

Korelaciona analiza indikatora upotrebnog kvaliteta rudarske mehanizacije u funkciji upravljanja životnim vekom

STEVAN P. ĐENADIĆ, Univerzitet u Beogradu,
Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
ORCID: 0000-0003-2835-7151

DRAGAN M. IGNJATOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,
Rudarsko-geološki fakultet Beograd
ORCID: 0000-0002-8941-4108

MILOŠ LJ. TANASIJEVIĆ, Univerzitet u Beogradu,
Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
ORCID: 0000-0002-9629-1513

UGLJEŠA S. BUGARIĆ, Univerzitet u Beogradu,
Mašinski fakultet, Beograd
ORCID: 0000-0003-2459-2656

ŽARKO LJ. ALEKSIĆ, Elektroprivreda Srbije,
Rudarski basen Kolubara, Lazarevac

Originalni naučni rad
UDC: 622.23.05:658.581
DOI: 10.5937/tehnika2603241D

Upravljanje životnim vekom rudarske mehanizacije predstavlja stalan inženjerski izazov. Upotrebni kvalitet mehanizacije, odnosno sposobnost mašine da u realnim eksploatacionim uslovima kontinuirano ispunjava projektovane zadatke, predstavlja osnovni pokazatelj njenog trenutnog stanja i preostalih eksploatacionih mogućnosti. Na osnovu toga, definisanje indikatora upotrebnog kvaliteta predstavlja preduslov za efikasno upravljanje životnim vekom opreme. Osnovni indikatori upotrebnog kvaliteta su raspoloživost, pouzdanost, produktivnost, efikasnost i ekonomičnost, dok se za pomoćnu rudarsku mehanizaciju oni mogu definisati kroz raspoloživost i troškove. U ovom radu, razvijen je pristup zasnovan na korelacionoj analizi ova dva indikatora. Analiza je sprovedena na dozerima, kao najzastupljenijoj pomoćnoj rudarskoj mehanizaciji. Korišćeni su istorijski podaci o troškovima, vremenu rada i zastojima. Na osnovu dobijenih rezultata definisani su trendovi raspoloživosti i troškova u funkciji vremena. Doprinos rada ogleda se u formiranju funkcionalne zavisnosti između troškova i raspoloživosti, čime se unapređuje pristup upravljanju životnim vekom rudarske opreme.

Ključne reči: rudarstvo, mehanizacija, upotrebni kvalitet, raspoloživost, troškovi

1. UVOD

Radne operacije u rudarstvu karakteriše visok stepen kompleksnosti procesa. Za dobijanje sirovina, poluproizvoda i proizvoda iz rudarstva neophodno je multidisciplinarno učešće različitih inženjerskih disciplina i aktivnosti. U svakodnevnom radu učestvuje veliki broj ljudi različitih struka, kao i različita rudarska mehanizacija, koja se razlikuje po vrsti, dime-

nzijama i nameni. S tim u vezi, efikasno funkcionisanje kompleksnog sistema kakav je površinski kop zahteva pravovremeno raspolaganje relevantnim informacijama, adekvatno planiranje procesa i kontinuirano praćenje i analizu ključnih pokazatelja performansi rada.

Eksploatacija mineralnih sirovina vrši se različitim rudarskom mehanizacijom. Prema osnovnoj klasifikaciji, primenjuju se mašine kontinualnog (neprekidnog) ili diskontinualnog (prekidnog) principa rada. U odnosu na tip posla koji obavlja, mehanizacija može biti osnovna ili pomoćna. Osnovna mehanizacija ima zadatak da vrši otkopavanje, transport i odlaganje korisne mineralne sirovine ili otkrivke. Os-

Adresa autora: Stevan Đenadić, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, Đušina 7
e-mail: stevan.djenadic@rgf.bg.ac.rs
Rad primljen: 10.06.2026.
Rad prihvaćen: 15.06.2026.

novna mehanizacija može biti kontinualna ili diskontinualna. Pomoćna mehanizacija treba da obezbedi optimalne uslove rada osnovnoj mehanizaciji i postara se da ti uslovi omoguće bezbedan i siguran rad ljudi. Prema principu rada, ovoj grupi pripadaju diskontinualne mašine [1].

Kontinualna mehanizacija je specifična, velikih dimenzija i izrađuje se prema zahtevu korisnika u skladu sa uslovima rada. Vrednost takve opreme je nekoliko miliona ili desetina miliona evra. Od procesa projektovanja do puštanja u rad potrebno je nekoliko godina (3-5 godina). Životni vek kontinualne mehanizacije često je jednak životnom veku rudnika (30-50 godina). Ukupan broj ovakvih mašina po otkopu nije veliki. U ovu grupu ubrajaju se: rotorni bageri, bageri vedričari, transporteri sa gumenom trakom, odlagači i deponijske mašine. Ove mašine čine tzv. BTO (bager-transporter-odlagač) ili BTD (bager-transporter-deponijska mašina) sisteme.

Diskontinualna mehanizacija je manjih dimenzija i izrađuje se u velikim serijama. Pored rudarstva, primenjuje se i u građevinarstvu i drugim srodnim industrijama. Proizvode se u velikom opsegu snaga, gabarita, dimenzija i specifičnosti. Vrednost mašina je od nekoliko desetina hiljada do miliona evra. Od procesa porudžbine do puštanja u rad potrebno je nekoliko nedelja do nekoliko meseci. Životni vek diskontinualne opreme je 7 do 15 godina. Ukupan broj ovakvih mašina po otkopu je veliki. Neke od ovih mašina su: bager dreglajn, bager kašikar, hidraulični bager, dozeri, kamioni, utovarači, cevopolagači, skreperi, grejderi itd.

U ovom radu biće analizirani dozeri kao reprezentativan primer diskontinualne, pomoćne mehanizacije. Podaci koji se koriste vezani su za površinske kopove uglja, gde su ove mašine angažovane sa ciljem stvaranja optimalnih radnih uslova za osnovnu mehanizaciju. Blagovremenim i kvalitetnim izvršavanjem pomoćnih poslova poboljšava se radno okruženje i redukuju zastoji u proizvodnji. Korišćeni podaci predstavljaju ostvarene dosadašnje rezultate mašina u konkretnim uslovima analiziranog površinskog kopa. Izbor dozera kao reprezentativnog uzorka iz pomoćne mehanizacije motivisan je velikim intenzitetom korišćenja pri čemu je opseg pomoćnih poslova najveći. Dosadašnje analize ukazale su da dozeri generišu 40-45% od ukupnih troškova pomoćne mehanizacije [2].

Analiza u radu referencira se na dva osnovna parametra: troškove i raspoloživost. Analiza troškova ima za cilj njihovu minimalizaciju. Raspoloživost je parametar koji ukazuje na to da li će neka mašina u datom trenutku biti u mogućnosti da izvrši definisan zadatak sa potrebnim kvalitetom [3]. Oba parametra analize smatraju se značajnim indikatorom upotrebnog

kvaliteta tehničkog sistema kao što su rudarske mašine. U radu je prikazan model proračuna oba parametra, praćenje u funkciji starosti mašine kao i zavisnost među parametrima. Način proračuna troškova i raspoloživosti je poznat [1, 3-6]. Slične analize bile su predmet više radova. Inovativnost u ovom radu ogleda se kroz formiranje jednačine koja predstavlja funkcionalnu zavisnost ova dva indikatora. Jednačina treba da prikaže kako se kreću troškovi u funkciji raspoloživosti i obrnuto, kod različitih proizvođača iste opreme.

1.1. Kratak pregled literature

Raznovrsnost diskontinualne pomoćne mehanizacije sa pregledom i opisom svih poslova koji se uspešno izvršavaju dat je u izvorima [1,7]. Sva mehanizacija prikazana je kroz osnovne informacije, konstruktivne sklopove, tehnološke parametre, tehnologiju rada i održavanje i sl.

Rudarsko-geološki fakultet je izradio studiju pod nazivom *Optimizacija organizacije, sredstava i troškova pomoćne mehanizacije u cilju povećanja stepena iskorišćenja jalovinskih i ugljenih sistema na površinskim kopovima EPS-a* [2] koja treba da pomogne u optimalnoj primeni, potrebnom broju i kalkulaciji ostvarenih rezultata pomoćne mehanizacije na površinskim kopovima lignita Elektroprivrede Srbije (u nastavku teksta EPS).

Definisanje osnovnih parametara koji bi trebalo da se prate u radu pomoćne mehanizacije prikazano je u radu [8]. Modeli evaluacije ostvarenih rezultata rada pomoćne mehanizacije prikazani su u radovima [6, 9]. U ovim radovima se kroz hibridni pristup kombinovanja postojećih MCDM (engl. Multi Criteria Decision Making) metoda vrši evaluacija indikatora pomoćne mehanizacije čije su merne veličine po prirodi međusobno neuporedive.

Modeli na bazi fazi logike u oceni rada, upravljanju životnim vekom i održavanju rudarske mehanizacije prikazani su u radovima [5,10-12]. Kroz radove su predstavljeni modeli koji definišu trenutnu efikasnost rada opreme i daju osnovne predikcije optimalnog izbora. U studijama slučaja su analizirani dozeri, hidraulični bageri i cevopolagači. Modeli na bazi fazi logike su doprineli definisanju preporuka na osnovu kojih se smanjuje subjektivnost donosioca odluka u upravljanju životnim vekom opreme.

2. METODE I MATERIJALI

Najveći površinski kop u okviru EPS-a je Rudarski basen Kolubara (u nastavku teksta RB Kolubara). Pored velikog broja osnovnih mašina, na ovom kopu angažovano je preko 250 pomoćnih mašina. Najbrojnije mašine su dozeri kojih ima oko 90, prosečne starosti su oko 6,5 godine. Raznovrsnost pomoćnih

poslova koji se izvršavaju dozerima kao i najveće prosečno vreme angažovanja ukazuju na značaj ovih mašina.

Na osnovu prikupljenih i obrađenih podataka, dozeri se analiziraju kroz dva parametra: troškove i raspoloživost. Troškovi su predstavljeni kao indikator (mera) ekonomskih pokazatelja, dok je raspoloživost indikator (mera) sigurnosti funkcionisanja. Ova dva parametra su najznačajniji faktori pri oceni upotrebnog kvaliteta, životnog veka i preostalih mogućnosti pomoćne mehanizacije.

Analiza ekonomskih pokazatelja odnosno troškova rada dozera biće urađena na osnovu podataka o troškovima prikupljenih za period od prvih 10 godina rada svake od mašine ponaosob. Podaci koji se koriste iz kumulativnog oblika svode se na specifičan oblik prikazivanja u zavisnosti od vremena korišćenja. Svedeni oblik su prosečni troškovi izraženi u jedinici €/mh [4]. Kao takvi definišu se za svaku od predviđenih 10 godina. Pretpostavka je da troškovi imaju rastući trend u funkciji vremena.

Tehnička raspoloživost se kao drugi parametar definiše na osnovu vremena provedenog u radu i vremena provedenog u otkazu za svaku od mašina određenog tipa i proizvođača. Vremena se kumulativno sabiraju prema kriterijumu godine rada. Analizirani period i u ovom slučaju je prvih 10 godina rada mašina [4]. U ovom slučaju je pretpostavka da raspoloživost ima opadajući trend funkciji vremena.

2.1. Predmet analize

Dozeri su mašine koje se koriste prvenstveno za radove na guranju zemljanog materijala. Konkretno, koriste se pri: izradi trasa za transport bagera i odlagača; izradi puteva i rampi; radu na planumu terena za pomeranje transportera; guranju rasutih masa u zonu dejstva rotornog točka; planiranju odloženog materijala na odlagalištima; oblikovanju kosina; čišćenju etaža; guranju ili vuči pogonskih i povratnih stanica ili drugih mašina; proveru nosivosti tla i sl. [1-2, 7].

U radu se analiziraju dozeri iste klase. Prema snazi su u grupi snažnih dozera (190-300 kW). Prema okretnosti pluga su buldozeri. Na osnovu dostupnih podataka analizom je obuhvaćeno 97 dozera različite starosti i proizvođača.

Za svaku mašinu se posmatra period od prvih 10 godina životnog veka. Treba napomenuti da je period korišćenja nekih mašina kraći od predviđenih 10 godina stoga se kod analize ulaznih podataka uvode korektivni koeficijenti. Analizirane su mašine koje su ispunile preduslov od 10 godina korišćenja kao i novije mašine koje rade kraće. U tabeli 1 su prikazani osnovni podaci o analiziranim mašinama.

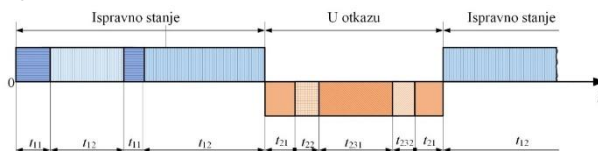
Tabela 1. Osnovni podaci o analiziranim dozerima

Proizvođač, oznaka	Broj	God. nabavke.	Cena, [€]
Liebherr PR752/754	8	2006-2021.	420.000,00
Caterpillar D8R	40	2007-2024.	460.000,00
Dressta TD25M	15	2011-2019.	340.000,00
Shantui SD32W	34	2014-2021.	320.000,00

Napomena: u tabeli su dati samo analizirani dozeri, vrednost cene je procenjena za period analize i ne odražava trenutnu cenu.

2.2. Tehnička raspoloživost

Izračunavanje tehničke raspoloživosti, vrši se na osnovu vremenske slike stanja [13], koja je sačinjena od vremena u radu i vremena u otkazu [4, 11]. Vremenska slika stanja prikazana je na slici 1. 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. [4, 11]. Raspored vremena nije uvek isti.



Slika 1 - Vremenska slika stanja [4, 11, 13]

U ovom radu se ne ulazi u analize uzroka zastoja već se isključivo podaci koriste za proračun raspoloživosti $A(t)$. Parametri iz vremenske slike stanja su pojednostavljeni pa se za proračun raspoloživosti koriste vreme rada (t_{11}), vreme planskih zastoja (t_{21}) i vreme neplanskih zastoja (t_{22}) u sledećoj jednačini:

$$A(t) = \frac{\sum t_{11}}{\sum t_{21}, t_{22}} \quad (1)$$

2.3. Ukupni troškovi

Ukupni troškovi rada dozera sačinjeni su iz tri segmenta: troškova vlasništva, operativnih troškova i troškova radne snage. Referentni oblik vrednosti ukupnog troška dobija se svođenjem vrednosti na trošak po moto sati rada mašine (jedinica je €/mh) [4, 11-12].

Za potrebe definisanja troškova vlasništva neophodni su sledeći podaci: nabavna cena, period amortizacije, trenutni broj godina starosti mašine,

ukupan broj moto sati. Za period amortizacije usvaja se 10 godina. Amortizaciona vrednost na svaki moto sat rada dozera izračunava se deljenjem nabavne cene mašine sa ukupnim moto satima koje je mašina napravila u predviđenom periodu. U slučaju da mašina radi kraće od predviđenog perioda, uvodi se koeficijent amortizacije od 0,1. Jednačina za redukovanje vrednosti nabavne cene (2) je:

$$P' = [1 - (B - N) \cdot a] \cdot P \quad [\text{€}] \quad (2)$$

gde je: P – cena isporuke, [€]; B – definisani period korišćenja dozera, [god]; N – trenutni broj godina korišćenja mašine; a – koeficijent amortizacije.

Nakon toga se redukovana cena deli sa ukupnim moto satima koje je mašina napravila. Osiguranje se računa bez obzira na način finansiranja pri kupovini mašine. Specifični trošak osiguranja prema moto satu rada mašine računa se na sledeći način:

$$I = \frac{P \cdot (N + 1) + S \cdot (N + 1)}{2N} \cdot \frac{i}{C} \cdot 100 \quad \left[\frac{\text{€}}{\text{mh}} \right] \quad (3)$$

gde je: I – trošak osiguranja, [€/mh]; S – vrednost mašine u trenutku zamene (preprodajna vrednost), [€]; C – prosek godišnjeg korišćenja mašine, [mh/god]; i – koeficijent amortizacije.

Operativni troškovi se generišu svakodnevnim radom opreme. Generišu ih troškovi: goriva, maziva, preventivnog i korektivnog održavanja i ostali specifični troškovi. Njihovo svođenje na jedinicu €/mh može se izvršiti na dva načina u zavisnosti od toga kakav je tip podataka dostupan. Kada su poznati ukupni kumulativni troškovi, oni se dele sa ukupnim moto satima koje je mašina u tom periodu napravila. Drugi način se koristi kada je poznata specifična potrošnja materijala/materije mašine na svaki moto sat rada. Tada se ta vrednost množi sa jediničnom cenom materijala/materije. U ovoj analizi se koristi prvi pristup [4].

Način obračunavanja troškova radne snage je specifičan konkretnom primeru. Troškovi se generišu na rukovaoca opreme i na ljudstvo na održavanju. Troškovi rukovaoca definišu se na osnovu ukupnog broja angažovanih ljudi na predmetnoj mašini koji se množi sa bruto platom a potom deli sa napravljenim moto satima rada mašine čime se dobija specifična vrednost. Troškovi održavanja imaju sličan pristup pri čemu se definiše udeo održavanja dozera u odnosu na održavanje svih pomoćnih mašina [4].

Kako bi se dobila što objektivnija srednja vrednost raspodele troškova, izračunate vrednosti se ponderišu moto satima koje su mašine u okviru razmatrane grupe (godine) napravile.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (4)$$

gde je za konkretan primer: x_i – vrednost troškova; w_i – frekvenca (moto sati rada mašine).

2.4. Metoda aproksimacije

Na osnovu prikupljenih podataka za raspoloživost i troškove u poslednjih 10 godina rada, moguće je definisati empirijsku vremensku zavisnost ovih indikatora. Pod pretpostavkom da su očekivani porast troškova i pad raspoloživosti sa vremenom uniformnog karaktera, krenuće se sa linearnom aproksimacijom pomenutih empirijskih u teorijske funkcije. Oblik linearne regresije je najjednostavniji oblik i bazira na metodi najmanjih kvadrata.

Aproksimacija ovakvih podataka vrši se pravom koja uz jednačinu aproksimacije u najboljoj meri reprezentuje razmatrani set podataka [14]. Postupak određivanja tj. pronalaženja funkcije koja dobro aproksimira određeni skup podataka često se naziva „fitovanje krive“ ili definisanje „regresione linije“. Generalno posmatrano, postupak linearne regresije je opšte poznat [14-17] i bazira se na osnovnoj jednačini oblika:

$$y_i = a_0 + a_1 \cdot x_i \quad (5)$$

gde je: x_i – nezavisna promenljiva (godine rada mašine), y_i – zavisna promenljiva (ukupni troškovi ili raspoloživost mašine), a_0 – vrednost u kojoj će aproksimativna linija preseći ordinatnu osu dijagrama, a_1 – nagib prave.

Ako se usvoji da su poznate x_i i y_i dobija se jednačina sa dve nepoznate (a_0 i a_1) [4, 14]. Sledi da se nagib prave računa na sledeći način:

$$a_1 = \frac{\sum (x - \bar{x}) \times (y - \bar{y})}{\sum (x - \bar{x})^2} \quad (6)$$

gde su: $\bar{x}$ i $\bar{y}$ srednje vrednosti x_i i y_i .

Nakon računanja nagiba a_1 prave aproksimacije, dobijena vrednost se vraća u jednačinu (5) gde se umesto poznatih vrednosti x_i , y_i koriste njihove srednje vrednosti za ceo skup $\bar{x}$ i $\bar{y}$. Rešavanjem ove jednačine dolazi se do vrednosti presečna tačka ordinate a_0 [4, 14].

Za potrebe utvrđivanja korelacije među podacima i verodostojnosti korišćenja metode aproksimacije, računa se *Pearson*-ov koeficijent (r_{xy}). Ovaj koeficijent ukazuje na meru veze između dve ili više veličina. Računa se na sledeći način (7) [4, 14]:

$$r_{xy} = \frac{s_{xy}}{s_x s_y} \quad (7)$$

gde je: S_{xy} – kovarijansa (8); S_x – varijansa prve veličine (9); i S_y – varijansa druge veličine (10).

$$s_{xy} = \frac{\sum x_i y_i}{n} - \bar{x} \bar{y} \quad (8)$$

$$s_x = \frac{\sum x_i^2}{n} - \bar{x}^2 \quad (9)$$

$$s_y = \frac{\sum y_i^2}{n} - \bar{y}^2 \quad (10)$$

Pozitivan koeficijent r_{xy} ukazuje na postojanje tendencije da sa rastom vrednosti promenljive x_i raste i njima odgovarajuće vrednosti promenljive y_i . Negativan koeficijent r_{xy} ukazuje suprotnu situaciju, da sa rastom vrednosti promenljive x_i postoji tendencija da njima odgovarajuće vrednosti promenljive y_i opadaju ili obrnuto. Što je tendencija veća (u bilo kom pravcu), to je apsolutna vrednost koeficijenta korelacije bliža vrednosti 1, pa je i linearna veza jača u nekom od pravaca – pozitivnom ili negativnom [14, 17]. Pearson-ov koeficijent se može koristiti samo kod linearne korelacije. U praksi se često koristi koeficijent determinacije R^2 koji je kvadrat *Pearson*-ovog koeficijenta (r_{xy}). U tabeli 2 je dat opseg vrednosti *Pearson*-ovog koeficijenta koji prikazuje stepen korelacije odnosno kvalitet izvršene linearne regresije [4, 14].

Tabela 2. *Pearson*-ovi koeficijenti [4, 14, 17]

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

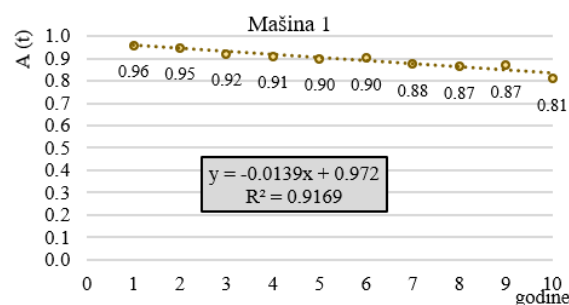
3. REZULTATI

Na osnovu dostupnih podataka o radu, izvršena je analiza dva indikatora upotrebnog kvaliteta. S obzirom da su ovakve analize prethodno rađene kroz različite radove [2, 4-6, 8-12], u ovom radu će kroz sekcije biti prikazani samo rezultati dobijenih vrednosti tehničke raspoloživosti i specifičnih troškova za razmatrani period od 10 godina. Rezultati će biti prikazani kroz tabelarni pregled uz grafički prikaz i dobijene jednačine aproksimacije.

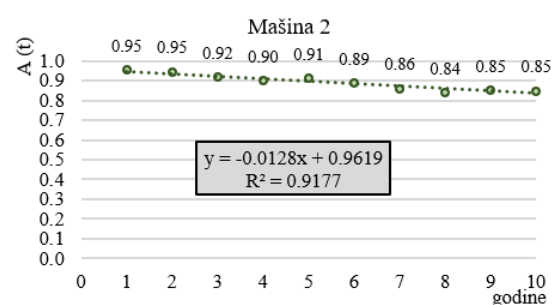
3.1. Rezultati tehničke raspoloživosti

Raspoloživost različitih proizvođača dozera je izračunata u skladu sa metodom prikazanom u poglavlju 2.2. Primenom jednačine (1) uz unapred - podatke,

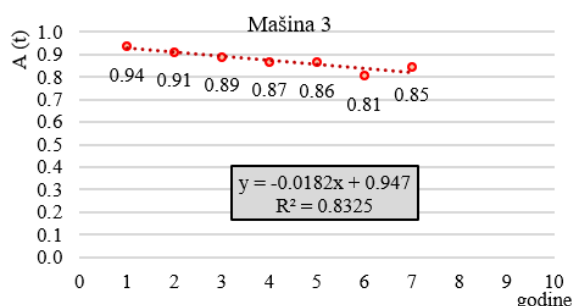
deljeno je ukupno vreme rada sa zbirom vremena u radu i svih oblika zastoja. Grafički prikaz rezultata po godinama sa formiranim aproksimativnim linijama i jednačinom aproksimacije dat je na slikama 2-5.



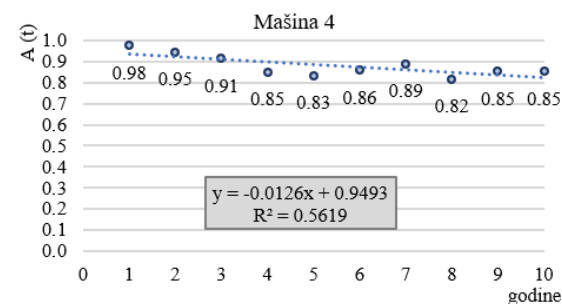
Slika 2 - Tehnička raspoloživost – Mašina 1



Slika 3 - Tehnička raspoloživost – Mašina 2



Slika 4 - Tehnička raspoloživost – Mašina 3

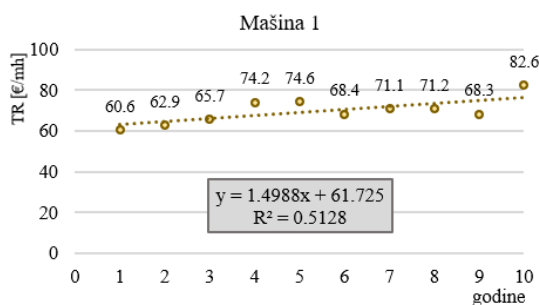


Slika 5 - Tehnička raspoloživost – Mašina 4

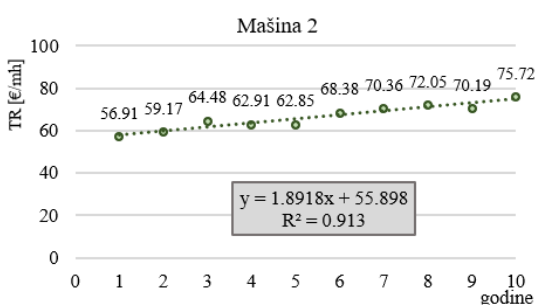
Mera kvaliteta aproksimacije definiše se na osnovu koeficijenta determinacije (R^2) odnosno *Pearson*-ovog koeficijenta (r_{xy}). U odnosu na vrednosti iz tabele 2, r_{xy} za Mašine 1, 2 i 3 je u grupi „odlična korelacija“, dok je za mašina 4 u grupi „dobra korelacija“.

3.2. Rezultati ukupnih troškova

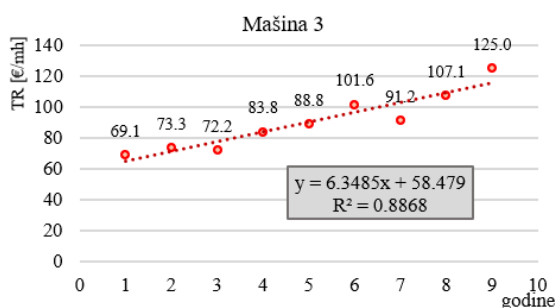
Ukupni troškovi dozera sačinjeni su od troškova vlasništva, operativnih troškova i troškova radne snage. Deljenjem sa ukupnim moto satima rada dobijaju se specifični troškovi. Rezultati prema različitim mašinama prikazani su grafički na slikama 6-9 koje sadrže i jednačine aproksimacije.



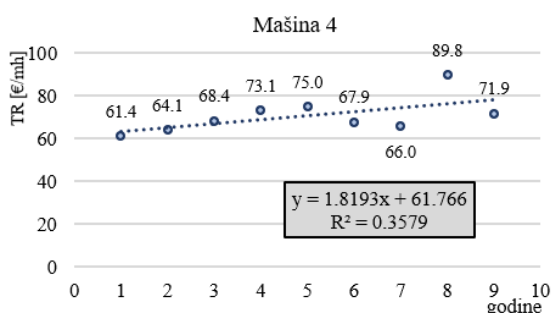
Slika 6 - Ukupni troškovi – Mašina 1



Slika 7 - Ukupni troškovi – Mašina 2



Slika 8 - Ukupni troškovi – Mašina 3



Slika 9 - Ukupni troškovi – Mašina 4

Mera kvaliteta aproksimacije za Mašine 2 i 3 je u grupi „odlična korelacija“, dok je za Mašine 1 i 4 u grupi „umerena korelacija“.

3.3. Komparativna analiza indikatora

Korelaciona veza između troškova i raspoloživosti može se ostvariti formiranjem jedinstvene jednačine aproksimacije koja uključuje oba pokazatelja. Prva jednačina će aproksimirati uticaj raspoloživosti na troškove. U krajnjem obliku aproksimativne jednačine, nezavisna promenljiva x_i će umesto godine rada mašine biti raspoloživost (A), dok je vrednost troškova (TR) zavisna promenljiva y_i . Druga jednačina aproksimira uticaj troškova na raspoloživost i kod nje će raspodela nezavisne i zavisne promenljive biti suprotna prethodnoj. Reprezentativan primer će biti urađen za Mašinu 1, gde jednačine aproksimacije imaju sledeći oblik:

$$A: y = -0,0139 \cdot x + 0,9169$$

$$TR: y = 1,4988 \cdot x + 61,725$$

gde je $x_i = t$ u oba slučaja (godine rada).

Ako se iz obe jednačine izrazi t , pri čemu se promenljiva x_i u prvoj jednačini označi sa A i u drugoj sa TR, dobijaju se sledeći oblici jednačina:

$$t = -\frac{A - 0,9169}{0,0139} \quad t = \frac{TR - 61,725}{1,4988}$$

S obzirom da se obe jednačine imaju zajedničku veličinu t (vreme), sledi:

$$-1,4988 \cdot A + 1,4988 \cdot 0,9169 = 0,0139 \cdot TR - 0,0139 \cdot 61,725$$

Svedeni oblici jednačina aproksimacije troškova i raspoloživosti su:

$$A = -0,00927 \cdot TR + 1,48934$$

$$TR = -107,827 \cdot A + 160,592$$

U tabeli 3 su prikazane korelacione jednačine aproksimacije za sve mašine.

Tabela 3. Jednačine korelacije

Mašina 1	$AM1 = -0,00927 \cdot TR_{B1} + 1,48934$
	$TR_{M1} = -107,827 \cdot A_{B1} + 160,592$
Mašina 2	$AM2 = -0,00677 \cdot TR_{B2} + 1,34011$
	$TR_{M2} = -147,797 \cdot A_{B2} + 198,064$
Mašina 3	$AM3 = -0,00287 \cdot TR_{B3} + 1,1146$
	$TR_{M3} = -348,819 \cdot A_{B3} + 388,810$
Mašina 4	$AM4 = -0,0070 \cdot TR_{B4} + 1,3579$
	$TR_{M4} = -142,2 \cdot A_{B4} + 193,2$

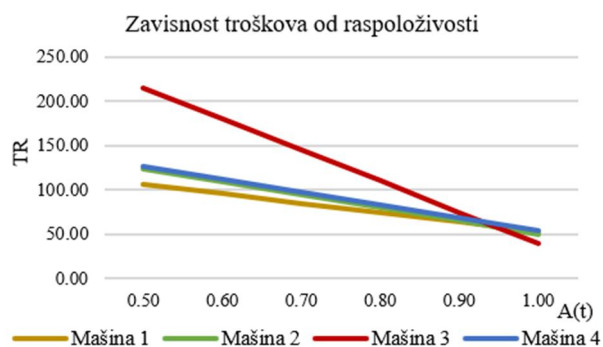
Definisane jednačine opisuju zavisnost među razmatranim indikatorima. Na osnovu jednačina urađena je analiza osetljivosti. U tabeli 4 su dati rezultati analize visine troškova (TR) pri promeni raspoloživosti sa korakom od 0,1. U inženjerskoj praksi primene ovakvih mašina, granična vrednost raspoloživosti je 0,8. Najviše troškove na 0,8 raspoloživosti ima Mašina 3 u vrednosti od 109,8 €/mh, dok najniže

ima Mašina 1. Ovakvim pristupom se mogu predvideti troškovi u odnosu na ciljanu vrednost donje granice raspoloživosti.

Tabela 4. Zavisnost troškova od raspoloživosti

A(t)	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
Mašina 1	106,7	95,9	85,1	74,3	63,5	52,8
Mašina 2	124,2	109,4	94,6	79,8	65,1	50,3
Mašina 3	214,4	179,5	144,6	109,8	74,9	40,0
Mašina 4	126,6	112,2	97,8	83,3	68,9	54,5

Na slici 10 su prikazane linije aproksimacije troškova u funkciji raspoloživosti. Linija aproksimacije je najstrmija za Mašina 3, što znači da sa padom raspoloživosti troškovi najprogresivnije rastu.



Slika 10 - Linija aproksimacije TR u funkciji A(t) za sve mašine

4. ZAKLJUČAK

Izbor adekvatnog tipa i proizvođača dozera, u skladu sa konkretnim radnim uslovima, od izuzetne je važnosti za vlasnike kompanija. Različiti proizvođači i klase dozera u sličnim radnim uslovima pokazuju različite rezultate. U radu su definisana dva osnovna pokazatelja koja direktno utiču na efikasnost i stepen iskorišćenja ovih mašina. Konkretni pristupi proračunu vrednosti raspoloživosti i specifičnih troškova bili su predmet prethodnih radova. Poseban doprinos ovog rada je u načinu formiranja jednačine aproksimacije koja obuhvata oba indikatora. Cilj formiranja jednačine je uočavanje međusobne zavisnosti i njihove osetljivosti na promene jednog od indikatora.

Na površinskim kopovima uglja u ovom regionu, politika kompanija često je bila takva da se pojedine mašine koriste dokle god su sposobne za rad, bez obzira na visinu troškova koje generišu i njihovu raspoloživost. Često se dešava da su troškovi ovih mašina izrazito visoki, dok je njihova raspoloživost takva da rukovodstvo ne može sa sigurnošću tvrditi da će mašina biti dostupna u potrebnom trenutku.

Nedostatak ovih mašina uzrokuje kašnjenja u izvršavanju pomoćnih radova, što smanjuje iskorišćenje velikih kontinualnih sistema. Pored toga, može doći do ugrožavanja bezbednosti ljudi i opreme, kao i do zastoja koji indukuju troškove od nekoliko desetina hiljada evra.

Osnovni nedostatak u radu je što, na osnovu dostupnih podataka, pojedine mašine nisu radile predviđenih 10 godina. Neke od mašina koje su analizirane su nabavljene u skorijem periodu i još uvek ne rade dovoljno dugo da bi podaci bili u potpunosti verodostojni. Ne treba zanemariti ni činjenicu da je ne mali broj mašina rashodovan pre 10-te godine usled većih kvarova. S toga, konkretne rezultate (posebno za mašine koje rade kraće) treba uzeti sa određenom rezervom. Iz tog razloga, konkretni nazivi proizvođača i oznake mašina nisu korišćeni u analitičkom delu rada. Pored toga, baze podataka ne prepoznaju korišćenje ispravnih delova sa prethodno rashodovanih mašina, što može značajno smanjiti operativne troškove.

Osnovni cilj rada, kroz dokazivanje ispravnosti pristupa adekvatnom upravljanju opremom kao imovinom, je potvrđen. Uštede u početnom investicionom ulaganju u nabavku opreme mogu imati kontraefekat, stoga je veoma važno da pri izboru opreme to ne bude jedini merodavni parametar. Tokom životnog veka, visina operativnih troškova može premašiti nabavnu cenu mašine i do nekoliko puta.

Rezultat ovog pristupa je kvalitetna izlazna (prediktivna) informacija koja može značajno uticati na buduće odluke, prvenstveno sa aspekta definisanja pravog trenutka zamene mašine i pravilnog izbora pri nabavkama novih. Ovakav pristup se može primeniti na sve pomoćne mašine, kao i na drugu opremu uz određene modifikacije.

LITERATURA

- [1] Ignjatović D, Šubaranović T, Đenadić S, *Mašine i pomoćni radovi na površinskim kopovima*. Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, 2021.
- [2] Ignjatović D, Jovančić P, Tanasijević M. i saradnici. *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, 2018.
- [3] Đenadić S, *Projekat unapređenja upravljanja rudarske mehanizacije*. Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet, završni rad, 2021.
- [4] Đenadić S, Ignjatović D, Jovančić P, Lekić M, Aleksić Ž, Janković I, *Analiza osnovnih indikatora upotrebnog kvaliteta mašina pomoćne mehanizacije na površinskim kopovima uglja. XV Međunarodna*

- konferencija OMC 2022*, Jugoslovenski komitet za površinsku eksploataciju, Zlatibor, 12-15. oktobar 2022, s. 20-31. 2022.
- [5] Djenadic S, Tanasijevic M, Miletic F. & Jovancic P. Application of the Fuzzy theory in the evaluation of operating parameters of auxiliary mechanization on open-pit coal mine, case study: pipelayers. *8th Balkan Mining Congress*, Belgrade, September 28-30, pp. 118-124. 2022.
- [6] Đenadic S, Jovančić P, Ignjatović D, Miletić F. & Janković I. Analiza primene višekriterijumskih metoda u optimizaciji izbora hidrauličnih bagera na površinskim kopovima. *Tehnika*, 70(3), 369-377, 2019.
- [7] Maksimović, N. *Operativno rukovanje rudničkom mehanizacijom: Instrukcije na primeru površinskog kopa uglja Polje "D" u Rudarskom basenu Kolubara*. Rudarski institut, Beograd, 2015.
- [8] Đenadić, S. *Metodologija ocenjivanja operativno-eksploatacionih parametara dozera za rad na površinskim kopovima* – master rad. Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, 2018.
- [9] Jankovic, I, Djenadic S, Ignjatovic D, Jovancic P, Subaranovic T, Ristic I, Multi-Criteria Approach for Selecting Optimal Dozer Type in Open-Cast Coal Mining. *Energies*, 12(12), 2245, 2019.
- [10] Miodragovic R, Tanasijevic M, Mileusnic Z, Jovancic P, Effectiveness assessment of agricultural machinery based on fuzzy sets theory. *Expert Systems with Applications*, 39(10), 8940–8946, 2012.
- [11] Djenadic S, Ignjatovic D, Tanasijevic M, Bugaric U, Jankovic I, Subaranovic T, 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, 2019.
- [12] Djenadic S, Tanasijevic M, Milisavljevic V, Ignjatovic D, Jovancic P, Application of the Fuzzy Model in the Evaluation and Selection of Hydraulic Excavators on Open-pit Lignite Mine. *10th International Conference on Through-life Engineering Service, SSRN-TESSConf*, University of Twente, 19, The Netherlands, 16-17 November. Available on: 10.2139/ssrn.3945617, 2021.
- [13] Ivković, S. *Otkazi elemenata rudarskih mašina*. Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, 1997.
- [14] Mladenovski Z, Rančić J. *Metod najmanjih kvadrata i fitovanje krivih*. Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2017.
- [15] Miličić M, Miličić N, Stankov D. *Elementi numeričke analize – teorija, algoritmi, programi, zadaci*. Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, 2003.
- [16] Statistička ocena parametara – Metoda najmanjih kvadrata – nastavni materijal. Univerzitet u Beogradu, Matematički fakultet. Dostupno na: http://www.matf.bg.ac.rs/p/files/62-OMM_fitovanje.pdf
- [17] Paunović R, Omorjan R, *Osnovi inženjerske statistike*. Tehnološki fakultet, Novi Sad, 2009.

SUMMARY

CORRELATION ANALYSIS OF QUALITY OF SERVICE INDICATORS OF MINING MACHINERY FOR LIFE CYCLE MANAGEMENT

Life cycle management of mining machinery represents a continuous engineering challenge. The operational quality of machinery, defined as the machine's ability to continuously fulfill its designed functions under actual operating conditions, is a fundamental indicator of its current condition and remaining service potential. Accordingly, the definition of operational quality indicators is a prerequisite for effective equipment life cycle management. The primary indicators of operational quality include availability, reliability, productivity, efficiency, and cost-effectiveness, while for auxiliary mining machinery, they can be primarily characterized through availability and costs. In this paper, an approach based on the correlation analysis of these two indicators is developed. The analysis was conducted on bulldozers, which represent the most commonly used type of auxiliary mining machinery. Historical data on costs, operating time, and downtime were utilized. Based on the results obtained, trends in availability and costs as functions of time were established. The contribution of this study lies in defining a functional relationship between costs and availability, thereby enhancing the approach to life cycle management of mining equipment.

Key Words: mining, mechanization, quality of service, availability, costs