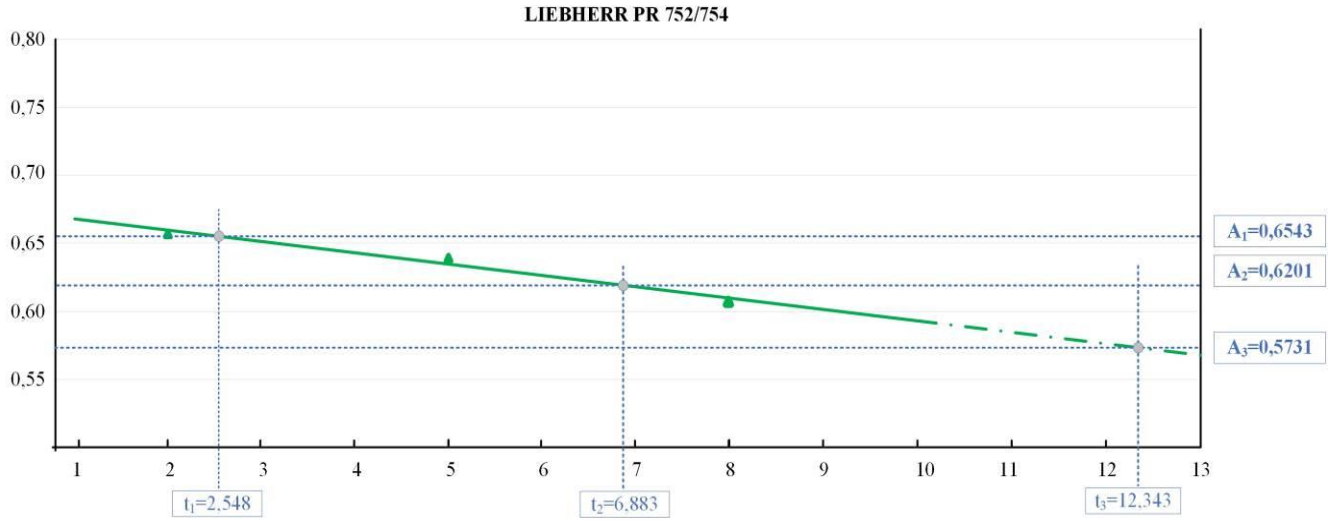
Granični uslovi koji su postavljeni u prethodnim tačkama su: ekonomski vek sa maksimalnim profitnom mašine (t_1), ekonomski vek mašine sa profitom (t_2) i tehnički vek mašine (t_3).

Da bi se uradila navedena analiza neophodno je dugogodišnje praćene rada mašina, što često nije izvodljivo. Ekspertski model sa druge strane ne zahteva opsežno prikupljanje podataka, već samo popunjavanje upitnika, što je njegova suštinska prednost. Nedostatak je što za razliku od empirijskih modela gde analitičkim pristupom možemo da odredimo u kom periodu životnog veka se nalazi mašina, ovde to nije slučaj. Zbog toga se formiraju uređeni parovi ekspertske procene raspoloživosti i odgovarajućih vremena. Ovaj postupak će biti urađen preslikavanjem navedenih vremena t_1, t_2 i t_3 na dijagrame koji predstavljaju ekspertske ocene raspoloživosti.

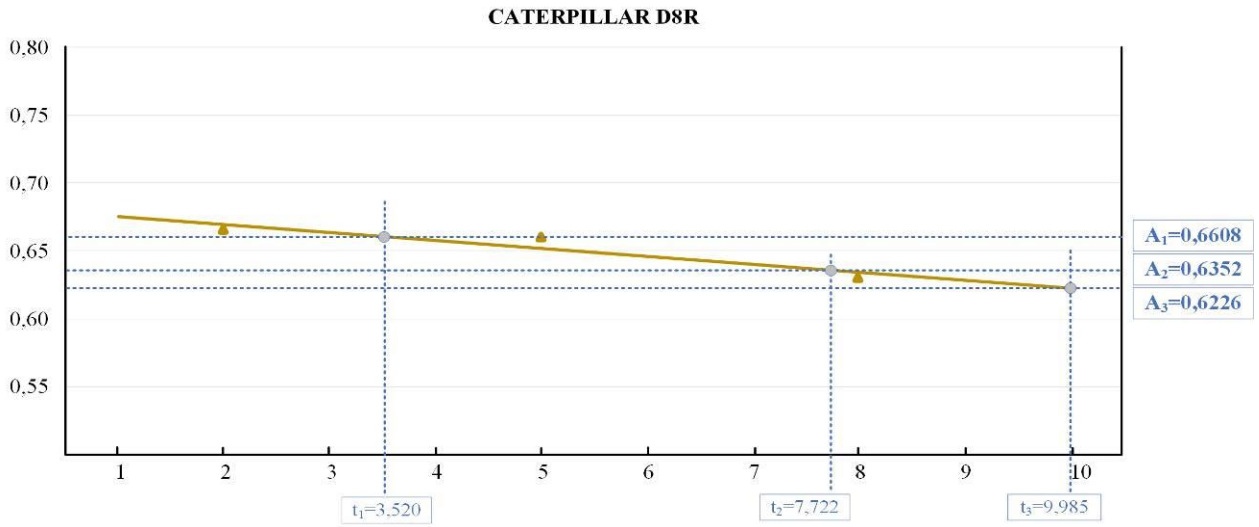
Tabela 8.10. Rezultati sintezne analize za dozere

	t_1	A_1	t_2	A_2	t_3	A_3
Mašina 1 Liebherr PR 752/754	2,54844	0,6543	6,8827	0,6201	12,343	0,5731
Mašina 2 Caterpillar D8R	3,52039	0,6608	7,7221	0,6352	9,985	0,6226
Mašina 3 Dressta TD25M	1,56909	0,6461	2,41465	0,6356	6,550	0,5843

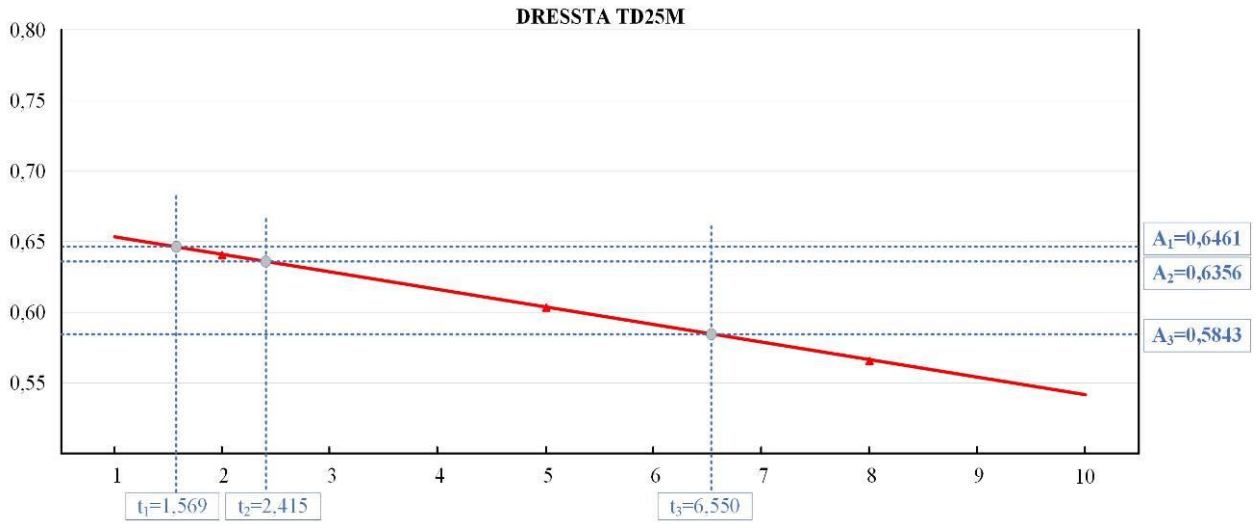
Grafički prikaz rezultata iz tabele 8.10, za svaku od analiziranih mašina (dozera) prikazani su na slikama 8.17, 8.18 i 8.19.



Slika 8.17. Postupak aproksimacije ekspertskih ocena raspoloživosti sa kritičnim vrednostima t_1, t_2 i t_3 za mašinu Liebherr PR752/754



Slika 8.18. Postupak aproksimacije ekspertskih ocena raspoloživosti sa kritičnim vrednostima t_1, t_2 i t_3 za mašinu Caterpillar D8R



Slika 8.19. Postupak aproksimacije ekspertskih ocena raspoloživosti sa kritičnim vrednostima t_1, t_2 i t_3 za mašinu Dressta TD25M

Za buldozere *Liebherr PR752/754 i Caterpillar D8R* dobijeni su veoma bliski rezultati za vreme t_1, t_2 i t_3 (tabela 8.10). Za buldozer TD 25M dobijena su znatno kraća vremena t_1, t_2 i t_3.

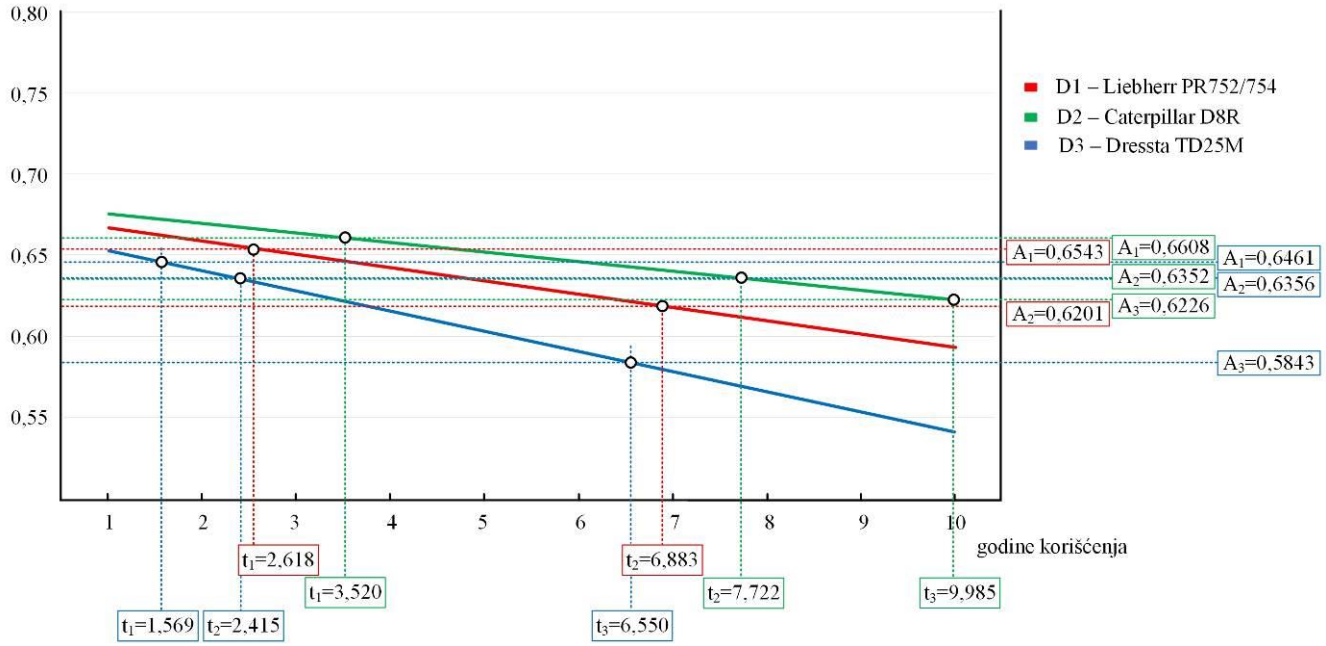
Iz prikazanog modela može se zaključiti da dozeri *CAT D8R* i pored toga što su najskuplji u nabavci (460.000 €) tokom životnog veka imaju najmanje troškove i najveću raspoloživost, što upućuje na zaključak da pri nabavci mašina se mora voditi računa o troškovima tokom čitavog životnog veka a ne samo prilikom nabavke mašina. Pored toga raspoloživost ovih mašina ima blaži pad i raspoloživost od 0,8 postižu tek posle 10 godina. Dozeri tip CAT D8R ostvaruju maksimalni profit do 3,5 godina a profit do 8 godina.

Dozeri tipa *Liebherr PR752/754* ostvaruju nešto slabije rezultate posle 7 godine. Razlog je konstruktivno rešenje prenosa snage (hidrostatički tip) koji nakon 6-7 godine korišćenja zahtevaju znatna ulaganja. Vreme t_1 dostižu posle 2,5 godine, a vreme t_2 posle 7 godina. Raspoloživost ovih dozera opada veoma sporo i vrednost od 0,8 dostižu posle dvanaeste godine.

Dozeri tipa *Dressta TD25M* i pored toga što su najjeftiniji u nabavci (360.000 €) veoma brzo dostižu granicu t_1 (posle 1,5 godine), odnosno granicu t_2 (posle 2,5 godine). Takođe raspoloživost ovih dozera pada ispod granice od 0,8 za manje od 5 godina. Što pokazuje da su ovi dozeri pokazali kao najlošiji u eksploataciji.

Rezultati sintezne analize (tabela 8.10.) pokazuju da se model prikazuje veoma bliske rezultate i da se vreme t_1 postiže kada je ocena oko 0,65- 0,66; vreme t_2 kada je ocena oko 0,62-0,63; a vreme t_3 oko 0,58-0,60.

Na slici 8.20 dat je uporedni prikaz dobijenih vrednosti za sve dozere.



Slika 8.20. Uporedni prikaz aproksimativnih pravih linija raspoloživosti sa referentnim vrednostima A_i (t_i) za sve analizirane dozere

8.3. Model optimalnog vremena zamene cevopolagača

Na osnovu reprezentativnog modela prikazanog za dozere, za preostale mašine (cevopolagače i hidraulične bagere), u poglavlju o modelu procene raspoloživosti na bazi ekspertskih modela, biće dat samo skraćeni prikaz ulaznih ocena analitičara i krajnjih rezultata.

8.3.1. Model procene raspoloživosti na bazi ekspertskih modela

Prema istom principu eksperti su dodeljivali ocene za cevopolagače prema unapred definisanim pitanjima, takođe za svaki od indikatora (fenomena) R, M i S. U tabelama 8.11-8.13 sadržane su ocene koje su dodeljivali i respektivno su prikazane.

Tabela 8.11. Ulazni podaci za cevopolagače stare dve godine

Analitičari		C1 – 2G					C2 – 2G					C3 – 2G				
		A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
1.	R	0,8	0,2				0,9	0,1				0,7	0,3			
	M	0,7	0,3				0,6	0,4				0,5	0,5			
	S	0,8	0,2				0,7	0,3				0,6	0,4			
2.	R	0,7	0,3				1					0,8	0,2			
	M	0,6	0,4				0,8	0,2				0,4	0,6			
	S	0,7	0,3				0,9	0,1				0,6	0,4			
3.	R	0,8	0,2				0,9	0,1				0,9	0,1			
	M	0,7	0,3				0,7	0,3				0,8	0,2			
	S	0,7	0,3				0,6	0,4				0,8	0,2			
4.	R	0,7	0,3				0,8	0,2				0,7	0,3			
	M	0,7	0,3				0,9	0,1				0,6	0,4			
	S	0,8	0,2				0,8	0,2				0,7	0,3			
Σ	R	0,750	0,250				0,900	0,100				0,775	0,225			
	M	0,675	0,325				0,750	0,250				0,575	0,425			
	S	0,750	0,250				0,750	0,250				0,675	0,325			

Tabela 8.12. Ulazni podaci za cevopolagače stare pet godine

Analitičari		C1 – 5G					C2 – 5G					C3 – 5G				
		A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
1.	R	0,6	0,4				0,7	0,3				0,4	0,6			
	M	0,5	0,5				0,4	0,6				0,2	0,8			
	S	0,7	0,3				0,6	0,4				0,5	0,5			
2.	R	0,3	0,7				0,6	0,4				0,1	0,9			
	M	0,6	0,4				0,5	0,5				0,3	0,7			
	S	0,6	0,4				0,5	0,5				0,3	0,7			
3.	R		0,9	0,1			0,4	0,6					1			
	M	0,4	0,6				0,3	0,7					0,9	0,1		
	S	0,3	0,7				0,2	0,8				0,1	0,9			
4.	R		1				0,5	0,5					0,8	0,2		
	M	0,4	0,6				0,4	0,6				0,1	0,9			
	S	0,5	0,5				0,3	0,7				0,3	0,7			
Σ	R	0,225	0,750	0,025			0,550	0,450				0,125	0,825	0,050		
	M	0,475	0,525				0,400	0,600				0,150	0,825	0,025		
	S	0,525	0,475				0,400	0,600				0,300	0,700			

Tabela 8.13. Ulazni podaci za cevopolagače stare osam godine

Analitičari		C1 – 8G					C2 – 8G					C3 – 8G				
		A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
1.	R		0,6	0,4				0,7	0,3				0,5	0,5		
	M		0,7	0,3				0,6	0,4				0,6	0,4		
	S	0,2	0,8					0,9	0,1				0,8	0,2		
2.	R			0,7	0,3			0,2	0,8					0,5	0,5	
	M		0,2	0,8					0,9	0,1				0,6	0,6	
	S		0,3	0,7				0,4	0,6					0,3	0,7	
3.	R		0,2	0,8				0,5	0,5				0,2	0,8		
	M		0,6	0,4				0,4	0,6				0,3	0,7		
	S		0,7	0,3				0,2	0,8				0,2	0,8		
4.	R		0,1	0,9				0,8	0,2					0,7	0,3	
	M		0,3	0,7				0,2	0,8					1		
	S			1				0,1	0,9					1		
Σ	R		0,225	0,700	0,075			0,375	0,550	0,075			0,175	0,625	0,200	
	M		0,450	0,550				0,150	0,725	0,125			0,225	0,675	0,100	
	S	0,05	0,450	0,500				0,075	0,750	0,175			0,050	0,725	0,225	

Nakon definisanja ulaznih parametara, uticaj indikatora R, M, S na raspoloživost je korigovan primenom AHP metode. Ulazni podaci za AHP metodu su dati u tabeli 8.14.

Tabela 8.14. Ulazni podaci za AHP metodu za sve cevopolagače

	C1-3 – 2G			C1-5G			C2-5G			C3-5G			C1-8G			C2-8G			C3-8G		
	R	M	S	R	M	S	R	M	S	R	M	S	R	M	S	R	M	S	R	M	S
R	1	2	2	1	1/2	2	1	1/2	1	1	½	1	1	1	1/2	1	1/2	1/2	1	1/2	½
M	1/2	1	1	2	1	3	2	1	2	2	1	2	1	1	1/2	2	1	1	2	1	1
S	1/2	1	1	1/2	1/3	1	1	1/2	1	1	1/2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	1

Primenom AHP metode prema modelu definisanom u poglavlju 7, izračunate su preferencije indikatora i prikazane u tabeli 8.15.

Tabela 8.15. Rang indikatora raspoloživosti cevopolagača

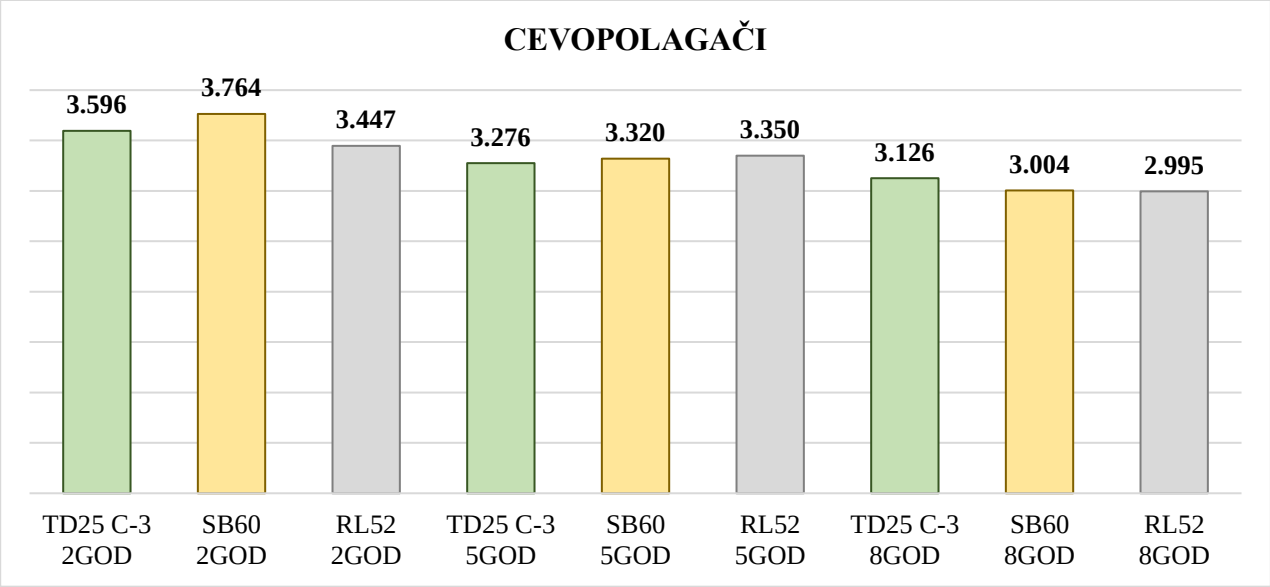
	C1-3 – 2G	C1-5G	C2-5G	C3-5G	C1-8G	C2-8G	C3-8G
W_R	0,500	0,297	0,250	0,250	0,250	0,200	0,200
W_M	0,250	0,540	0,500	0,500	0,250	0,400	0,400
W_S	0,250	0,163	0,250	0,250	0,500	0,400	0,400
λ_{max}	3	3,0073	3	3	3	3	3
CI	0	0,00365	0	0	0	0	0
CR	0	0,00702	0	0	0	0	0

Sledeći korak u modelu podrazumeva formiranje MAX-MIN kompozicije, potom sledi identifikacija pa defazifikacija izračunatih vrednosti. Krajnji rezultati ekspertske ocene i rang cevopolagača dati su u narednoj tabeli,

Tabela 8.16. Rezultati primene AHP-Fazi modela za izračunavanje raspoloživosti cevopolagača

	OCENE						RANG
	A	B	C	D	E		
C1-2G	0,418293	0,170810	0,137269	0,135646	0,137982	**3,596**	2
C2-2G	0,497924	0,137951	0,118075	0,121975	0,124075	**3,764**	1
C3-2G	0,355188	0,192324	0,149619	0,149973	0,152896	**3,447**	3
C1-5G	0,218429	0,304028	0,168235	0,153288	0,156020	**3,276**	3
C2-5G	0,255851	0,271256	0,165167	0,152468	0,155259	**3,320**	2
C3-5G	0,154886	0,431450	0,153218	0,129271	0,131175	**3,350**	1
C1-8G	0,135291	0,271772	0,309904	0,14969	0,133342	**3,126**	1
C2-8G	0,118212	0,164299	0,439393	0,159884	0,118212	**3,004**	2
C3-8G	0,118001	0,162827	0,433762	0,167408	0,118001	**2,995**	3

Na slici 8.21 dat je grafički prikaz krajnjih rezultata.



Slika 8.21. Grafički prikaz rezultata primene Fazi-AHP metode za cevopolagače

8.3.2. Model za procenu ekonomskog životnog veka mašine sa maksimalnim profitom t_1

- **Za mašinu *Dressta* TD25 CS-3**

Funkcija kumulativnih troškova održavanja *f(t)* za mašinu *Dressta* TD25 CS-3:

$$f(t) = 0,00252 + 33,274 \cdot t - 6,70121 \cdot t^2 + 2,48113 \cdot t^3 - 0,37800 \cdot t^4 + 0,02768 \cdot t^5 - 0,00096 \cdot t^6 + 0,00001 \cdot t^7$$

Funkcija ukupnih troškova eksploatacije mašine *Dressta* TD25 CS-3, ako je za nabavnu vrednost usvojena vrednost mašine od K = 410 000 €:

$$F(t) = K + f(t) - K \cdot \varphi(t) = 410,003 - 410 \cdot (1 - 0,28460 \cdot t^{0,5}) + 33,274 \cdot t - 6,70121 \cdot t^2 + 2,48113 \cdot t^3 - 0,37800 \cdot t^4 + 0,02768 \cdot t^5 - 0,00096 \cdot t^6 + 0,00001 \cdot t^7$$

gde je faktor otpisa vrednosti mašine: $\varphi(t) = 1–0{,}28460 \cdot t^{0,5}$.

Funkcija prosečnih troškova $\bar{F}(t)$:

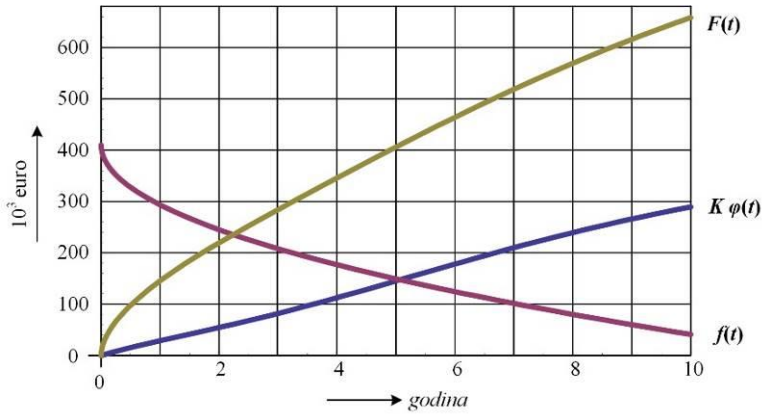
$$\bar{F}(t) = \frac{1}{t} \cdot K \cdot \left[1 - \varphi(t)\right] + \frac{1}{t} \cdot f(t) = -6{,}70121 - \frac{0{,}00252}{t^2} - \frac{58{,}3}{t^{1{,}5}} + 4{,}96227 \cdot t - 1{,}13401 \cdot t^2 + 0{,}11071 \cdot t^3 - 0{,}00480 \cdot t^4 + 0{,}00007 \cdot t^5$$

Dužina vremena eksploatacije [0, t_1] za koju su minimalni prosečni troškovi dobija se preko prvog izvoda funkcije $\bar{F}(t)$ kao:

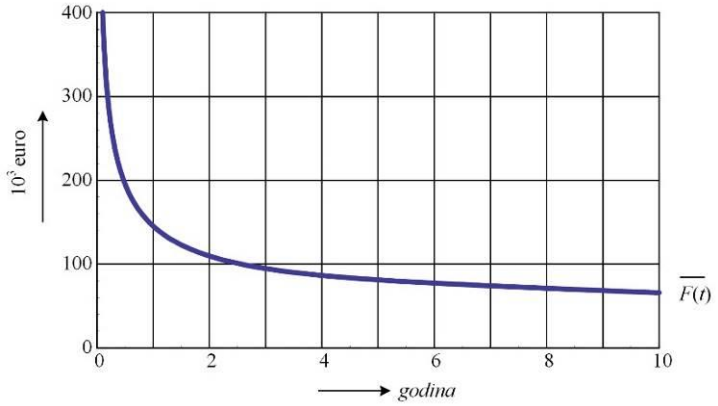
$$\frac{d\bar{F}(t)}{dt} = \frac{1}{t^2} \cdot \left\{ \left[-K \cdot \varphi'(t) + f' \cdot (t) \right] \cdot t - K \cdot \left[1 - \varphi(t)\right] - f \cdot (t) \right\} = 0$$

$$4{,}96227 + \frac{0{,}00504}{t^3} + \frac{87{,}514}{t^{2{,}5}} - 2{,}6801 \cdot t + 0{,}33213 \cdot t^2 - 0{,}01922 \cdot t^3 + 0{,}00036 \cdot t^4 = 0$$

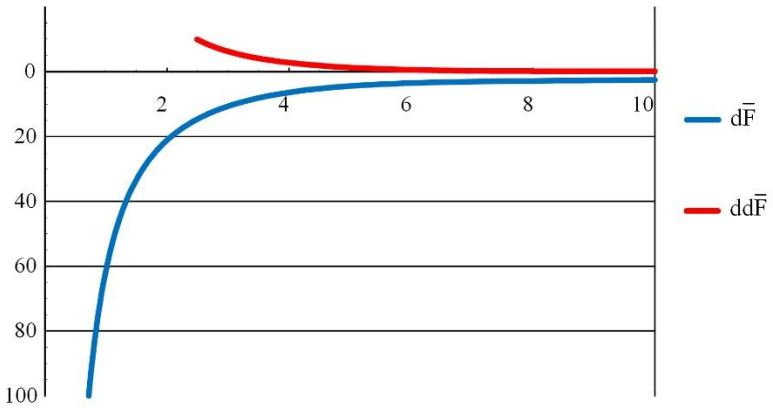
$$\rightarrow t_1 = 11{,}55 \ \ godina$$



Slika 8.22. Funkcija kumulativnih troškova održavanja f(t) i ukupnih troškova eksploatacije za mašinu Dressta TD25 CS-3



Slika 8.23. Funkcija prosečnih troškova za mašinu Dressta TD25 CS-3



Slika 8.24. Prvi i drugi izvod funkcije prosečnih troškova za mašinu Dressta TD25 CS-3

- **Za mašinu *Dressta* SB60**

Funkcija kumulativnih troškova održavanja *f(t)* za mašinu *Dressta* SB60:

$$f(t) = 0,08487 + 2,55129 \cdot t + 9,23023 \cdot t^2 + 5,25967 \cdot t^3 - 3,11436 \cdot t^4 + 0,61483 \cdot t^5 - 0,05352 \cdot t^6 + 0,00174 \cdot t^7$$

Funkcija ukupnih troškova eksploatacije mašine *Dressta* SB60, ako je za nabavnu vrednost usvojena vrednost mašine od K = 410 000 €:

$$F(t) = K + f(t) - K \cdot \varphi(t) = 409,915 - 410 \cdot (1 - 0,28460 \cdot t^{0,5}) + 2,55129 \cdot t + 9,23023 \cdot t^2 + 5,25967 \cdot t^3 - 3,11436 \cdot t^4 + 0,61483 \cdot t^5 - 0,05352 \cdot t^6 + 0,00174 \cdot t^7$$

gde je faktor otpisa vrednosti mašine: $\varphi(t) = 1–0,28460 \cdot t^{0,5}$.

Funkcija prosečnih troškova $\bar{F}(t)$:

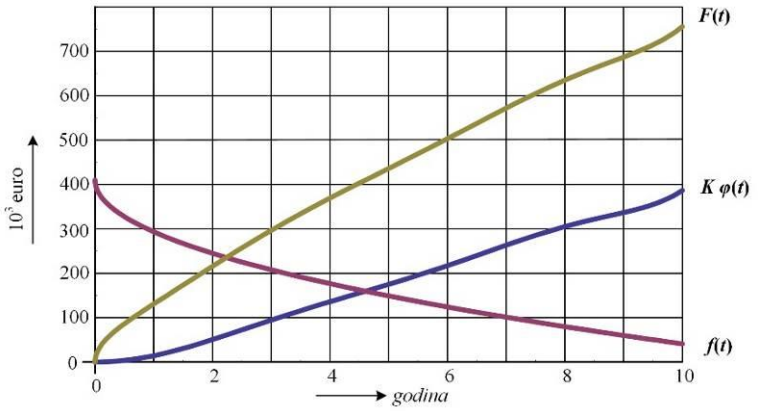
$$\bar{F}(t) = \frac{1}{t} \cdot K \cdot [1 - \varphi(t)] + \frac{1}{t} \cdot f(t) = 2,55129 - \frac{0,08486}{t} + \frac{116,69}{t^{0,5}} + 9,23023 \cdot t + 5,25967 \cdot t^2 - 3,11436 \cdot t^3 + 0,61483 \cdot t^4 - 0,05352 \cdot t^5 + 0,00174 \cdot t^6$$

Dužina vremena eksploatacije $[0, t_1]$ za koju su minimalni prosečni troškovi dobija se preko prvog izvoda funkcije $\bar{F}(t)$ kao:

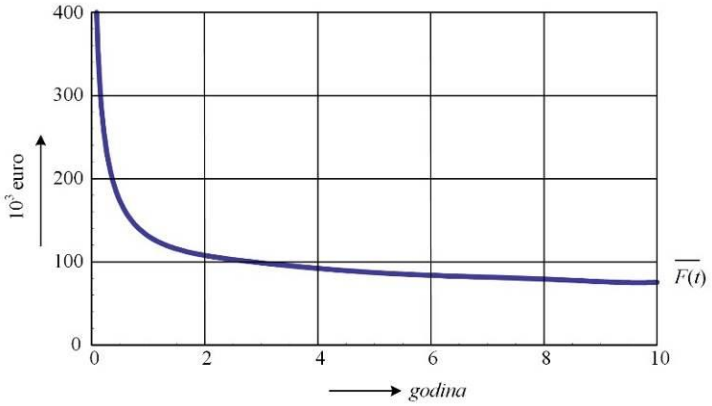
$$\frac{d\bar{F}(t)}{dt} = \frac{1}{t^2} \cdot \left\{ \left[-K \cdot \varphi'(t) + f' \cdot (t) \right] \cdot t - K \cdot [1 - \varphi(t)] - f \cdot (t) \right\} = 0$$

$$9,23023 + \frac{0,08486}{t^2} - \frac{58,343}{t^{1,5}} + 10,519 \cdot t - 9,34309 \cdot t^2 + 2,45934 \cdot t^3 - 0,26759 \cdot t^4 + 0,01041 \cdot t^5 = 0$$

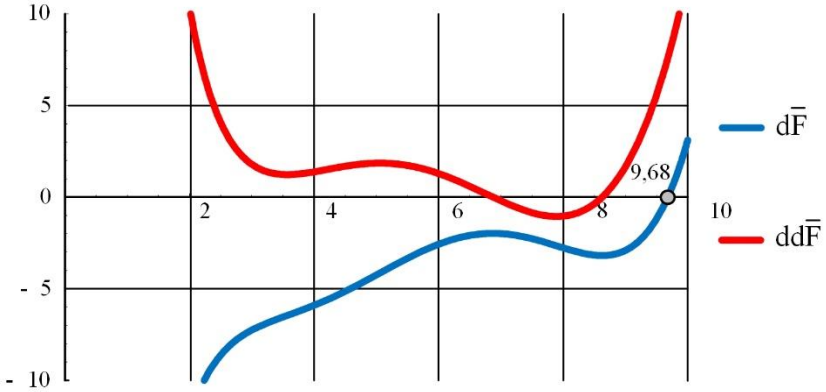
$$\rightarrow t_1 = 9,68 \ \ godina$$



Slika 8.25. Funkcija kumulativnih troškova održavanja f(t) i ukupnih troškova eksploatacije za mašinu Dressta SB60



Slika 8.26. Funkcija prosečnih troškova za mašinu Dressta SB60



Slika 8.27. Prvi i drugi izvod funkcije prosečnih troškova za mašinu Dressta SB60

- **Za mašinu *Liebherr* RL52**

Funkcija kumulativnih troškova održavanja *f(t)* za mašinu ***Liebherr* RL52**:

$$f(t) = -0,27360 + 49,3428 \cdot t - 73,1483 \cdot t^2 + 64,4633 \cdot t^3 - 21,8869 \cdot t^4 + 3,55836 \cdot t^5 - 0,27744 \cdot t^6 + 0,00834 \cdot t^7$$

Funkcija ukupnih troškova eksploatacije mašine ***Liebherr* RL52**, ako je za nabavnu vrednost usvojena vrednost mašine od K = 480 000 €:

$$F(t) = K + f(t) - K \cdot \varphi(t) = 479,726 - 480 \cdot (1 - 0,28460 \cdot t^{0,5}) + 49,3428 \cdot t - 73,14830 \cdot t^2 + 64,4633 \cdot t^3 - 21,8869 \cdot t^4 + 3,55836 \cdot t^5 - 0,27744 \cdot t^6 + 0,00834 \cdot t^7$$

gde je faktor otpisa vrednosti mašine: $\varphi(t) = 1–0,28460 \cdot t^{0,5}$.

Funkcija prosečnih troškova $\bar{F}(t)$:

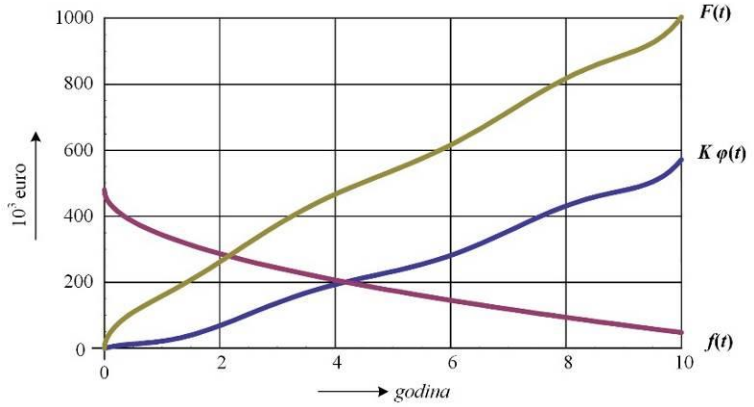
$$\bar{F}(t) = \frac{1}{t} \cdot K \cdot [1 - \varphi(t)] + \frac{1}{t} \cdot f(t) = 49,3428 - \frac{0,27360}{t} + \frac{136,61}{t^{0,5}} - 73,1483 \cdot t + 64,1633 \cdot t^2 - 21,8869 \cdot t^3 + 3,55836 \cdot t^4 - 0,27744 \cdot t^5 + 0,00834 \cdot t^6$$

Dužina vremena eksploatacije $[0, t_1]$ za koju su minimalni prosečni troškovi dobija se preko prvog izvoda funkcije $\bar{F}(t)$ kao:

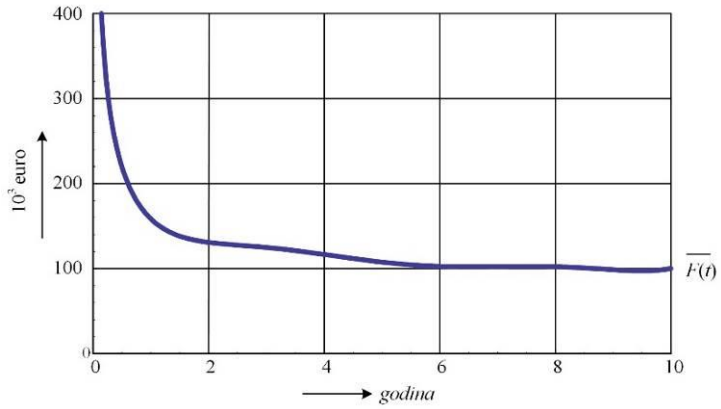
$$\frac{d\bar{F}(t)}{dt} = \frac{1}{t^2} \cdot \left\{ \left[-K \cdot \varphi'(t) + f'(t) \right] \cdot t - K \cdot [1 - \varphi(t)] - f \cdot (t) \right\} = 0$$

$$-73,1483 + \frac{0,27360}{t^2} - \frac{68,304}{t^{1,5}} + 128,93 \cdot t - 65,6606 \cdot t^2 + 14,2335 \cdot t^3 - 1,38722 \cdot t^4 + 0,05004 \cdot t^5 = 0$$

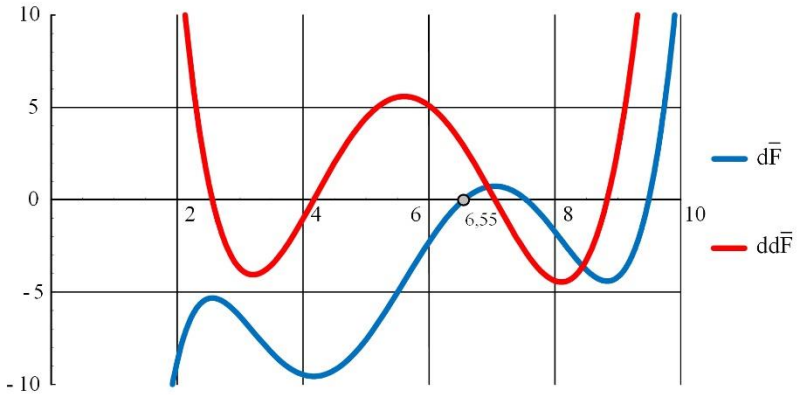
$$\rightarrow t_1 = 6,553 \ \ godina$$



Slika 8.28. Funkcija kumulativnih troškova održavanja f(t) i ukupnih troškova eksploatacije za mašinu Liebherr RL52



Slika 8.29. Funkcija prosečnih troškova za mašinu Liebherr RL52



Slika 8.30. Prvi i drugi izvod funkcije prosečnih troškova za mašinu Liebherr RL52

8.3.3. Model za procenu ekonomskog života mašina t_2 - Analiza troškova izabranih mašina na bazi empirijskih podataka

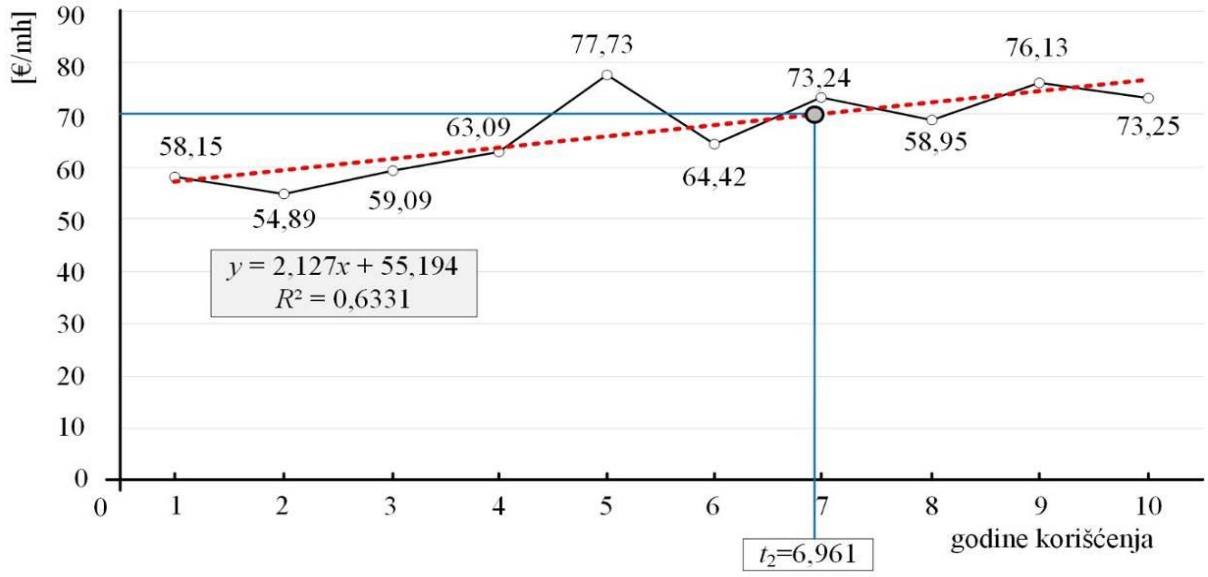
- **Za mašinu *Dressta* TD25 CS-3**

Jednačina aproksimativne linije za mašinu *Dressta* TD25 CS-3, na osnovu dijagrama sa slike 8.31, prikazana je predstojećoj jednačini,

$$y = 2{,}127 \cdot x + 55{,}19$$

gde je $y = 70$ [€/mh] i $x = t_2$, sledi:

$$70 = 2{,}127 \cdot t_2 + 55{,}19 \quad \rightarrow \quad t_2 = 6{,}963 \; godina$$



Slika 8.31. Trend rasta empirijske funkcije troškova i postupak određivanja kritične tačke za slučaj 70 = f (t_2), za mašinu Dressta TD25 CS-3

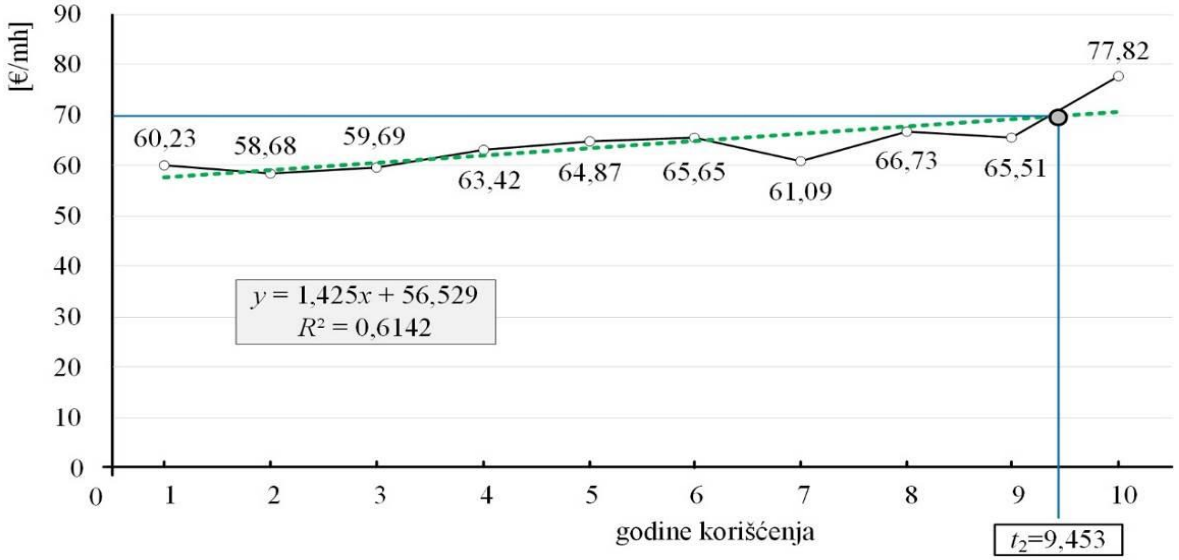
- **Za mašinu *Dressta* SB60**

Jednačina aproksimativne linije za mašinu *Dressta* SB60 ima sledeći oblik,

$$y = 1,425 \cdot x + 56,53$$

gde je $y = 70$ [€/mh] i $x = t_2$, sledi:

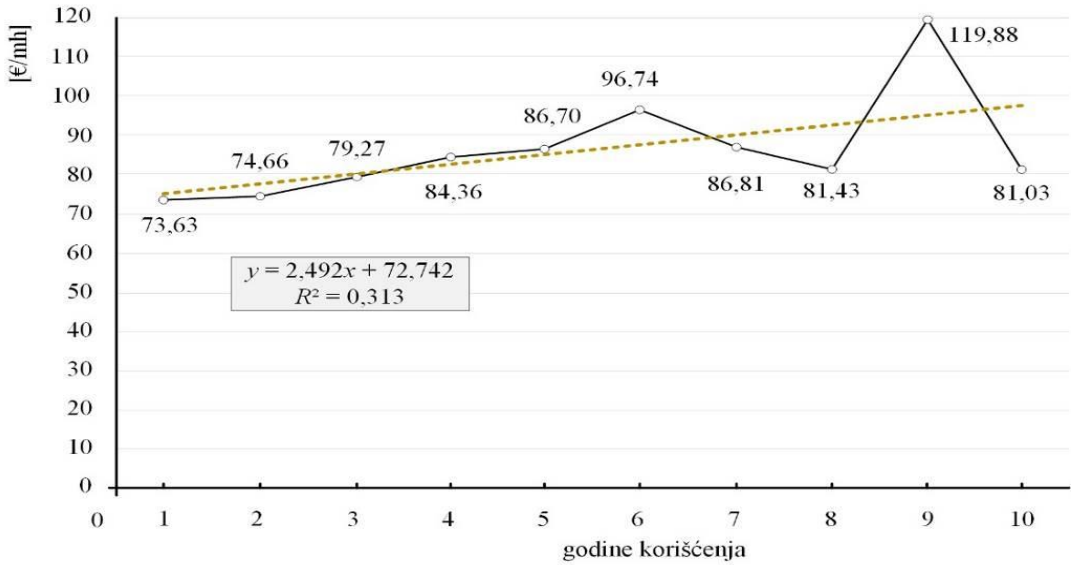
$$70 = 1,425 \cdot t_2 + 56,53 \quad \rightarrow \quad t_2 = 9,453 \; godina$$



Slika 8.32. Trend rasta empirijske funkcije troškova i postupak određivanja kritične tačke za slučaj 70 = f (t_2), za mašinu Dressta SB60

- **Za mašinu *Liebherr* RL52**

Jednačina aproksimativne linije za mašinu *Liebherr* RL52, na osnovu dijagrama sa slike 8.33, troškovi za ovaj tip cevopolagača su preko 70 €/mh već od prve godine rada.



Slika 8.33. Trend rasta empirijske funkcije troškova i postupak određivanja kritične tačke za slučaj 70 = f (t_2), za mašinu Liebherr RL52

8.2.4 Model za procenu životnog veka mašina t_3 - Analiza raspoloživosti izabranih mašina na bazi empirijskih podataka

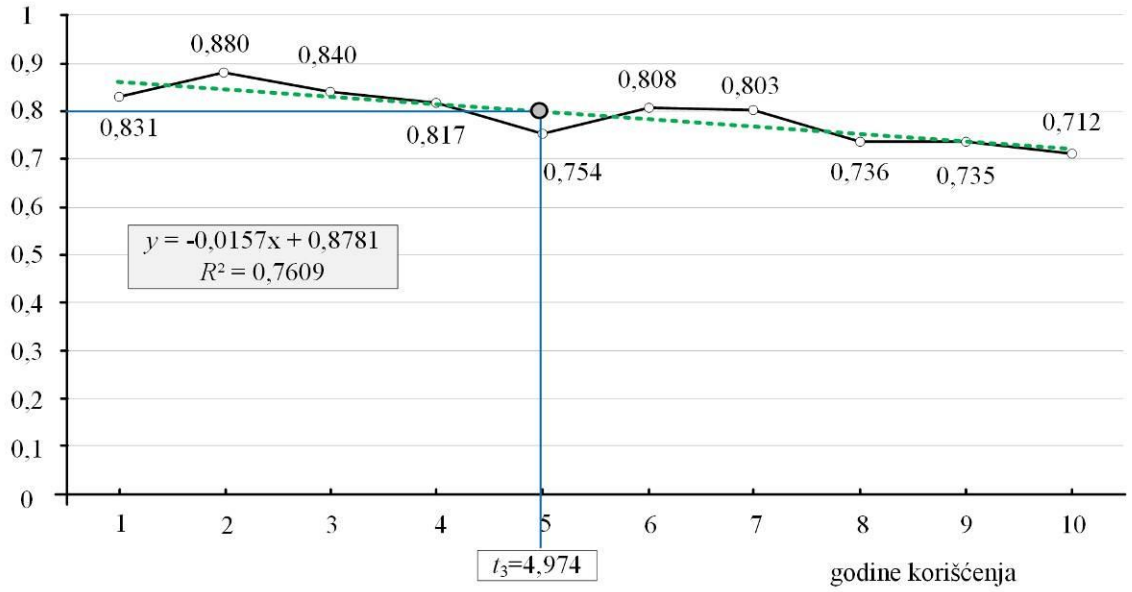
- **Za mašinu *Dressta* TD25 CS-3**

Jednačina aproksimativne linije za mašinu *Dressta* TD25 CS-3:

$$y = -0,0157 \cdot x + 0,8781$$

gde je $y = 0,8$ i $x = t_3$, pa sledi:

$$0,8 = -0,0157 \cdot t_3 + 0,8781 \quad \rightarrow \quad t_3 = 4,974 \; godina$$



Slika 8.34. Trend pada empirijske funkcije raspoloživosti i postupak određivanja kritične tačke za slučaj 0,8 = f (t_3), za mašinu Dressta TD25 CS-3

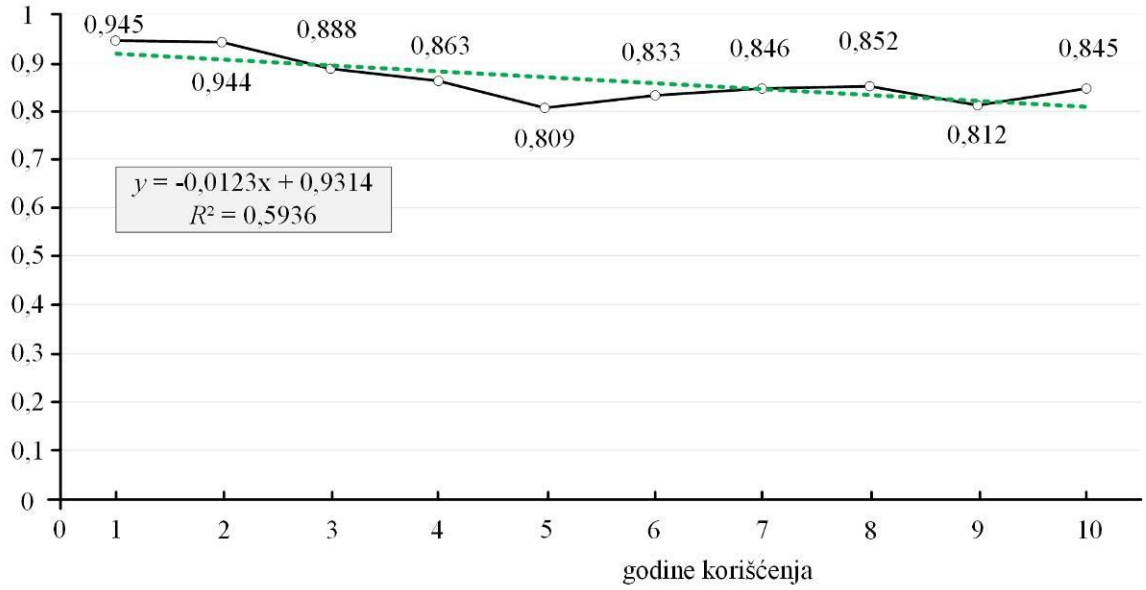
- **Za mašinu *Dressta* SB60**

Jednačina aproksimativne linije za mašinu *Dressta* SB60:

$$y = -0,0123 \cdot x + 0,9314$$

gde je $y = 0,8$ i $x = t_3$, pa sledi:

$$0,8 = -0,0123 \cdot t_3 + 0,9314 \quad \rightarrow \quad t_3 = 10,623 \; godina$$



Slika 8.35. Trend pada empirijske funkcije raspoloživosti i postupak određivanja kritične tačke za slučaj 0,8 = f (t_3), za mašinu Dressta SB60

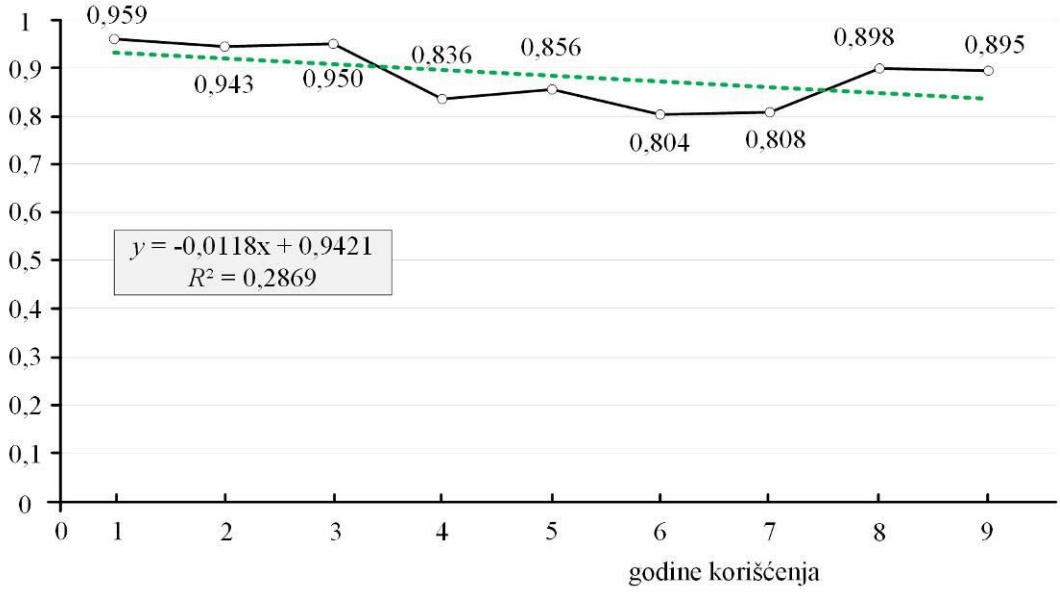
- **Za mašinu *Liebherr* RL52**

Jednačina aproksimativne linije za mašinu *Liebherr* RL52:

$$y = -0,0118 \cdot x + 0,9421$$

gde je $y = 0,8$ i $x = t_3$, pa sledi:

$$0,8 = -0,0118 \cdot t_3 + 0,9421 \quad \rightarrow \quad t_3 = 12,042 \; godina$$



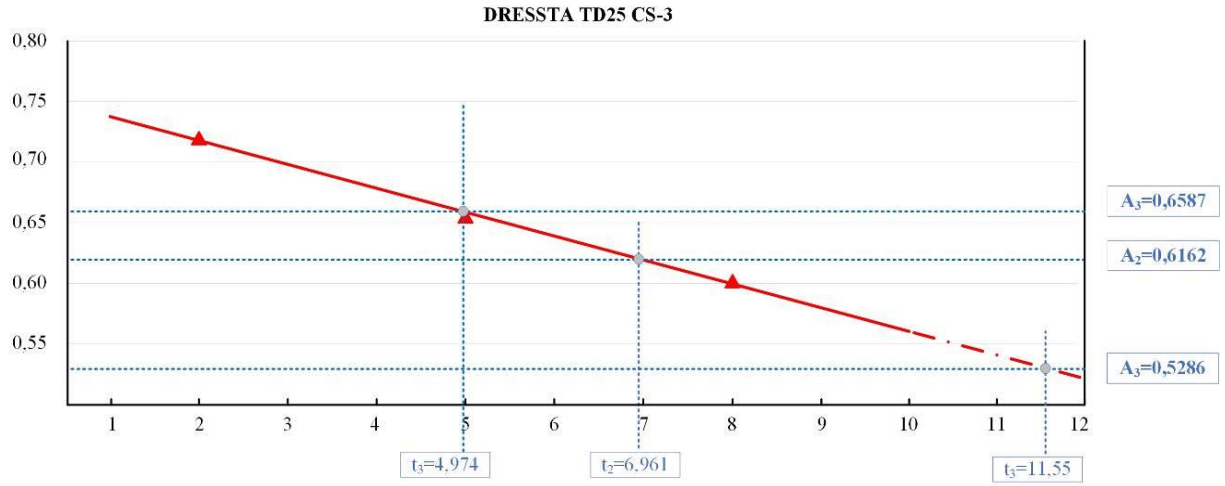
Slika 8.36. Trend pada empirijske funkcije raspoloživosti i postupak određivanja kritične tačke za slučaj 0,8 = f (t_3), za mašinu Liebherr RL52

8.3.5. Sintezna analiza za cevopolagače

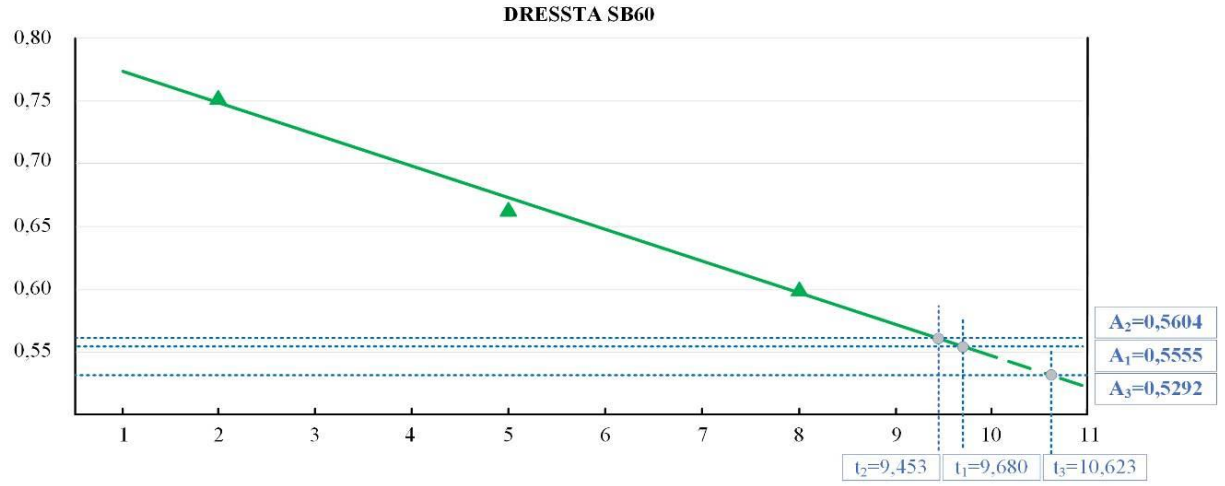
Kao i dok dozera i kod cevopolagača su granični uslovi postavljeni u tačkama: ekonomski vek sa maksimalnim profitnom mašine (t_1), ekonomski vek mašine sa profitom (t_2) i tehnički vek mašine (t_3). Formirani su uređeni parovi ekspertske procene raspoloživosti i odgovarajućih vremena. Vremena t_1, t_2 i t_3 su preslikana na dijagrame i predstavljaju ekspertske ocene raspoloživost. Numeričke vrednosti koje se očitane prikazane su u tabeli 8.17. Vreme t_1 je približno za sve bagere i iznosi 6,5 do 11,5 godina. Vreme t_2 se kreće u rasponu od 7 do 9,5 godina (osim za mašinu *Liebherr* RL52), a vreme t_3 ima najveći raspon i kreće se od 5 do 12 godina.

Tabela 8.17. Rezultati sintezne analize za cevopolagače

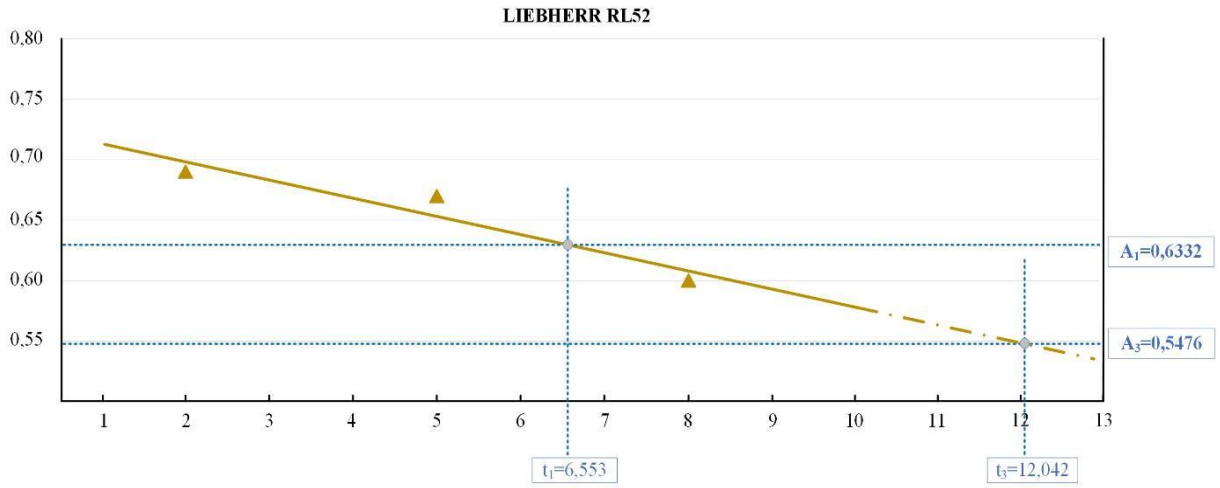
	t_1	A_1	t_2	A_2	t_3	A_3
Mašina 1 Dressta TD25 CS-3	11,55	0,5286	6,961	0,6162	4,974	0,6587
Mašina 2 Dressta SB60	9,680	0,5555	9,453	0,5604	10,623	0,5292
Mašina 3 Liebherr RL52	6,553	0,6332	/	/	12,042	0,5476



Slika 8.37. Postupak aproksimacije ekspertskih ocena raspoloživosti sa kritičnim vrednostima t_1, t_2 i t_3 za mašinu Dressta TD25 CS-3

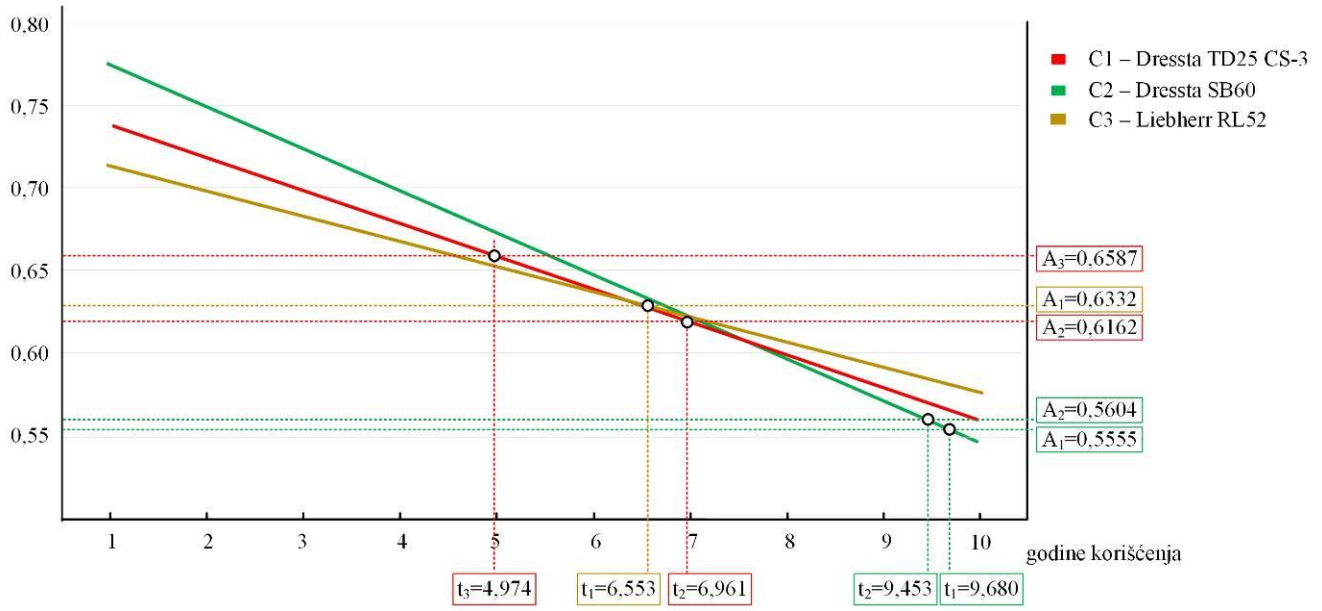


Slika 8.38. Postupak aproksimacije ekspertskih ocena raspoloživosti sa kritičnim vrednostima t_1, t_2 i t_3 za mašinu Dressta SB60



Slika 8.39. Postupak aproksimacije ekspertskih ocena raspoloživosti sa kritičnim vrednostima t_1, t_2 i t_3 za mašinu Liebherr RL52

Uporedni prikaz krajnjih rezultata za sve cevopolagače dat je na slici 8.40.



Slika 8.40 Uporedni prikaz aproksimativnih pravih linija raspoloživosti sa referentnim vrednostima A_i (t_i) za sve analizirane cevopolagače

Prikazana metoda za cevopolagače nije dala zadovoljavajuće rezultate. Osnovni razlog je niska korelacija zavisnosti raspoloživosti i godina eksploatacije (koja se kreće 0,2 – 0,7), kao i korelacija između troškova eksploatacije i godina rada (koja se kreće 0,3 – 0,6). Za cevopolagač *Liebherr* RL52 nije dobijeno vreme t_2 jer su troškovi već prve godine rada iznosili preko 70 €/mh. Takođe, vreme t_1 je veće od vremena t_2 za sve mašine, što ukazuje da nije realno postavljena interna cena od 70 €/mh.

8.4. Model optimalnog vremena zamene hidrauličnih bagera

8.4.1. Model procene raspoloživosti na bazi ekspertskih modela

Predstojeće tabele 8.18-8. sadrže ocene koje su eksperti dodeljivali hidrauličnim bagerima na osnovu unapred definisanih pitanja za svaki od indikatora R, M, S.

Tabela 8.18. Ulazni podaci za hidraulične bagere stare dve godine

Analitičari		H1 – 2G					H2 – 2G					H3 – 2G				
		A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
1.	R	0,5	0,5				0,9	0,1				0,8	0,2			
	M	0,8	0,2				0,7	0,3				0,7	0,3			
	S	0,7	0,3				0,6	0,4				0,6	0,4			
2.	R		1				0,8	0,2				0,7	0,3			
	M	0,8	0,2				0,8	0,2				0,6	0,4			
	S	0,6	0,4				0,7	0,3				0,5	0,5			
3.	R	0,4	0,6				1					0,9	0,1			
	M	0,7	0,3				0,7	0,3				0,7	0,3			
	S	0,8	0,2				0,8	0,2				0,7	0,3			
4.	R		0,9	0,1			0,8	0,2				0,8	0,2			
	M	0,9	0,1				0,7	0,3				0,6	0,4			
	S	0,7	0,3				0,7	0,3				0,7	0,3			
Σ	R	0,225	0,750	0,025			0,875	0,125				0,800	0,200			
	M	0,800	0,200				0,725	0,275				0,650	0,350			
	S	0,700	0,300				0,700	0,300				0,625	0,375			

Tabela 8.19. Ulazni podaci za hidraulične bagere stare pet godine

Analitičari		H1 – 5G					H2 – 5G					H3 – 5G				
		A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
1.	R		0,6	0,4			0,8	0,2				0,7	0,3			
	M	0,7	0,3				0,6	0,4				0,6	0,4			
	S	0,6	0,4				0,5	0,5				0,6	0,4			
2.	R		0,2	0,8			0,8	0,2				0,5	0,5			
	M	0,3	0,7				0,7	0,3				0,4	0,6			
	S	0,2	0,8				0,6	0,4				0,2	0,8			
3.	R		0,5	0,5			0,6	0,4				0,4	0,6			
	M	0,4	0,6				0,5	0,5				0,5	0,5			
	S	0,5	0,5				0,6	0,4				0,5	0,5			
4.	R		0,4	0,6			0,5	0,5				0,3	0,7			
	M		1				0,6	0,4				0,6	0,4			
	S		0,9	0,1			0,4	0,6				0,3	0,7			
Σ	R		0,425	0,575			0,675	0,325				0,475	0,525			
	M	0,350	0,650				0,600	0,400				0,525	0,475			
	S	0,325	0,650	0,025			0,525	0,475				0,400	0,600			

Tabela 8.20. Ulazni podaci za hidraulične bagere stare osam godine

Analitičari		H1 – 8G					H2 – 8G					H3 – 8G				
		A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
1.	R			0,5	0,5		0,6	0,4				0,5	0,5			
	M	0,3	0,7					0,7	0,3				0,6	0,4		
	S		0,7	0,3				0,6	0,4				0,7	0,3		
2.	R			0,3	0,7			1					0,8	0,2		
	M		0,6	0,4				0,4	0,6				0,6	0,4		
	S		0,3	0,7				0,5	0,5				0,5	0,5		
3.	R			0,7	0,3			0,8	0,2				0,6	0,4		
	M	0,1	0,9					0,5	0,5				0,4	0,6		
	S		0,6	0,4				0,6	0,4				0,6	0,4		
4.	R			0,9	0,1		0,1	0,9					0,7	0,3		
	M		0,5	0,5				0,6	0,4				0,5	0,5		
	S		0,4	0,6				0,5	0,5				0,2	0,8		
Σ	R			0,600	0,400		0,175	0,775	0,050			0,125	0,650	0,225		
	M	0,100	0,675	0,225				0,550	0,450				0,525	0,475		
	S		0,500	0,500				0,550	0,450				0,500	0,500		

Isti model kao i kod dozera i cevopolagača iskorišćen je i za hidraulične bagere. Metoda AHP iskorišćena je i za definisanje uticaja indikatora R, M, S na raspoloživost. Tabela 8.21 sadrži ulazne podatke za AHP metodu.

Tabela 8.21. Ulazni podaci za AHP metodu za sve hidraulične bagere

	H1-3 – 2G			H1-5G			H2-5G			H3-5G			H1-8G			H2-8G			H3-8G		
	R	M	S	R	M	S	R	M	S	R	M	S	R	M	S	R	M	S	R	M	S
R	1	2	2	1	3	2	1	1/2	1	1	1/2	1/2	1	1	1	1	1	2	1	1	1/2
M	1/2	1	1	1/3	1	1/2	2	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1/2
S	1/2	1	1	1/2	2	1	1	1/2	1	2	1	1	1	1	1	1/2	1/2	1	2	2	1

Vrednosti koje su izračunate primenom AHP metodom prikazane su u tabeli 8.22.

Tabela 8.22. Rang indikatora raspoloživosti hidrauličnih bagera

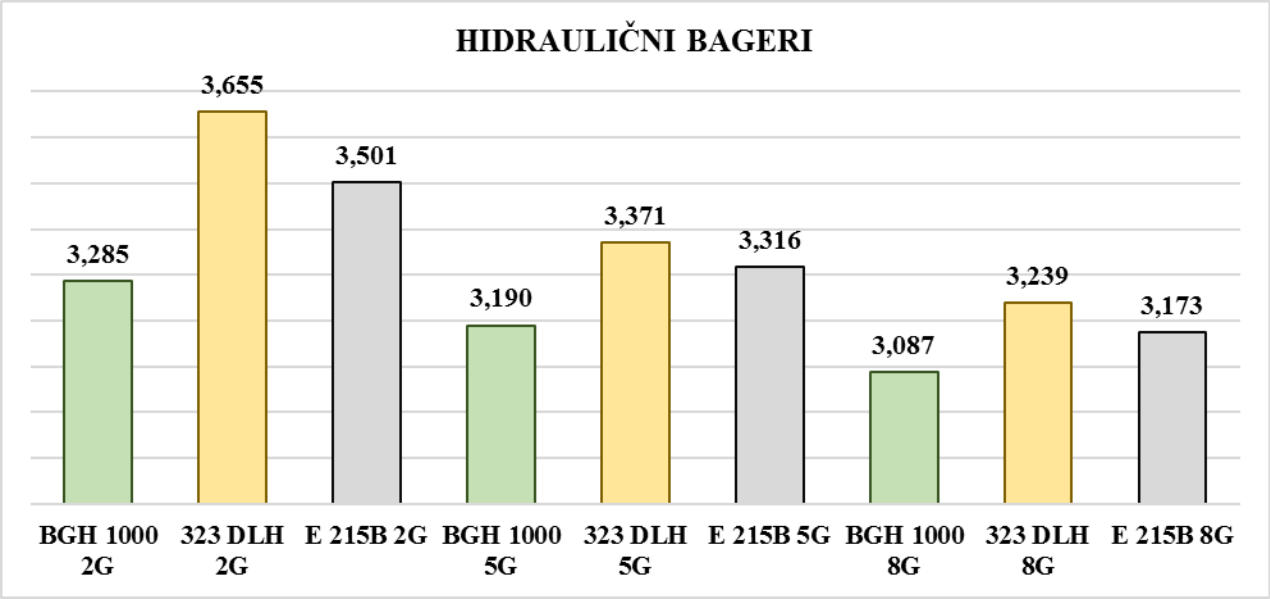
	H1-3 – 2G	H1-5G	H2-5G	H3-5G	H1-8G	H2-8G	H3-8G
W_R	0,500	0,540	0,250	0,200	0,333	0,400	0,250
W_M	0,250	0,163	0,500	0,400	0,333	0,400	0,250
W_S	0,250	0,297	0,250	0,400	0,333	0,200	0,500
λ_{max}	3	3,0073	3	3	3	3	3
CI	0	0,00365	0	0	0	0	0
CR	0	0,00702	0	0	0	0	0

Sledeći korak u modelu podrazumeva formiranje MAX-MIN kompozicije, potom sledi identifikacija pa defazifikacija izračunatih vrednosti. Krajnji rezultati ekspertske ocene i rang cevopolagača dati su u narednoj tabeli,

Tabela 8.23. Rezultati primene AHP-Fazi modela za izračunavanje raspoloživosti hidrauličnih bagera

	OCENE						RANG
	A	B	C	D	E		
H1-2G	0,254788	0,260567	0,162420	0,159806	0,162420	**3,285**	3
H2-2G	0,451250	0,153593	0,128534	0,132128	0,134495	**3,655**	1
H3-2G	0,379394	0,183550	0,143914	0,145215	0,147926	**3,501**	2
H1-5G	0,162953	0,302949	0,240557	0,147996	0,145545	**3,190**	3
H2-5G	0,307822	0,222440	0,159305	0,153724	0,156708	**3,371**	1
H3-5G	0,253532	0,273263	0,164873	0,152749	0,155583	**3,316**	2
H1-8G	0,133241	0,237577	0,345779	0,150162	0,133241	**3,087**	3
H2-8G	0,141492	0,361844	0,224528	0,138052	0,134084	**3,239**	1
H3-8G	0,138530	0,310872	0,269641	0,147435	0,133522	**3,173**	2

Na slici 8.41 dat je grafički prikaz krajnjih rezultata.



Slika 8.41. Grafički prikaz rezultata primene Fazi-AHP metode za hidraulične bagere

8.4.2. Model za procenu ekonomskog životnog veka mašine sa maksimalnim profitom t_1

- **Za mašinu *14 Oktobar* BGH 1000**

Funkcija kumulativnih troškova održavanja *f(t)* za mašinu ***14 Oktobar*** **BGH 1000** :

$$f(t) = -0,11158 + 11,019 \cdot t - 7,68451 \cdot t^2 + 8,06969 \cdot t^3 - 2,56725 \cdot t^4 + 0,38589 \cdot t^5 - 0,02813 \cdot t^6 + 0,00080 \cdot t^7$$

Funkcija ukupnih troškova eksploatacije mašine ***14 Oktobar*** **BGH 1000**, ako je za nabavnu vrednost usvojena vrednost mašine od K = 150 000 €:

$$F(t) = K + f(t) - K \cdot \varphi(t) = 149,888 - 150 \cdot (1 - 0,2372 \cdot t^{0,5}) + 11,019 \cdot t - 7,68451 \cdot t^2 + 8,06969 \cdot t^3 - 2,56725 \cdot t^4 + 0,38589 \cdot t^5 - 0,02813 \cdot t^6 + 0,00080 \cdot t^7$$

gde je faktor otpisa vrednosti mašine: $\varphi(t) = 1–0{,}2372 \cdot t^{0{,}5}$.

Funkcija prosečnih troškova $\bar{F}(t)$:

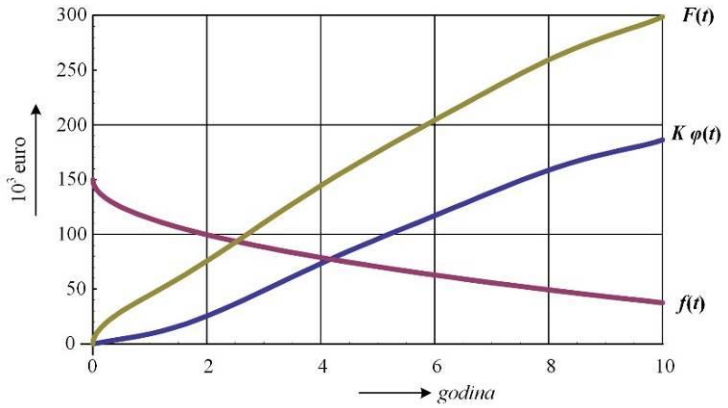
$$\bar{F}(t) = \frac{1}{t} \cdot K \cdot \left[1 - \varphi(t)\right] + \frac{1}{t} \cdot f(t) = 11{,}0197 - \frac{0{,}11158}{t} + \frac{35{,}6}{t^{0{,}5}} - 7{,}68451 \cdot t + 8{,}06969 \cdot t^2 - 2{,}56725 \cdot t^3 + 0{,}38589 \cdot t^4 - 0{,}028127 \cdot t^5 + 0{,}00080 \cdot t^6$$

Dužina vremena eksploatacije $[0, t_1]$ za koju su minimalni prosečni troškovi dobija se preko prvog izvoda funkcije $\bar{F}(t)$ kao:

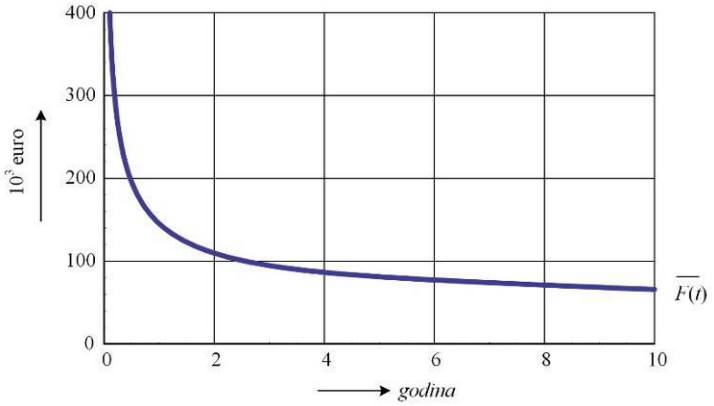
$$\frac{d\bar{F}(t)}{dt} = \frac{1}{t^2} \cdot \left\{ \left[-K \cdot \varphi'(t) + f' \cdot (t) \right] \cdot t - K \cdot \left[1 - \varphi(t)\right] - f \cdot (t) \right\} = 0$$

$$-7{,}68451 + \frac{0{,}11158}{t^2} - \frac{17{,}79}{t^{1{,}5}} + 16{,}139 \cdot t - 7{,}70176 \cdot t^2 + 1{,}54356 \cdot t^3 - 0{,}14063 \cdot t^4 + 0{,}00479 \cdot t^5 = 0$$

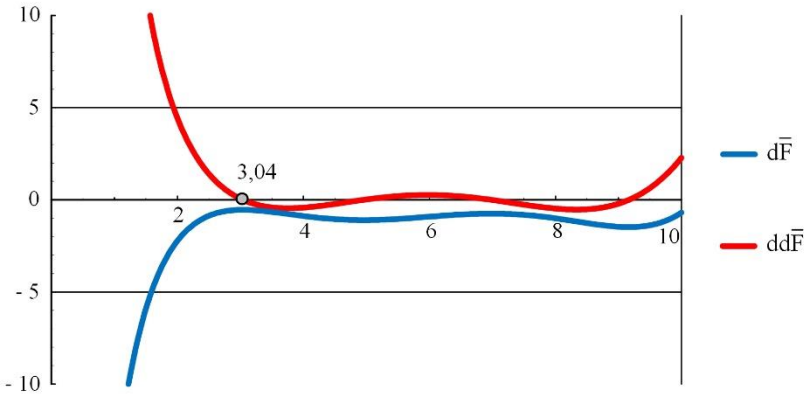
$$\rightarrow t_1 = 3{,}041 \ \ godina$$



Slika 8.42. Funkcija kumulativnih troškova održavanja f(t) i ukupnih troškova eksploatacije za mašinu 14 Oktobar BGH 1000



Slika 8.43. Funkcija prosečnih troškova za mašinu 14 Oktobar BGH 1000



Slika 8.44. Prvi i drugi izvod funkcije prosečnih troškova za mašinu 14 Oktobar BGH 1000

- **Za mašinu *Caterpillar* 323 DLH**

Funkcija kumulativnih troškova održavanja *f(t)* za mašinu ***Caterpillar* 323 DLH**:

$$f(t) = -0{,}13121 + 14{,}808 \cdot t - 7{,}51027 \cdot t^2 + 9{,}91585 \cdot t^3 - 2{,}86821 \cdot t^4 + 0{,}31980 \cdot t^5 - 0{,}01247 \cdot t^6$$

Funkcija ukupnih troškova eksploatacije mašine ***Caterpillar* 323 DLH**, ako je za nabavnu vrednost usvojena vrednost mašine od K = 180 000 €:

$$F(t) = K + f(t) - K \cdot \varphi(t) = 189{,}868 - 190 \cdot (1 - 0{,}2372 \cdot t^{0{,}5}) + 14{,}808 \cdot t - 7{,}51207 \cdot t^2 + 9{,}91585 \cdot t^3 - 2{,}86821 \cdot t^4 + 0{,}31980 \cdot t^5 - 0{,}01247 \cdot t^6$$

gde je faktor otpisa vrednosti mašine: $\varphi(t) = 1 - 0{,}2372 \cdot t^{0{,}5}$.

Funkcija prosečnih troškova $\bar{F}(t)$:

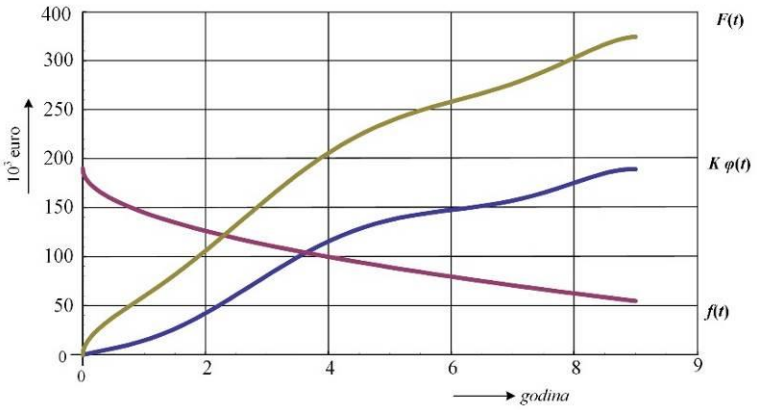
$$\bar{F}(t) = \frac{1}{t} \cdot K \cdot [1 - \varphi(t)] + \frac{1}{t} \cdot f(t) = 14{,}8076 - \frac{0{,}13211}{t} + \frac{45{,}1}{t^{0{,}5}} - 7{,}51207 \cdot t + 9{,}91585 \cdot t^2 - 2{,}86821 \cdot t^3 + 0{,}31980 \cdot t^4 - 0{,}01247 \cdot t^5$$

Dužina vremena eksploatacije $[0, t_1]$ za koju su minimalni prosečni troškovi dobija se preko prvog izvoda funkcije $\bar{F}(t)$ kao:

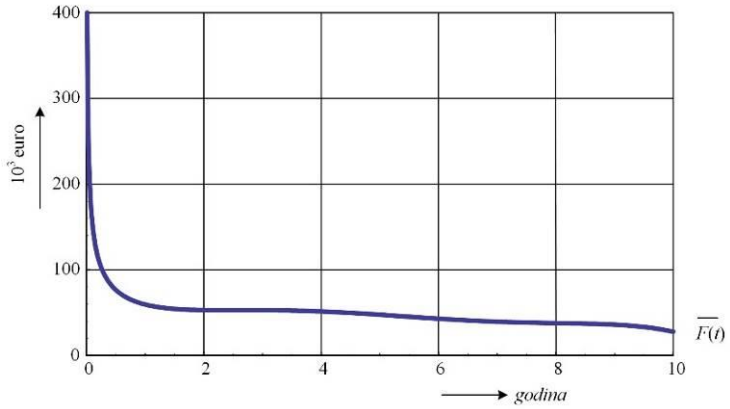
$$\frac{d\bar{F}(t)}{dt} = \frac{1}{t^2} \cdot \left\{ \left[-K \cdot \varphi'(t) + f'(t) \right] \cdot t - K \cdot [1 - \varphi(t)] - f(t) \right\} = 0$$

$$-7{,}51207 + \frac{0{,}13211}{t^2} - \frac{22{,}53}{t^{1{,}5}} + 19{,}832 \cdot t - 8{,}60462 \cdot t^2 + 1{,}27922 \cdot t^3 - 0{,}06238 \cdot t^4 = 0$$

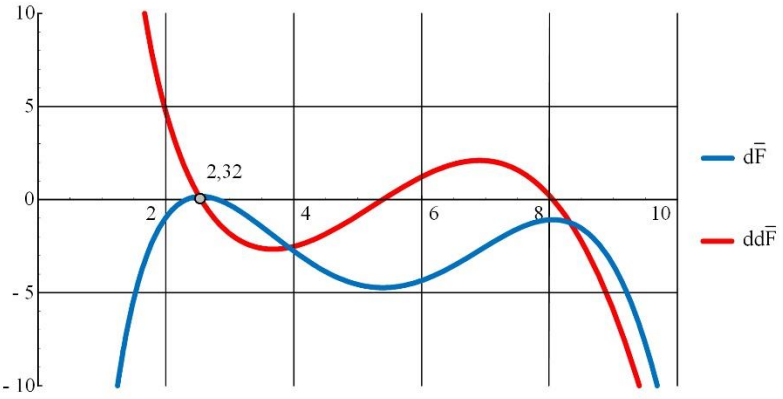
$$\rightarrow t_1 = 2{,}321 \ \ godina$$



Slika 8.45. Funkcija kumulativnih troškova održavanja f(t) i ukupnih troškova eksploatacije za mašinu Caterpillar 323 DLH



Slika 8.46. Funkcija prosečnih troškova za mašinu Caterpillar 323 DLH



Slika 8.47. Prvi i drugi izvod funkcije prosečnih troškova za mašinu Caterpillar 323 DLH

- **Za mašinu *New Holland* E 215B**

Funkcija kumulativnih troškova održavanja *f(t)* za mašinu ***New Holland* E 215B**:

$$f(t) = -0,12944 + 17,657 \cdot t - 18,9988 \cdot t^2 + 14,396 \cdot t^3 - 3,76111 \cdot t^4 + 0,44919 \cdot t^5 - 0,02465 \cdot t^6 + 0,00048 \cdot t^7$$

Funkcija ukupnih troškova eksploatacije mašine ***New Holland* E 215B**, ako je za nabavnu vrednost usvojena vrednost mašine od K = 150 000 €:

$$F(t) = K + f(t) - K \cdot \varphi(t) = 149,871 - 150 \cdot (1 - 0,2372 \cdot t^{0,5}) + 17,657 \cdot t - 18,9988 \cdot t^2 + 14,396 \cdot t^3$$
$$- 3,76111 \cdot t^4 + 0,44919 \cdot t^5 - 0,02465 \cdot t^6 + 0,00048 \cdot t^7$$

gde je faktor otpisa vrednosti mašine: $\varphi(t) = 1 - 0,2372 \cdot t^{0,5}$.

Funkcija prosečnih troškova $\bar{F}(t)$:

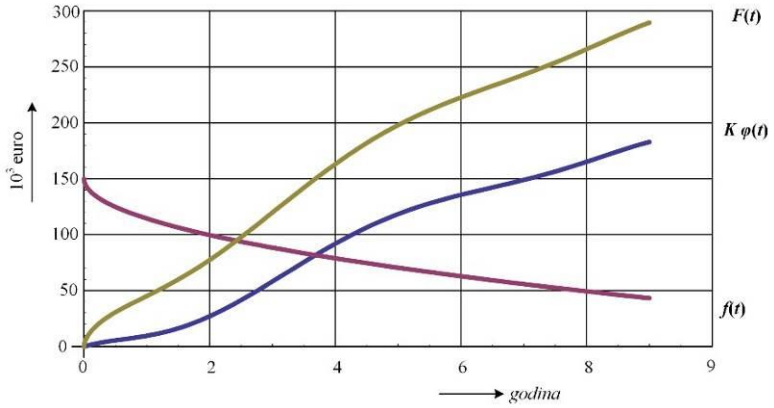
$$\bar{F}(t) = \frac{1}{t} \cdot K \cdot [1 - \varphi(t)] + \frac{1}{t} \cdot f(t) = 17,657 - \frac{0,12944}{t} + \frac{35,58}{t^{0,5}} - 18,9988 \cdot t + 14,396 \cdot t^2 - 3,76111 \cdot t^3$$
$$+ 0,44919 \cdot t^4 - 0,02465 \cdot t^5 + 0,00048 \cdot t^6$$

Dužina vremena eksploatacije [0, t_1] za koju su minimalni prosečni troškovi dobija se preko prvog izvoda funkcije $\bar{F}(t)$ kao:

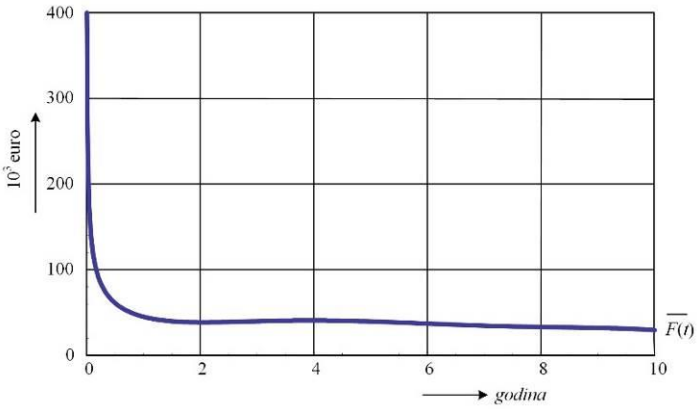
$$\frac{d\bar{F}(t)}{dt} = \frac{1}{t^2} \cdot \left\{ \left[-K \cdot \varphi'(t) + f' \cdot (t) \right] \cdot t - K \cdot [1 - \varphi(t)] - f \cdot (t) \right\} = 0$$

$$-18,9988 + \frac{0,12944}{t^2} - \frac{17,79}{t^{1,5}} + 28,7919 \cdot t - 11,2833 \cdot t^2 + 1,79675 \cdot t^3 - 0,12327 \cdot t^4 + 0,00291 \cdot t^5 = 0$$

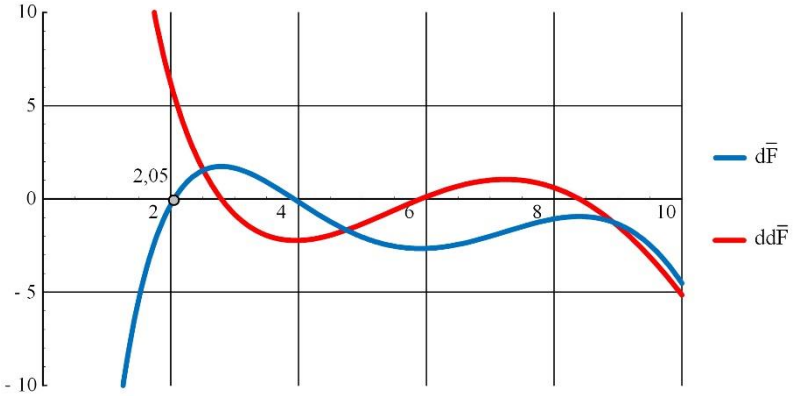
$$\rightarrow t_1 = 2,053 \ \ godina$$



Slika 8.48. Funkcija kumulativnih troškova održavanja f(t) i ukupnih troškova eksploatacije za mašinu New Holland E 215B



Slika 8.49. Funkcija prosečnih troškova za mašinu New Holland E 215B



Slika 8.50. Prvi i drugi izvod funkcije prosečnih troškova za mašinu New Holland E 215B

8.4.3. Model za procenu ekonomskog života mašina t_2 - Analiza troškova izabranih mašina na bazi empirijskih podataka

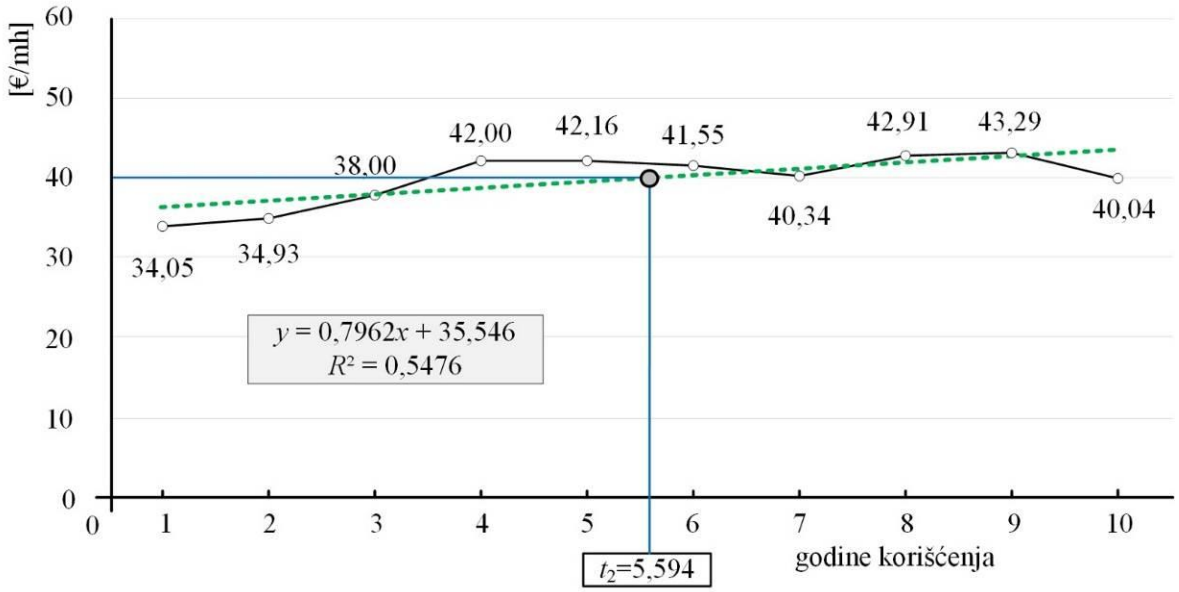
- **Za mašinu *14 Oktobar* BGH 1000**

Jednačina aproksimativne linije za mašinu *14 Oktobar* BGH 1000, na osnovu dijagrama sa slike 8.51, prikazana je predstojećoj jednačini,

$$y = 0,7962 \cdot x + 35,546$$

gde je $y = 40$ [€/mh] i $x = t_2$, sledi:

$$40 = 0,7962 \cdot t_2 + 35,546 \quad \rightarrow \quad 5,594 \; godina$$



Slika 8.51. Trend rasta empirijske funkcije troškova i postupak određivanja kritične tačke za slučaj 40 = f (t_2), za mašinu 14 Oktobar BGH1000

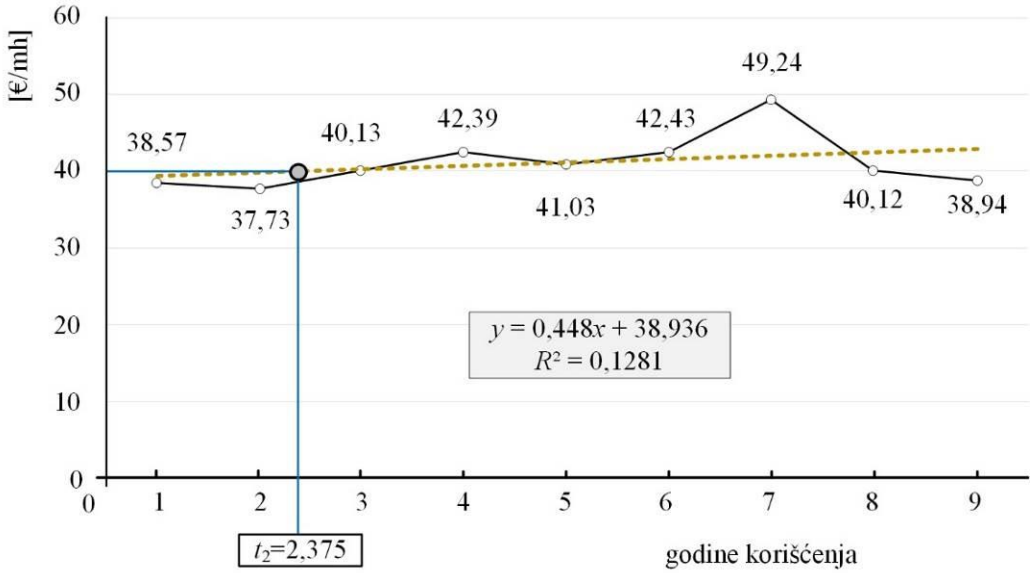
- **Za mašinu *Caterpillar* 323 DLH**

Jednačina aproksimativne linije za mašinu *Caterpillar* 323 DLH, na osnovu dijagrama sa slike 8.52, prikazana je predstojećoj jednačini,

$$y = 0,448 \cdot x + 38,936$$

gde je $y = 40$ [€/mh] i $x = t_2$, sledi:

$$40 = 0,448 \cdot t_2 + 38,936 \quad \rightarrow \quad 2,375 \; godina$$



Slika 8.52. Trend rasta empirijske funkcije troškova i postupak određivanja kritične tačke za slučaj 40 = f (t_2), za mašinu Caterpillar 323 DLH

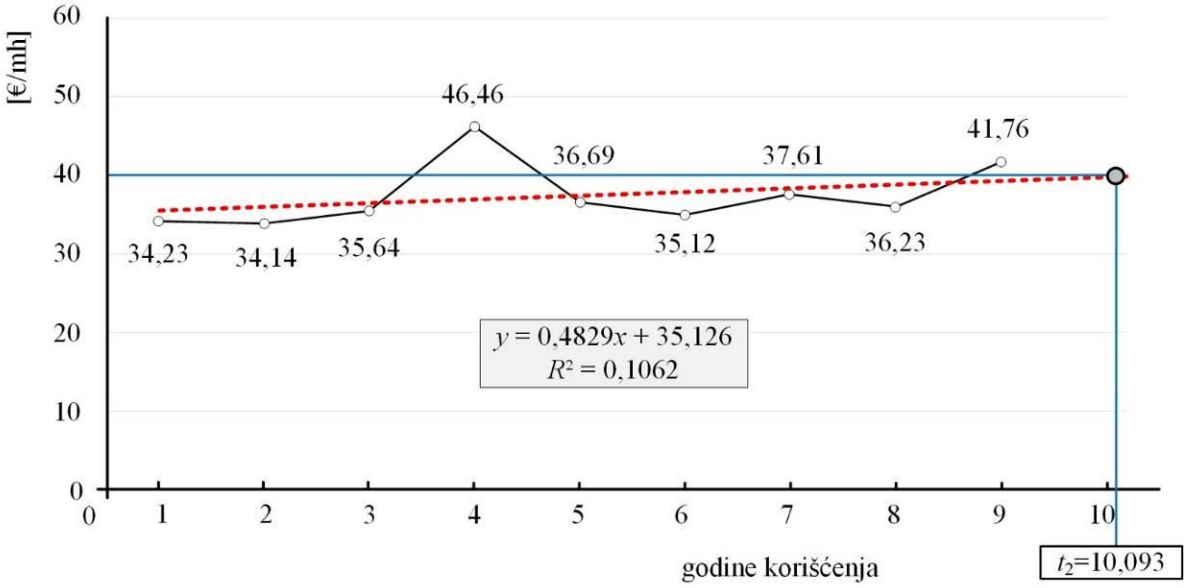
- **Za mašinu *New Holland* E 215B**

Jednačina aproksimativne linije za mašinu *New Holland* E 215B, na osnovu dijagrama sa slike 8.53, prikazana je predstojećoj jednačini,

$$y = 0,4829 \cdot x + 35,126$$

gde je y = 40 [€/mh] i $x = t_2$, sledi:

$$40 = 0,4829 \cdot t_2 + 35,126 \quad \rightarrow \quad 10,093 \; godina$$



Slika 8.53. Trend rasta empirijske funkcije troškova i postupak određivanja kritične tačke za slučaj 40 = f (t_2), za mašinu New Holland E 215B

8.4.4. Model za procenu životnog veka mašina t_3 - Analiza raspoloživosti izabranih mašina na bazi empirijskih podataka

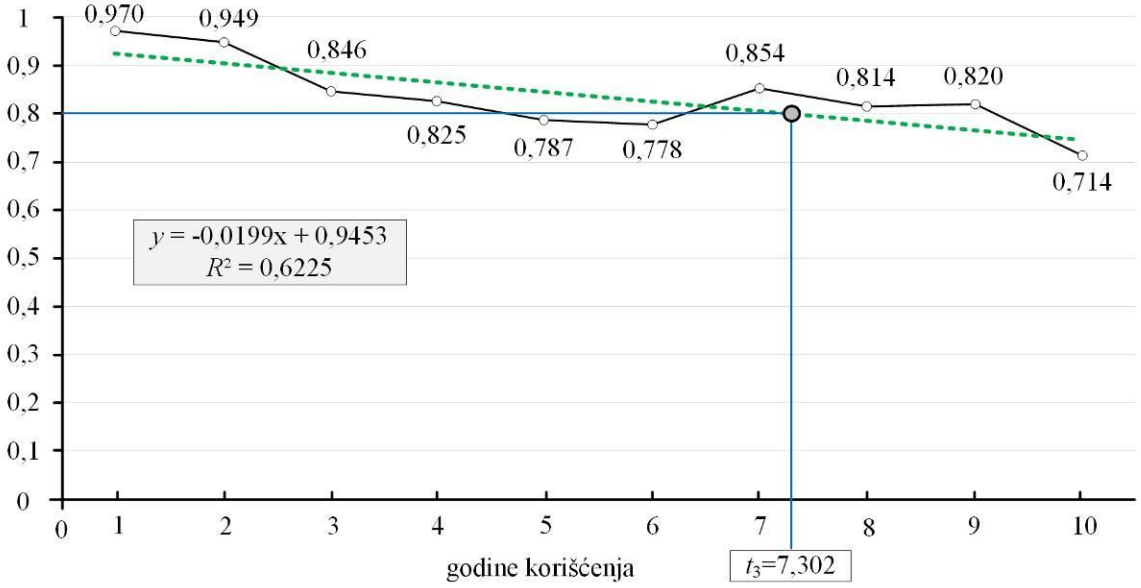
- **Za mašinu *14 Oktobar* BGH 1000**

Sa dijagrama prikazanog na slici 8.54, može se uočiti da je za mašinu *14 Oktobar* BGH vrednost t_3 pre kraja prve godine rada. Jednačina aproksimativne linije je:

$$y = -0,0199 \cdot x + 0,9453$$

gde je y = 0,8 i $x = t_3$, pa sledi:

$$0,8 = -0,0199 \cdot t_3 + 0,9453 \quad \rightarrow \quad t_3 = 7,302 \; godina$$



Slika 8.54. Trend pada empirijske funkcije raspoloživosti postupak određivanja kritične tačke za slučaj 0,8 = f (t_3) za mašinu 14 Oktobar BGH 1000

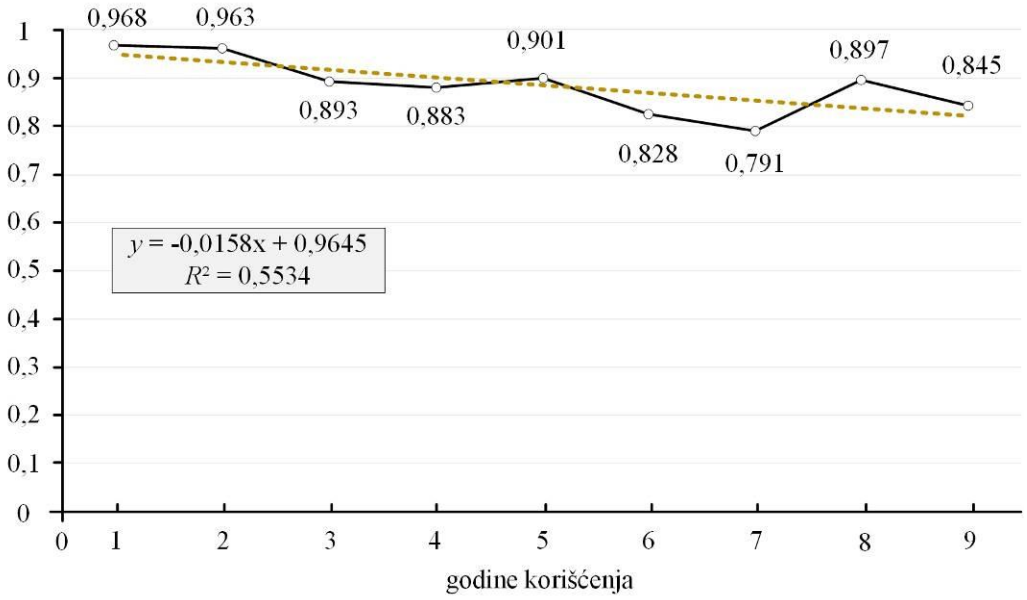
- **Za mašinu *Caterpillar* 323 DLH**

Sa dijagrama prikazanog na slici 8.55, može se uočiti da je za mašinu *Caterpillar* 323 DLH vrednost t_3 nakon desete godine rada. Jednačina aproksimativne linije je:

$$y = -0,0158 \cdot x + 0,9645$$

gde je $y = 0,8$ i $x = t_3$, pa sledi:

$$0,8 = -0,0158 \cdot t_3 + 0,9645 \quad \rightarrow \quad t_3 = 10,411\ godina$$



Slika 8.55. Trend pada empirijske funkcije raspoloživosti postupak određivanja kritične tačke za slučaj 0,8 = f (t_3) za mašinu Caterpillar 323 DLH

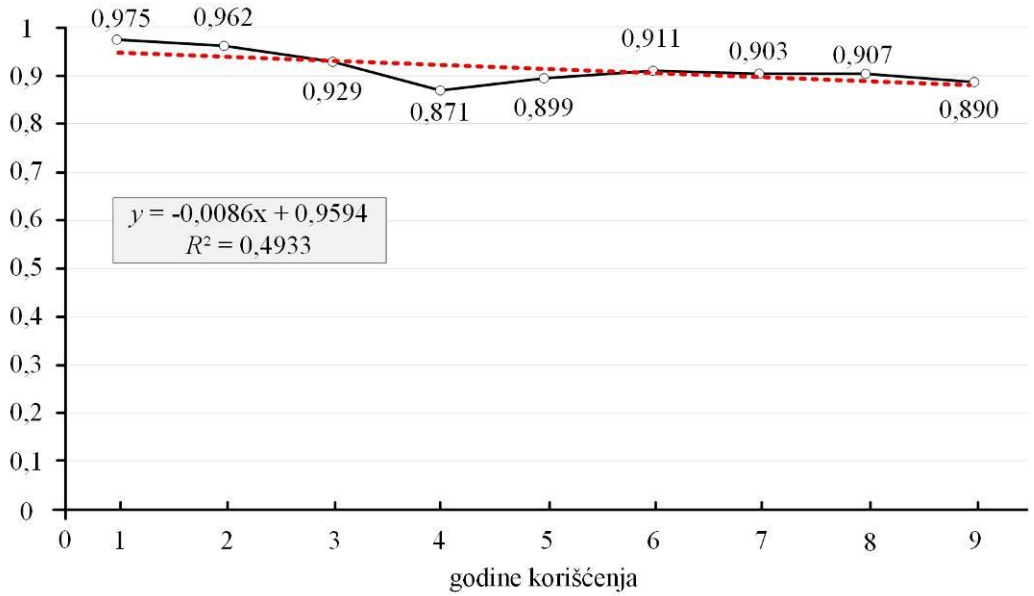
- **Za mašinu *New Holland* E 215B**

Sa dijagrama prikazanog na slici 8.56, može se uočiti da je za mašinu *New Holland* E 215 B da raspoloživost tokom perioda posmatranja nije bila ispod 0.8 uz malu vrednost R^2

$$y = -0,0086 \cdot x + 0,9594$$

gde je $y = 0,8$ i $x = t_3$, pa sledi:

$$0,8 = -0,0086 \cdot t_3 + 0,9594 \quad \rightarrow \quad t_3 = 18,535 \; godina$$



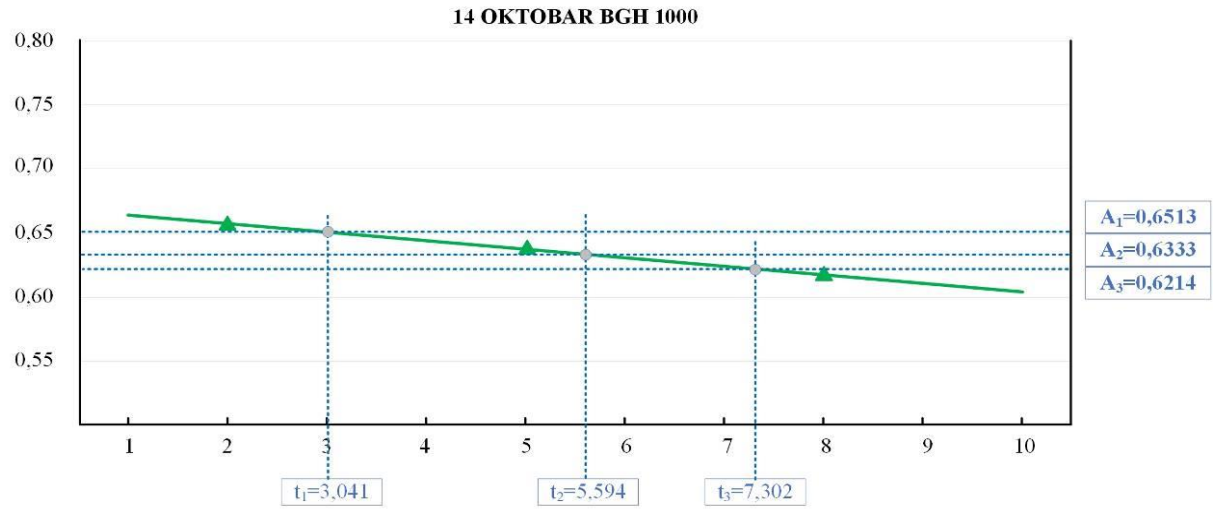
Slika 8.56. Trend pada empirijske funkcije raspoloživosti postupak određivanja kritične tačke za slučaj 0,8 = f (t_3) za mašinu New Holland E 215B

8.3.5. Sintezna analiza za hidraulične bagere

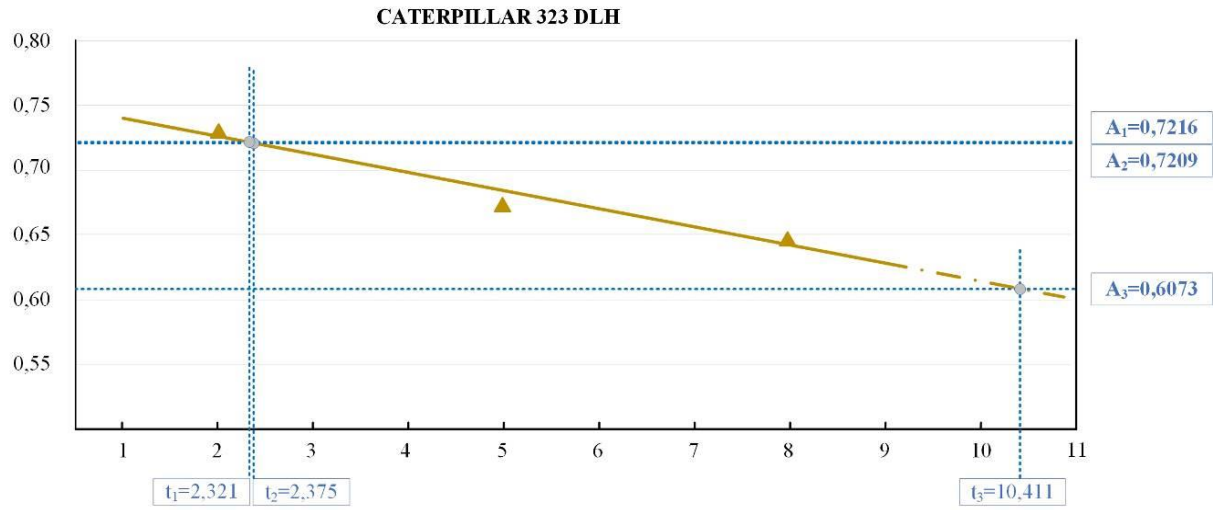
Kod hidrauličnih bagera, kao i kod dozera i cevopolagača primenjena je ista metoda, pri čemu su tri karakteristična vremena definisana kao tačke: ekonomski vek sa maksimalnim profitnom mašine (t_1), ekonomski vek mašine sa profitom (t_2) i tehnički vek mašine (t_3). Formirani su uređeni parovi ekspertske procene raspoloživosti i odgovarajućih vremena. Vremena t_1, t_2 i t_3 su preslikana na dijagrame (slike 8.54-8.56.) i predstavljaju ekspertske ocene raspoloživost. Numeričke vrednosti koje se očitane prikazane su u tabeli 8.24. Vreme t_1 je približno za sve bagere i iznosi 2 – 3 godine. Vreme t_2 se kreće u rasponu od 2,3 do 10 godina, a vreme t_3 ima najveći raspon i kreće se od 7,3 do 18,5 godina.

Tabela 8.24. Rezultati sintezne analize za hidraulične bagere

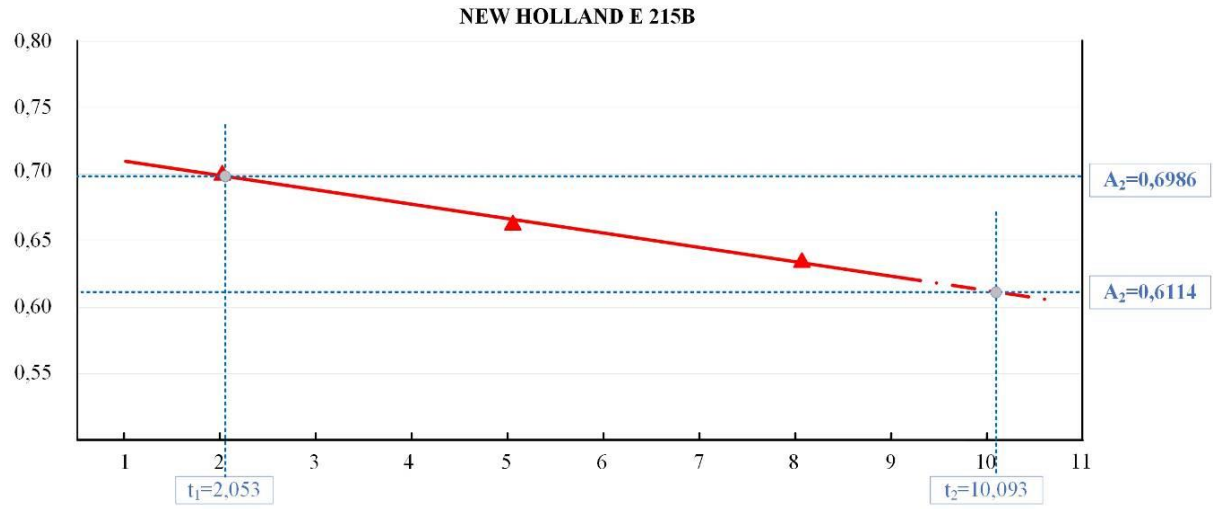
	t_1	A_1	t_2	A_2	t_3	A_3
Mašina 1 14 Oktobar BGH 1000	3,041	0,6513	5,594	0,6333	7,302	0,6214
Mašina 2 Caterpillar 323 DLH	2,321	0,7216	2,375	0,7209	10,411	0,6073
Mašina 3 New Holland E215B	2,053	0,6986	10,093	0,6114	18,535	/



Slika 8.57. Postupak aproksimacije ekspertskih ocena raspoloživosti sa kritičnim vrednostima t_1, t_2 i t_3 za mašinu 14 Oktobar BGH 1000

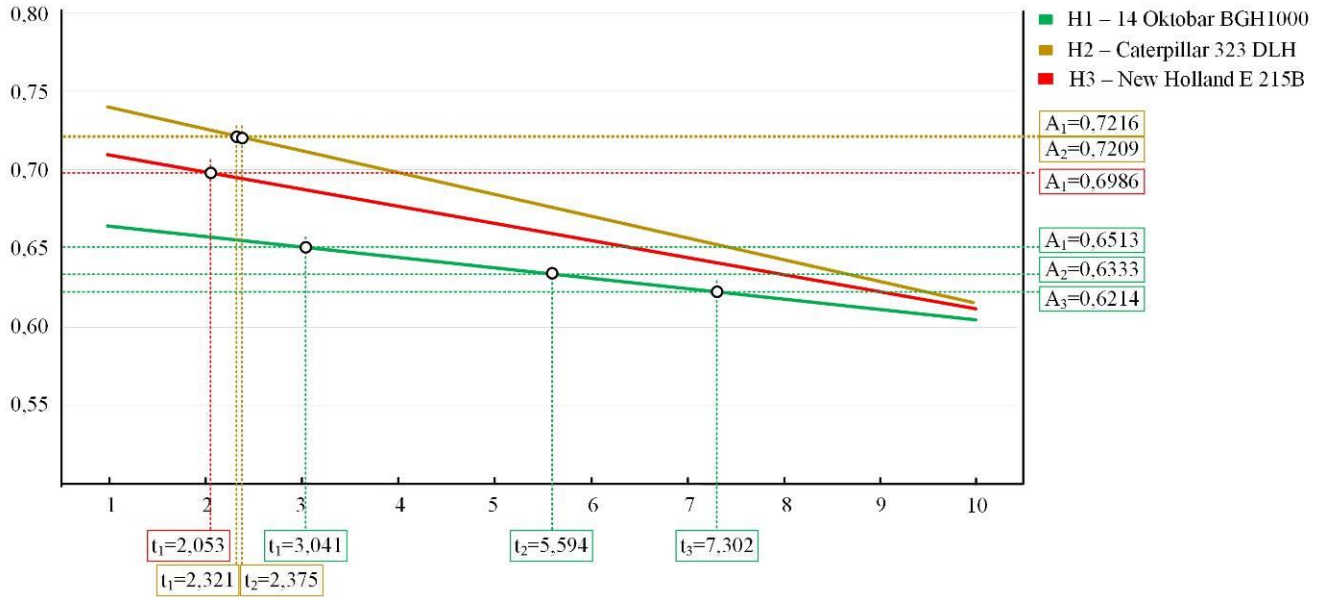


Slika 8.58. Postupak aproksimacije ekspertskih ocena raspoloživosti sa kritičnim vrednostima t_1, t_2 i t_3 za mašinu Caterpillar 323 DLH



Slika 8.59. Postupak aproksimacije ekspertskih ocena raspoloživosti sa kritičnim vrednostima t_1, t_2 i t_3 za mašinu New Holland

Uporedni prikaz krajnjih rezultata za sve hidraulične bagere dat je na slici 8.60.



Slika 8.60 Uporedni prikaz aproksimativnih pravih linija raspoloživosti sa referentnim vrednostima A_i (t_i) za sve analizirane hidraulične bagere

Prikazana metoda za hidraulične bagere, kao i za cevopolagače nije dala zadovoljavajuće rezultate. Osnovni razlog je niska korelacija zavisnosti raspoloživosti i godina eksploatacije (koja se kreće 0,5 – 0,6), kao i korelacija između troškova eksploatacije i godina rada (koja se kreće 0,1 – 0,5). Takođe, interna cena zakupa hidrauličnih bagera (40 €/mh) je niska. Bageri BGH 1000 koji su se pokazali kao veoma loši u eksploataciji i koji imaju veoma niske ocene od strane eksperata, ostvarila je približne rezultate sa daleko kvalitetnijim bagerima tipa *Caterpillar 323 DLH.*

9. ZAKLJUČAK

Zadovoljavajuće vremensko i kapacitetno iskorišćenje osnovne rudarske mehanizacije na površinskim kopovima moguće je samo pod pretpostavkom da su obezbeđeni optimalni uslovi za njen rad, a za to je neophodno blagovremeno i kvalitetno izvršavanje svih pomoćnih radova. Da bi se ovo ostvarilo potrebno je da površinski kop raspolaže odgovarajućom pomoćnom mehanizacijom kako po vrsti, broju, tako i tehničkim karakteristikama. Izostanak ili neodgovarajući tip ili broj ove mehanizacije, tj. loše i neblagovremeno izvođenje pomoćnih radova u znatnoj meri otežava rad osnovne mehanizacije, utiče na pad vremenskog i kapacitetnog iskorišćenja sistema na eksploataciji, a često dovodi u pitanje i ukupnu bezbednost mehanizacije i ljudstva koje istu opslužuje.

Površinski kopovi lignita zahtevaju mašine pomoćne mehanizacije koje su raspoložive, koje pouzdano izvršavaju svoju funkciju i da su pri tome troškovi tokom eksploatacije niski. Na odluku o nabavci ne utiče samo investicioni trošak nabavke mašine pomoćne mehanizacije (koji je različit za različite proizvođače u istoj klasi), već isto tako i očekivani operativni troškovi mašina tokom njihovog veka trajanja na površinskom kopu (koji su daleko manji kod kvalitetnijih mašina), kao i kakav je trend pada raspoloživosti tokom godina eksploatacije. Korisnici mašina pomoćne mehanizacije moraju održavati balans između proizvodnje i troškova radi postizanja optimalne, željene proizvodnje pri najnižim mogućim troškovima, a to podrazumeva pravilan izbor ali i upravljanje životnim vekom, posebno pri određivanju optimalnog vremena zamene tih mašina.

Veliki broj mašina kao i veliki troškovi eksploatacije, i posebno imajući u vidu relativno kratki vek eksploatacije imperativno nameću potrebu za optimizacijom upravljanja životnim vekom ovih mašina. Budući da se ovde radi o mašinama proizvedenim u velikim serijama, najvažniji period tokom životnog ciklusa ovih mašina je period eksploatacije i održavanja. Ovaj period se naziva i životni vek mašine, koji sa svoje strane ima definisane vremenske intervale počev od probnog rada, preko redovne eksploatacije pa do otpisa. U okviru eksploatacije mogu se jasno navesti periodi koji su definisani kao „ekonomski životni vek sa maksimalnim profitom“, „ekonomski životni vek sa profitom“ i „fizički“ životni vek. Između njih su velike razlike u troškovima eksploatacije i dobiti koja se ostvaruje radom ove mehanizacije.

Najvažniji zadaci u životnom veku mašina pomoćne mehanizacije su:

- da se u fazi nabavke mašina izvrši njen optimalni izbor kako po vrsti tako i po tehničkim karakteristikama a koja će najbolje odgovoriti konkretnim uslovima radne sredine na površinskim kopovima lignita,
- da se u fazi eksploatacije mašina optimalno koristi, i da se odredi optimalno vreme njihove zamene kako se stanovišta troškova eksploatacije i održavanja, tako i sa stanovišta zamene kada su koeficijenti raspoloživosti i kvara još uvek u optimalnim granicama
- da se mašina otpiše (proda) kada je rezidualna vrednost velika.

Svi navedeni zahtevi podrazumevaju sveobuhvatnu analizu rada i troškova eksploatacije i održavanja, kao i praćenje osnovnih pokazatelja rada kako bi se izvršila optimizacija životnog veka pomoćne mehanizacije na površinskim kopovima lignita. Međutim, u pogonskim uslovima često je praćenje troškova neažurno i nije moguće dobiti tačne troškove, a mašine se koriste do kraja fizičkog životnog veka, pri čemu troškovi rastu daleko preko granice zadatih troškova, a sa druge strane raspoloživost opada, što za posledicu ima veliki broj mašina na stanju a nedovoljni broj mašina u radu.

Istraživanja parametara životnog veka ukazuju na visok značaj fenomena raspoloživosti i troškova u cilju definisanja navedenih perioda u eksploataciji mašina. U tom smislu sprovedena su istraživanja sa

teorijskog i praktičnog aspekta sa ciljem da se formira jedinstveni model koji se može koristiti za određivanje pozicije mašine u odnosu na profitni, ekonomski ili fizički vek mašine. Na ovaj način se pruža dodatna sigurnost u procesu upravljanja pomoćnom mehanizacijom ali i celim kopom. Odnosno, obezbeđuje se da površinski kop uvek raspolaže sa dovoljnim brojem pouzdanih mašina a da pri tome troškovi njihovog rada ne prelaze očekivanu vrednost.

Razvoj modela sadrži dva interaktivna modula, koji kao izlaz daju ocenu raspoloživosti dobijenu na bazi ekspertskog modela, i trendove raspoloživosti i troškova dobijene na bazi statističke obrade odgovarajućih ulaznih podataka. Ekspertski model, koji je ovde izvorno i originalno razvijen predstalja rezultat fazi logičkog zaključivanja sa korekcijom ishoda dobijenog rangiranjem (AHP metoda). Verifikacija ekspertskog modela izvršena je korelacijom sa rezultatima dobijenim statističkom analizom vremenske slike stanja.

Ideja primene Fazi teorije u ovom istraživanju je da se parcijalni indikatori raspoloživosti tretiraju kao ulazni podaci, odnosno fazi relacije, a da se njihova sinteza (optimizacija) obavi jednom od metoda fazi kompozicije. Pri tome se daje mogućnost korekcije rezultata kompozicije uvođenjem rangiranja ulaznih podataka. Osnovni razlog uvođenja rangiranja uticaja pouzdanosti, pogodnosti održavanja i nivoa podrške na raspoloživost je dobijanje mogućnosti primene ekspertskog modela za više različitih mašina i više različitih radnih okruženja.

Koncept istraživanja je takav da razvijeni model ima dva ishoda: optimizacija parametara životnog veka prema kriterijumu raspoloživosti i donošenje odluke vezano na izbor i preostale mogućnosti mašine prema kriterijumu troškova. Pri tome se uvode pojmovi: optimalno vreme zamene mašine, kritična raspoloživost i minimalni troškovi. Razvijeni algoritam upravljanja životnim vekom mašina pomoćne mehanizacije na osnovu ekspertske procene koja je aproksimirana na osnovu empirijskih podataka, pruža mogućnost definisanja vremenskih koordinata (prelomnih tačaka) u odnosu na preostale mogućnosti mašine. Pri tome svaka prelomna tačka u sebi sadrži informaciju o aktuelnoj raspoloživosti i troškovima i njihovom trendu.

Da bi se uradila navedena analiza neophodno je dugogodišnje praćenje rada mašina, što često nije izvodljivo. Ekspertski model sa druge strane ne zahteva opsežno prikupljanje podataka, već samo popunjavanje upitnika, što je njegova suštinska prednost. Nedostatak je što za razliku od empirijskih modela gde analitičkim pristupom možemo da odredimo u kom periodu životnog veka se nalazi mašina, ovde to nije slučaj. Zbog toga se formiraju uređeni parovi ekspertske procene raspoloživosti i odgovarajućih vremena vezanih za kritične vrednosti troškova i raspoloživosti a koje su dobijene egzaktnom empirijskom analizom. Na ovaj način, rekurzivnim postupkom se dobija mogućnost određivanja kritičnih vrednosti raspoloživosti i troškova ekspertskim modelom.

Na bazi izloženih postavki, formiran je algoritam ocene mašina pomoćne mehanizacije u odnosu na preostale mogućnosti prema kriterijumu raspoloživosti i troškova, uvažavajući sve specifičnosti mašina pomoćne mehanizacije na površinskim kopovima lignita. U tom smislu može da se postavi rezime zaključka:

- Raspoloživost predstavlja meru upotrebnog kvaliteta tehničkog sistema
- Troškovi predstavljaju neodvojivi deo stepena zadovoljenja korisnika datog tehničkog sistema njegovim upotrebnim kvalitetom.
- Najpotpunija ocena upotrebnog kvaliteta mašine, konkretno pomoćne mehanizacije na površinskim kopovima lignita, daje se ocenom raspoloživosti i nivoa troškova.

- Parcijalni pokazatelji raspoloživosti su: pouzdanost, pogodnost održavanja i nivo podrške (logistika).
- Struktura raspoloživosti je takva da jednoznačno može da se opiše i empirijskim i ekspertskim modelima.
- Postoji jasna koherentnost između trenda pada raspoloživosti i porasta troškova sa vremenom.
- Ekspertski modeli koji se zasnivaju na fazi logičkom zaključivanju i rangiranju relacija koje čine fazi kompoziciju, u potpunosti mogu da apsorbuju ulazne podatke sa različitih mašina i različitih radnih okruženja.
- Životni vek u osnovi ima tri vremenska intervala: $\mathbf{t_1}$ zaključno sa ekonomskim vekom sa maksimalnim profitom, $\mathbf{t_2}$ zaključno sa ekonomskim vekom sa profitom, $\mathbf{t_3}$ zaključno sa fizičkim vekom kada raspoloživost pada ispod 80%.
- Mašine mogu da nastave da rade i nakon tog vremena (što je na žalost i praksa koja je prikazana u glavi 1), ali pri tome raspoloživost je niska, što uslovljava da ili kop mora da raspolaže nepotrebno velikim brojem mašina na stanju ili ih neće biti dovoljno u radu,
- Drugi slučaj je da mašine rade sa troškovima koji su iznad onih koji se postižu ako bi se mašine iznajmile što je ekonomski neprihvatljivo i uslovljava povećanje cene proizvodnje.
- Ekonomski vek sa maksimalnim profitom i ekonomski vek sa profitom zavisi od: investicione vrednosti, kvaliteta mašina, troškova održavanja, ostvarenih moto časova rada, načina korišćenja i održavanja.
- Fizički vek zavisi od raspoloživosti mašine, kvaliteta mašina, načina korišćenja i održavanja

U disertaciji je razvijen novi aplikativni model koji na bazi ekspertski procenjene pouzdanosti, pogodnosti održavanja i logističke podrške daje ocenu preostalih mogućnosti mašine. Pri tome kriterijum ocene zavisi od troškova koje mašina indukuje i aktuelne raspoloživosti. Model je fleksibilan i adaptivan u zavisnosti od funkcionalnih i konstrukcijskih karakteristika mašine, načina na koji se vrši preventivno i korektivno održavanje i karakteristika radnog okruženja.

Predloženi model je verifikovan kroz studiju slučaja koja je urađena za najvažnije pomoćne mašine dozere, cevopolagače i hidraulične bagere.

Analiza urađena za dozere gde postoji odlična korelacija između raspoloživosti i vremena rada (oko 0,9), kao i troškova, daje dobre rezultate i na osnovu ekspertskog modela jednostavno i brzo može se odrediti optimalno vreme zamene mašina. Za dobijenu vrednost ekspertske analize od 0,65-0,66 za sve dozere dobija se vrednost ekonomskog veka sa maksimalnim profitom t_1 (koja je različita za različite vrste dozera i kreće su od 1,6 do 3,5 godina). Za dobijenu vrednost 0,62-0,63 dobija se vreme ekonomskog veka sa profitom t_2, koje je takođe različito za različite vrste dozera i kreće se od 2,5 do 7,7 godina, odnosno za 0,58-0,60 vreme fizičkog veka kada raspoloživost pada ispod 80% t_3, pri čemu je ovo vreme u rasponu od 6,5 do 12 godina. Sprovedena ispitivanja ukazala su na značaj pravilnog izbora mašina pre svega sa aspekta troškova životnog veka tako i raspoloživosti. Dok su dozeri *Caterpillar* D8R i *Liebherr* PR 752/754 ostvarili približno iste rezultate u optimalna vremena zamene, dozeri tipa *Dressta* TD25M su se pokazali daleko lošije i optimalna vremena zamene u odnosu na prethodne dozere je kraće za 50 i više procenata.

Sa druge strane analiza urađena za cevopolagače i hidraulične bagere gde je loša korelacija između raspoloživosti i vremena rada, kao i troškova i vremena rada, model ne daje dobre rezultate. Razlozi su raznovrsni, počev od toga da ove mašine u proseku rade oko 1500 časova godišnje u odnosu na dozere koji rade preko 3000 časova godišnje, načina korišćenja, opterećenja prilikom eksploatacije, pa do problema sa nabavkom rezervnih delova, načina vođenja vremena rada i zastoja i dr.

Rezultati rada ovog istraživanja mogu se primeniti na površinskim kopovima lignita u cilju upravljanja životnim vekom pomoćne mehanizacije, odnosno brzog i efikasnog određivanja optimalnog vremena zamene i optimalnog izbora mašina pomoćne mehanizacije. Na osnovu predloženog modela mogu se doneti zaključci o vrsti mašina koji najbolje odgovaraju konkretnim uslovima radne sredine kao i izboru najboljeg proizvođača opreme bez obzira na početna investiciona ulaganja, jer se tokom životnog veka različite mašine različito ponašaju u funkciji pada raspoloživosti i rasta troškova.

Primenjena metoda može unaprediti upravljanje životnim vekom i znatno uticati na smanjenje operativnih troškova kao i smanjenje inventarskog parka mašina odnosno manja investiciona ulaganja. Takođe, može se odrediti kakav je trend pada raspoloživosti i koja mašina je najekonomičnija.

10. LITERATURA

[1] Ignjatović, D., Jovančić. P., Tanasijević,M. i saradnici. (2018). *Optimizacija organizacije, sredstava i troškova pomoćne mehanizacije u cilju povećanja stepena iskorišćenja jalovinskih i ugljenih sistema na površinskim kopovima EPS-a* – Studija. Rudarsko-geološki fakultet, Beograd.

[2] Ignjatović, D. (2001). *Izbor pomoćne mehanizacije za površinske kopove lignita* – Monografija. Zadužbina Andrejević, Beograd.

[3] Ignjatović,D. (1997). *Metodologija izbora pomoćne mehanizacije za površinske kopove lignita* - Doktorska disertacija. Rudarsko-geološki fakultet, Beograd.

[4] Đurić, R. (2016). *Koncept raspoloživosti pri definisanju efikasnosnog održavanja pomoćne mehanizacije na površinskim kopovima* – Doktorska disertacija. Beograd: Rudarsko-geološki fakultet.

[5] Barkhuiyzen, W. F. (2002). *Life Cycle Management for Mining Machinery* – Doctoral dissertation atUniversity of Johannesburg.

[6] Douglas, J. (1975). *Construction equipment policy*. New York: McGraw – Hill.

[7] Gransberg, D. D., & O'Connor, E. P. (2015). *Major Equipment Life-cycle Cost Analysis.* Minnesota Department of Transportation, Research Services & Library.

[8] Ignjatovic, D., Jovancic, P., Djenadic, S., Jankovic, I., & Ristovic, I. (2019). The Optimization of Auxiliary Machinery in Open-cast Lignite Mines: A Case Study of Bulldozers. VII International Symposium of Mining and Environmental Protection. Vrdnik, Serbia, pp. 286-292.

[9] Tanasijević, M. (2007). *Sigurnost funkcionisanja mehaničkih komponenti rotornog bagera* – Doktorska disertacija. Beograd: Rudarsko-geološki fakultet.

[10] Polovina, D. (2011). *Metode utvrđivanja preostalih mogućnosti rotornih bagera u eksploataciji i revitalizaciji* – Doktorksa disertacija. Beograd: Rudarsko-geološki fakultet.

[11] Polovina, D., Ivkovic, S., Ignjatovic, D., & Tanasijevic, M. (2010). Remaining operational capabilities evaluation of bucket wheeel excavator by applying expert assessment method with empirical correction factor. *Structural Integrity and Life – Integritet i vek konstrukcija, 10*(1), 31 – 41.

[12] Živojinović, R. (2001). *Matematičko-modelski pristupi determinacije optimalnog eksploatacionog veka opreme na rudnicima* – Doktorska disertacija. Beograd: Rudarsko-geološki fakultet.

[13] Đurić, R. (2016). *Koncept raspoloživosti pri definisanju efikasnosti održavanja pomoćne mehanizacije na površinskim kopovima* – Doktorska disertacija. Beograd: Rudarsko-geološki fakultet.

[14] Savković, S. (2007). *Upravljanje životnim vekom rudarske mehanizacije na površinskim kopovima* – Magistarski rad. Beograd: Rudarsko-geološki fakultet.

[15] Nurock, D., & Porteous, C. (2008). Methodology to determine the optimal replacement age of mobile mining machines. In *Third International Platinum Conference 'Platinum Tranformation*, 297 – 306.

[16] Jankovic, I., Djenadic, S., Ignjatovic, D., Jovancic , P., Subaranovic, T., & Ristovic, I. (2019). Multi-Criteria Approach for Selecting Optimal Dozer Type in Open-Cast Coal Mining. *Energies, 12*(12), 2245.

[17] Djenadic, S., Ignjatovic, D., Tanasijevic, M., Bugaric, U., Jankovic, I., & Subaranovic, T. (2019). Development of the Availability Concept by Using Fuzzy Theory with AHP Correction, a Case Study: Bulldozers in the Open-Pit Lignite Mine. *Energies, 12*(21), 4044.

[18] Đenadic, S., Jovančić, P., Ignjatović, D., Miletić, F., & Janković, I. (2019). Analiza primene višekriterijumskih metoda u optimizaciji izbora hidrauličnih bagera na površinskim kopovima. *Tehnika, 70*(3), 369-377.

[19] Sharma, A., & Bawa, R. K. (2017). A multilevel hybrid approach for selection of agile development method using AHP, PROMETHEE and FUZZY LOGIC. *Structural Integrity and Life, 17*(1), 44 – 54.

[20] Barringer, P. (2001). *How to justify Equipment Improvements Using Life Cycle Cost and Reliability Principles – Reliability Engineering Principles*, Barringer & Associates, Humble.

[21] Vujić, S., Stanojević, R., Tanasković, T., Zajić, B., Živojinović, R., & Maksimović, S. (2004). *Metode za optimizaciju eksploatacionog veka rudarskih mašina*. Inženjerska komora SCG, Elektroprivreda Srbija, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd.

[22] Gavrilov, L., & Gavrilov, N. (2005). *Reliability Theory of Aging and Longevity*. Center on Aging NORC and the University of Chicago, Illinois, USA.

[23] Taylor, J. S. (1923). A Statistical Theory of Depreciation. *Journal of the American Statistical Association - ASA*, 144, 1010 – 1023.

[24] Hotelling, H. (1925). A general Mathematical Theory of Depreciation. *Journal of the American Statistical Association - ASA*, 151, 340 – 353.

[25] Preinreich, G. A. D. (1940). The Economic Life of Industrial Equipment. *Econometrica, 8*(1), 12 – 43.

[26] Terborgh, G. W. (1949). *Dynamic Equipment Policy*. New York: McGraw – Hill.

[27] Dhilon, B. S. (2008). *Mining Equipment, Reliabity, Maintainability and Safety*. Springer, London.

[28] Jovičić, S., & Todorović, J. (1994). Upotrebni kvalitet i sigurnost funkcionisanja. *Vojnotehnički glasnik*, 42(3-4), 208-214.

[29] Ivković, S. (1997). *Otkazi elemenata rudarskih mašina*, Beograd: Rudarsko-geološki fakultet.

[30] Todorović, J. (1993). *Inžinjerstvo održavanja tehničkih sistema*. Jugoslovensko društvo za motore i vozila, Beograd.

[31] Tanasković, T. (2001). *Održavanje rudarskih mašina*, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd.

[32] Dhillon, B. S. (1999). *Design Reliability: Fundamentals and Applications*. CRC press, Boca Raton, FL

[33] Todorović, J., & Zelenović D. (1990). *Efektivnost sistema u mašinstvu (operativna gotovost, pouzdanost, funkcionalna gotovost).* Naučna knjiga, Beograd.

[34] Tanasijević, M. (2004). *Metodologija definisanja optimalne veze reduktor–pogonski bubanj na tračnim transporterima* - Magistarski rad. Rudarsko-geološki fakultet Beograd.

[35] International Electrotechnical Commission. International standard - Dependability management ISO-IEC 300. http://www.iec.ch/

[36] Avizienis, A., Laprie, J., Randell, B., & Landwehr, C. (2004). Basic concept and taxonomy of dependable and secure computing, *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, 1(1), 11-33.

[37] Avizienis, A., Laprie, J., & Randell, B. (2004). Dependability and its threats - A taxonomy. *IFIP Congress Topical Sessions*, 91-120.

[38] Cai, K. Y. (1996). System failure engineering and fuzzy methodology An introductory overview. *Fuzzy Sets and Systems*, 83(2),113-133.

[39] Miodragovic, R., Tanasijevic, M., Mileusnic, Z., & Jovancic P. (2012). Effectiveness assessment of agricultural machinery based on fuzzy sets theory. *Expert Systems with Applications*, 39(10), 8940–8946.

[40] Ebramhimipour, V., & Suzuki, K. (2006). A synergetic approach for assessing and improving equipment performance in offshore industry based on dependability. *Reliability Engineering and System Safety*, 91(1),10-19.

[41] Ivezic, D., Tanasijevic, M., & Ignjatovic, D. (2008). Fuzzy Approach to Dependability Performance Evaluation. *Quality and Reliability Engineering International*, 24(7), 779-792.

[42] Tanasijevic, M., Ivezic, D., Jovancic, P., Catic, D., & Zlatanovic, D. (2013). Study of Dependability Evaluation for Multi-hierarchical Systems Based on Max–Min Composition. *Quality and Reliability Engineering International*, 29(3), 317-326.

[43] Tanasijevic, M., Ivezic, D., Jovancic, P., Ignjatovic, & D., Bugaric, U. (2013). Dependability assesment of open-pit mines equpment – study on the bases of fuzzy algebra rules. *Eksploatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability*,15(1), 66–74.

[44] Caterpillar (2018). *Performance Handbook 48*, Peoria, Illinois, USA

[45] Jaafri, A., & Matteffy, V. K. (1990). Realistic Model for Equipment Replacement, *Journal of Construction Engineering and Management*, 116(3), 514 – 532.

[46] Drinkwater, R. W., & Hastings, N.A. (1967). An economic replacement model. *Journal of the Operational Research Society, 18*(2), 121 – 138.

[47] Hasting, N. A. J (1969). The repair limit replacement method. *Journal of the Operational Research Society, 20*(3), 337 – 349.

[48] Mahon, B. H., & Baily, R. J. M. (1975). A proposed improved replacement policy for army vehicles, *Journal of Operational Research Society, 26*(3), 477 – 491.

[49] Vorster, M. C., & De la Garza, J. M. (1990). Consequental equipment costs associated with lac of availability and downtime, *Journal of Construction Engineering and Management, 116*(4), 656 – 669.

[49] Mitchell, Z. W. (1997). Economic Decisions in Equipment Management. *Unpublished article. Virginia Tech, Blacksburg,VA.*

[50] Keen, P. (1987). Decision Support System: the next decade. *Decision Support System, 3*(3), 253-265.

[51] Harris, K. (2014). *Introduction to Decision Making.* VirtualSalt.

[52] Opricović, S., & Tzeng, G. (2004). Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis fo VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research, 156*(2), 445-455.

[53] Saaty, T. L. (1988). What is the analytic hierarchy process?. *Mathematical models for decision support*, Springer, Berlin, Heidelberg, 109-121.

[54] de FSM Russo, R., & Camanho, R. (2015). Criteria in AHP: a systematic review of literature. *Procedia Computer Science*, 55, 1123-1132.

[55] Milisavljević, V. M., Medenica, D. M., Čokorilo, V. B., & Ristović, I. M. (2016). New approach to equipment quality evaluation method with distinct functions. *Termal Science, 20*(2), 743-752.

[56] Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytical hierarchy process. *International journal of service science, 1*(1) 89-98.

[57] Klutho, S. (2013). Mathematical Decision Making: An Overview of the Analytic Hierarchy Process. *Washington: Whitman College*.

[58] Hudej, M. M. (2014). *Multivarijabilni modeli upravljanja u rudarstvu* – Doktorska disertacija. Rudarsko-geološki fakultet, Beograd.

[59] Brunelli, M. (2014). *Introducing to the analytical hierarchy process.* Springer International Publishing.

[60] Aleksi, I., & Hocenski, Ž. (2009). *Primena Expert-Choice Alata i AHP metode za Odabir Virtex-5 FPGA čipa.* Elaborat, Elektrotehnički fakultet, Sveučilište u Osjek.

[61] Nikolić, I., & Borović, S. (1996). *Višekriterijumska optimizacija.* Beograd: CVŠ VJ.

[62] Stevanović, D., Lekić, M., Krzanović, D., & Ristović, I. (2018). Application of MCDA in selection of different mining methods and solutions. *Advances in Science and Technology Research Journal, 12*,171-180.

[63] Saaty, T.L. (2000). *Fundamentals of decision making and priority theory with the analytic hierarchy process* (Vol. 6). RWS publications: Pittsburgh, PA, USA.

[64] Subašić, P. (1997). *Fazi logika i neuronske mreže*. Tehnička knjiga, Beograd.

[65] Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, *8*(3), 338-353.

[66] Miljanović, I. (2008). *Fazi logičko upravljanje procesima u pripremi mineralnih sirovina* – Monografija. Beograd: Rudarsko-geološki fakultet.

[67] Teodorovic, D., Kikuchi, S. (1991). *Uvod u teoriju fuzzy skupova i primene u saobraćaju*. Saobraćajni fakultet, Univerziteta u Beogradu.

[68] Kaufmann, A., Gupta, M. M. (1985.). *Fuzzy mathematical models in engineering and management science*. Elsevier Science Publishers, New York.

[69] Panić, G. (2013). *Razvoj namenskog sistema fazi logike za primenu u sistemima za upravljanje XML dokumentima* – Doktorska distertacija. Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet.

[70] Teodorovic, D., Vukadinovic, K. (1998). *Traffic Control and Transport Planning A Fuzzy Sets and Neural Networks Approach*, Kluwer Academic Publishers Boston.

[71] Fuller, R. (1998). *Fuzzy reasoning and fuzzy optimization* (No. 9). Abo: Turku Centre for Computer Science.

[72] Klir, G. J., Yuan, B. (1995). Fuzzy sets and fuzzy logic: theory and applications. *Upper Saddle River*, 563.

[73] Saaty, T.L. Decision Making: The Analytical Hierarchy Process; Mc-Graw-Hill: New York, NY, USA, 1980.

[74] Sazdanović, S. (1980). *Elementi operacionih istraživanja*. Naučna knjiga, Beograd.

[75] Paunović, R. & Omorjan, R. (2009). *Osnovi inženjerske statistike*. Tehnološki fakultet, Novi Sad.

[76] Ying-Ming, W., Kwai-Sang, C., Gary KaKwai, P., Jian-Bo, Y. (2009). Risk evaluation in failure mode and effects analysis using fuzzy weighted geometric mean. *Expert Systems with Applications*, 36, 1195‑1207.

BIOGRAFIJA

Ivan Janković rođen je 4. septembra 1979. godine u Beogradu. Osnovnu i srednju školu završio je u Lazarevcu.

Na Rudarsko – geološki fakultet upisao se školske 2000/2001 godine. Smer za površinsku eksploataciju završava 2006. godine, sa prosečnom ocenom 7,8 i ocenom 10 na diplomskom radu, čime stiče zvanje diplomiranog inženjera rudarstva, smer za površinsku eksploataciju. Nakon diplomiranja, 2006. godine zapošljava se na Rudarsko – geološkom fakultetu kao stručni saradnik na Katedri za površinsku eksploataciju.

U 2013. godini stupa u radni odnos u Sektoru za geologiju i rudarstvo Ministarstva prirodnih resursa, rudarstva i prostornog planiranja, a od 2014. godine Ministarstva rudarstva i energetike. U novembru 2017. godine stupa na funkciju pomoćnika ministra Ministarstva rudarstva i energetike za oblast geologije i rudarstva.

Od decembra 2017. godine vrši funkciju predsednika komisije Saveza inženjera i tehničara Srbije za polaganje stručnih ispita u oblasti rudarstva. Član je radne grupe Ministarstva rudarstva i energetike za utvrđivanje i overu rezervi čvrstih mineralnih sirovina i nafte i gasa na teritoriji republike Srbije, radne grupe za sigurnost snabdevanja, Vladine Radne grupe za implementaciju projekta "Jadar". Bio je član radne grupe za praćenje realizacije izrade predloga Uredbe kojom se utvrđuje Program ostvarivanja Strategije razvoja energetike Republike Srbije do 2025. godine sa projekcijama do 2030. godine za period 2017. do 2023. godine. Od 2018. do 2020. godine, obavljao je funkciju direktora SATREPS projekta *Research on the integration system of spatial environment analysis and advanced metal recovery to ensure sustainable resources development*.

Od 2006. godine učestvovao je na tri naučno istraživačka projekta, šest tehničkih rešenja, izradio je i učestvovao u izradi velikog broja projekata, studija i elaborata iz oblasti površinske eksploatacije ležišta mineralnih sirovina. Takođe, objavio je 18 naučnih radova saopštenih u celini, štampanih u zbornicima radova sa skupova od međunarodnog značaja i 5 radova u časopisima od međunarodnog značaja od čega su 2 rada objavljena u časopisima koji se nalaze na ECST listi.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Ivan V. Janković

Број индекса R 704/12

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

OPTIMIZACIJA KONCEPTA ŽIVOTNOG VEKA POMOĆNE MEHANIZACIJE NA POVRŠINSKIM KOPOVIMA LIGNITA

- 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

Име и презиме аутора Ivan V. Janković

Број индекса R 704/12

Студијски програм Rudarsko inženjerstvo

Наслов рада

OPTIMIZACIJA KONCEPTA ŽIVOTNOG VEKA POMOĆNE MEHANIZACIJE NA POVRŠINSKIM KOPOVIMA LIGNITA

Ментор prof. dr Dragan Ignjatović

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

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

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

Потпис аутора

У Београду, _____ _____

Изјава о коришћењу

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

OPTIMIZACIJA KONCEPTA ŽIVOTNOG VEKA POMOĆNE MEHANIZACIJE NA POVRŠINSKIM KOPOVIMA LIGNITA

која је моје ауторско дело.

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

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

1. Ауторство (CC BY)

2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)

3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)

5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)

6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.

Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, _____ _____

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

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

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

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

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

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