



UNIVERZITET U BANJOJ LUCI  
RUDARSKI FAKULTET



**Mr Jelena Trivan**

**KOMPLEKSNO IZUČAVANJE OTPORA KOPANJA  
ZA PRIMJENU BTO SISTEMA U USLOVIMA  
ČVRSTIH STIJENA NA POVRŠINSKIM KOPOVIMA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Prijedor, 2021.



UNIVERZITET U BANJOJ LUCI  
RUDARSKI FAKULTET



**MSc Jelena Trivan**

**COMPLEX STUDY OF EXCAVATION  
RESISTANCE FOR APPLICATION OF CROSS-PIT  
SPREADER SYSTEM IN CONDITIONS OF HARD  
ROCK MASSES AT SURFACE MINES**

PhD Thesis

Prijedor, 2021.

## **INFORMACIJE O MENTORU I DOKTORSKOJ DISERTACIJI**

**Mentor:** dr Srđan Kostić, vanredni profesor, Rudarski fakultet Univerziteta u Banjoj Luci,  
uža naučna oblast Podzemna eksploatacija mineralnih sirovina

**Naslov doktorske disertacije:** KOMPLEKSNO IZUČAVANJE OTPORA KOPANJA ZA PRIMJENU BTO SISTEMA U USLOVIMA ČVRSTIH STIJENA NA POVRŠINSKIM KOPOVIMA

### **Rezime:**

Predmet disertacije je istraživanje uticaja fizičko-mehaničkih karakteristika stijenske mase na otpor kopanju na površinskim kopovima. U doktorskoj disertaciji formirani su prognozni modeli otpora kopanju primjenom savremenih matematičkih metoda višestruke linearne regresije gdje su modeli razvijeni kao nelinearne funkcije karakteristika otpora kopanju (linijski i površinski koeficijent otpora kopanju, brzina i potrošnja struje na rotornom bageru) od fizičko-mehaničkih karakteristika stijenske mase: zapreminske težine, čvrstoće na pritisak, granulometrijskog sastava i čvrstoće na smicanje.

Istraživanja izvedena u okviru disertacija obuhvatila su laboratorijska ispitivanja, terenska mjerenja i matematičko-statističku analizu rezultata.

Posebno treba istaći da je predmetnim istraživanjima obuhvaćena mnogo šira oblast od one koja je bila predviđena samom temom disertacije. Premda je svojom temom, disertacija vezana za površinske kopove u uslovima čvrstih stijena, pored izučavanja čvrstih stijenskih masa, na primjeru površinskog kopa „Turija-Banovići”, u okviru disertacije vršena su istraživanja veze otpora kopanja, rada bagera i geomehaničkih karakteristika uglja (rudnik podvodne eksploatacije „Kovin”) i nevezanih i slabo vezanih stijenskih masa otkrivke (površinski kop „Tamnava Istočno polje”). Na taj način, predmetnom disertacijom obuhvaćeni su svi mogući slučajevi pojave stijenskih masa na površinskim kopovima, čime disertacija dobija sveobuhvatniji značaj.

Rezultati izvedenih istraživanja ukazuju da postoji statistički značajan uticaj geomehaničkih karakteristika stenskih masa na otpore kopanju. U slučaju analize uzoraka uglja sa rudnika podvodne eksploatacije „Kovin”, rezultati istraživanja su pokazali da čvrstoća na pritisak i smicanje i zapreminska težina uglja imaju statistički značajan uticaj na silu rezanja. S druge strane, u slučaju otkrivke izgrađene od čvrstih stenskih masa, sa površinskog kopa „Turija-Banovići”, rezultati ukazuju na statistički značajan uticaj zapreminske težine, čvrstoće na pritisak i kohezije na maksimalnu silu rezanja i maksimalnu potrošnju energije na bageru. U pogledu uticaja geomehaničkih svojstava otkrivke izgrađene od slabovezanih i nevezanih stenskih masa, izvedena istraživanja su pokazala da granulometrijski sastav, zapreminska težina i čvrstoća na smicanje imaju statistički značajan uticaj na maksimalnu potrošnju struje na bageru i na brzinu bagera, za slučaj novih zuba bagera, dok je značajan uticaj geomehaničkih svojstava otkrivke za pohabane zube bagera ustanovljen samo za potrošnju struje na bageru.

Rezultati dobijeni istraživanjima realizovanim u okviru izrade disertacije predstavljaju originalni naučni doprinos, jer se prvi put u domaćoj i međunarodnoj naučnoj javnosti razmatraju uticaji geomehaničkih svojstava različitih vrsta stenskih masa na parametre otpora kopanja. S druge strane, inženjerski doprinos disertacije je takođe značajan, jer se formirani modeli mogu koristi za optimizaciju procesa otkopavanja otkrivke na površinskim kopovima za koje su razvijeni, odnosno primenjena metodologija i disertaciji može poslužiti za razvoj novih modela na drugim lokacijama površinskih kopova.

**Ključne riječi:** stijenska masa, otpor kopanju, rotorni bager, geomehaničke karakteristike, modelovanje

**Naučna oblast:** Inženjerstvo i tehnologija

**Naučno polje:** Inženjerstvo životne sredine

**Klasifikaciona oznaka (CERIF):** T 340 Rudarstvo

**UDK** 622.271.4:622.341.1(497.6)(043.3)

**Tip odabrane licence Kreativne zajednice (Creative Commons):** Autorstvo – nekomercijalno dijeliti pod istim uslovima

## **INFORMATION ON MENTOR AND DOCTORAL DISSERTATION**

Mentor: Associate professor Srđan Kostić, University of Banja Luka Faculty of Mining,  
scientific field: Underground exploitation of mineral resources

**Title of doctoral dissertation:** COMPLEX STUDY OF EXCAVATION RESISTANCE  
FOR APPLICATION OF CROSS-PIT SPREADER SYSTEM IN CONDITIONS OF HARD  
ROCK MASSES AT SURFACE MINES

### **Summary:**

The subject of the dissertation is the study of the influence of physical and mechanical characteristics of rock mass on the resistance to cutting in surface mines. In the doctoral dissertation, prognostic models of cutting resistance were formed using modern mathematical methods of multiple linear regression where models were developed as nonlinear functions of cutting resistance characteristics (linear and surface coefficient of cutting resistance, velocity and current consumption of a bucket-wheel excavator) on physical-mechanical characteristics of rock mass: unit weight, compressive strength, particle size distribution and shear strength.

The research performed within the dissertations included laboratory tests, field measurements and mathematical-statistical analysis of the results.

It should be especially emphasized that the subject research covers a much wider area than the one envisaged by the topic of the dissertation. Although the topic of the dissertation is related to surface mining in solid rock conditions, in addition to the study of solid rock masses, on the example of the surface mine "Turija-Banovići", the dissertation investigated the relationship between excavation resistance, excavator work and geomechanical characteristics of coal (underwater mine "Kovin") and unbound and loosely bound rock masses of the overburden (surface mine "Tamnava East Field"). In this way, dissertation covers all possible cases of rock masses in surface mines, which gives the dissertation a more comprehensive significance.

The results of the performed research indicate that there is a statistically significant influence of geomechanical characteristics of rock masses on cutting resistance. In the case of the

analysis of coal samples from the underwater mine "Kovin", the results of the research showed that the compressive strength and shear strength and unit weight of coal have a statistically significant effect on the cutting force. On the other hand, in the case of the overburden built of solid rock masses, at the surface mine "Turija-Banovići", the results indicate a statistically significant influence of unit weight, compressive strength and cohesion on the maximum cutting force and maximum energy consumption of the excavator. Regarding the influence of geomechanical properties of the overburden built of weakly bound and unbound rock masses, the performed research has shown that the granulometric composition, unit weight and shear strength have statistically significant impact on the maximum current consumption and excavator velocity, for the case of new excavator teeth, while statistically significant impact of geomechanical properties of overburden on current consumption was found only for the used excavator teeth.

The results obtained by the research within the dissertation represent an original scientific contribution, because for the first time in the domestic and international scientific community the influences of geomechanical properties of different types of rock masses composing the overburden on the parameters of cutting resistance are considered. On the other hand, the engineering contribution of the dissertation is also important, because the formed models can be used to optimize the process of excavating overburden at surface mines for which they were developed, or the applied methodology within the dissertation can be used to develop new models at other surface mine sites.

**Key words:** rock mass, cutting resistance, bucket-wheel excavator, geomechanical characteristics, modelling

**Scientific area:** Engineering and technology

**Scientific field:** Environmental engineering

**Classification Code (CERIF):** T 340 Mining

**UDK** 622.271.4:622.341.1(497.6)(043.3)

**Creative Commons type:** Authorship - non-commercial - share under the same conditions  
CC BY-NC-SA

*Ovaj rad posvećujem Vukašinu*

*Zahvaljujem se mentoru dr Srđanu Kostiću, vanrednom profesoru i dr Nebojši Gojkoviću, redovnom profesoru na podršci pri pripremi, uputstvima i sugestijama koje su doprinijele da ova disertacija bude uspješno završena, mojoj porodici za strpljenje i moralnu podršku i svima koji su na bilo koji način doprinijeli uspjehu ovog istraživanja.*

## SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. PREGLED REZULTATA DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA	8
3. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA	24
3.1 Terenska - vatmetarska metoda	26
3.1.1. Određivanje specifičnog otpora na kopanje pomoću vatmetarske metode na PK „Tamnova-istočno polje“	28
3.2 Laboratorijska metoda kлина (metoda Orenstein & Koppel, tzv. O&K metoda)	31
3.3 Laboratorijsko određivanje rezne sile metodom reznog klatna tipa „Š“	32
3.4 Matematičko-statistička analiza	34
3.4.1 Regresijska analiza	34
3.4.2 Analiza varijanse	40
3.4.3. Dvofaktorski model analize varijanse	43
4. OPŠTI POJMOVI	46
4.1. Rotorni bager	46
4.1.1 Klasifikacija rotornih bagera	46
4.1.2 Kostruktivni dijelovi rotornog bagera	48
4.1.3 Tehnologija rada rotornog bagera	51
4.1.4. Kapacitet rotornih bagera	52
4.2. Transportna oprema kontinualnog dejstva	54
4.3. Odlagači	55
4.3.1. Tipovi odlagača	57
4.4. Opšte o otporu kopanja	59
4.4.1. Ukupni otpor materijala na kopanje	59
4.4.2. Specifični otpor materijala na kopanje	61
5. UPOTREBA BTO SISTEMA NA POVRŠINSKIM KOPOVIMA U REPUBLICI SRPSKOJ	62
5.1. Tehnologija sistema eksploracije na površinskom kopu Gacko	62
5.2. Tehnologija sistema eksploracije na površinskom kopu Stanari	67

<b>6. REZULTATI ISTRAŽIVANJA</b>	<b>70</b>
6.1. Rezultati terenskih istraživanja	70
6.1.1. Kratak pregled tehnologije eksplotacije uglja na odabranim lokacijama	71
6.1.1.1. Rudnik podvodne eksplotacije uglja „Kovin“	71
6.1.1.2. Rudnik površinske eksplotacije uglja „Turija-Banovići“	72
6.1.1.3. Rudnik površinske eksplotacije uglja „Tamnava - istočno Polje“	72
6.1.2. Terenska mjerena otpora na kopanje	74
6.2. Rezultati laboratorijskih istraživanja	80
6.2.1. Laboratorijska istraživanja otpora rezanja na površinskom kopu Kovin	81
6.2.2. Laboratorijska ispitivanja otpora rezanja na površinskom kopu „Turija – Banovići“	83
6.2.3. Laboratorijska ispitivanja otpora rezanja na površinskom kopu „Tamnava – Istočno polje“	86
6.3. Analiza uticaja geomehaničkih svojstava na otpor na kopanje	87
6.3.1. Formiranje modela na PK „Kovin“	87
6.3.2. Formiranje modela na površinskom kopu „Turija - Banovići“	89
6.3.3. Formiranje modela na površinskom kopu „Tamnava – Istočno polje“	94
6.3.3.1. Novi zubi bagera	95
6.3.3.2. Zubi bagera poslije 250 sati rada	100
7. ZAKLJUČAK	112
7.1. Opšti pregled	112
7.2. Čvrste stijenske mase	113
7.3. Slabo vezane i nevezane stijenske mase	113
7.4. Ugalj	115
7.5. Ocjena naučnog doprinosa rezultata	115
7.6. Ocjena mogućnosti primjene u praksi i značaja za rad na površinskim kopovima	115
7.7. Prijedlog mogućeg pravca daljih istraživanja	116
8. LITERATURA	117
9. PRILOZI	

## SPISAK SLIKA

Slika 1.1. Proizvodnja električne energije za period 1996-2019. godina [Energetski bilans Republike Srpske, 2019]	1
Slika 1.2. Razmještaj rudnika uglja u Republici Srpskoj i BiH-	2
Slika 1.3. Svjetska neto proizvodnja električne energije po izvorima energije (a) i učešće pojedinih izvora energije u neto proizvodnji električne energije [Šekulić i Sekulić, 2019]	3
Slika 2.1. Pregled empirijskih metoda za određivanje otpora rezanja [Ignjatović, 1993]	12
Slika 2.2. Pregled metode za određivanje otpora rezanja naizmjeničnim djelovanjem rezni element-uzorak [Ignjatović, 1993]	12
Slika 2.3. Pregled poznatih uređaja za laboratorijska određivanje otpora rezanja [Ignjatović, 1993]	13
Slika 2.4. Pregled uređaja za terensko određivanje otpora rezanja [Ignjatović, 1993]	14
Slika 2.5. Uticaj debljine i širine reza na specifični otpor rezanja [Đukić, 1984]	15
Slika 2.6. Relacija između sile rezanja i čvrstoće na pritisak [Inal, 1984]	15
Slika 2.7. Rezivost jalovinskih stijena u funkcija čvrstoće [Inal, 1984]	16
Slika 2.8.-Sila rezanja i specifični otpor rezanja za laporce sa površinskog kopa Kakanj [Đukić, 1984]	18
Slika 2.9. Zavisnost specifične sile kopanja ( $K_t$ ) od jednoaksijalne čvrstoće na pritisak [Ignjatović, 1993]	20
Slika 2.10. Zavisnost specifične sile kopanja ( $K_t$ ) od jednoaksijalne čvrstoće na pritisak [Ignjatović, 1993]	21
Slika 2.11. Zavisnost specifičnog otpora kopanja od kohezije za basen Kolubara, Kostolac i Kosovo [Ignjatović, 1993]	21
Slika 2.12. Zavisnost specifičnog otpora kopanja od procentualnog udjela prašinastih sastojaka i vlage [Ignjatović, 1993]	22
Slika 3.1. Rotornog bagera SchRs 900 25/6 (proizvođača O&K), [foto dokumentacija rudnika]	28
Slika 3.2. Karakteristična kriva motora za pogon rotornog točka bagera SchRe 900 25/6 (2x230 kW) [Ignjatović, 1993]	29
Slika 3.3. Dijagram baždarenja debljine adreska [Ignjatović, 1993]	30
Slika 3.4. Šematski prikaz metode klina [Ignjatović, 1993]	32

Slika 3.5. Izgled i glavne dimenzije reznog klatna	33
Slika 3.6. Linearne (pravac) i neke nelinearne (logaritamsaka, eksponencijalna, polinom n-tog stepena) matematičke funkcije [Dizdar, 2006]	36
Slika 4.1. Osnovne konstruktivne cjeline rotornog bagera [Banković, 2018]	46
Slika 4.2. Različiti tipovi rotornih bagera [Petrović, 2016]	47
Slika 4.3. Različiti načini rada rotornog bagera [Banković, 2018]	48
Slika 4.4. Glavne komponente rotornog bagera [Petrović, 2016]	49
Slika 4.5. Konstrukcija transportera sa trakom, [Banković, 2018]	55
Slika 4.6. Koračajući dvodjelni odlagač sa trakama ZP 10000 [Malbašić, 2010]	58
Slika 4.7. Jednodjelni šinski odlagač sa kašikama [Malbašić, 2010]	58
Slika 4.8. Sile koje djeluju na vedricu pri otkopavanju materijala [Bošković, 2016]	59
Slika 4.9. Šematski prikaz određivanja specifičnog otpora na kopanje [Bošković, 2016]	61
Slika 5.1. Rotorni bager ER – 1250*17/1.5 [IRM-Bor d.o.o. Zvornik, 2021.]	63
Slika 5.2. Rotorni bager ER – 1250*16/1.5 [IRM-Bor d.o.o. Zvornik, 2021.]	63
Slika 5.3. Samohodni transporter P1600 [IRM-Bor d.o.o. Zvornik, 2021.]	65
Slika 5.4. Samohodni transporter BRs 1200 [IRM-Bor d.o.o. Zvornik, 2021.]	65
Slika 5.5. Odlagač OŠ 1600/40+110 [IRM-Bor d.o.o. Zvornik, 2021.]	66
Slika 5.6. Odlagač ARs1200/(20+50)*21 [IRM-Bor d.o.o. Zvornik, 2021.]	66
Slika 5.7. Rotorni bager C-700 [foto dokumentacija rudnika]	68
Slika 6.1. Učestalost pojavljivanja analiziranih vrijednosti parametara ( $C_{l_{per}}$ , $S_{l_{pe}}$ , $SSN_{per}$ , $MSM_{per}$ , $\gamma$ , $c$ i $\varphi$ )	75
Slika 6.2. Učestalost pojavljivanja izmjerениh vrijednosti parametara $V_b$ i $I_{max}$	77
Slika 6.3. Učestalost pojavljivanja izmjerениh vrijednosti parametara $V_b$ i $I_{max}$	79
Slika 6.4. Uzorak uglja prije (a) i nakon (b) laboratorijskog određivanje sile rezanja [Kostić at al, 2018]	81
Slika 6.5. Učestalost pojavljivanja analiziranih vrijednosti parametara $\gamma$ , $\sigma_p$ , $c$ , $\varphi$ i $K_P$	82
Slika 6.6. Učestalost pojavljivanja analiziranih vrijednosti parametara, $\gamma$ , $\sigma_p$ , $\sigma_z$ $c$ i $\varphi$	84
Slika 6.7. Učestalost pojavljivanja izmjerениh vrijednosti parametara, $F$ i $E$	85

Slika 6.8. Statistička značajnost uticaja ispitanih ulaznih parametara na silu rezanja uglja [Kostić et al, 2018]

87

Slika 6.9. Poređenje laboratorijskih vrijednosti sile rezanja i vrijednosti dobijene procjenom korištenjem jednačine (1). Procjena je data za skup podataka bez vrlo niskih i visokih vrijednosti označenih crvenom bojom [Kostić et al, 2018]

88

Slika 6.10. Uticaj geomehaničkih faktora na silu rezanja: (a)  $K_F = f(\gamma \cdot \varphi)$ , (b)  $K_F = f(\sigma \cdot \varphi)$ . Dok vrijednosti ugla unutrašnjeg trenja, zapreminske težine ili čvrstoće na pritisak variraju, vrijednosti preostalih parametara se održavaju konstantnim na njihovim srednjim vrijednostima:  $\gamma=12.3\text{kN/m}^3$ ,  $\sigma=5.95\text{MPa}$ ,  $c=1.5\text{ MPa}$  [Kostić et al, 2018]

89

Slika 6.11. Približno ista mehanička svojstva otkrivke sa povećanjem dubine: 1 – kohezija (MPa), 2 – čvrstoća na pritisak (MPa), 3 – ugao unutrašnjeg trenja ( $^\circ$ ), zapreminska težina ( $\text{kN/m}^3$ ) [Trivan et al, 2021]

91

Slika 6.12. Uticaj mehaničkih svojstava otkrivke na silu rezanja bagera. Dok vrijednost jednog parametra varira, vrijednosti ostalih parametara su konstantne sa sledećim vrijednostima:  $\gamma=21\text{kN/m}^3$ ,  $\sigma_p=22.6\text{ MPa}$ ,  $c=0.5\text{ MPa}$  [Trivan et al, 2021]

92

Slika 6.13. Uticaj mehaničkih svojstava otkrivke na potrošnju energije bagera. Dok vrijednost jednog parametra varira, vrijednosti ostalih parametara su konstantne sa sledećim vrijednostima:  $\gamma=21\text{kN/m}^3$ ,  $\sigma_p=22.6\text{ MPa}$ ,  $c=0.5\text{ Mpa}$  [Trivan et al, 2021]

92

Slika 6.14. Grafikoni normalnih vjerovatnoća ostataka za jednačinu 6.4 (a) i jednačinu 6.5. (b). [Kostić i Trivan, 2021]

97

Slika 6.15. Uticaj mehaničkih svojstava otkrivke na brzinu rotornog bagera: slučaj novih zuba bagera. Dok vrijednost jednog parametra varira, vrijednosti ostalih parametara su konstantne sa sledećim vrijednostima:  $CL_{per} = 24,5\%$ ,  $SI_{per} = 68\%$ ,  $SSN_{per} = 33,5\%$ ,  $MSN_{per} = 4,5\%$ ,  $\gamma = 19\text{kN /m}^3$ ,  $c = 22\text{ kPa}$ ,  $\varphi = 22,5^\circ$  [Kostić i Trivan, 2021]

98

Slika 6.16. Uticaj mehaničkih svojstava otkrivke na utrošak struje: slučaj novih zuba bagera. Dok vrijednost jednog parametra varira, vrijednosti ostalih parametara su konstantne sa sledećim vrijednostima:  $CL_{per} = 24,5\%$ ,  $SI_{per} = 68\%$ ,  $SSN_{per} = 33,5\%$ ,  $MSN_{per} = 4,5\%$ ,  $\gamma = 19\text{kN / m}^3$ ,  $c = 22\text{ kPa}$ ,  $\varphi = 22,5^\circ$  [Kostić i Trivan, 2021]

99

Slika 6.17. Grafikoni normalnih vjerovatnoća ostataka za jednačinu 6.6. [Kostić i Trivan, 2021]

101

Slika 6.18. Uticaj mehaničkih svojstava otkrivke na potrošnju struje bagera: slučaj zuba bagera poslije 250 sati rada. Dok vrijednost jednog parametra varira, vrijednosti ostalih parametara su konstantne sa sledećim vrijednostima:  $CL_{per} = 24,5\%$ ,  $SI_{per} = 68\%$ ,  $SSN_{per} = 33,5\%$ ,  $MSN_{per} = 4,5\%$ ,  $\gamma = 19\text{kN / m}^3$ ,  $c = 22$

kPa, $\varphi = 22,5^\circ$ [Kostić i Trivan, 2021]	102
Slika 6.19. Zavisnost brzine bagera od koefekta zapreminske težine i (a) kohezije, (b) ugla unutrašnjeg trenja; slučaj novih zuba bagera [Kostić i Trivan, 2021]	103
Slika 6.20. Zavisnost brzine bagera od koefekta (a) kohezije i, (b) ugla unutrašnjeg trenja i $SSN_{per}$ , i (c) ugla unutrašnjeg trenja i zapreminske težine, slučaj novih zuba bagera [Kostić i Trivan, 2021]	104
Slika 6.21 Zavisnost trenutne potrošnje struje bagera od koefekta zapreminske težine i (a) $SSN_{per}$ (3-32,5%), (b) $SSN_{per}$ (32,5-62%), slučaj novih zuba bagera [Kostić i Trivan, 2021]	105
Slika 6.22. Zavisnost maksimalne potrošnje struje bagera od koefekta kohezije i (a) zapreminske težine, (b) ugla unutrašnjeg trenja, slučaj novih zuba bagera [Kostić i Trivan, 2021]	106
Slika 6.23. Zavisnost maksimalne potrošnje struje bagera od koefekta kohezije i (a) zapreminske težine, (b) ugla unutrašnjeg trenja, slučaj novih zuba bagera [Kostić i Trivan, 2021]	107
Slika 6.24. Zavisnost maksimalne potrošnje struje bagera od koefekta ugla unutrašnjeg trenja i (a) zapreminske težine $I_{max}$ (b), slučaj novih zuba bagera [Kostić i Trivan, 2021]	107
Slika 6.25. Zavisnost maksimalne potrošnje struje bagera od koefekta kohezije i zapreminske težine, slučaj pohabanih zuba bagera [Kostić i Trivan, 2021]	109
Slika 6.26. Zavisnost maksimalne potrošnje struje bagera od koefekta ugla trenja i (a) $CL_{per}$ (b) $SSN_{per}$ , (c) $SI_{per}$ , slučaj pohabanih zuba bagera [Kostić i Trivan, 2021]	110
Slika 6.27. Zavisnost maksimalne potrošnje struje bagera od koefekta zapreminske težine i (a) $SSN_{per}$ (2-33,5%) (b) $SSN_{per}$ (33,5-65%), slučaj pohabanih zuba bagera [Kostić i Trivan, 2021]	110

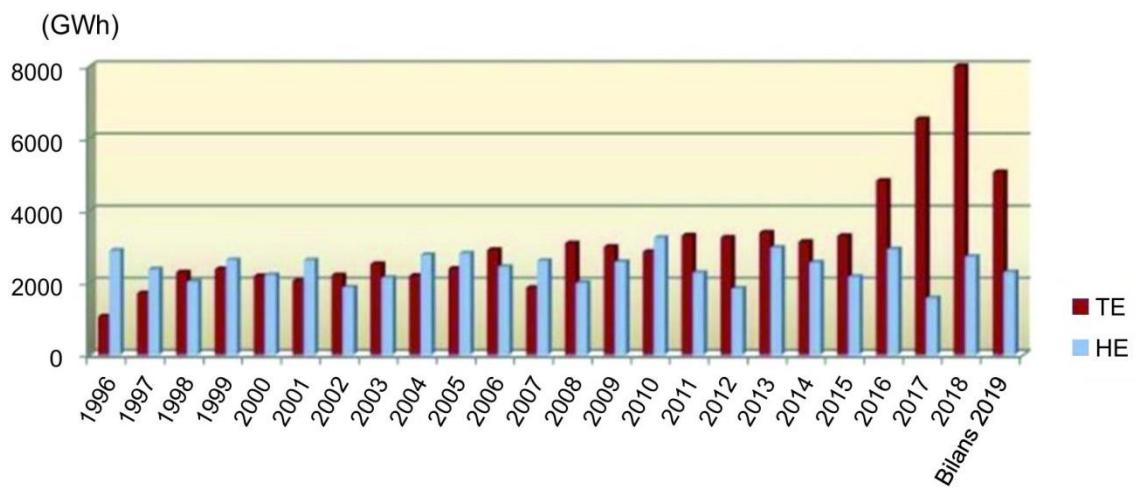
## **SPISAK TABELA**

Tabela 2.1. Sistematizacija postavki o procesu kopanja [Ignjatović, 1993]	9
Tabela 2.2 Vrijednosti otpora kopanju bagera za različite kategorije stijena [Đukić, 1984]	16
Tabela 2.3. Vrijednosti otpornosti na pritisak, kohezije i otpora kopanju za pojedine materijale [Đukic, 1984]	19
U tabli 3.1. prikazana je klasifikacija regresijskih modela s obzirom na spomenute kriterije [Dizdar, 2006]	35
Tabela 3.2. k slučajnih uzoraka [Knežević, 2017]	41
Tabela .3.3. Dvofaktorski eksperiment [Knežević, 2017]	44
Tabela 4.1 Karakteristike bagera po klasama [Ignjatović, 2012].	47
Tabela 5.1. Osnovna kontinualna otkopna i odalažuća oprema [IRM-Bor d.o.o. Zvornik, 2021.]	63
Tabela 5.2. Tehničke karakteristike rotornog bagera ER – 1250*17/1.5 i ER – 1250*16/15 [IRM-Bor d.o.o. Zvornik, 2021.]	64
Tabela 5.3. Tehničke karakteristike samohodnog transportera P – 1600 i BRs1200 date [IRM-Bor d.o.o. Zvornik, 2021.]	65
Tabela 5.4. Tehničke karakteristike odlagača OŠ 1600 i ARS 1200 (IRM-Bor d.o.o. Zvornik, 2021.)	66
Tabela 5.5. Tehnološki parametri rada rotornog bagera ER 1250 [IRM-Bor d.o.o. Zvornik, 2021.].	67
Tabela 5.6. Tehničke karakteristike rotornog bagera C-700	69
Tabela 6.1. Osnovne tehničke karakteristike opreme na površinskom kopu „Tamnava – istočno polje“	73
Tabela 6.2. Statistički pokazatelji analiziranih vrijednosti parametara za nove zube bagera	75
Tabela 6.3. Statistički pokazatelji izmjerenih vrijednosti parametara za nove zube bagera	77
Tabela 6.4. Statistički pokazatelji analiziranih vrijednosti parametara za pohabane zube bagera	77
Tabela 6.5. Statistički pokazatelji izmjerenih vrijednosti parametara za pohabane zube bagera	78
Tabela 6.6 Pregled analiziranih parametara i njihov raspon vrijednosti	79

Tabela 6.7. Pregled osnovnih statistički pokazatelja koji su mjereni	80
Tabela 6.8. Statistički pokazatelji analiziranih vrijednosti parametara	81
Tabela 6.9. Raspon dobijenih laboratorijskih vrijednosti za uticajne faktore i silu rezanja uglja	83
Tabela 6.10. Statistički pokazatelji analiziranih vrijednosti parametara	83
Tabela 6.11. Raspon analiziranih vrijednosti parametara	84
Tabela 6.12. Statistički pokazatelji izmjerениh vrijednosti parametara	85
Tabela 6.13. Raspon analiziranih vrijednosti parametara	85
Tabela 6.14. Rezultati ANOVA testa za model (1) odnosno jednačina 6.2.[Trivan et al., 2021]	93
Tabela 6.15. Rezultati ANOVA testa za model (2) odnosno jednačina 6.3.[Trivan et al., 2021]	94
Tabela 6.16. Rezultati ANOVA testova za jednačinu 6.4.	96
Tabela 6.17. Rezultati ANOVA testova za jednačinu 6.5.	96
Tabela 6.18. Rezultati ANOVA testova za jednačinu 6.6.	101

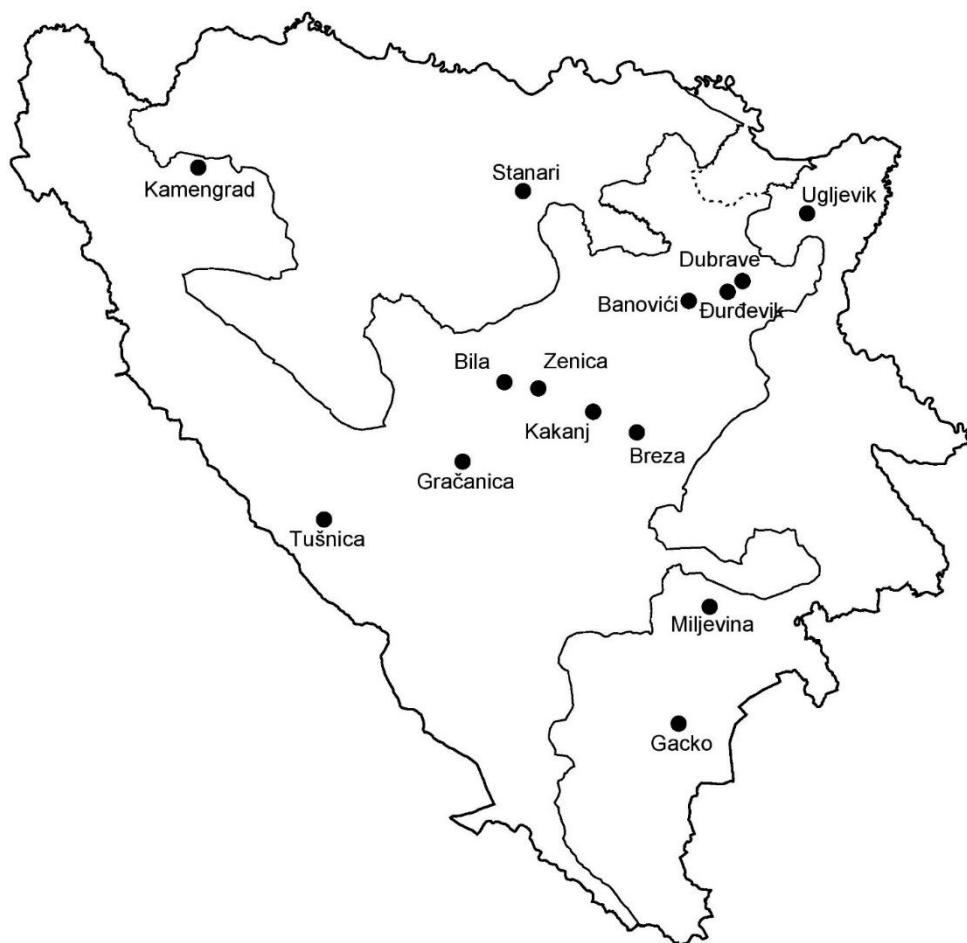
## 1. UVOD

Proizvodnja električne energije u Republici Srpskoj bazira se na termoelektranama na domaći ugalj, koje u ukupnoj proizvodnji električne energije u 2019. godini učestvuju sa 69% i na hidroelektranama (bez malih elektrana) koje proizvode 31% [Energetski bilans Republike Srpske, 2019]. Proizvodnja električne energije za 2020. godinu bazira se uglja iz termoelektrana je 65%, na hidroelektranama (bez malih elektrana) koje proizvode 29,5 %. [Energetski bilans Republike Srpske, 2020]. Na slici 1.1. prikazana je proizvodnja električne energije za period 1996-2019. godine u Republici Srpskoj.



Slika 1.1. Proizvodnja električne energije za period 1996-2019. godina [Energetski bilans Republike Srpske, 2019]

Ugalj je najzastupljeniji emergent koji se koristi u Republici Srpskoj. Ugljonosni baseni su rasprostranjeni na cijelom prostoru Republike Srpske i utvrđene su značajne rezerve mrkog uglja i lignita, zadovoljavajućeg kvaliteta, a eksplotacija uglja za proizvodnju električne energije vrši se u basenima Ugljevika, Gacka i Stanara. Razlog što je procenat proizvodnje električne energije iz uglja tako visok je povoljna geološka građa (postojanje većeg broja neogenih basena sa znatnim rezervama uglja), kao i činjenica što je najveći dio sistema za proizvodnju električne energije izgrađen u prošlom vijeku, kada su se zemlje najviše oslanjale na eksplotaciju uglja. Na slici 1.2. prikazan je razmještaj rudnika uglja i termoelektrana u Republici Srpskoj i Bosni i Hercegovini.

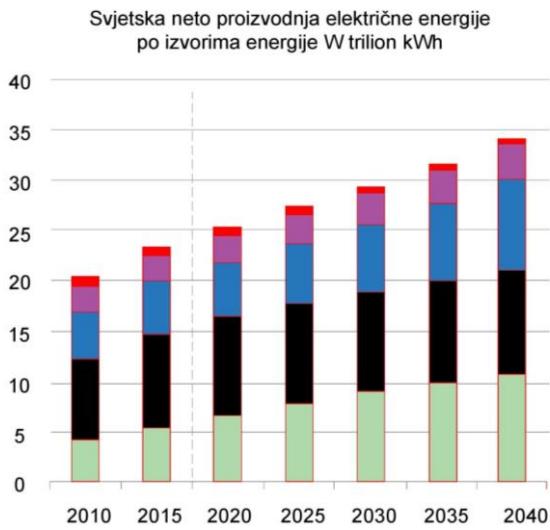


Slika 1.2. Razmještaj rudnika uglja u Republici Srpskoj i BiH.

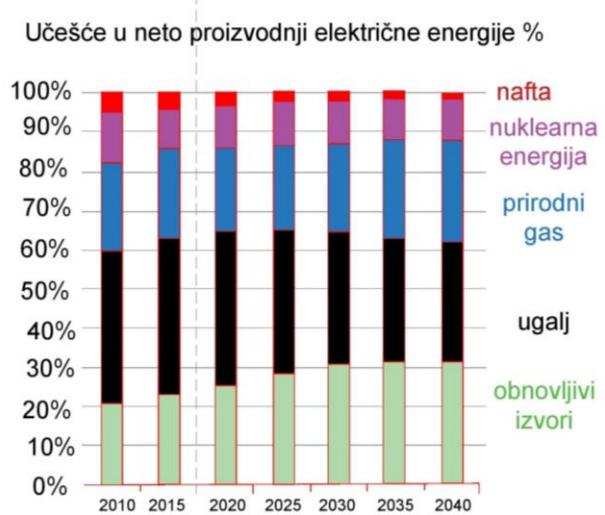
Rezerve uglja u BiH iznose oko 5,6 milijardi tona odnosno 0,6 % svjetskih rezervi odnosno 2,2 % evropskih rezervi uglja. U isto vrijeme rezerve uglja u Republici Srpskoj iznose 867 miliona tona odnosno 15 % rezervi BiH odnosno 0,33 % evropskih rezervi [Malbašić, 2021].

I na svjetskom nivou se proizvodnja električne energije dominantno zasniva na preradi uglja i radu teremoelektrana. Ukupna bruto proizvodnja električne energije u svijetu 2016. godine je bila 25.082 TWh. Izvori struje su bili ugalj i treset 38,3%, prirodni gas 23,1%, hidroenergija 16,6%, nuklearna energija 10,4%, nafta 3,7%, solarna/vjetar/geotermalna/plimska/drugo 5,6%, biomasa i otpad 2,3% [Šekulić i Sekulić, 2019]. Na slici 3.1. prikazana je svjetska neto proizvodnja električne energije po izvorima energije od 2010. do 2020. godine i predviđanja za period od 2020. do 2040. godine.

a)



b)



Slika 1.3. Svjetska neto proizvodnja električne energije po izvorima energije (a) i učešće pojedinih izvora energije u neto proizvodnji električne energije [Šekulić i Sekulić, 2019]

Sa slike 1.3. se vidi da se predviđa postepeno smanjenje korištenja uglja kao glavne energetske sirovine. Usvajanjem Direktive o integrisanoj kontroli i prevenciji zagađenja (IPPC direktiva - *IPPC Integrated Prevention Pollution Control 96/61/EC*), Evropska Unija je postavila ambiciozan cilj visokog nivoa zaštite okoline u cjelini i uvela koncept održivog razvoja za široki spektar zagađujućih industrijskih aktivnosti uključujući rudarstvo i metalurgiju, energetiku, i niz drugih oblasti [Stojanović i Borović, 2019].

S obzirom na dominatno učešće uglja u ukupnoj proizvodnji električne energije u zemljama Jugoistične Evrope, jasno je da će obaveze preuzete formiranjem Energetske zajednice imati značajan uticaj na industriju uglja u regionu, pogotovo ako se ima na umu činjenica da su neke zemlje regiona jugoistočne Evrope članice EU dok su ostale zemlje u procesu pridruživanja. Njemačka se često navodi kao primjer zemlje, članice Evropske unije, gdje se oslanjanje na rad termoelektrana postepeno smanjuje. Prema raspoloživim podacima, Njemačka ne planira izgradnju nijedne nove termoelektrane na ugalj, a takođe planira da do 2030. godine najmanje 50% svoje bruto potrošnje električne energije obezbjedi energijom iz obnovljivih izvora. Tokom poslednje dvije decenije, Njemačka je doživjela obimno smanjenje broja zaposlenih u industriji uglja. Godine 1989. bilo je 156.731 zaposlenih u

rudnicima uglja širom Njemačke. Do 2012. godine ovaj broj je opao na 16.622 [Stojanović i Borović, 2019].

Bez obzira na tendencije Evropske Unije i međunarodne zajednice za smanjenjem korištenja uglja u procesu proizvodnje električne energije, a s obzirom na izgrađenu infrastrukturu i procjenjene rezerve uglja, realna je pretpostavka da će se u narednim godinama (i decenijama) proizvodnja električne energije u Republici Srpskoj dominantno oslanjati na eksploataciju uglja i rad termoelektrana. S tim u vezi, postoji realna potreba za optimizacijom procesa eksploatacije uglja i smanjenjem uticaja eksploatacije uglja i rada termoelektrana na životnu sredinu, što su najvažniji preduslovi efikasnog i održivog sistema snabdjevanja električnom energijom baziranog na termoelektranama.

U Srpskoj eksploatacija uglja vrši se na površinskim kopovima, i to sledećom tehnologijom:

- u rudniku Stanari koristi se kontinualna i diskontinualna tehnologija (potpuno modernizovan BTO sistem i hidraulični bageri kašikari i kamioni),
- na površinskom kopu Gračanica - Gacko otkopavanje i odlaganje otkrivke i jalovine vrši se kontinualnim sistemom, a otkopavanje uglja selektivnim otkopavanjem (hidraulični bageri kašikari i kamioni),
- na površinskom kopu Bogutovo selo – Ugljevik otkopavanje otkrivke i uglja vrši se diskontinualnom tehnologijom.

Kada je u pitanju kontinualna mehanizacija na površinskom kopu Gacko u primjeni su tri rotorna bagera, na površinskom kopu Stanari jedan rotorni bager. Ovi bageri su njemačke proizvodnje i nabavljeni su, zavisno od komercijalnih uslova, od različitih proizvođača: Takraf, O&K, Krupp i dr. i u periodu od više decenija, što je uslovilo njihovu veliku raznolikost i samim tim posebno otežano održavanje.

Oprema koja se održava je uglavnom stranog porijekla i vrlo skupa. Samim tim, održavanje treba da doprinese što dužem korištenju opreme. Među najvažnijim uslovima adekvatne upotrebe rotornih bagera je usklađivanje sile kopanja i otpora kopanja radne sredine. Neadekvatan izbor tipa mehanizacije u odnosu na realne otpore kopanja može usloviti značajno povećanje dimenzija bagera, njegove nabavne cijene. Štaviše, precijenjene vrijednosti otpora kopanja mogu da uslove da se još u fazi izbora mehanizacije odustane od primjene BTO sistema, odnosno do usvajanja ne toliko efektivne mehanizacije

diskontinualnog dejstva. S druge strane, potcenjivanje sile kopanja dovodi do pojave pada iskorištenja bagera, velikog opterećenja konstrukcije, odnosno do otežalog rada bagera.

Kao primjer uticaja geomehaničkih karakteristika stijenske mase na process otkopavanja uglja navodimo slučaj teške havarije rotornog bagera – loma konstrukcije rotornog točka bagera SRs 1301 24/2.5 u rudarskom basenu Kolubara Polje “D” 2014. godine, kao posljedica odrona jalovog materijala, kada je došlo do oštećenja značajnog dijela konstrukcije radnog mosta, dok su točak i reduktor kopanja bili zarobljeni odronjenim materijalom. BTO sistem se nalazio na frontu otkopavanja uglja i bager koji je pretrpio havariju morao je što prije da se premjesti, radi nesmetane proizvodnje uglja i pristupi njegovoj revitalizaciji [Paunović et al, 2016].

Imajući u vidu prethodno, jasno je da određivanje otpora kopanja stijenske mase predstavlja jedan od najvažnijih zadataka pri geomehaničkim istraživanjima na površinskim kopovima. Različite vrste stijenskih masa pružaju različite otpore kopanja, što zavisi od subjektivnih i objektivnih činilaca. Subjektivni činioci uslovljeni su samim petrološkim, fizičko-mehaničkim i tehničko-tehnološkim svojstvima stijenskog masiva. Od petroloških svojstava najveći uticaj na otpor kopanja stijena ima mineralni sastav, struktura i tekstura stijenske mase, i vrsta veziva kod posredno vezanih stijena. Očekivano je da stijene sa mineralima veće tvrdoće po Mosovoj skali (olivini, ortoklasi, i dr.), koji su svježi (neraspadnuti) pružaju veće otpore kopanja. Takođe, magmatske stijene sa zrnastom strukturom i masivnom teksturom otpornije su prema kopanju u odnosu na magmatske stijene porfirske strukture i planparalelene tekture, ili u odnosu na uslojene posredno vezane sedimentne stijene (npr. pješčari). Od mehaničkih svojstava najveći uticaj imaju čvrstoća stijenske mase na pritisak, zatezanje i smicanje, dok su od tehničko-tehnoloških svojstava primarni faktori tvrdoća i žilavost. Sva ova svojstva stijenskih masa mogu da se utvrde laboratorijski, ispitivanjem na uzorcima. Međutim, na otpor kopanja stijenske mase značajan uticaj imaju i svojstva stijenskog masiva in situ: ispučlost, prirodna napregnutost i stepen površinskog raspadanja. Kvantifikacija uticaja ovih faktora vrši se na osnovu terenskih ispitivanja, detaljnim geotehničkim kartiranjem terena – kosina i primjenom odgovarajućih klasifikacija terena kao radne sredine. Najvažniji objektivni činioci koji utiču na otpor kopanja stijenske mase jesu karakteristike alata i tehnologija kopanja.

Predmet disertacije je istraživanje vezano za fizičko mehaničke karakteristike stijenske mase, uključujući zapreminsку težinu, granulometrijski sastav, parametre otpornosti stijenske mase

na smicanje (koheziju i ugao unutrašnjeg trenja), i čvrstoću na pritisak. Sve navedene fizičko - mehaničke karakteristike stijenske mase imaju statistički značajan uticaj na otpor kopanja, izražen preko sile rezanja, koeficijenta otpora rezanja i kopanja i potrošnji energije.

Posebno treba istaći da je predmetnim istraživanjima obuhvaćena mnogo šira oblast od one koja je bila predviđena samom temom disertacije. Premda je svojom temom, disertacija vezana za površinske kopove u uslovima čvrstih stijena, pored izučavanja čvrstih stijenskih masa, na primjeru površinskog kopa „Turija-Banovići”, vršena su istraživanja veze otpora kopanja, rada bagera i geomehaničkih karakteristika uglja (rudnik podzemne eksploatacije „Kovin”) i nevezanih i slabo vezanih stijenskih masa i otkrivke (površinski kop „Tamnava Istočno polje“). Na taj način, predmetnom disertacijom obuhvaćeni su svi mogući slučajevi pojave stijenskih masa na površinskim kopovima, čime disertacija dobija sveobuhvatniji značaj.

Naučni doprinos disertacije ogleda se u formiranju originalnih modela za prognozu otpora kopanja i rada rotornog bagera (potrošnje struje na bageru i brzine bagera), u funkciji osnovnih geomehaničkih karakteristika stijenske mase. Koliko je autoru poznato, rezultati predstavljeni u ovoj disertaciji predstavljaju prve i originalne rezultate na polju uspostavljanja funkcionalne zavisnosti između geomehaničkih karakteristika stijenske mase i otpora kopanja i karakteristika rada bagera. Ovako razvijeni modeli mogu naći svoju direktnu primjenu na površinskim kopovima koji su analizirani u predmetnoj disertaciji. Osim toga, na drugim površinskim kopovima, sprovedenim istraživanjem je definisana metodologija kreiranja prognoznih modela, koja može poslužiti da se korištenjem podataka sa konkretnih kopova formiraju modeli koji će biti prilagođeni specifičnostima uslova rada na različitim površinskim kopovima.

Predmetna disertacija strukturirana je u devet poglavlja.

- U prvom poglavlju se daje opis predmeta istraživanja, osnovne hipoteze i motivacija za predmetno istraživanje.
- U drugom poglavlju data je metodologija istraživanja, sa teorijom statističke analize.
- U trećem poglavlju je dat pregled dosadašnjih istraživanja iz oblasti doktorske disertacije.
- U četvrtom poglavlju su date teorijske postavke otkopavanja materijala kontinualnim dejstvom sa posebnim akcentom na rad rotornog bagera i otpore koji se javljaju prilikom kopanja i metode određivanja specifičnog otpora kopanja materijala.

- U petom poglavlju dat je pregled primjene BTO sistema na površinskim kopovima u Republici Srpskoj.
- U šestom poglavlju dati su rezultati terenskih i laboratorijskih istraživanja određivanja specifičnog otpora kopanja metodama, zatim formirani su prognozni modeli i njihova verifikacija na tri primjera površinskog kopa uglja.
- U sedmom poglavlju data su zaključna razmatranja o pouzdanosti formiranih modela i njihovoj provjeri određivanjem koeficijenta determinacije i srednje kvadratne greške.
- U osmom poglavlju je dat pregled korištene literature.

## **2. PREGLED REZULTATA DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA**

Istraživanja vezana za otpore kopanja rotornih bagera predviđenih za otkopavanje različitih vrsta stijenskih masa izvode se sa ciljem adekvatnog izbora bagera prilagođenih konkretnim uslovima radne sredine. Većina mašina na površinskim kopovima koje rade na otkrivci ili dobijanju rude, razaranje obavljaju rezanjem ili odlamanjem. Kod projektovanja i eksploatacije tih mašina važno je znati kakve se sile javljaju pri rezanju, kopanju, kolika je snaga potrebna za pogon radnog organa, pri kojem režimu dostiže najbolju produktivnost uz prihvatljivu potrošnju energije i kakav oblik radnog organa odgovara određenim uslovima.

Proces razaranja radne sredine sadrži rezanje, cijepanje, odlamanje velikih blokova, bušenje i drobljenje. Rezanje i bušenje se uključuju u operaciju kopanja. Rezanje kao takvo predstavlja proces odvajanja dijela materijala od masiva pomoću reznog dijela radnog organa koji ima obično oblik klina. Kopanje je, međutim, skup operacija odvajanja materijala od masiva, uključujući njegovo rezanje i pomjeranje po radnom organu, a u posebnim slučajevima pomjeranje unutar radnog organa, npr. u vedricama rotornih bagera. Sve radne operacije: odvajanje materijala iz masiva (rezanje), zahvatanje radnim elementom (punjenje), prenos zahvaćenog materijala do mesta pražnjenje (podizanja) i predaja istom transportnom sredstvu (istovar), obavljaju se neprekidno. Prema tome, rezanje otkopanog materijala predstavlja samo jednu od radnih operacija u složenom kontinualnom procesu kopanja.

Jasno je da složenost ovog radnog procesa iziskuje opsežna istraživanja radi potpunijeg razjašnjavanja različitih fizičko-mehaničkih pojava koje iz tog radnog procesa proističu.

Pojedinačna i fragmentalna istraživanja, koja se uglavnom odnose na radnu operaciju rezanja, ne mogu da pruže adekvatne rezultate koje bi se praktično primjenjivali za različite uslove radne sredine.

Opšti nedostatak istraživanja procesa kopanja primjenom rotornih bagera ogleda se u velikom broju primjenjenih metoda i postupaka, kao i širokom dijapazonu dobijenih parametara kopanja, za iste ili slične vrste stijenskog materijala ili mineralne sirovine.

Raznolikost, a često i neujednačenost ovog radnog procesa u praksi obično dovodi do nerealne ocjene eksploatacione sposobnosti bagera. Naime, sposobnost savremenih rudarskih mašina (rotornih bagera) za otkopavanje različitih vrsta materijala, zavisi od toga koji se od mnogobrojnih obrazaca primjenjuje i koji od njih se preporučuje od strane proizvođača ovih mašina.

Uvođenjem u rad bagera sa više radnih elemenata, naročito rotornih bagera, nastupilo je veće interesovanje za problem rezanja raznih vrsta stijena. Glavni cilj ovih istraživanja bio je da se pruži najpovoljniji postupak izbora mehanizma za rezanje stijenskih masa, a time i izbor tipa i veličine bagera. U bivšem SSSR-u do značajnih rezultata zasnovanih na utvrđivanju specifičnog otpora kopanja  $K_F$  došao je Dombrovski.

Eksperimentalna verifikacija teorije rezanja stijenskih masa izvršena je od strane A.N.Zelenina. On tvrdi da otpor kopanja zavisi od niza činilaca i da se oba pokazatelia  $K_F$  (specifični otpor kopanja) i  $K_L$  (specifični otpor rezanja) mjenaju sa promjenama oblika i veličine elementarnog adreska otkopane mase.

Razvoj posebne naučne discipline, mehanike stijena vezan je za niz istraživačkih radova koji se zasnivaju na analitičko-teoretskim metodama kopanja raznih vrsta stijena. U ovom domenu poznati su sledeći istraživači kao: Zelnin, Ajzenštak, Vetrov, Limberk, Artiemabajev, Brach, Sahne i dr.

Najveći broj istraživanja vršen je u zemljama koje su imale jaku tradiciju u kontinualnoj eksploataciji na površinskim kopovima i zemljama koje su proizvodile rotorne bagere, kao što su Rusija, Njemačka i Poljska.

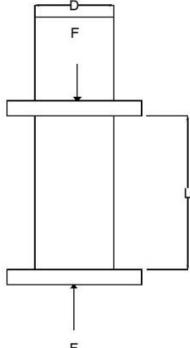
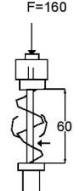
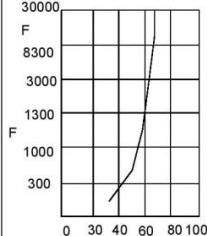
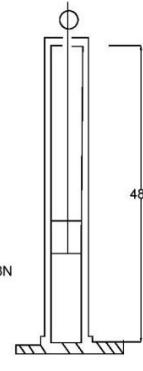
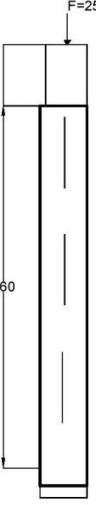
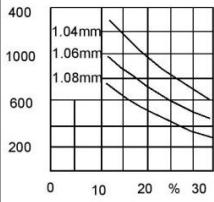
U tabeli 2.1. prikazani su autori, metode mjerena i doprinosi u oblasti istraživanja procesa kopanja i određivanja otpora kopanja. Na slikama 2.1., 2.2., 2.3. i 2.4. šematski su prikazane neke od brojnih metoda i mjernih uređaja za laboratorijsko i terensko određivanje otpora kopanja.

Tabela 2.1. Sistematisacija postavki o procesu kopanja [Ignjatović, 1993]

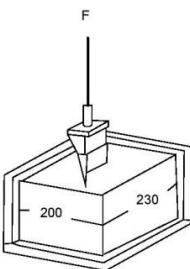
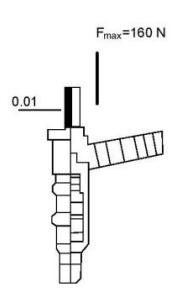
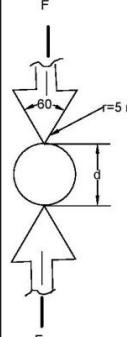
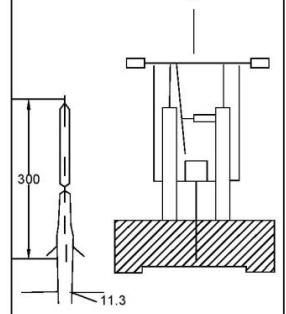
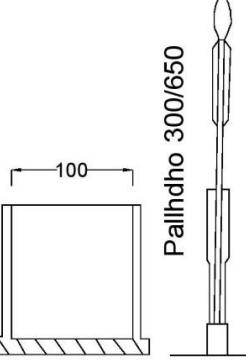
AUTOR	METODE	DOPRINOSI
Gorjačkin V.P.	-rezanje tla plugom	-formula za izračunavanje sile rezanja, -opadanje vrijednosti specifičnog otpora pri povećanju površine poprečnog presjeka adreska.
Elijah Weber	-lom tla pri rezanju ravnim nožem	-dinamički karakter procesa rezanja, -četiri vrste loma tla.
Dinglinger E.	-opiti u kanalu sa pijeskom	-kritična dubina zarivanja noža.
Rathe J.	-opit sa pijeskom I elementarnim nožem, -upotreba teorije mehanike rastresite sredine za određivanje otpora rezanja.	-zavisnost sile rezanja od geometrijskih parametara adreska, -promjenljivost sile rezanja, -ravni smicanja, -raspodjela pritiska po dubini zarivenog noža, -izraz za silu rezanja, -prostorni uticaj noža na tijelo.

AUTOR	METODE	DOPRINOSI
Sohne	-rezanje pijeska	-oscilovanje sile rezanja oko srednje vrijednosti u granicama $\pm 50\%$
Siemens Weber Thornburn	-eksperiment u kanalu sa mješavinom gline i ulja (10 %) mehanički sabijenom	-periodičnost procesa rezanja -pojava ravni klizanja -zavisnost sile od ubrzanja rezanja
Ismer Luth	-uticaj brzine na process rezanja	-dominantan uticaj horizontalne komponente sile rezanja
Dombrovski N.G.	-iskop materijala zahvatnim uređajem (kašikom), -mjerjenje sile kopanja u zavisnosti od geometrijskih parametara adreska.	-izraz za silu kopanja.-specifični otpor kopanja, kao količnik sile kopanja i površine poprečnog presjeka adreska, -zavisnost specifičnog otpora od geometrijskih odnosa procesa kopanja, -nesklad mjerjenja sile na modelu i na mašinama, -dominantan uticaj sile rezanja u ukupnoj sili kopanja.
Ajzenštok	-dopuna Dombrovskog, -rezanje tla prostim oštrim nožem.	-zavisnost specifičnog otpora kopanja od ugla rezanja i pokazatelja terena, -izraz za silu dobijen uprošćavanjem izraza za pasivni „pritisak“ tla, prema Sokolovskom, -izraz za silu prema Kulonu, -izraz za silu prema Zvorikinu I.A.
Vladimirov V.M.	-ispitivanje na rotornom bageru	-dinamički karakter otpora kopanja, -koeficijent dinamičkog opterećenja.
Zelenin A.N.	-fizičke i geometrijske zavisnosti rezanja tla, -proučavanje procesa rezanja raznim oblicima noža, -opit sa zamrznutim zemljištima.	-izraz sile rezanja za: -elementarni profil, -kašiku bagera bez zuba, -sanduk skrepere, -buldozerski plug, -zavisnost sile kopanja od veličine otpora tla na rezanje, -nagovještaj primjene mehanike loma u određivanju sile rezanja.
Vetrov Ju.A.	-ispitivanja na prirodnom tlu, -ispitivanje potpuno i djelimično blokirano rezanja, -sinteza teoretskog razmatranja i rezultata praktičnih ispitivanja.	-konstatacija periodičnosti sile, -izraz za silu u složenoj funkciji niza nezavisnih parametara, -komponovanje sile rezanja složenim nožem pomoću sila elementarnih profila, -uticaj ugla rezanja na način oblikovanja adreska, -objašnjenje pojave “sabijenog jezgra” na reznoj ivici, -detaljna zavisnost sile rezanja od dubine i širine rezanja.
Fedorov D.J.	-sinteza analitičkih razmatranja (mehanika tla), sa rezultatima eksperimenta.	-izraz za tangentnu komponentu sile kopanja, -uticaj zatupljenja rezne ivice, kao promjenljivog faktora, na silu rezanja.
Heuman	-ispitivanje modelskog tla (pijesak, šljunak, cement i kamenno brašno).	-dinamički karakter sile rezanja.
Vornkahl	-ispitivanje uticaja brzine rezanja na silu rezanja u finom pijesku.	-granična brzina rezanja.

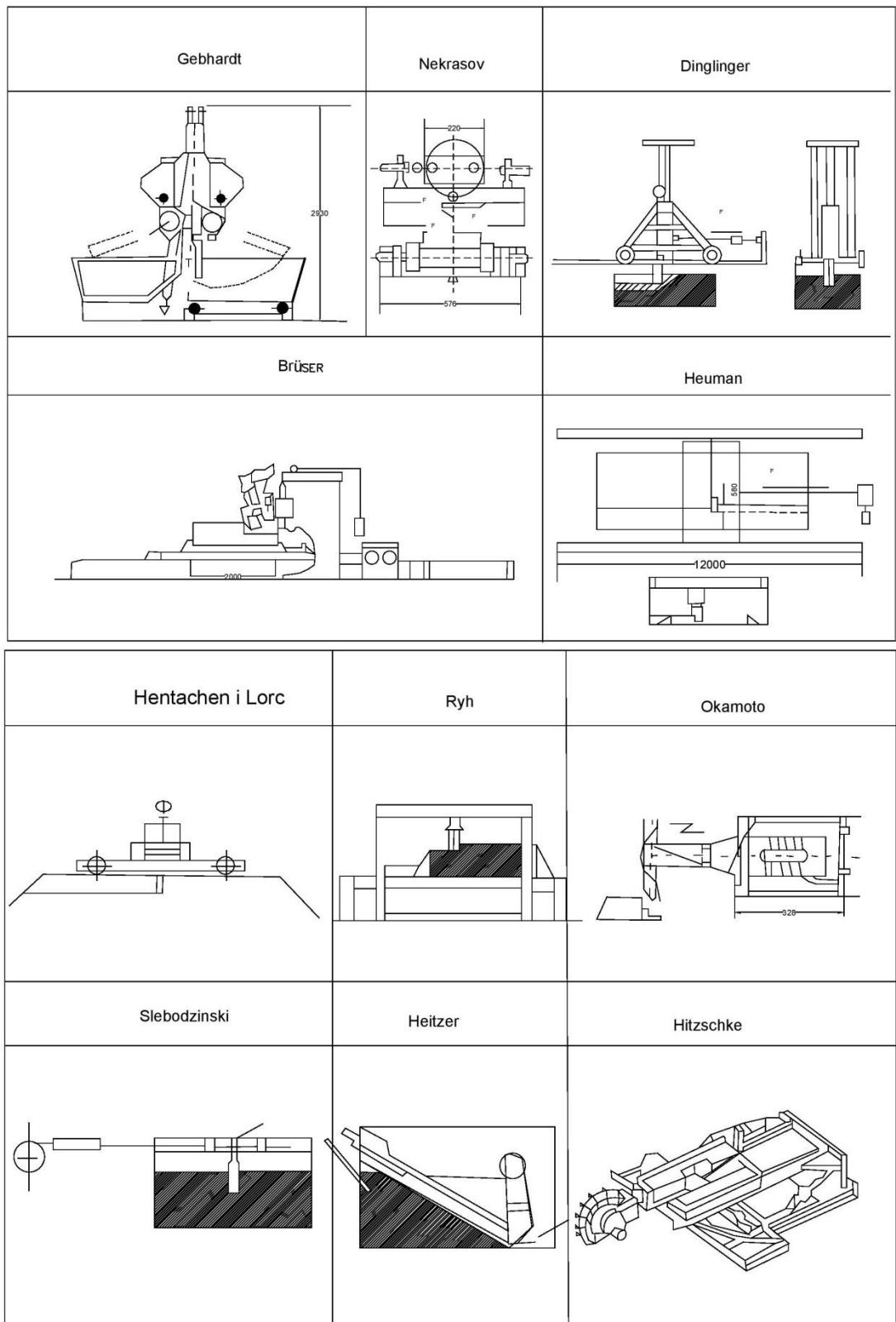
AUTOR	METODE	DOPRINOSI
Balovnjev V.I.	-teoretska razmatranja i eksperimenti.	-izraz za silu rezanja, opšti i za određene vrste reznih elemenata.
Tyro	-skreper, -primjena "teorije potpornog" zida u izračunavanju otpora rezanju.	-izraz za silu rezanja, -uticaj oblika noža na otpor kopanja.
Surikov V.V.	-krti lom smrznutog tla.	-određivanje faktora inteziteta naponi.
Ryhming Cooper Berli	-razmatranja na bazi postavki mehanike loma, -eksperimenti posebnim uređajem.	-određivanje sile i energije loma korištenjem mehanike loma.
Evans	-teoretska razmatranja na bazi mehanike loma i provjere opitom.	-razvrstavanje loma homogenih materijala na dvije vrste, -razvoj pukotina po krivoj površini.
Atanasković H.	-eksperimenti na modelu i u realnim uslovima.	-mjerjenje otpora kopanja, -određivanje specifične rezne sile.
Milović P.	-teoretska razmatranja na bazi mehanike loma, -opit sa pijeskom i šljunkom, sabijenim ili uz dodatak kamenog brašna, cementa i vode.	-određivanje otpora kopanja primjenom teorije mehanike loma, -analiza uticajnih faktora na veličinu sile rezanja.
Radojević J.	-eksperimenti u laboratorijskim i realnim uslovima.	-prilagođavanje brzine i uglova rezanja u funkciji utrošene energije i instalisane snage
Pratz K.H.	-eksperimenti u realnim uslovima.	-mjerjenje sile na sjećivima vedrice rotornih bagera.
Szepietowski W.	-eksperimenti u realnim uslovima.	-klasifikacija stijena u odnosu na otpor kopanja, -određivanje korelacionih zavisnosti otpora kopanja i fizičko-mehaničkih karakteristika materijala.

DIN 1836	Udarni čekić	Pomeroy	Protođakonov	Test padanja i test doboša A.S.T.M.
	 			

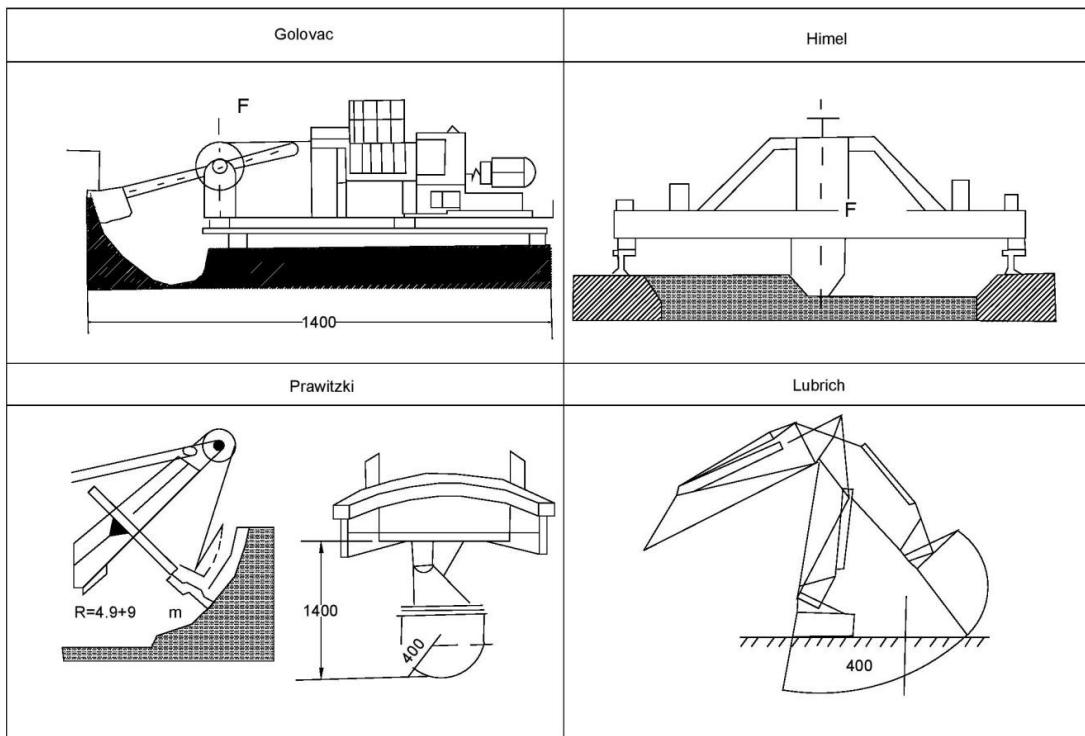
Slika 2.1. Pregled empirijskih metoda za određivanje otpora rezanja [Ignjatović, 1993]

Otpor utiskivanju	Sprava po Zingel-u	Point-load test	Penetrometar	Proctor-igla
	 $F_{max} = 160 \text{ N}$	 $r=5 \text{ mm}$	 $300$ $11.3$	 $100$ <b>Pallhdho 300/650</b>

Slika 2.2. Pregled metode za određivanje otpora rezanja naizmjeničnim djelovanjem rezni element-uzorak [Ignjatović, 1993]



Slika 2.3. Pregled poznatih uređaja za laboratorijska određivanje otpora rezanja [Ignjatović, 1993]



Slika 2.4. Pregled uređaja za terensko određivanje otpora rezanja [Ignjatović, 1993]

Wojtkiewitch H. [iz Bošković, 2016., prema Wojtkiewitch, 1963], [iz Bošković, 2016. prema Wojtkiewitch, 1974] je analizirao otpor kopanja u funkciji površine i oblika reza, na osnovu čega je definisana metodologija određivanja specifičnog otpora kopanja i dužine reznih ivica. Dodatno, izvedene su analize i trajanja zuba za različite uslove radne sredine.

Vetrov J. A. [iz Bošković, 2016., prema Vetrov, 1965.] je analizirao kako više parametara utiče na silu rezanja, prije svega fizičko-mehanička svojstva radne sredine, geometrija reznih alata (zakošenje rotora prema rotornoj strijeli, položaj zuba na vedricama i nagib rotora) i ishabanost reznih alata.

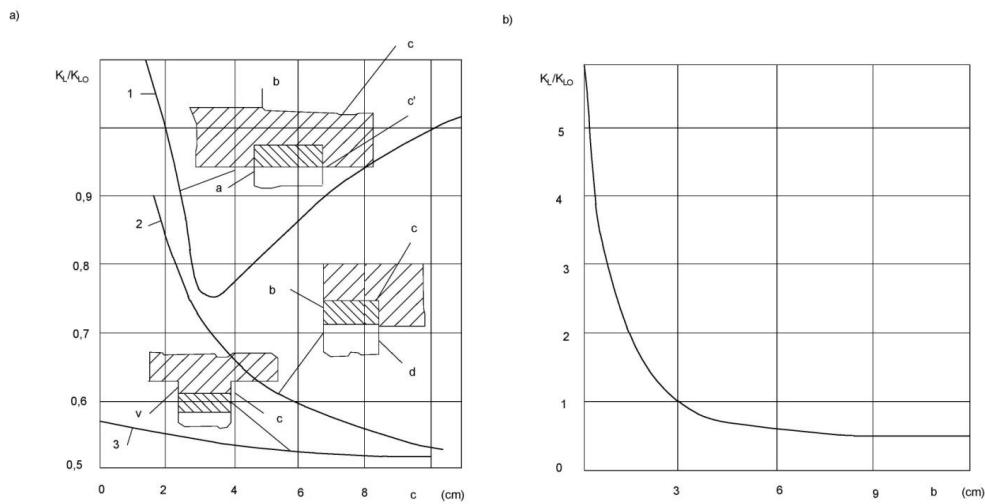
Dombrovski N. G. [Dombrovski, 1972] je vršio terenske opite sa bagerskim vedricama, a na osnovu rezultata istraživanja je zaključeno da otpor kopanja zavisi od geometrijskih parametara odreska i reza, fizičko-mehaničkih svojstava radne sredine, i od oblika i dimenzija radnog organa.

Coleman i Fitzhardinge [Coleman i Fitzhardinge, 1979] uspostavili su korelaciju između čvrstoće na pritisak, otpora rezanja dlijeta i indeksa čvrstoće tačkastog opterećenja.

Dambrovski je uveo pojam specifičnog otpora kopanja:

$$K_F = \frac{P_{01}}{F} . \quad (2.1)$$

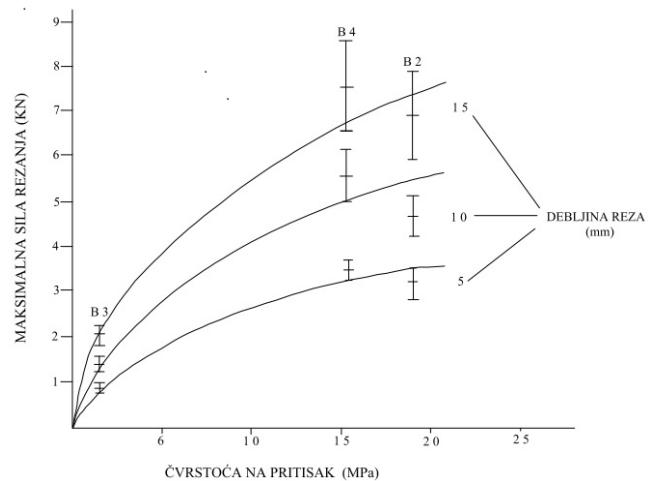
Smanjenje otpora kopanja  $K_F$  sa povećanjem debljine reza (c) objašnjava se manjim deformacijama stijene, zbog odlamanja većih komada i stepena njegovog razaranja. Na slici 2.5. prikazan je uticaj debljine i širine reza na specifični otpor rezanja kod blokiranoj, polublokiranog i slobodnog kopanja.



Slika 2.5. Uticaj debljine i širine reza na specifični otpor rezanja [Đukić, 1984]

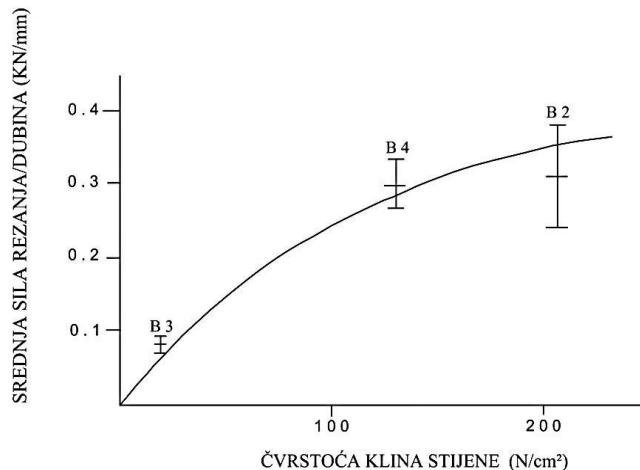
Na bazi eksperimenata predložena je klasifikacija stijena po specifičnom otporu kopanja.

Inal [Inal, 1984] je razvio novi indeks otpora kopanja za bagere sa zubima, zasnovan na korelaciju između čvrstoće stijene na pritisak i sile rezanja (slika 2.6).



Slika 2.6. Relacija između sile rezanja i čvrstoće na pritisak [Inal, 1984]

Pošto između čvrstoće na pritisak i čvrstoće klina, postoji linearna zavisnost može se pretpostaviti da bi korelacija između sile rezanja i rezultata opita klina mogla imati nelinearnu zavisnost. Slika 2.7. pokazuje da bi to bio slučaj čak i kada je srednja sila normirana i izražena kao srednja vrijednost sile rezanja po dubine reza.



Slika 2.7. Rezivost jalovinskih stijena u funkcija čvrstoće [Inal, 1984]

Đukić [Đukić, 1984] je dao vrijednosti otpornosti na pritisak, kohezije i otpora kopanja za pojedine materijale prikazane u tabeli 2.2.

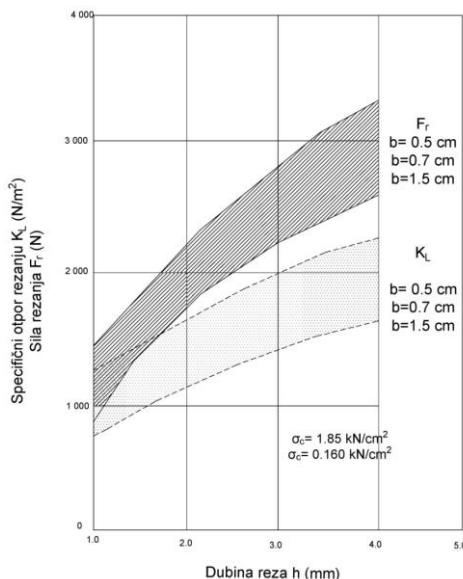
Tabela 2.2 Vrijednosti otpora kopanja bagera za različite kategorije stijena [Đukić, 1984]

Kategorija stijena	Stijene	Otpor kopanja $K_F$						Zapreminska masa $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Koeficijent rastresitosti $k_r$		
		Ciklični bageri			Kontinuirani bageri						
		Kašikar	Dreglajn	Strugač	Vedričar	Rotorni	Kanaolokopač				
I	Pijesak, mekana glina vlažna i rastresita pjeskovita glina bez umetka	1,6-5,5	3-12	4-13	5-18	4-13	7-23	12-15	1,05-1,16		
II	Pjeskovita	7-16	12-20	14-20	15-30	12-25	21-40	14-19	1,14-1,20		

Kategorija stijena	Stijene	Otpor kopanja $K_F$						Zapreminska masa $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Koeficijent rastresitosti $k_r$
		Ciklični bageri			Kontinuirani bageri				
		Kašikar	Dreglajn	Strugač	Vedričar	Rotorni	Kanaolokopač		
	glina bez umetka, sitnozrni i srednji šljunak, mekana, vlažna ili rastrešena glina								
III	Pjeskovita glina, srednje čvrstoće, čvršća, vlažna ili rastrešena, vrlo meki argilit i arevolut.	12-25	16-30	13-32	24-45	20-35	38-60	16-20	1,24-1,3
IV	Pjeskovita glina, čvršća sa šljunkom, glina čvrsta i vrlo čvrsta vlažna, mekani ugalj, slabo cementiran konglomerat	22-36	25-42	27-45	37-60	30-45	55-80	19-22	1,28-1,3
V	Laporci, mekši, glina čvrsta, suva i les, kreda, gips, ugalj, vrlo mekan pješčar, mekani konglomerati, dobro minirana otkrivka (komadi do 0,3-0,4 širine kašike)	33-55	40-55	44-60	58-85	42-66	80-100	21-25	1,35-1,40
VI	Mekani krečnjak,	43-75 70-140	- -	48-82 80-	75-15 150-	55-12 130-	100-220	23-26 12-15	1,4-1,4 1,4-1,4

Kategorija stijena	Stijene	Otpor kopanja $K_F$						Zapreminska masa $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Koeficijent rastresitosti $k_r$		
		Ciklični bageri			Kontinuirani bageri						
		Kašikar	Dreglajn	Strugač	Vedričar	Rotorni	Kanaolokopač				
	kreda, laporci i gips srednje čvrstoće, čvrsti ugalj, vrlo čvrst ugalj			150	250	200	-				
VII	Čvrsti laporci, kreda i gips, krečnjak srednje čvrstoće, mekan pješčar, smrznuto tlo	120-450	-	100-450	150-550	130-500	200-600	23-28	1,42-1,4		
VIII	Čvrste i smrznute stijene dobro minirane	22-25	23-31	30-35	-	-	-	-	-		

Na površinskom kopu Kakanj [Đukić, 1984] vršena su ispitivanja sile rezanja i specifičnog otpora rezanja za laporce (slika 2.8.)



Slika 2.8. Sila rezanja i specifični otpor rezanja za laporce sa površinskog kopa Kakanj  
[Đukić, 1984]

Tabela 2.3. Vrijednosti otpornosti na pritisak, kohezije i otpora na kopanje za pojedine materijale [Đukić, 1984]

Kategorija stijena	Materijal	Otpornost na pritisak $\sigma$ (N/cm <sup>2</sup> )	Kohezija C (N/cm <sup>2</sup> )	Otpor kopanja K <sub>F</sub> (N/cm <sup>2</sup> )
I	Meko i rastresito tlo	< 300	< 2	$\frac{1 - 6}{3}$
II	Dovoljno zbijeno tlo	300-800	2-4	$\frac{6 - 12}{9}$
III	Slab ugalj Zbijeno tlo	800-1000	4-7	$\frac{12 - 20}{16}$
IV	Srednje čvrst ugalj Veoma zbijeno tlo	1000-1500	7-10	$\frac{20 - 28}{24}$
V	Čvrst ugalj Polučvrste stijene s najmanjom čvrstoćom Vezane stijene izrazito raspucale Teške rude izrazito raspucale	1500-3000 150-2000 < 6000 < 8000	10-15	$\frac{28 - 38}{33}$
VI	Vrlo čvrst ugalj Dovoljno čvrste razne poluvezane stijene Vezane stijene i teške rude jako raspucale	> 3000 2000-3000 > 8000	15-23	$\frac{38 - 50}{44}$
VII	Čvrste razne poluvezane stijene Vezane stijene i teške rude srednje raspucale	3000-6000 > 8000	23-35	$\frac{50 - 70}{60}$
VIII	Vezane stijene i teške rude malo raspucale	> 8000	35-55	$\frac{70 - 100}{85}$
IX	Vezane stijene i teške rude bez pukotina	> 8000	55	100-150

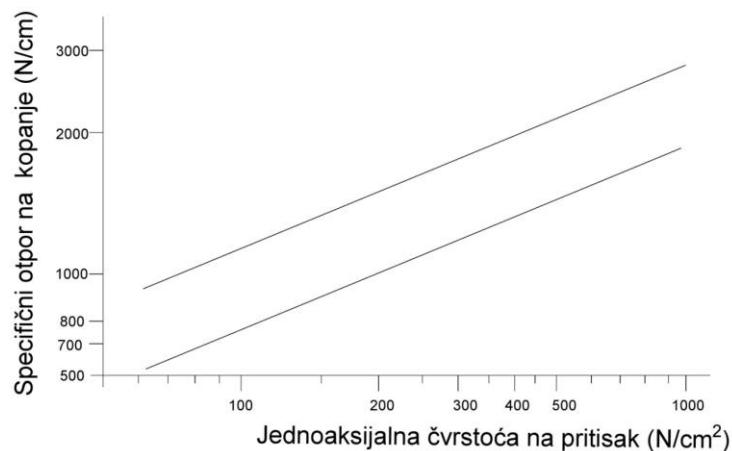
Tokom 80-ih godina prošlog vijeka na Institutu za rudarska istraživanja u Tuzli, vršena su eksperimentalna, laboratorijska ispitavanja parametara rezivosti čvrstih stijena na primjeru PK "Turija" Banovići [Šalović, 1987]. Krive zavisnosti dobijene na taj način predstavljene su u obliku jednostavnih eksponencijalnih funkcija dubine reza i koeficijenta otpora rezanja, dok uticaj karakteristika stijenske mase na otpor kopanja nije detaljno razmatran.

Szepiatowski W. [iz Bošković, 2016, prema Szepietowski, 1991] je na osnovu istraživanja površinskih kopova u Poljskoj definisao specifični otpor kopanja u funkciji kohezije, zapreminske težine i rastresitosti, kao i vrste vedrica i zuba.

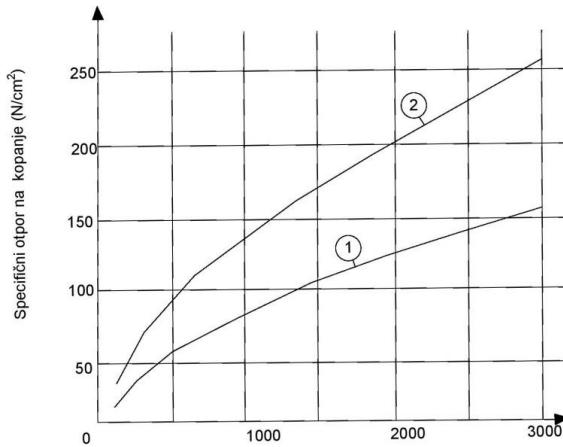
Bolukbassi i dr. [1991] ustanovili su klasifikaciju rezivosti jalovinskih materijala na osnovu korelacije između specifične energije rezanja i Ohrenstein & Koppel metoda klina.

Ignjatović D. [Ignjatović, 1993] je analizirao mogućnost izbora metode za određivanje otpora kopanja za slučaj primjene rotornih bagera na površinskim kopovima lignita Kolubare. U ovom magistarskom radu posebna pažnja posvećena je prilagođavanju sile kopanja otporu stijenske mase. Efekat oblika zuba i njihovog kvaliteta je posebno analiziran, uključujući i zavisnost specifičnog otpora kopanja od tehnoloških parametara adreska. Za određivanje specifičnog otpora kopanja materijala korištene su dvije terenske (vatmetarska i penetrometrijska), dvije laboratorijske (razaranje uzorka klinom i razaranje uzorka jednoaksijalnim pritiskom) i dvije korelace metode koje počivaju na suodnosu između specifičnog otpora kopanja sa jedne strane i kohezije, odnosno procentualnog udjela prašinastih frakcija u materijalu i vlažnosti materijala.

Na slikama 2.9. i 2.10. prikazane su zavisnosti specifičnog otpora kopanja i jednoaksijalna čvrstoća na pritisak.



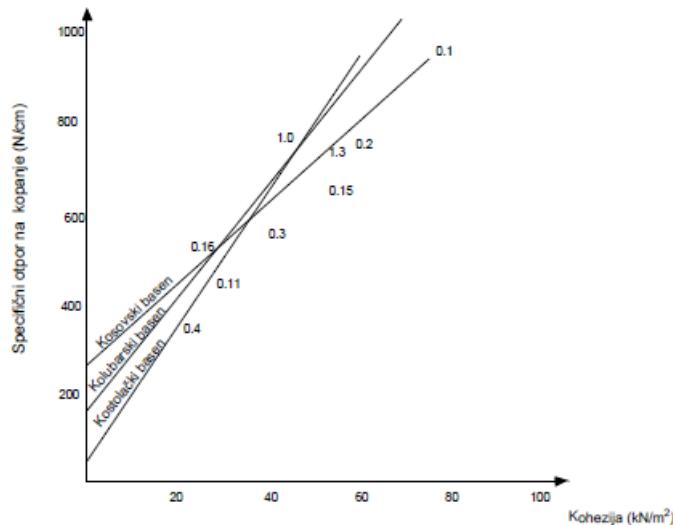
Slika 2.9. Zavisnost specifične sile kopanja ( $K_l$ ) od jednoaksijalne čvrstoće na pritisak  
[Ignjatović, 1993]



Slika 2.10. Zavisnost specifične sile kopanja ( $K_t$ ) od jednoaksijalne čvrstoće na pritisak  
[Ignjatović 1993]

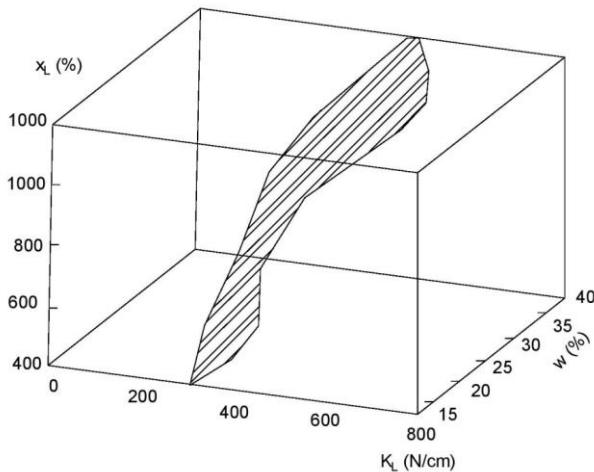
Na slici 2.11. prikazana je zavisnost između specifičnog otpora kopanja i kohezije za sva tri bazena u Srbiji (Kolubara, Kosovo, Kostolac), a prema istraživanjima Rudarskog instituta [Ignjatović, 1993] Za materijale u basenu Kolubara ta zavisnost je definisana izrazom:

$$K_t = 12,83c + 143,8 \quad (2.2)$$



Slika 2.11. Zavisnost specifičnog otpora kopanja od kohezije za basen Kolubara, Kostolac i Kosovo [Ignjatović 1993]

Zavisnost između specifičnog otpora kopanja sa jedne i procentualnog udjela prašinastih sastojaka, vlage, brzine kopanja i ukupne površine poprečnih presjeka svih vedrica koje su istovremeno u kontaktu sa materijalom sa druge strane prikazana je na slici 2.12.



Slika 2.12. Zavisnost specifičnog otpora kopanja od procentualnog udjela prašinastih sastojaka i vlage [Ignjatović 1993]

Scheffler [Scheffler, 1997] je analizirao mogućnost predviđanja otpora rezanja na bagerima sa zubima pod uticajem parametara strukture stijene.

Razz V. [iz Bošković, 2016, prema Razz, 1999] je razmatrao uticaj radne sredine na silu rezanja primjenom point-load testa i originalnog softvera za optimalan izbor tehnoloških parametara radnog procesa i geometrije zuba.

Su i Akcin [Su i Akcin, 2005], su predložili odnos između Šorovog indeksa tvrdoće i nekoliko svojstava uglja: jednoaksijalne čvrstoće na pritisak, Šorovog indeksa tvrdoće, indeks dinamičke čvrstoće i vrijednosti prodiranja konusa. Relacije između ovih parametara date su kao jednostavne linearne funkcije, zasnovane na rezultatima ispitivanja deset uzoraka uglja.

Drugi pristup u izučavanju otpora kopanja stijena podrazumijeva definisanje posebnih klasifikacija terena kao radne sredine, odnosno definisanje kvalitativnih karakteristika stijenske mase preko posebnih numeričkih pokazatelja, odnosno indeksa, uzimajući u obzir jednoaksijalnu čvrstoću na pritisak, brzinu prostiranja seizmičkih talasa, indeks kvaliteta jezgra, modul elastičnosti, abrazivnost, svojstva pukotina, poput njihove hrapavosti, stepena alteracije, broja familija, i dr. [Dey i Ghose, 2008] [Dey i Ghose, 2011].

Dey i Ghose [2011] predložili su novi sistem klasifikacije stijenske mase za površinsku eksploataciju, koji se bazira na zavisnosti indeksa rezivosti od tačkastog opterećenja, stepena ispucalosti stijene, abrazivnosti, pravca rezanja u odnosu na pravac glavne pukotine i snage mehanizacije.

Amara i dr. [Amar et al, 2013], koji uvode indeks rezivosti, kao funkciju više numeričkih pokazatelja pridruženih kvalitativnim svojstvima stijenske mase (procjene indeksa tačkaste čvrstoće, procjene abrazivnosti, zapreminskog koeficijenta ispucalosti, uticaja orijentacije sjećiva u odnosu na položaj glavnih diskontinuiteta u stijenskoj masi i procjene primjenjene snage mehanizacije). Takav pristup je od značaja u prvim, preliminarnim procjenama otpornosti kopanja stijenske mase, ali to zahtijeva dodatne metode procjene u kasnijim, detaljnijim fazama određivanja karakteristika stijenske mase radi adekvatnog izbora mehanizacije. S druge strane, takav pristup podrazumjeva značajan uticaj subjektivne procjene, u smislu određivanja karakteristika pukotina, što, kod finalnog modela, može značajno uticati na njegovu pouzdanost i tačnost.

Langham-Villiams i Hagan [Langham-Villiams i Hagan,2014] su predložili neke jednostavne korelacije između jednoaksijalne čvrstoće na pritisak nekoliko vrsta stijena (pješčar, šljunak, ugalj, konglomerati i injekciona masa) i njihovih svojstava rezanja (specifična energija, sila rezanja i normalna sila). Rezultati dobijeni analizom 44 uzorka pokazali su visoku vrijednost koeficijenta determinacije ( $\geq 0,63$ ).

### **3. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA**

Imajući u vidu kompleksnu problematiku izučavanja otpora kopanja, primjenjeni metodološki princip realizacije planiranih aktivnosti u okviru disertacije podrazumjevalo je faznost u postupku izučavanja, istraživanja i ispitivanja, i to kroz četiri faze:

- 1) **U prvoj fazi istraživanja** izvršena je analiza postojeće literature i fondovske dokumentacije. U ovoj fazi glavna pažnja je bila usmjerena na analizu rezultata studija prethodnih istraživanja u vezi sa izučavanjem otpora kopanja. Takođe, pristupilo se analizi rezultata istraživanja objavljenih u radovima u referentnim međunarodnim časopisima. Na kraju ove faze, izvršio se odabir pogodnih lokacija (površinski krovovi „Kovin“, „Turija“ i „Tamnava - istočno polje“) za formiranje modela, u zavisnosti od specifičnosti geomehaničkih svojstava terena.
- 2) **U drugoj fazi istraživanja** izvršena su terenska istraživanja, odnosno mjerjenja otpora kopanja i potrošnji energije bagera vatmetarskom metodom, pri čemu su za analizu korišteni i podaci registrovani na terenu iz prethodnih istraživanja, a sve u cilju dobijanja što brojnijeg uzorka za pouzdanu statističku analizu.
- 3) **U trećoj fazi istraživanja** pristupilo se laboratorijskom ispitivanju otpora kopanja na uzorcima stijenskih masa, pri čemu su i u ovoj fazi prikupljeni i rezultati prethodnih laboratorijskih ispitivanja, radi dobijanja što većeg uzorka za validnu statističku analizu.
- 4) **U četvrtoj fazi istraživanja** je izvršena obrada dobijenih i prethodnih terenskih podataka i laboratorijskih rezultata, na osnovu čega se pristupilo formiranju prognoznih modela. Obrada podataka podrazumjevala je statističku analizu rezultata istraživanja i formiranje matematičkih modela sa određivanjem greške procjene i intervalima pouzdanosti. Formiranje modela je izvršeno primjenom savremenih matematičkih metoda višestruke linearne regresije. Modeli su razvijeni kao nelinearne funkcije karakteristika otpora kopanja od fizičko-mehaničkih karakteristika stijenske mase. Pouzdanost formiranog modela provjerena je određivanjem koeficijenta determinacije i srednje kvadratne greške, kao ispitivanjem raspodjele i autokorelacije reziduala.

Istraživanja su sprovedena na tri različite lokacije – pilot područja, sa različitom tehnologijom eksploatacije mineralnih sirovina:

- **Istraživanja na prvoj lokaciji - rudnik uglja sa podvodnom eksploatacijom „Kovin“** obuhvatila su analizu otpornosti kopanja uglja, tako što je na uzorcima uglja određivana sila otpora kopanja odnosno ispitivanje linijskog i površinskog otpora rezanja u vodenoj sredini pod različitim hidrostatickim pritiskom (2,5- 6,0 bara) u laboratorijskim uslovima u potpunosti simulirajući radne uslove otkopavanja-rezanja „in situ“. Ispitivanjima je obuhvaćeno 48 uzoraka uglja na kojima su izvršena laboratorijska ispitivanja u Laboratoriji za geomehaniku Rudarskog instituta iz Beograda. U okviru laboratorijskih ispitivanja obuhvaćena su sledeća svojstva uglja koja su ispitana na uzorcima: zapreminska težina, parametri čvrstoće na smicanje (ugao unutrašnjeg trenja i kohezija), čvrstoća na pritisak i sila rezanja. U svrhu određivanja specifičnog otpora rezanja uglja, upotrebljen je posebno konstruisan klin firme Orenstein und Koppel. Klin koji je korišten za rasklinjavanje probnih tijela uglja ima nagibe bočnih strana  $17^{\circ}$  prema uzdužnoj osi, zatupljen vrh širine 0,5 cm i dužine sječiva 6,5 cm. Klin je ugrađen u triaksijalnu celiju u kojoj se održavao stalni bočni pritisak sa korakom od 0,5 bara uz nanošenje vertikalne sile sve do loma probnog tijela.
- **Na drugoj lokaciji istraživanja - rudnik mrkog uglja sa površinskom eksploatacijom „Turija-Banovići“** uspostavljena je korelacija između parametara stijenske mase i otpora kopanja odnosno mehaničkih svojstava stijenske mase, s jedne strane, uključujući: čvrstoću na pritisak i zatezanje, zapreminsku težinu, koheziju i ugao unutrašnjeg trenja i maksimalne sile rezanja, maksimalne otpornosti na rezanje i maksimalne potrošnje struje, s druge strane. Istraživanja su izvedena za tri različite dubine rezanja (0,5m, 0,75 m i 1,0 m) koristeći višestruku linearnu regresiju. U laboratoriji je utvrđena zapreminska težina otkrivke pomoću metode sa cilindrom, ispitivanje čvrstoće na pritisak hidrauličnom presom, zatezna čvrstoća brazilskom metodom, dok je ispitivanje direktnog smicanja korišteno za određivanje ugla unutrašnjeg trenja i kohezije. Otpor rezanja je određivan u laboratoriji pomoću reznog klatna tipa „Š“ na 21 uzorku otkrivke (sivi laporci), koji je konstruisan u Rudarskom institutu Tuzla.
- **Na trećoj lokaciji istraživanja – površinski kop uglja „Tamnava - istočno polje“** izvršena je analiza otpora na kopanje otkrivke na brzinu bagera  $V_b$  i maksimalnu potrošnju struje bagera  $I_{max}$  za nove zube i zube bagera nakon najmanje 250 sati rada na bageru SchRsc 900 25/6. Određivanje otpora kopanja otkrivke izvršeno je vatmetarskom metodom tj. mjeranjem angažovane snage za pogon rotornog točka. U

laboratoriji su ispitivana sledeća svojstva otkrivke: granulometrijski sastav (procenat gline, prašine i pijeska), zapreminska težina (metodom sa cilindrom) i čvrstoća na smicanje (kohezija i ugao unutrašnjeg trenja) korištenjem metode direktnog smicanja. Za mjerjenje potrošnje struje korišten je dvokanalni pisač struje OSCILOMNIK L, kao i instrumenti na bageru. Korištenjem analize višestruke linearne regresije razvijene su eksplisitne matematičke korelacije između  $I_{max}$ -a i  $V_b$ -a i svojstva otkrivke u obliku nelinearnih jednačina.

### 3.1. Terenska - vatmetarska metoda

Vatmetarska metoda predstavlja jednu od terenskih metoda kod koje se specifični otpor kopanja određuje preko mjerena angažovane snage na motoru za pogon rotora. Elektromotori za pogon rotora izloženi su u radu promjenljivom opterećenju, koje varira od opterećenja praznog hoda do maksimalnih, takozvanih vršnih, opterećenja. Do ovoga dolazi zbog anizotropije materijala koji se otkopava i diskontinualnog rasporeda vedrica po obimu rotora što se može smatrati najčešćim uzrocima. Ova promjenljivost iziskuje poseban režim mjerena snage koja se troši u procesu kopanja, odnosno režim kontinualnog mjerena pomoći pisača struje određene brzine. Pisač registruje momentnu struju, pomoći koje izračunavamo ukupnu snagu koja se troši u procesu kopanja, odnosno efektivnu snagu. Preko efektivne snage dobijamo angažovanu snagu. Pisač je dvokanalni ili višekanalni, tako da se uz mjerjenje struje motora za pogon rotora i struje motora za pogon okreta gornje gradnje, koja je jednosmjerna, mogu mjeriti i druge vrijednosti. Registrovanjem momentne struje, moguće je izračunati ukupnu snagu koja se troši u procesu kopanja. Naime, preko momentne struje može se izračunati efektivna, a preko nje i angažovana snaga.

Efektivna struja se može sračunati korišćenjem obrascra:

$$I_{ef} = \frac{I_{mom}}{\sqrt{2}} \quad (3.1)$$

dok je snaga koja se troši u procesu kopanja definisana obrascem:

$$N_s = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_{ef} \cdot \cos \varphi \cdot 10^{-3} \quad (3.2)$$

gdje je:

$I_{ef}$  - efektivna struja (A),

$I_{mom}$  - momentna struja (A),

$N_s$ - angažovana snaga (kW),

$U$ - nominalni napon (V),

$\cos\varphi$ - faktor snage.

Predata snaga po motoru iznosi:

$$N_p = N_s \cdot \eta \quad (3.3)$$

gdje je:

$\eta$ - koeficijent korisnog dejstva pogona.

Snaga koja se troši na kopanje dobija se kada se od ukupne predate snage oduzme snaga potrebna za dizanje materijala do visine pražnjenja, tj.:

$$N_k = N_p - N_{pod} \quad (3.4)$$

Snaga koja se troši za podizanje materijala do visine pražnjenja može se računati shodno obrascu:

$$N_{pod} = \frac{Q \cdot \gamma \cdot g \cdot h_d}{3600} \quad (3.5)$$

gdje je:

$Q$ - kapacitet bagera ( $m^3/h$ ),

$\gamma$ - masa materijala ( $t/m^3$ ),

$g$ - ubrzanje zemljine teže ( $m/s^2$ ),

$h_d$ - visina dizanja materijala do mjesta pražnjenja (m).

Sila potrebna za kopanje se određuje iz snage potrebne za kopanje:

$$P_k = \frac{N_k}{v} \quad (3.6)$$

gdje je:

$v$ - obodna brzina rotornog točka (m/s).

Na bazi poznate sile kopanja i definisanja zbirnih dužina reznih ivica, specifični otpor kopanja definiše se izrazom:

$$K_l = \frac{P_k}{\sum_{i=1}^{i=m} L_i}, \quad K_f = \frac{P_k}{\sum_{i=1}^{i=m} F_i} \quad (3.7)$$

gdje je:

$K_l$ - linijski specifični otpor materijala na kopanje (N/cm),

$K_f$ - površinski specifični otpor materijala na kopanje (N/cm<sup>2</sup>),

$P_k$ - sila kopanja (N),

$\sum_{i=1}^{i=m} L_i$ - ukupna dužina reznih ivica svih vedrica koje su istovremeno u kontaktu sa materijalom (cm),

$\sum_{i=1}^{i=m} F_i$ - ukupna površina poprečnog presjeka odrezaka svih vedrica koje su istovremeno u kontaktu sa materijalom (cm<sup>2</sup>),

$m$ - broj vedrica koje se nalaze istovremeno u kontaktu sa materijalom.

### 3.1.1. Određivanje specifičnog otpora na kopanje pomoću vatmetarske metode na PK „Tamnova-istočno polje“

Određivanje otpora kopanja izvršeno je na bageru SchRs 900 25/6 (proizvođača O&K), koji radi na otkopavanju otkrivke površinskog kopa „Tamnova-istočno polje“, prikazanog na slici 3.1.



Slika 3.1. Rotorni bager SchRs 900 25/6 (proizvođača O&K), [foto dokumentacija rudnika]

Određivanje otpora kopanja izvršeno je vatmetarskom metodom tj. mjeranjem angažovane snage za pogon rotornog točka. U cilju mjerjenja korišten je dvokanalni pisač struje OSCILOMNIK L, kao i instrumenti na bageru za:

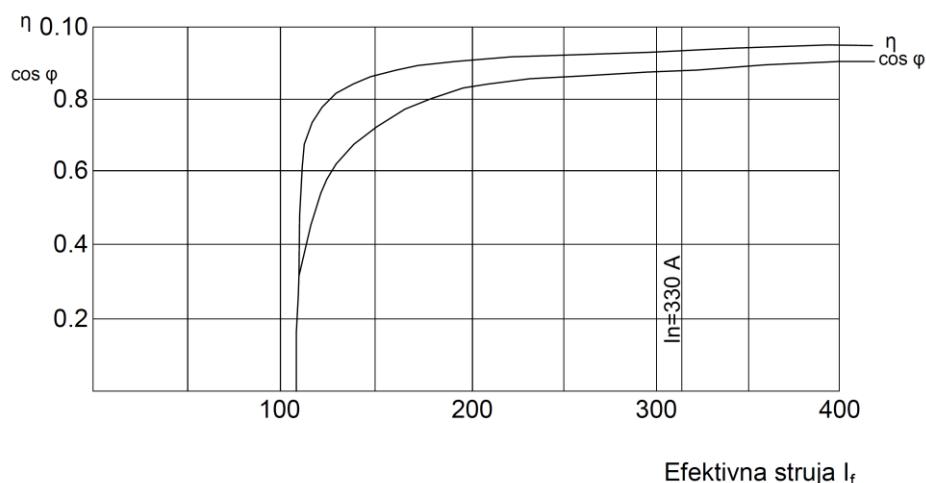
- pokazivanje brzine kružnog kretanja bagera,
- pokazivanje nastupa bagera (debljine odreska),
- pokazivanje visinskog položaja rotornog točka i pokazivanje ugaonog položaja rotorne strijеле (mjereno od podužne ose bagera).

Prije početka svakog mjerjenja vršena su ispitivanja tačnosti instrumenta, a po potrebi vršeno je njihovo baždarenje.

Svako pojedinačno mjerjenje odnosi se na jedan vremenski ograničen dio procesa zaokretanja bagera, za  $15^0$  od podužne ose bagera u lijevu odnosno desnu stranu.

Pomoću dvokanalnog pisača struje, koji je smješten u elektropostrojenju bagera i povezan po šemama, registrovana je momentna struja oba motora za pogon rotornog točka i struja motora za kružno kretanje bagera. Pomjeranje papira kod svih mjerjenja iznosilo je 25 mm/s. Srednje vrijednosti dobijene su planimetrisanjem, a maksimalne i minimalne vrijednosti očitavane su sa zapisa. Efektivna struja po motoru i snaga koja se troši u procesu kopanja određivane su po obrascima (3.1. i 3.2.).

Nominalni napon za ovaj bager iznosi 500 V, a faktor snage se određuje sa karakteristične krive motora (slika 3.2.), i iznosi 0,87.



Slika 3.2. Karakteristična kriva motora za pogon rotornog točka bagera SchRe 900 25/6  
(2x230 kW) [Ignjatović, 1993]

Predata snaga po motoru i snaga koja se troši kopanjem određena je po obrascu 3.3. i 3.4. Snaga koja se troši za podizanje materijala do visine pražnjenja je definisana obrascem 3.5.

Kapacitet bagera određivan je preko parametara adreska shodno obrascu:

$$Q_t = 60 \cdot h \cdot s \cdot V_b \quad (3.8)$$

gdje je:

$h$ -visina adreska (m),

$s$ -debljina adreska (m),

$V_b$ -brzina kretanja bagera (m/min).

Visina adreska određivana je pomoću instrumenta na bageru, a provjeravana je geodetskim snimanjem. Debljina adreska određivana je takođe pomoću instrumenta na bageru, a pošto je postojala razlika između vrijednosti očitane na instrumentu i stvarnog nastupa bagera, vršena je korekcija ove vrijednosti preko dijagrama koji je dobijen mjerenjem stvarnog pređenog puta bagera pri prelasku u novi rez (slika 3.3.). Brzina kružnog kretanja očitavana je sa instrumenta na bageru.



Slika 3.3. Dijagram baždarenja debljine adreska [Ignjatović, 1993]

Sila potrebna za kopanje je određena iz snage potrebne za kopanje shodno obrascu:

$$P_k = \frac{N_k}{v} \quad (3.9)$$

gdje je:

$v$ -obodna brzina rotornog točka (m/s).

Specifična potrošnja energije, potrebna za otkopavanje 1 m<sup>3</sup> materijala, se dobija kada se razlika predate snage i snage praznog hoda podjeli sa ostvarenim kapacitetom:

$$E = \frac{N_p - N_{pr}}{Q_t} \quad (3.10)$$

gdje je:

$E$ - specifična potrošnja energije (kWh/m<sup>3</sup>),

$N_p$ - predata snaga po motoru (kW),

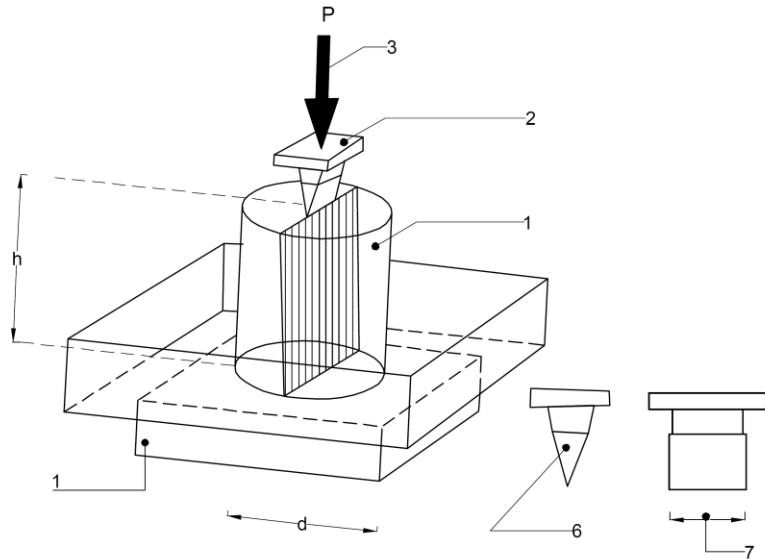
$N_{pr}$ - snaga praznog hoda (11 kW),

$Q_t$ - kapacitet bagera (m<sup>3</sup>/h).

### 3.2. Laboratorijska metoda klina (metoda Orenstein & Koppel, tzv. O&K metoda)

Kod ove metode na pripremljeni uzorak, čiji su krajevi fino obrađeni postavlja se klin koji se opterećuje sve do razaranja uzorka. Ugao klina iznosi 35°, a njegova dužina 65 mm. Ispitivanje se obavlja na sledeći način (slika 3.4.):

- klin se postavlja na gornju ploču odgovarajuće prese,
- pripremljeni uzorak se postavlja na donju ploču,
- kada se uređaj za ispitivanje doveđe u kontakt sa uzorkom, postavlja se uređaj za ispitivanje penetracije,
- presa se pušta u radi u momentu rasklinjavanja očita se sila koja je taj rad izvršila i očitava vrijednost penetracije.



Slika 3.4. Šematski prikaz metode klina [Ignjatović 1993] Legenda: 1.uzorak materijala, 2. kiln, 3. sila (P), 4. površina cijepanja (f), 5. pješčana posteljica, 6. ugao klina ( $35^0$ ), 7. širina klina (65 mm), d– prečnik uzorka, h– visina uzorka.

Određivanje specifičnog otpora na kopanje se vrši shodno obrascu:

$$K_l = \frac{P}{l} \quad K_f = \frac{P}{f} \quad (3.11)$$

gdje je:

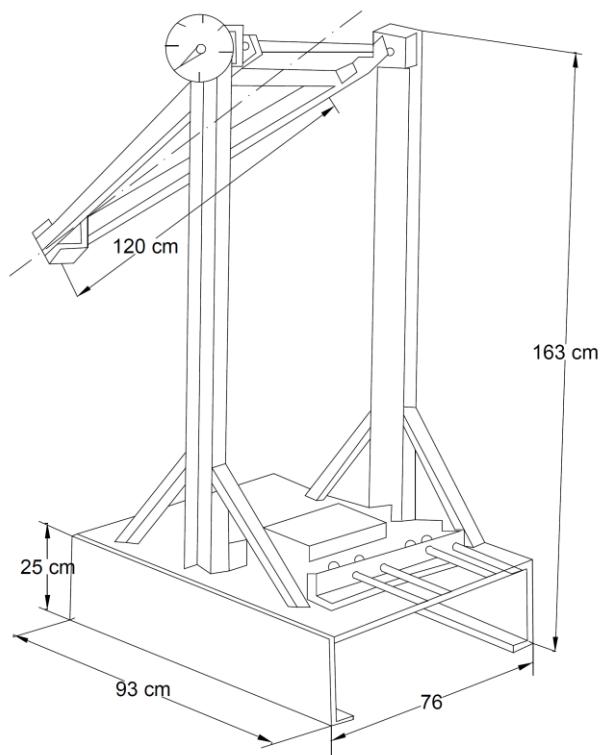
$P$  – sila koja je izvršila rasklinjavanje (N),

$l$  – dužina klina koji je učestvovao u rasklinjavanju (cm),

$f$  – površina poprečnog presjeka uzorka ( $\text{cm}^2$ ).

### 3.3. Laboratorijsko određivanje rezne sile metodom reznog klatna tipa „Š“

Rezno klatno, tipa „Š“, konstrukcija Instituta za rudarska istraživanja u Tuzli slika 3.5., predstavlja metodu ispitivanja pomoću klatna. Određivanje rezne sile ovom metodom sastoji se u izračunavanju rada utrošenog po jedinici dužine (1cm), određene dubine  $h$  (cm) i površine njegovog poprečnog presjeka  $S$  ( $\text{cm}^2$ ). Rad se izračunava iz razlike potencijalne energije koju klatno ima u položaju prije i poslije rezanja, isključujući vrijednost energije utrošene na prazan hod.



Slika 3.5. Izgled i glavne dimenzije reznog klatna [Đukić, 1984]

Klatno se spušta sa određene visine koja odgovara uglu  $\alpha$ , prelazi iznad uzorka i sječivom para po njegovoj površini, ostavljujući trag dubine (h), zatim diže do određene visine koja odgovara uglu  $\beta$ .

Izrazi li se rad preko potencijalne energije svih sila koje djeluju na sistem kako spoljašnjih, tako i na unutrašnjih, rad datih sila biće jednak:

$$A_i = (E_{po})_i - (E_{pl})_i. \quad (3.12)$$

Prema tome, za sve spoljašnje i unutrašnje sile je:

$$\Sigma A_i = \Sigma (E_{po})_i - (E_{pl})_i = E_{po} - E_{pl} \quad (3.13)$$

gdje je:

$E_p - \Sigma E_{pi}$  - potencijalna energija cijelog sistema.

Poznavajući potencijalnu energiju klatna u početnom položaju i uglove  $\alpha$  i  $\beta$ , utrošeni rad na rezanje može se izraziti u obliku:

$$A = G \cdot r \cdot (\cos \alpha - \cos \beta) \quad (\text{kNcm}) \quad (3.14)$$

gdje su:

$G$  -masa klatna i poluge (kN),

$r$  -rastojanje težišta klatna i poluge od obrtne ose (cm),

$\alpha$  -ugao spuštanja klatna ( $^{\circ}$ ),

$\beta$  -ugao podizanja klatna nakon izvršenog reza ( $^{\circ}$ ).

Iz poznate vrijednosti utrošenog rada i dužine reza izračunava se rezna sila za različite dubine reza prema Baronu:

$$F = \frac{A}{l}. \quad (3.15)$$

### 3.4. Matematičko-statistička analiza

#### 3.4.1. Regresijska analiza

Regresijska analiza je matematičko-statistički postupak kojim se utvrđuje odgovarajuća funkcionalna veza između jedne zavisne varijable i jedne ili više nezavisnih varijabli. Time se omogućava predviđanje zavisne varijable na temelju promjena u skupu nezavisnih varijabli.

Opši oblik regresijskog modela moguće je izraziti sljedećom relacijom

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, \dots, X_m) + e. \quad (3.16)$$

gdje je

$Y$  – zavisna (kriterijska) varijabla,

$X_1, \dots, X_m$  nezavisne (prediktorske) varijable,

$e$  – gрешka prognoze,

$f$  – odgovarajuća funkcija.

Dakle, pomoću regresijske analize možemo predviđati vrijednosti zavisne varijable na temelju promjena nezavisnih varijabli. Ako je moguće funkcionalnu vezu jedne zavisne i jedne ili više nezavisnih varijabli izraziti odgovarajućim matematičkim modelom na temelju

kojega je moguće tačno utvrđivati vrijednosti zavisne varijable na osnovi varijacija drugih varijabli, radi se o determinističkom modelu ( $e=0$ ). Pod stohastičkim modelom podrazumijeva se odgovarajuća funkcionalna veza kod koje odgovarajućim vrijednostima nezavisnih varijabli odgovara više vrijednosti zavisne varijable ( $e \neq 0$ ) [Dizdar, 2006].

Modele za utvrđivanje funkcionalne zavisnosti moguće je generalno podijeliti na temelju dva kriterija:

- prema broju nezavisnih varijabli na jednostavne (engl. simple) i višestruke (engl. multiple) regresijske modele,
- prema odnosu između zavisnih i nezavisnih varijabli na linearne i nelinearne regresijske modele (slika 3.6.).

U tabli 3.1. prikazana je klasifikacija regresijskih modela s obzirom na spomenute kriterije [Dizdar, 2006].

Tabela 3.1. Klasifikacija regresijskih modela.

	<b>LINEARNI</b>	<b>NELINEARNI</b>
JEDNOSTAVAN	$Y = b_0 + b_1X$ polinom prvog stepena, (pravac)	$Y = b_0 + b_1X + b_2X^2$ polinom drugog stepena (parabola) $Y = b_0 + b_1X^2 + b_mX^m$ polinom n-tog stupnja $Y = b_0b_1^x$ eksponencijalna funkcija $Y = \log_b X$ - logaritamska funkcija itd.
VIŠESTRUK	$Y = b_0 + b_1X_1 + \dots + b_mX_m$	

### - Višestruka (multipla) regresijska analiza

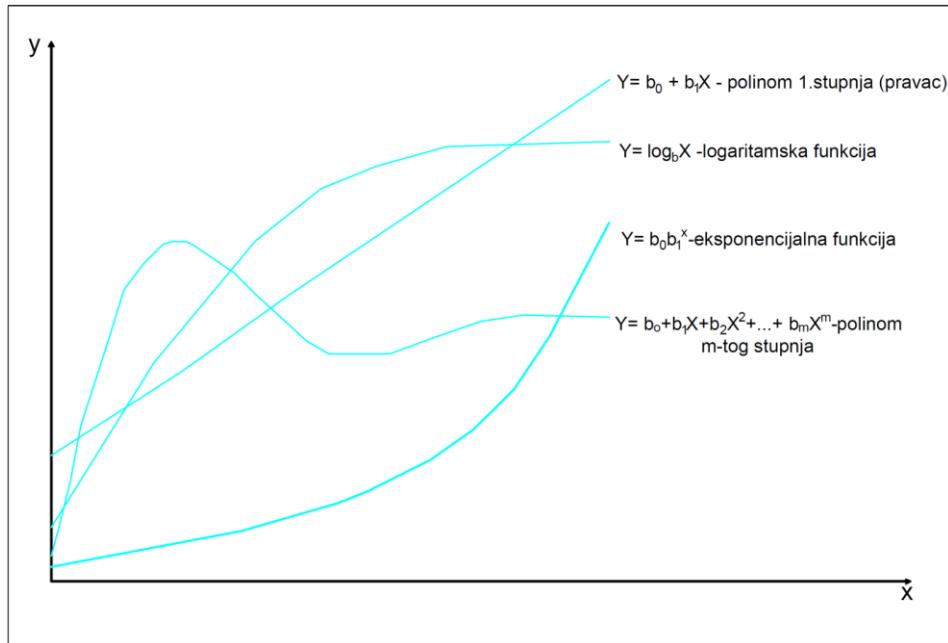
Funkcionalnu zavisnost nezavisnih varijabli i jedne zavisne varijable moguće je izraziti višestrukom linearnom regresijskom jednačinom

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_mx_m + e. \quad (3.17)$$

gdje je

- $y$  - zavisna varijabla,
- $x_1 \dots x_m$  - nezavisne varijable
- $b_0 \dots b_m$  - regresijski koeficijenti,
- $e$  - rezidualna varijabla.

Za izračunavanje regresijskih koeficijenata ( $b_0, \dots, b_m$ ) potrebno je da svaka varijabla ima n vrijednosti, gdje je  $n > m$ ; m-broj nezavisnih varijabli. To praktično znači da u nekom istraživanju treba izmjeriti najmanje  $m+1$  entiteta kako bi se dobio dovoljan broj linearnih jednačina za izračunavanje  $m+1$  regresijskih koeficijenata.



Slika 3.6. Linearne (pravac) i neke nelinearne (logaritamska, eksponencijalna, polinom n-tog stupnja) matematičke funkcije [Dizdar, 2006]

Dakle, ako n entiteta opišemo jednom zavisnom i m nezavisnim varijablama (gdje je  $n > m$ ), dobije se sistem od n linearnih jednačina.

$$y_i = b_0 + b_1 x_{i1} + b_2 x_{i2} + \dots + b_m x_{im} + e_i, \quad (3.18)$$

gdje je  $i = 1, \dots, n$  ( $n$  - broj entiteta,  $n > m$ ),

odnosno, u matričnom obliku

$$\begin{aligned} \mathbf{y} &= \mathbf{X} \mathbf{b} + \mathbf{e} \\ \begin{pmatrix} \hat{y}_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & \cdots & x_{1m} \\ 1 & x_{21} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \cdots & x_{nm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{b}_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_m \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \hat{e}_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_n \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3.19)$$

gdje je

- $y$  - vektor rezultata n entiteta u zavisnoj varijabli,
- $X$  - matrica (reda n x m+1) rezultata entiteta u m nezavisnih varijabli,
- $b$  - vektor m+1 regresijskih koeficijenata,
- $e$  - vektor rezidualnih rezultata n entiteta.

Metodom najmanjih kvadrata izračunaju se regresijski koeficijenti  $b$  za jednačinu

$$y = Xb \quad (3.20)$$

uz uslov da suma kvadrata rezidualnih vrijednosti, odnosno odstupanja izmjereneh vrijednosti  $y_i$  od prognoziranih  $y'_i$  bude minimalna.

Sistem normalnih jednačina dobije se množenjem gornjeg izraza s  $X^T$  ( $X^T$  - transponirana matrica  $X$ )

$$X^T y = X^T X b. \quad (3.21)$$

Ako dobijeni izraz pomnožimo inverzom matrice  $X^T X$ , dobijemo

$$(X^T X)^{-1} X^T y = (X^T X)^{-1} X^T X b. \quad (3.22)$$

Kako je  $(X^T X)^{-1} X^T X = I$ , gdje je  $I$  - matrica identiteta, a množenje bilo koje matrice sa matricom identiteta ostavlja matricu nepromijenjenom (kao broj 1 u skalarnoj algebri), dobije se

$$(X^T X)^{-1} X^T y = b. \quad (3.23)$$

Vektor  $b$  sa m+1 regresijskih koeficijenata u kojem  $b_0$  predstavlja vrijednost zavisne varijable kada su vrijednosti nezavisnih varijabli jednake nuli, a  $b_j$  ( $j = 1, \dots, m$ ) su regresijski koeficijenti koji predstavljaju veličine promjena vrijednosti zavisne varijable za jedinični porast vrijednosti nezavisne varijable  $x_j$ , uz uslov da su vrijednosti preostalih nezavisnih varijabli konstantne. Ako se vrijednost nezavisne varijable  $x_j$  poveća za jedan (uz uslov da se ne mijenjaju vrijednosti preostalih nezavisnih varijabli), vrijednost zavisne varijable poveća se u prosjeku za vrijednost  $b_j$  [Dizdar, 2006].

Rezidualni vektor  $e$  dobije se oduzimanjem prognoziranih rezultata entiteta od izmjereneh

$$e = y - y' = y - Xb. \quad (3.24)$$

Rezidualne vrijednosti date su u mjernim jedinicama zavisne varijable. Radi jednostavnije interpretacije moguće je izračunati i relativne rezidualne vrijednosti

$$\hat{e}_i = \frac{y_i - y'_i}{y_i} \cdot 100 . \quad (3.25)$$

Standardna pogreška prognoze ( $\sigma_e$ ), odnosno standardna devijacija izmjerjenih rezultata u odnosu na prognozirane je

$$\sigma_e^2 = \frac{r_{ss}}{df} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2}{n-m-1} \quad (3.26)$$

Ako se rezultati dobiveni mjerenjem n entiteta u zavisnoj varijabli i m nezavisnih varijabli standardizuju, odnosno transformišu u standardizovanu skalu s očekivanim vrijednostima  $E(z_i) = 0$  i  $E(z_i^2) = 1$ , onda je standardizovan oblik linearne regresijske jednačine

$$k = \beta_1 Z_1 + \beta_2 Z_2 + \cdots + \beta_m Z_m + \varepsilon, \quad (3.27)$$

odnosno, u matričnom obliku

$$\begin{aligned} k &= Z \beta + \varepsilon \\ \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_n \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} z_{11} & \cdots & z_{1m} \\ z_{21} & \cdots & z_{2m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & \cdots & z_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \end{aligned}$$

gdje je

- $k$  - vektor n standardiziranih rezultata entiteta u zavisnoj varijabli,
- $Z$  - matrica (reda nxm) n standardiziranih rezultata entiteta u m nezavisnih varijabli,
- $\beta$  - vektor m standardiziranih regresijskih koeficijenata,
- $\varepsilon$  - vektor standardiziranih rezidualnih rezultata n entiteta.

Analogno postupku za izračunavanje regresijskih koeficijenata pod modelom najmanjih kvadrata moguće je izračunati i standardizovane regresijske koeficijente ( $\beta_j$ ). Množenjem izraza  $k = Z \beta$  sa  $Z^T n^{-1}$  dobije se

$$\underbrace{Z^T k}_{r} \underbrace{n^{-1}} = \underbrace{Z^T Z}_{R} \underbrace{n^{-1}} \beta$$

gdje je

- $ZT k \ n-1 = r$  vektor korelacija zavisne i nezavisnih varijabli,
- $ZT Z \ n-1 = R$  matrica interkorelacija nezavisnih varijabli.

Dakle, može se napisati da je

$$r = R \beta. \quad (3.28)$$

Ako navedeni izraz pomnožimo inverzom matrice  $R$ , dobijemo

$$R^{-1}r = R^{-1}R\beta. \quad (3.29)$$

S obzirom da je  $R^{-1}R = I$  ( $I$  - matrica identiteta čije množenje bilo kojom matricom ostavlja matricu nepromijenjenom), onda je

$$R^{-1}r = \beta. \quad (3.30)$$

Standardizovani regresijski koeficijenti  $\beta_j$  ( $j=1,\dots,m$ ) predstavljaju veličinu promjene zavisne varijable izraženu u dijelovima standardne devijacije za jedinični porast standardizovane vrijednosti nezavisne varijable  $z_p$ , uz uslov da su vrijednosti preostalih nezavisnih varijabli konstantne. Ako se vrijednost nezavisne varijable  $z_p$  poveća za jednu standardnu devijaciju (uz uslov da se ne mijenjaju vrijednosti preostalih nezavisnih varijabli), vrijednost zavisne varijable povećaće se u prosjeku za  $\beta_j$  standardnih devijacija. Budući da su standardizacijski regresijski koeficijenati izračunati na standardizacijama varijabli, oni predstavljaju relativan doprinos svake nezavisne varijable prognozi zavisne varijable pa se smatraju koeficijentima uticaja [Dizdar, 2006].

Vektor rezidualnih vrijednosti  $\varepsilon$  dobije se oduzimanjem vektora standardizovanih prognoziranih rezultata  $k'$  od vektora standardizovanih izmjerениh rezultata  $k$

$$\varepsilon = k - k' = k - Z \beta. \quad (3.31)$$

Koeficijent determinacije multiple korelacije izračunava se prema formuli

$$\rho^2 = \beta \cdot r. \quad (3.32)$$

Odnosno

$$\rho^2 = \sum_{j=1}^m \beta_j r_j = \sum_{j=1}^m \beta_j p_j \quad (3.33)$$

pa je multipla korelacija jednaka  $\rho = \sqrt{\rho^2}$ .

Vrijednosti  $p_j$  predstavljaju varijabilitet zajednički pojedinoj nezavisnoj varijabli i zavisnoj varijabli, odnosno predstavljaju relativni udio svake nezavisne varijable u objašnjrenom varijabilitetu zavisne varijable. Suma svih  $p_j$  jednak je  $\rho^2$  te se naziva parcijalni koeficijent determinacije. Ako se  $p_j$  pomnoži sa 100, dobije se postotak zajedničke varijance pojedine nezavisne i zavisne varijable. Analizom parcijalnih koeficijenata determinacije ( $p_j$ ) moguće je otkriti tzv. supresore. Primjer, ako je  $p_j$  negativnog predznaka, a pripadajući standardizovan regresijski koeficijent ( $\beta_j$ ) ima visoku vrijednost, onda je varijabla  $j$  supresor. Supresor je ona nezavisna varijabla koja je u nultoj ili vrlo niskoj korelaciji sa zavisnom varijablom, a ima visoku vrijednost standardizovanog regresijskog koeficijenta ( $\beta_j$ ).

### 3.4.2. Analiza varijanse

Analiza varijanse (engl. Analysis of variance), ANOVA, jest statistički test kojim se prihvaca ili opovrgava nulta hipoteza o jednakosti matematičkih sredina populacija. Uopšte, ANOVA se koristi kada se želi uporediti više populacija i kada se želi utvrditi postojanje razlike između populacija.

Ako se želi utvrditi postojanje razlike između dvije populacije, tada se koristi t statistika koja se podvrgava t rasподjeli. Ako postoji N populacija, tada je moguće provesti  $\binom{N}{2}$  t testova između parova populacija. Ako između nijednog para populacija nije utvrđena razlika, tada se nulta hipoteza o jednakosti populacija ne može odbaciti. Međutim, ovakav način razmišljanja je pogrešan. Ako je unaprijed postavljen nivo značajnosti  $\alpha$ , tada vjernatnoća greške prve vrste u skupu od  $\binom{N}{2}$  testova iznosi  $1 - (1 - \alpha)^{\binom{N}{2}}$ , a što je različito od  $\alpha$ . Upravo zbog tog razloga potreban je test koji će simultano moći uporediti sve populacije, a da pritom greška prve vrste ostane ista. Takav test naziva se omnibus test (lat. za sve) [Knežević, 2017].

ANOVA test razvio je statističar i biolog Sir Ronald Aylmer Fisher 1920. godine, koji se ujedno smatra ocem moderne statistike. U čast njemu, F raspodjela nosi prvo slovo Fisherovog prezimena.

Iako ANOVA test donosi odluku o jednakosti sredina populacija, odluka se donosi na temelju poređenja varijabilnosti sredine uzorka populacije  $X_i$  sa sredinom uzorka svih populacija, te poređenja varijabilnosti unutar uzorka populacije  $X_i$ . Uopšteno, što su sredine uzorka iste

populacije više razmagnute, te što je varijansa unutar grupe iste populacije manja, veća je vjerovatnoća odbacivanja nulte hipoteze o jednakosti populacija. Upravo zbog donošenja odluke na temelju varijabilnosti, ovaj test se zove analiza varijansi [Knežević, 2017].

**Pretpostavka modela** Pretpostavlja se da su populacije (uzorci prikupljeni eksperimentima) nezavisni i da se pokoravaju normalnoj raspodjeli s očekivanjima  $\mu_i$  i jednakim varijansama  $\sigma_2$ .

Hipoteze eksperimenta koji se provodi formulirano je jednačinama 3.34. i 3.35.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 \dots = \mu_k \quad (3.34)$$

$$H_0: \text{najmanje dvije sredine nisu jednake.} \quad (3.35)$$

Neka  $y_{ij}$  označava j. realizaciju u eksperimentu i. Realizacija se naziva još i opservacija (lat. obseruo, 1.). Tablica 3.2 prikazuje zapis opservacija u eksperimentima.  $Y_i$ . Predstavlja zbir svih opservacija u i. eksperimentu,  $\bar{y}_i$  predstavlja sredinu svih opservacija u i. eksperimentu,  $Y$  predstavlja zbir svih opservacija u svim eksperimentima i  $\bar{y}$  označava sredinu svih opservacija u svim eksperimentima.

Svaka opservacija može se zapisati u obliku  $Y_{ij} = \mu_i + \varepsilon_{ij}$ , međutim, ako se uvede supstitucija  $\mu_i = \mu + \alpha_i$ , s ograničenjem  $\sum_{i=0}^k \alpha_i = 0$ , tada se svaka opservacija može opisati jednačinom 3.36, a koja se interpretira kao slučajna varijabla koja se sastoji od komponenti opšte srednje vrijednosti,  $\mu$ , efekta i, eksperimenta,  $\alpha_i$  i slučajne grješke  $\varepsilon_{ij}$ , koji se podvrgava normalnoj raspodjeli  $N(0, \sigma_2)$ .

Tabela 3.2. k slučajnih uzoraka [Knežević, 2017]

Eksperiment	1	2	...	i	...	k	
	$y_{11}$	$y_{21}$	...	$y_{i1}$	...	$y_{k1}$	
	$y_{12}$	$y_{22}$	...	$y_{i2}$	...	$y_{k2}$	
	...	...	...	...	...	...	
	$y_{1n}$	$y_{2n}$	...	$y_{in}$	...	$y_{kn}$	
Zbir	$Y_1$	$Y_2$	...	$Y_i$	...	$Y_k$	$Y$
Sredina	$\bar{y}_1$	$\bar{y}_2$	...	$\bar{y}_i$	...	$\bar{y}_k$	$\bar{y}$

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \varepsilon_{ij} \quad (3.36)$$

$$\mu = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \mu_i \quad (3.37)$$

Hipoteze 3.34. i 3.35. mogu se preinačiti u 3.38. i 3.39.

$$H_0: \alpha_1 = \alpha_2 \dots = \alpha_k \quad (3.38)$$

$$H_0: \text{barem jedna } \alpha_i \text{ je različita od nule.} \quad (3.39)$$

Jednačine 3.40., 3.41. i 3.42. opisuju mjere varijabilnosti u podacima, dok jednačina 3.48. pokazuje vezu između varijabilnosti. U ovome trenutku uočava se sličnost između modela linearne regresije i analize varijanse. Ako se usporedi varijabilnost kod linearne regresije i analize varijanse, primjećuje se isti model.

$$SST = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2, \quad (3.40)$$

$$SSA = n \sum_{i=1}^k (\bar{y}_i - \bar{y}_{..})^2, \quad (3.41)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{i..})^2, \quad (3.42)$$

$$SST = SSA + SSE. \quad (3.43)$$

Povezanost testa analize varijanse i linearne regresije Test analize varijanse i linearna regresija dvije su strane iste medalje. Ono što je bitno jest znati ispravno interpretirati rezultate. Ako se model za višestruku regresiju prikaže matrično, tada je jednačina 3.44. ekvivalentna jednačini 3.45. Također, ako se jednofaktorski ANOVA model prikaže matrično, tada su jednačine 3.36. i 3.45. ekvivalentne, pod pretpostavkom da su kategorije kod analize varijanse prikazane binarno. To znači da u jednačini 3.45., za svaki redak  $i$ , mora vrijediti  $\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1$ . Na primjer, za 5 eksperimenata, 1: eksperiment bio bi kodiran kao [10000], 2: eksperiment bio bi kodiran kao [01000], a 5: eksperiment bio bi kodiran kao [00001] [Knežević, 2017].

$$\begin{vmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & z_{1m} & x_{k1} \\ 1 & x_{12} & x_{12} & z_{2m} & x_{k2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{1n} & x_{2n} & z_{nm} & x_{kn} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{vmatrix} \quad (3.44)$$

$$\begin{vmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & z_{1m} & x_{k1} \\ 1 & x_{12} & x_{12} & z_{2m} & x_{k2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{1n} & x_{2n} & z_{nm} & x_{kn} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_k \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{vmatrix} \quad (3.45)$$

Nadalje, prepostavimo, bez smanjenja uopštenosti, da su faktori u modelu linearne regresije prirodni brojevi. Tada se svi faktori mogu proglašiti kategoričkim varijablama i kodirati na jednak način kao i u modelu analize varijanse. Tada je očito da su modeli 3.44. i 3.45 jednaki. Znači li to da su modeli linearne regresije i analize varijanse ekvivalentni? Iako je prethodno pokazano da su modeli analize varijanse i linearne regresije isti, interpretacija rezultata je drugačija.

Kod linearne regresije postoji koeficijent determinacije,  $R^2$ , koji govori koliko dobro model linearne regresije opisuje uzorke. Međutim, statistika 3.46. opisuje prilagođavanje modela podacima i pokorava se F razdiobi s  $(k, n - k - 1)$  stepena slobode. To znači da ako vrijedi  $f > f_\alpha(n, n - k - 1)$ , tada se može odbaciti, s  $\alpha$  nivoom značajnosti, nulta hipoteza o prilagođavanju odabranog linearног modela uzorcima.

$$f = \frac{\frac{SSR}{k}}{\frac{SSE}{n-k-1}} = \frac{\frac{SSR}{k}}{\frac{S^2}{n-k-1}} . \quad (3.46)$$

Kod analize varijance, vrijedi statistika 3.52., koja se pokorava F raspodjeli s  $(k - 1, k(n - 1))$  stepeni slobode. To znači da ako vrijedi  $f > f_\alpha(k - 1, k(n - 1))$ , tada se može odbaciti, s  $\alpha$  nivo značajnosti, nulta hipoteza o jednakosti sredina populacija.

$$f = \frac{\frac{SSR}{k-1}}{\frac{SSE}{k(n-1)}} = \frac{\frac{SSR}{k-1}}{\frac{S^2}{k(n-1)}} \quad (3.47)$$

Rezultat linearne analize su regresijski koeficijenti  $\beta_i$ i, dok kod analize varijanse sredine populacija  $\mu_i$ i. Veza između tih rezultata opisana je jednačinom 3.48.

$$\mu_i = \beta_i + \beta_0 \quad (3.48)$$

### 3.4.3. Dvofaktorski model analize varijanse

Prethodno potpoglavlje razmatralo je jednofaktorski model analize varijanse. U ovom potpoglavlju objasnit će se dvofaktorski model analize varijanse.

Dvofaktorska analiza varijansi je proširenje jednofaktorske analize varijansi dodatnim faktorom. Svaka opservacija iz tabele 3.4 može se opisati modelom  $y_{ijk} = \mu_{ij} + \varepsilon_{ijk}$ . Tada se taj model može dekomponovati na model koji je sličan modelu 3.36. Model dvofaktorske analize varijanse opisan je jednačinom 3.49., uz ograničenja 3.50. Izraz  $(\alpha\beta)_{ij}$  predstavlja interakciju između i. i j. razine faktora A i B. Interakcija između faktora može se prikazati u

2D koordinatnom sistemu, gdje koordinatne osi predstavljaju faktore, tačke u sistemu vrijednosti prosječnu vrijednost y faktora, u zavisnosti o  $x$ . Za prosječne vrijednosti y faktora iscrtavaju se krive, koje mogu sugerisati postoji li interakcija. Ako su sve krive paralelne, tada interakcija ne postoji, u suprotnom postoji vjerovatnoća za interakcijom, međutim, tu vjerovatnoću treba provjeriti s određenom značajnošću [Knežević, 2017].

Tabela br.3.3. Dvofaktorski eksperiment [Knežević, 2017]

A/B	1	2	...	b	Zbir	Sredina
1	$y_{111}$	$y_{121}$	...	$y_{1b1}$	$Y_1$	$\bar{y}_1$
	$y_{112}$	$y_{122}$	...	$y_{1b2}$		
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		
2	$y_{11n}$	$y_{12n}$	...	$y_{1bn}$	$Y_2$	$\bar{y}_2$
	$y_{211}$	$y_{221}$	...	$y_{2b1}$		
	$y_{212}$	$y_{222}$	...	$y_{2b2}$		
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		
	$y_{21n}$	$y_{22n}$	...	$y_{2bn}$		
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		
a	$y_{a11}$	$y_{a21}$	...	$y_{ab1}$	$Y_a$	$\bar{y}_a$
	$y_{a12}$	$y_{a22}$	...	$y_{ab2}$		
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		
	$y_{a1n}$	$y_{a2n}$	...	$y_{abn}$		
Z	$Y_1$	$Y_2$	...	$Y_b$	$Y$	
	$\bar{y}_1$	$\bar{y}_2$	...	$\bar{y}_b$		$\bar{y}$

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (3.49)$$

$$\sum_{i=1}^a \alpha_i = 0, \quad \sum_{j=1}^b \beta_j = 0, \quad \sum_{i=1}^a \alpha \beta_{ij} = 0, \quad \sum_{j=1}^b \alpha \beta_{ij} = 0 \quad (3.50)$$

Nakon što je definisan model, tada se prethodno hipoteze mogu formulisati na sljedeći način:

$$1. H'_0: \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_a = 0, H'_1: \neg H'_0$$

$$2. H''_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b = 0, H''_1: \neg H''_0$$

$$3. H'''_0: (\alpha\beta)_{11} = (\alpha\beta)_{12} = \dots = (\alpha\beta)_{ab} = 0, H'''_1: \neg H'''_0$$

Jednačine od 3.51. do 3.55. opisuju mjere varijabilnosti u podacima, dok jednačina 3.56 pokazuje vezu između varijabilnosti.

$$SST = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (y_{ijk} - \bar{y} \dots)^2, \quad (3.51)$$

$$SSA = bn \sum_{i=1}^a (\bar{y}_{i..} - \bar{y} \dots)^2, \quad (3.52)$$

$$SSB = an \sum_{i=1}^b (\bar{y}_{\cdot j} - \bar{y}_{\dots})^2, \quad (3.53)$$

$$SS(AB) = n \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (\bar{y}_{ij} - \bar{y}_{\cdot i} - \bar{y}_{\cdot j} + \bar{y}_{\dots})^2, \quad (3.54)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (y_{ijk} - \bar{y}_{ijk})^2, \quad (3.55)$$

$$SST = SSA + SSE + SSB + SS(AB) + SSE \quad (3.56)$$

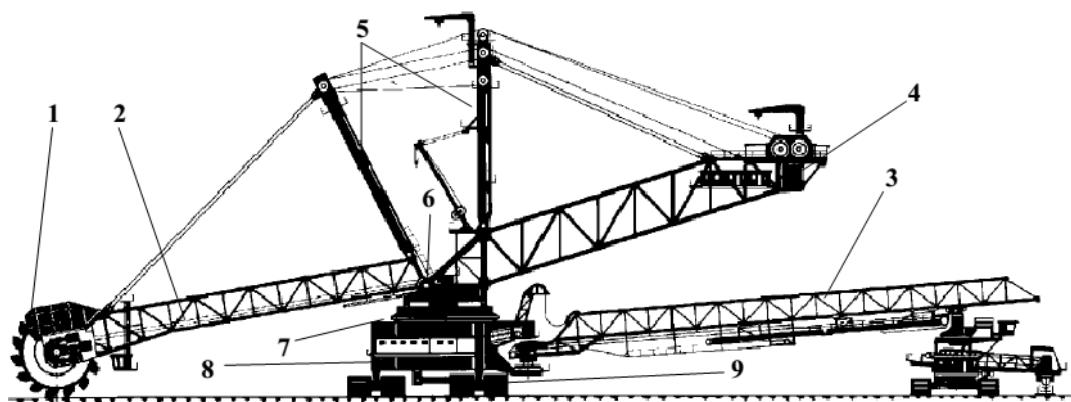
Uopšteno, dodavanjem faktora gradi se N-faktorska analiza varijanse. N-faktorska ANOVA ima  $2^N - 1$  F statistika koje mogu biti testirane za značajnost modela, te  $\frac{N!}{(m+1)!(N-m-1)!}$  m-faktorskih interakcija. To znači da 4-faktorska ANOVA ima 15 različitih F statistika: 4 za glavne faktoare, 6 za interakcije dva faktora, 4 za interakcije tri faktora i 1 za interakciju četiri faktora.

U predmetnoj disertaciji, ANOVA test korišten je za ocijenu uspostavljenih korelacija između geomehaničkih karakteristika terena koje su izmjerene u laboratoriji kao što su zapreminska težina, čvrstoća na pritisak, parametri čvrstoće na smicanje i parametara otpora kopanja.

## 4. OPŠTI POJMOVI

### 4.1. Rotorni bager

Rotorni bager je samohodna otkopno-utovarna mašina za površinsko neprekidno otkopavanje ravnomerno raspoređenim vedricama, i to meke jalovine i korisne mineralne sirovine, kontinualnim dejstvom [Banković, 2018]. Materijal se otkopava u odrescima pri obrtanju rotora u vertikalnoj ravni i istovremenim okretanjem strele rotora u horizontalnoj ravni. U istovarnom dijelu materijal se prazni iz punih vedrica na prijemni transporter (slika 4.1). Mehanizam za kretanje rotornog bagera je najčešće gusjenični, pri čemu se broj gusjenica u zavisnosti od gabarita bagera, osobina radne sredine i načina rada, kreće od 2 do 16.



1. rotorni točak s vedricama, koji se nalazi na rotornoj strijeli zajedno sa pogonom;
2. strijela rotornog točka (katarka), koja se svojim krajem oslanja na okretnu platformu (gornju gradnju);
3. istovarna strijela ili istovarni most;
4. konzola protivtega i protivtega za uravnoteženje konstrukcije rotornog bagera u odnosu na okretnu platformu i transportni mehanizam;
5. nadogradnja rotornog bagera, koja služi kao oslonac za vješanje rotorne strijеле, konzole protivtega, istovarne strijele;
6. okretna platforma, na kojoj se nalazi oprema rotornog bagera (uredaji, oprema, postrojenje, instalacija);
7. oslobo-okretni mehanizam na kome se nalazi okretna platforma;
8. donje postolje (donja gradnja);
9. transportni mehanizam

Slika 4.1 Osnovne konstruktivne cjeline rotornog bagera [Banković, 2018]

#### 4.1.1. Klasifikacija rotornih bagera

Podjela rotornih bagera prema konstruktivnim karakteristikama je na sledeće klase [Banković, 2018] (slika 4.2.):

- A - kompaktni (hidraulični) rotorni bageri,

- B - rotorni bageri sa C ramom,
- C - veliki rotorni bageri.

Tabela 4.1 Karakteristike bagera po klasama [Ignjatović, 2012].

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

Na slici 4.2. dati su različiti tipovi rotornih bagera tj. kompaktni (hidraulični) rotorni bager – tip A, bageri sa „C“ ramom – tip B.

Kompaktni (hidraulični) rotorni bageri – tip A, imaju kratku strijelu u odnosu na prečnik rotora, veliki kapacitet s obzirom na dimenziju, masu i i nisko težište. Nepovoljan je manji radni vijek konstrukcije i niži koeficijent bagerovanja (tipični primjeri ove klase bagera su C-700, SRs-400, SchRs-800).

Bageri sa “C” ramom - tip B, imaju povoljan koeficijent bagerovanja (tipični primjeri ove klase bagera su SRs-1200, SchRs-630, SRs-2000, SRs-1300).

Veliki bageri - imaju nisko težište i kompleksan transport otkopnog materijala (tipični primjer ove klase bagera je SRs-6300, SchRs-1760, SchRs-2300).





Slika 4.2. Različiti tipovi rotornih bagera [Petrović, 2016]

Pri otkopavanju materijal se predaje od rotornih bagera ka etažnim transporterima, ili se material utovaruje u transportni most, samohodni transporter, ili se vrši direktno prebacivanje u otkopan prostor (slika 4.3) [Durst, Vogt, 1988].

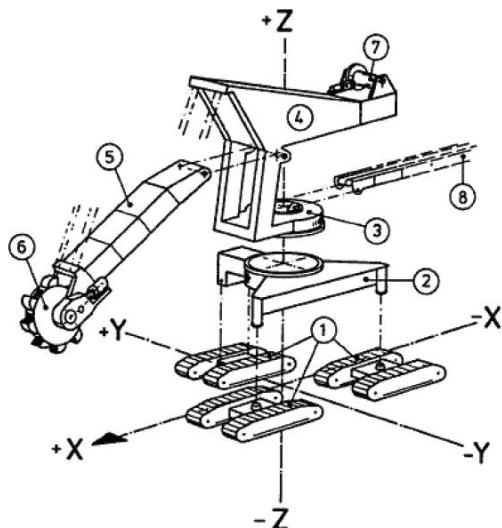


Slika 4.3. Različiti načini rada rotornog bagera [Banković, 2018]

#### 4.1.2. Konstruktivni dijelovi rotornog bagera

Rotorni bager ima osnovne i pomoćne uređaje (Slika 4.4.). U osnovne uređaje spadaju: uređaj za kopanje, sistem za unutrašnji transport materijala na bageru, transportni uređaj, pogonski uređaj, uređaj za upravljanje, noseća konstrukcija. Pomoćne uređaje čine: uređaji za

podmazivanje, uređaji za zagrijevanje, rasvjetu, uređaji za potrebe tehničkog održavanja i remonta itd. [Kun J., 1981], [Pavlović, Ignjatovoć, 2012],



Slika 4.4. Glavne komponente rotornog bagera: 1. gusjenični transportni mehanizam, 2. donja gradnja, 3. oslono-obrtni dio, 4. gornja gradnja sa protivtegom, 5. strijela bagera, 6. radni točak, 7. pogonski sistem za dizanje i spuštanje strijele radnog točka, 8. istovarna strijela  
[Petrović, 2016])

Strijela bagera pripada glavnoj nosećoj čeličnoj konstrukciji bagera i ona je najodgovorniji i najopterećeniji dio konstrukcije bagera. Rad bagera se sastoji od glavnih kretanja (obrtanje radnog točka i kružno kretanje gornje gradnje) i pomoćnih kretanja (kretanje u pravcu nastupa i promjena visinskog položaja radnog točka u vertikalnoj ravni).

Strijela kao najopterećeniji dio konstrukcije bagera učestvuje svega sa 6 do 13% od mase cijelog bagera. Smanjenje naprezanja povećanjem poprečnih presjeka dijelova konstrukcije dovodi do znatnog povećanja mase cijelog bagera. U opštem slučaju, procentualno učešće masa pojedinih dijelova u odnosu na ukupnu masu bagera približno iznosi:

- radni točak sa strijelom ..... 12%
- protivteg ..... 18%
- odložna strijela ..... 4,5%
- konstrukcija centralnih stubova ..... 9-10%
- obrtna platforma sa ležajem ..... 17-18%

- donja gradnja sa transportom ..... 40%

Noseća konstrukcija strijele treba da prenese sve sile (koje se javljaju u radu, transportu i mirovanju) na centralnu konstrukciju bagera. Oblik noseće konstrukcije proizilazi iz pravca djelovanja opterećenja, zahtjevanih tehnoloških parametara bagera, pozicioniranja pomoćnih konstrukcija, ugradnje instalacija, položaja radnog točka, presipnih mjesta, transporteru i zahtjeva održavanja. Primjenjuju se dva osnovna tipa konstrukcije i to:

- konstrukcija strijele punih zidova
- konstrukcija strijele u obliku rešetke.

Dužina strijele se bira u zavisnosti od tehnoloških zahvata otkopavanja ležišta, a mora biti usklađena i sa konstruktivnim mogućnostima mašine. Fizičko–mehaničke osobine materijala koji se otkopava, uz geološke karakteristike ležišta, određuju optimalan tip bagera za to ležište, odnosno njegove tehničke karakteristike. Na osnovu zahtjeva tehnologije otkopavanja koja je usaglašena sa geomehaničkim svojstvima ležišta, stvaraju se uslovi za izbor optimalnih parametara bagera, a samim tim i za određivanje potrebne dužine strijele, naravno i uz optimizaciju ekonomskih pokazatelja.

Dužina strijele ( $L_s$ ) je u određenoj srazmjeri sa sledećim parametrima:

- prečnikom radnog točka;
- dispozicijom uređaja i agregata ugrađenih na strijeli;
- visinom tačke vješanja strijele od planuma;
- poprečnim presjekom strijele;
- gabaritima hodnog uređaja.

Odnosi dužine strijele i prečnika rotornog točka kreću se u širokom dijapazonu:

$$L_s = (1,5 - 4,55)D_{rt} \quad (4.1)$$

Strijele na bagerima koji otkopavaju materijale male čvrstoće i zapreminske težine su manjeg poprečnog presjeka, odnosno imaju veću vitkost (deponijski rotorni bageri koji otkopavaju utovaraju već rastresiti material za deponiju) od bagera predviđenih za čvrste materijale.

Uticaj dužine strijele na masu bagera je očigledan i ukazuje na neopravdanost većih dužina od 70 m za bagere većeg kapaciteta. Određivanje optimalne dužine strijele je veoma bitno

radi usklađivanja sa uslovima radne sredine i konstruktivnim karakteristikama bagera. Neadekvatno odabrana dužina strijеле ima za direktnu posljedicu preveliku masu bagera ili nedovoljnu visinu otkopavanja.

Radni točak (rotor) predstavlja najkarakterističniji konstruktivni dio bagera (po njemu je i dobio ime), pri čemu su njegovi osnovni parametri: prečnik, broj vedrica, zapremina i oblik vedrica i geometrija reznih elemenata.

Prečnik rotora ( $D_{rt}$ ) se kreće u opsegu od 4.2 m do 21.6 m, a sve u zavisnosti od veličine bagera i njegove namjene.

Transporter na strijeli bagera ima ulogu da otkopani materijal iz presipa u rotoru transportuje do presipa u obrtnoj osi bagera. Kapacitet transportera zavisi u osnovi od širine trake, njene brzine i ugla nagiba bočnih valjaka, a treba ga uskladiti sa teoretskim kapacitetom rotora. Prilikom dubinskog rada, nagib transportera na strijeli ne smije biti veći od  $18^\circ$ . U slučaju većeg ugla transport materijala se obavlja pokrivanjem materijala sa specijalnom trakom.

Mehanizam za kružno kretanje ima zadatak da dovede radni točak u željeni položaj, da obavlja kružno kretanje u toku rada i da cijelu gornju gradnju u stanju zastoja drži u određenom položaju. Sastoji se od zupčastog vijenca i pogona za kružno kretanje sa malim zupčanikom.

#### **4.1.3. Tehnologija rada rotornog bagera**

Rotorni bageri rade u frontu, boku i bloku, pri čemu se rad u frontu rijetko koristi (npr. kod šinskih bagera i za selektivno otkopavanje) [Pavlović i Ignjatović 2012], [Popović 1984]. Otkopavanje materijala se vrši sa dvostranim (blok) ili jednostranim (bok) obrtanjem strijеле u odnosu na osu kretanja bagera.

Osnovni parametri rotornih bagera su maksimalna visina istresanja ( $H_{imax}$ ), minimalna visina istresanja ( $H_{imin}$ ), otkopna visina ( $H_k$ ), maksimalni radijus ( $R_k$ ) i radijus kopanja na nivou stajanja ( $R_{kh}$ ), dužina strele rotora ( $L$ ), radijus istresanja ( $R_i$ ), i prečnik rotora ( $D$ ). [Petrović 2016].

Radni proces rotornog bagera podrazumjeva: otkopavanje adreska (materijal otkopan jednom vedricom rotora), rez (niz odrezaka) i pojas (niz rezova). Osnovni faktori koji utiču na tehnologiju rada rotornog bagera su: prečnik točka, nagib radne kosine, širina bloka, visina otkopavanja i debljina reza. Otkopavanje rotornim bagerima može da se vrši na sledeće

načine: visinsko otkopavanje u bloku, frontu i boku (polublok) i dubinsko otkopavanje u bloku.

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

#### 4.1.4. Kapacitet rotornih bagera

Kapacitet rotornog bagera odnosi se na efekat rada izražen u ( $m^3$ ) ili ( $t$ ) otkopane mase u jedinici vremena [Pavlović i Ignjatović 2012], [Popović, 1984].

Teoretski kapacitet ( $Q_t$ ) izračunava se na osnovu konstruktivnih i kinematičkih karakteristika bagera.

Tehnički kapacitet bagera ( $Q_{th}$ ) uzima u obzir i uticaj radne sredine (otpor kopanju, plastičnost, raspucalost, ljepljivost, parametre čvrstoće na smicanje) i tehnologiju rada bagera u bloku.

Eksplotacioni kapacitet bagera ( $Q_e$ ) predstavlja tehnički kapacitet koji uzima u obzir zastoj u toku planiranog radnog vremena i ukupnog vremena rada, uključujući i neplanirane zastoje.

Efektivni kapacitet ( $Q_{ef}$ ) dobija se na kraju kalendarskog perioda na osnovu efektivnog radnog vremena i ukupno izmjerениh otkopanih količina materijala.

Teoretski kapacitet ( $Q_t$ ) rotornog bagera računa se kao proizvod računske zapremine jedne kašike ( $q$ ) i broja istresanja na minut ( $n$ ):

$$Q_t = 60 \cdot q \cdot n \quad \left( \frac{m^3}{h} \right) \quad (4.2)$$

Tehnički kapacitet ( $Q_{th}$ ) se računa spo formuli:

$$Q_{th} = Q_t \cdot k_p \cdot k_o \cdot k_r \left( \frac{cm^3}{h} \right) \quad (4.3)$$

gdje je:

$k_p$  - koeficijent punjenja kašika;

$k_r$  - koeficijent rastresitosti stijene;

$k_o$ - koeficijent otkopa.

Koeficijent otkopa ( $k_o$ ) obuhvata uticaj svih manevarskih operacija u bagerovanju bloka, gubitke kapaciteta od promjene brzine okretanja strijele na početku i na kraju rezova, gubitke uslijed srpastog oblika rezova, i gubitke zbog smanjenja visine rezova prema otkopanom prostoru [Bošković, 2016.].

Eksplotacioni kapacitet ( $Q_e$ ) se računa se po formuli:

$$Q_e = Q_{th} \cdot k_v \cdot T \quad (4.4)$$

gdje je:

$T$  - vrijeme (h);

$k_v$  - koeficijent iskorišćenja vremena, računa se po formuli:

$$k_{v=(T-t_{pz}-t_{nz}) \cdot T} \quad (4.5)$$

gdje je:

$t_{pz}$ - vrijeme planiranih zastoja;

$t_{nz}$  - vrijeme neplaniranih zastoja.

Eksplotacioni kapacitet ( $Q_e$ ) rotornog bagera računa se iz izraza [Bošković, 2016]:

$$Q_e = Q_{th} \cdot T_k \cdot K_t \cdot K_{th} \cdot K_o \quad (4.6)$$

gdje je :

$T_k$  – razmatrani kalendarski vremenski period (smena, nedelja, mesec, godina);

$K_t$  - koeficijent tehnološkog iskorišćenja vremena rada bagera dat formulom [Bošković, 2016]:

$$K_t = t_v \cdot (t_v + t_p) \quad (4.7)$$

gdje je:

$t_v$  - ukupno vrijeme rada bagera;

$t_p$  - ukupno vrijeme pomoćnih tehnoloških operacija;

$K_{th}$  - koeficijent tehničkog iskorišćenja vremena u razmatranom periodu kalendarskog vremena ( $T_k$ ):

$$K_{th} = T_k \cdot (T_k + T_o + T_r) \quad (4.8)$$

gdje je:

$T_o$  - vrijeme tehničkog opsluživanja bagera;

$T_r$  - vrijeme remonta bagera;

$K_o$  - koeficijent organizacionog iskorišćenja vremena:

$$K_o = (T_k - t_o) \cdot T_k \quad (4.9)$$

gdje je :

$t_o$  - ukupno vrijeme zastoja iz organizacionih razloga.

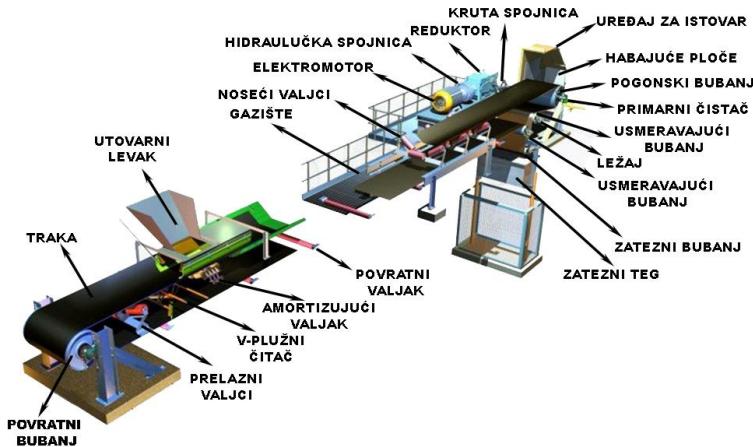
#### 4.2. Transportna oprema kontinualnog dejstva

U rudarskoj praksi najčešće se koriste sledeće vrste transporterata:

- Transporter sa trakom,
- Člankasti / grabuljasri /spiralni / vibracioni transporter,
- Elevator (kosi i vertikalni transport),
- Cijevasti transporter.

Najzastupljeniji vid kontinualnog transporta na površinskim kopovima je transporter sa trakom, koji je prvi put primjenjen na površinskim kopovima 1891. godine.

Transporter se sastoji od beskonačne gumene trake koja je zategnuta preko pogonskog i povratnog bubenja (slika 4.5.). Gumena transportna traka se sastoji od jezgra i omotača, koji ima ulogu zaštitnika jezgra od mehaničkih, atmosferskih i bioloških oštećenja. Jezgro može biti tekstilno ili sa čeličnim užadima. Utovar materijala se vrši preko utovarnog lijevka, a istovar preko bubnja ili posebnog uređaja za istovar.



Slika 4.5. Konstrukcija transporter sa trakom, [Banković, 2018]

#### 4.3. Odlagači

Odlagač jalovine predstavlja ekskavacioni i transportni uređaj koji crpi materijal istovaren iz vagona ili prima materijal sa trakastih transporterata, odlaže ga na kosinu odlagališta i vrši njegovo planiranje.

U zavisnosti od vrste transporta kojim se dovozi otkrivka, odlagači se dijele na grupu prilagođenu šinskom transportu i grupu koja radi sa transporterima sa trakom. Ciklično dopremanje mase željezničkim transportom kontinuirano preuzima odlagač koji je opremljen sa prijemnim uređajem sa kašikama na rotoru ili lancu koji radi na istom principu kao rotorni bageri ili bageri vedičari. Odlagači ove grupe nazivaju se odlagači sa kašikama.

Kod odlagača koji rade sa transporterima sa trakom, iskopina se predaje kontinuirano sa etažnog transporterata na prijemni transporterski uređaj odlagača. Odlagači ove grupe nazivaju se odlagači sa trakom.

Odlaganje odlagačima primjenjuje se u svim uslovima reljefa, u različitim klimatskim uslovima i kod srednjih i vrlo velikih kapaciteta. Uz primjenjene rotorne bagere na otkrivci danas se po pravilu primjenjuje transport transporterima, a odlagač je završetak tzv. BTO kompleksa.

U zavisnosti od povezanosti prijemnog uređaja sa odlažućim, odlagači se dijele na *jednodjelne*, kod kojih prijemni i odlažući uređaj čine zajedničku konstruktivnu cjelinu i *dvodjelne*, kod kojih prijemni i odlažući uređaj predstavljaju posebne konstruktivne cjeline postavljene na sopstvene mehanizme za kretanje.

Prema vrsti mehanizma za kretanje odlagači se dijele na šinske, gusjenične i koračajuće. Po pravilu su odlagači sa kašikama opremljeni sa šinskim mehanizmom za kretanje dok su odlagači sa trakom sa gusjeničnim ili koračajućim mehanizmom za kretanje.

Moguća podjela odlagača prema veličini je na:

- Vrlo male – kapaciteta 1000 rm3/h i približnog radijusa odlaganja 25 m;
- Male - kapaciteta 1000 - 2500 rm3/h i približnog radijusa odlaganja 35 m;
- Srednji - kapaciteta 2500 - 5000 rm3/h i približnog radijusa odlaganja 60 m;
- Veliki - kapaciteta 5000 – 8000 rm3/h i približnog radijusa odlaganja 80 m i
- Vrlo veliki - kapaciteta 8000 rm3/h i približnog radijusa odlaganja 120 m.

***Radni uređaji odlagača*** -Uredaj za prijem masa povezuje odlagač sa transportnom mrežom površinskog kopa. Ako se u površinskom kopu primjenjuje transport transporterima, odlagači su neposredno povezani sa sistemom transporterja, što osigurava kontinuiran tok masa za odlaganje. Kod jednodjelnih odlagača uređaj za odlaganje povezan je sa etažnim transporterom pomoću strijеле za prijem, a kod dvodjelnih odlagača pomoću uređaja za prijem. Pretovarni uređaj povezuje odlagač sa transporterom i pripada kompleksu radnih transporterja.

Kod šinskog transporta dovoz masa za odlaganje ima ciklični karakter. Potrebno ih je uklopiti u dati stalan tok. Kontinualnost odlaganja postiže se uređajem za prijem sa kašikama, koji je po konstrukciji i radu sličan uređaju za kopanje bagera vedričara ali je prilagođen izmenjenim uslovima rada, koji se ogledaju u smanjenju intenzivnosti procesa rezanja zbog dovoza materijala u rastresitom stanju, kao i stalnom položaju kašika u odnosu na mehanizam za kretanje odlagača.

Jalovina koja se od bagera dovozi vozovima, istresa se u prethodno iskopani odlagališni kanal duž trase odlagača. Dimenzije kanala zavise od veličine vagona koji dovoze jalovinu i od kapaciteta odlagača. Kapacitet uređaja za prijem zavisi, kao i kod bagera vedričara, od veličine kašika, stepena njihove napunjenoosti i broja pražnjenja u jedinici vremena. Brzine lanaca sa kašikama, koje se primjenjuju kod odlagača, s obzirom na manji otpor kopanju rastresenih stijena, veće su oko 10% nego kod bagera vedričara. Na kapacitet negativno utiče veći stepen rastresitosti materijala za odlaganje nastao zbog transporta i pretovara.

Uređaj za odlaganje kod odlagača ima oblik dugačke strijеле sa transporterom velike brzine trake, a to omogućava postizanje velikih kapaciteta pri relativno maloj težini konstrukcije. Materijal pada odbačen slobodno po putanji oblika parabole.

**Mehanizam za kretanje** - Kod odlagača se primjenjuju slične vrste i sistemi mehanizama za kretanje kao i kod kontinualnih bagera. Mehanizmi za kretanje mogu biti šinski, gusjenični i koračajući. Koristi se princip oslanjanja na tri tačke i sistem balansiranja koji osiguravaju podjednako opterećenje svakog nosećeg elementa mehanizma za kretanje pri neravnoj podlozi. S obzirom na znatno lošiju nosivost radnih etaža na odlagalištima, neophodno je ostvarivanje nižih specifičnih opterećenja tla (od 6 do 8 N/cm<sup>2</sup>). Zadatak noseće konstrukcije kod odlagača je povezivanje uređaja za prijem i odlaganje masa i prenošenje njihovih težina i spoljnih opterećenja na mehanizam za kretanje. Spoljne sile koje opterećuju konstrukciju odlagača mogu biti statične i dinamične i javljaju se pri transportu masa, pri čemu znatno veću ulogu nego kod bagera ima uticaj vjetra.

#### **4.3.1. Tipovi odlagača**

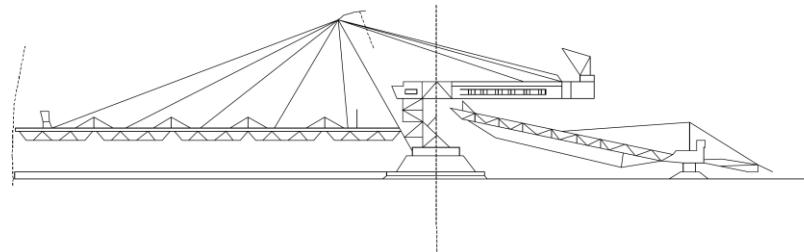
Svi savremeni odlagači imaju uređaj za odlaganje oblika strijеле sa transporterom i po pravilu konstruišu se kao obrtni. Razlike se sastoje u drukčjoj konstrukciji uređaja za prijem i mehanizma za kretanje.

Proizvode se gusjenični, jednodjelni i dvodjelni odlagači sa trakama, koračajući dvodjelni odlagači sa trakama i šinski, jednodjelni i dvodjelni odlagači sa kašikama.

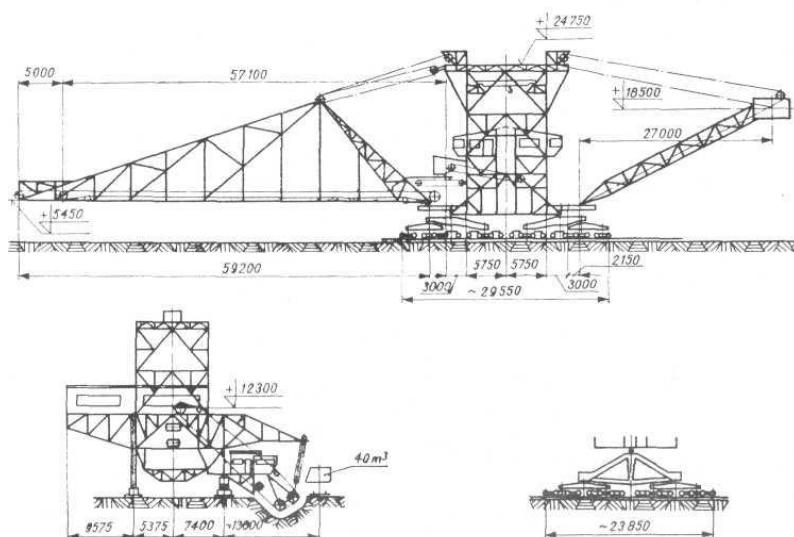
Gusjenični jednodjelni odlagači sa trakama imaju uređaj za prijem u obliku strijеле koja je ili oslonjena na pretovarni uređaj etažnog transporteru ili je obješena na konstrukciju gornjeg dijela odlagača. Prednost ovog tipa odlagača je jednostavan sistem noseće konstrukcije, jednostavan sistem za kretanje koji se sastoji od dvije ili tri gusjenice i mala težina. Slaba strana mu je mali radijus prijema masa za odlaganje i ograničena mogućnost kretanja odlagača u odnosu na etažni transporter. Jednodjelni sistemi primjenjuju se po pravilu kod manjih odlagača, kao što je na primjer odlagač firme Krupp ARs 2200, odlagač poljske proizvodnje tipa ZGOT 1000 i odlagač nemačke proizvodnje firme Takraf ARsB 2500-50.

Gusjenični dvodjelni odlagači sa trakama imaju uređaj za odlaganje povezan sa etažnim transporterom pomoću uređaja za prijem masa koji ima sopstveni mehanizam za kretanje, te imaju povećanu mogućnost manevrisanja u odnosu na etažni transporter. Težina uređaja za

prijem masa prenosi se na sopstveni mehanizam za kretanje, ne opterećuje mehanizam za kretanje uređaja za odlaganje i omogućava upotrebu dugih strijela za odlaganje (Slika 4.6.).



Slika 4.6. Koračajući dvodjelni odlagač sa trakama ZP 10000 [Malbašić, 2010]



Slika 4.7. Jednodjelni šinski odlagač sa kašikama [Malbašić, 2010]

Dvodjelni odlagači sa trakama imaju iste tehnološke karakteristike i način rada kao i odlagači na gusjenicama. Njihova prednost u poređenju sa gusjeničnim odlagačima je manje specifično opterećenje tla a nedostatak je mala brzina koračanja. Ovi odlagači se proizvode isključivo kao dvodjelni. Koračajuće odlagače proizvodi Rusija i Češka. Odlagači su opremljeni sa klizajućim mehanizmom za kretanje, a najveći do sada proizvedeni odlagač je ZP 10000.

Šinski jednodjelni i dvodjelni odlagači sa kašikama primjenjuju se na kopovima sa šinskim transportom (Slika 4.7.).

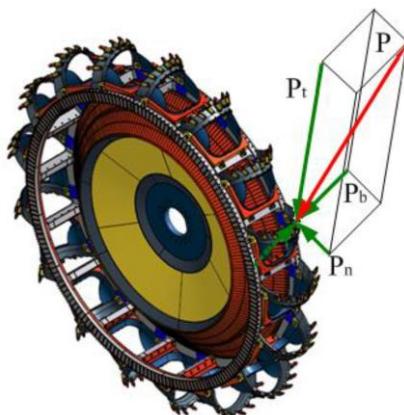
#### 4.4. Opšte o otporu kopanja

Rotorni bager vrši otkopavanje stijenskog materijala vedricama koje su ravnomerno raspoređene na rotoru, istovremenim okretanjem rotora u vertikalnoj ravni i strijeli rotora sa platformom u horizontalnoj ravni. Na početku procesa rezanja materijala ispred reznog elementa se sabija. U trenutku uravnoteženja sile pritiska reznog elementa sa čvrstoćom materijala na smicanje u ravni kliženja nastupa otkidanje materijala, a potom počinje proces ponovnog sabijanja [Ignjatović, 1993], [Bošković, 2016].

Rastresiti materijal bez kohezije ne pruža bitan otpor reznim elementima i materijal preko njih klizi u vedricu bagera. Plastični materijal, koji ima malu koheziju, pruža mali otpor i klizi u vedricu, dok se suvi vezani materijal sa većom kohezijom lomi u komade i pruža veći otpor kopanja. Čvrste stijene, sa većom kohezijom i čvrstoćom na pritisak, zahtjevaju znatne sile kopanja, jer se moraju u komadima lomiti iz masiva.

##### 4.4.1. Ukupni otpor materijala na kopanje

Ukupni otpor kopanja razlaže se na tri komponente (Slika 4.8.): tangentnu ( $P_t$ ), bočnu ( $P_b$ ) i normalnu ( $P_n$ ) [Bošković, 2016].



Slika 4.8. Sile koje djeluju na vedricu pri otkopavanju materijala ( $P$  – rezultanta sile kopanja,  $P_t$  – tangentna sila kopanja,  $P_b$  – bočna sila kopanja,  $P_n$  – normalna sila kopanja) [Bošković, 2016]

Obodna sila na rotoru savlađuje sledeće otpore [Bošković, 2016]:

- $P_{rez}$  – otpor na rezanje materijala iz masiva, uključujući otpor trenja reznih elemenata u čelu radnog bloka;
- $P_{pod}$  – otpor na podizanje materijala u vedricama do visine pražnjenja;

- $P_{punj}$  – otpor na punjenje vedrica materijalom;
- $P_{tr}$  – otpor trenja između materijala u vedrici i kružne skliznice rotora u procesu podizanja materijala do visine pražnjenja vedrica;
- $P_{kin}$  – otpor na saopštenje kinetičke energije materijalu u vedrici odnosno ubrzanje materijala do brzine vedrice.

Shodno naprijed izloženom, obodna sila na rotoru se može definisati izrazom:

$$P_t = P_{rez} + P_{pod} + P_{punj} + P_{tr} + P_{kin} \quad (4.10)$$

Vrijednost komponenta  $P_{punj}$ ,  $P_{tr}$ ,  $P_{kin}$  približno iznose:

$$P_{punj} + P_{tr} + P_{kin} = (0,02 - 0,15)P_{rez} \quad (4.11)$$

Izraz za obodnu silu može se pisati u obliku:

$$P_t = P_k + P_{pod} \quad (4.12)$$

pri čemu je:

$$P_k = P_{rez} + P_{punj} + P_{tr} + P_{kin} \quad (4.13)$$

gdje je:  $P_k$  - sila kopanja.

Ovakav način određivanja obodne sile na rotoru ( $P_t = P_k + P_{pod}$ ) danas se koristi od strane velikih proizvođača rotornih bagera u svijetu kao što su: Rusija, Njemačka, Češka Republika, itd. [Bošković, 2016].

Sila kopanja za rotorne bagere se određuje na sledeći način:

$$P_k = K_f \sum_{i=1}^{i=m} F_i = K_l \sum_{i=1}^{i=m} L_i \quad (4.14)$$

odnosno, njena srednja vrijednost iznosi:

$$P_{ksr} = K_f F_{sr} = K_l F_{sr} \quad (4.15)$$

gdje je:

$K_f$  - specifični otpor materijala na kopanje ( $\text{N}/\text{cm}^2$ ),

$F_i$  - zbir površina poprečnih presjeka odrezaka svih vedrica koje se istovremeno nalaze u procesu rezanja ( $\text{m}^2$ ),

$K_l$  – linijski specifični otpor materijala na kopanje ( $\text{N}/\text{cm}$ ),

$L_i$  - zbirna dužina reznih elemenata koje su istovremeno u procesu rezanja (cm),

$F_{sr}$  - srednja (po luku kopanja u ravni rotora) vrijednost površine poprečnog presjeka odreska ( $\text{cm}^2$ ),

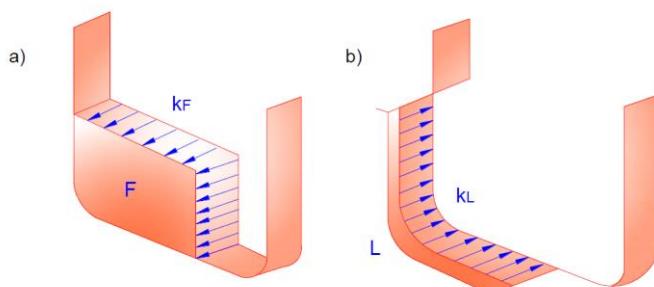
$L_{sr}$  - srednja (po luku kopanja) vrijednost dužine reznog elementa vedrice koja je u kontaktu sa materijalom (cm),

m - broj vedrica koje se istovremeno nalaze u procesu rezanja tj. u kontaktu sa materijalom.

#### 4.4.2. Specifični otpor materijala na kopanje

Specifični otpor na kopanje može da se definiše na sledeće načine (Slika 4.9.):

- odnos sile kopanja i zbirne površine poprečnih presjeka odrezaka svih vedrica koje se istovremeno nalaze u kontaktu sa materijalom -  $K_F$  ( $\text{N}/\text{cm}^2$ );
- odnos sile kopanja i zbirne dužine reznih elemenata svih vedrica koje su istovremeno u kontaktu sa materijalom, tj. u procesu rezanja -  $K_L$  ( $\text{N}/\text{cm}$ ) [Bošković, 2016].



Slika 4.9. Šematski prikaz određivanja specifičnog otpora na kopanje [Bošković, 2016]

a) u odnosu na površinu poprečnih presjeka odrezaka, b) u odnosu na dužinu rezne ivice u kontaktu sa materijalom

Često je u primjeni i treći pokazatelj  $K_{FL}$ , kao odnos tangentne komponente sile kopanja i kvadratnog korjena iz proizvoda zbirne površine poprečnih presjeka odrezaka i zbirne dužine reznih ivica koje su u kontaktu sa materijalom.

## **5. UPOTREBA BTO SISTEMA NA POVRŠINSKIM KOPOVIMA U REPUBLICI SRPSKOJ**

U Republici Srpskoj BTO sistem se koristi na dva površinska kopa i to u Gacku i u Stanarima.

### **5.1. Tehnologija sistema eksplotacije na površinskom kopu Gacko**

Projektovani sistem eksplotacije otkrivke i međuslojne jalovine na površinskom kopu Gacko – Centralno Polje se realizuje sa pet sistema i to:

1. I BTO sistem
- II BTO sistem
- III BTO sistem
2. Kombinovani sistem I
3. Kombinovani sistem II
4. Sistem kombajna Wirtgen SM 2500
5. Diskontinualni sistem u krovinskoj zoni eksplotacije i na otkopavanju humusa

I BTO sistem se sastoji od rotornog bagera ER 1250\*17/1.5 koji predstavlja osnovnu otkopnu opremu, jednog samohodnog transportera P 1600\*21/50, 5 transportera sa trakom širine 1200 mm i odlagača ARs 1200 (20+50)\*21. Pored rotornog bagera ER 1250\*17/1.5, u okviru istog sistema biće angažovan i rotorni bager ER 1250\*16/1.5 (D-1) kao agregatna zamjena postojećeg rotornog bagera. Ovaj drugi bager može se angažovati u slučajevima planiranih i neplaniranih zastoja rotornog bagera I BTO sistema i kada je kapacitativno moguće angažovati dva bagera na jednoj transportnoj liniji. Ovaj drugi slučaj je moguć kada je zbog fizičko-mehničkih karakteristika radne sredine kapacitet na otkopavanju rotornim bagerom značajno umanjen, odnosno pri radu bagera u materijalima sa povećanim otporom kopanja.

II BTO sistem se sastoji od rotornog bagera ER 1250\*16/1.5 (D-2), kao osnovne otkopne opreme, jednog samohodnog transportera BRs 1200\*29/32, 6 transportera sa trakom širine 1200 mm i samohodnog transportera tipa P 1600\*21/50, koji ima ulogu odlagača.

Od 2025. godine predviđeno je uključivanje III BTO sistema na otkopavanju otkrivke.

III BTO sistem projektovano je da čini Rotorni bager teoretskog kapaciteta  $3500 \text{ m}^3/\text{h}$ , samohodni transporter teoretskog kapaciteta  $4000 \text{ m}^3/\text{h}$ , 5 transportera sa trakom širine 1400 mm ukupne dužine 3800 m, Odlagač sa trakom teoretskog kapaciteta oko  $4500 \text{ m}^3/\text{h}$ . U okviru ovog sistema predviđena su jedna utovarna kolica za utovar materijala na transporter sa trakom i pretovarni uređaj za predaju materijala sa transporterom sa trakom na odlagač.

#### *Prikaz postojeće tehnologije otkopavanja otkrivke i uglja*

Osnovna kontinualna otkopna i odlažuća oprema prikazana je u Tabeli 5.1.

Tabela 5.1. Osnovna kontinualna otkopna i odlažuća oprema [IRM-Bor d.o.o. Zvornik, 2021.]

<b>OTKOPNA OPREMA</b>	<b>Godina nabavke</b>	<b>Teoretski kapacitet</b>
Rotorni bager ER-1250*17/1,5	1978.	$Qt=1250 \text{ m}^3/\text{h}$
Rotorni bager ER-1250*16/1,5	1978.	$Qt=1250 \text{ m}^3/\text{h}$
Rotorni bager ER-1250*16/1,5D	1978.	$Qt=1250 \text{ m}^3/\text{h}$
Samohodni transporter BRs 1200	1978.	$Qt=1200 \text{ m}^3/\text{h}$
Samohodni transporter P 1600 - 1	1978.	$Qt=1600 \text{ m}^3/\text{h}$
Samohodni transporter P 1600 - 2	1978.	$Qt=1600 \text{ m}^3/\text{h}$
Odlagač OŠ 1600	1978.	$Qt=1600 \text{ m}^3/\text{h}$
Odlagač ARs1200	1978.	$Qt=1200 \text{ m}^3/\text{h}$

Tehničke karakteristike rotornog bagera ER – 1250\*17/1.5 i ER – 1250\*16/15 date su u tabeli 5.2, dok su tehnološko-konstruktivne karakteristike ER – 1250\*17/1.5 prikazane na slici 5.1, a ER – 1250\*16/15 na slici 5.2.



Slika 5.1. Rotorni bager ER – 1250\*17/1.5 [IRM-Bor d.o.o. Zvornik, 2021.]



Slika 5.2. Rotorni bager ER – 1250\*16/1.5 [IRM-Bor d.o.o. Zvornik, 2021.]

Tabela 5.2. Tehničke karakteristike rotornog bagera ER – 1250\*17/1.5 i ER – 1250\*16/15  
[IRM-Bor d.o.o. Zvornik, 2021.]

<b>Parametar</b>	<b>Rotorni bager ER-1250*17/1.5</b>	<b>Rotorni bager ER-1250*16/1.5 (2)</b>
Teoretski kapacitet (m <sup>3</sup> /h)	1600/1200	1600/1200
Specifična sila kopanja (N/cm <sup>2</sup> )	7/10	7/10
Broj vedrica (n)	9,00	9,00
Zapremina vedrica (m <sup>3</sup> )	0,375	0,375
Broj istresanja u minuti	76,50	76,50
Brzina rezanja (m/min)	2,90	2,90
Širina transportne trake (mm)	1200	1200
Brzina kretanja bagera (m/h)	375	375
Dozvoljeni nagib (°):		
a) u radu	3	3
b) u transportu	5	5
Dovodni napon (V)	6000	6000
Temperaturni dijapazon rada (°C)	-30 do +35	-30 do +35
Visina kopanja (m)	17,00	16,00
Dubina kopanja (m)	1,50	1,50
Dužina katarke rotora (m)	21,30	21,30
Radius kopanja - gornji (m)	23,83	23,83
Radius kopanja - donji (m)	21,23	21,23
Prečnik rotora (m)	6,52	6,52
Visina istresanja (m): -max	8,50	6,50
-min	3,30	3,00
Maksimalna brzina katarke (m/min)	30,00	30,00
Brzina vertikalnog kretanja katarke (m/min)	3,00	3,00
Maksimalni ugao dizanja katarke (°)	23,00	20,00

Samohodni transporteri P – 1600 (Slika 5.3) namjenjeni su za rad sa rotornim bagerima, mada uz male prepravke mogu da posluže i kao odlagači. Trenutno na raspolaganju su 2 samohodna transportera ovog tipa. Samohodni transporter BRs 1200 (Slika 5.4.) namjenjen je za rad u tandemu sa rotornim bagerom. Tehničke karakteristike samohodnog transportera P - 1600 i BRs1200 date su u Tabeli 5.3.



Slika 5.3. Samohodni transporter P1600  
[IRM-Bor d.o.o. Zvornik, 2021.]



Slika 5.4. Samohodni transporter BRs 1200  
[IRM-Bor d.o.o. Zvornik, 2021.]

Tabela 5.3. Tehničke karakteristike samohodnog transportera P – 1600 i BRs1200 date [IRM-Bor d.o.o. Zvornik, 2021.]

<b>Parametar</b>	<b>P-1600*21/50</b>	<b>BRs-1200*29/32</b>
Teoretski kapacitet (m <sup>3</sup> /h)	2200	1800
Dužina prijemne strijele (m)	21	29
Dužina odlagajuće strijele (m)	50	32
Max. visina istresanja (m)	21	
Max. visina prijema materijala (m)	8.50	
Širina trake (mm)	1200	1200
Brzina trake (m/s):		
- Prijemnog transportera	4.45	4.30
- Odlagajućeg transportera	5.00	
Dozvoljeni nagib (°):		
- u radu	3	3
- u transportu	5	5
Brzina kretanja (m/min)	5.7-5.9	6
Ugao okretanja gornjeg stroja (0)	360	
Težina mašine (t):		
- Pri širini gusjenica 1500 mm	407	
- Pri širini gusjenica 2000 mm	420	
Dužina mašine (m)	78.08	
Širina mašine (m)	10.66	
Visina mašine (m)	22.50	

Odlagači OŠ 1600 (Slika 5.5.) i ARs1200 (Slika 5.6.) rade u sastavu kontinualnog dijela BTO sistema. Odlagač OŠ 1600 je jedna od gabaritno najvećih mašina na površinskom kopu. Tehničke karakteristike odlagača OŠ 1600 i ARs1200 date su u tabeli 5.4.



Slika 5.5. Odlagač OŠ 1600/40+110 [IRM-Bor d.o.o. Zvornik, 2021.]



Slika 5.6. Odlagač ARs1200/(20+50)\*21 [IRM-Bor d.o.o. Zvornik, 2021.]

Tabela 5.4. Tehničke karakteristike odlagača OŠ 1600 i ARS 1200 (IRM-Bor d.o.o. Zvornik, 2021.)

Parametri	OŠ 1600/40+110	ARS 1200/(20+50)*21
Teoretski kapacitet (m <sup>3</sup> /h)	1600	1800
Dužina prijemne strijele (m)	40,00	20,00
Dužina odlagajuće strijele (m)	110,00	50,00
Maksimalna visina istresanja (m)	34,00	21,00
Širina trake (mm)	1200	1200
Karakteristike prijemne trake brzina (m/s)		4,8
dozvoljeni nagib (°)	5,45	16,00
dozvoljeni ugao nagiba po dužini (°)	16,00	40,00
razmak između bubnjeva (m)		22,20
Karakteristike odlagajuće trake brzina (m/s)		4,28
dozvoljeni nagib (°)	5,45	+17 do -7,5
dozvoljeni ugao nagiba po dužini (°)	18,00	40,00
d) razmak između bubnjeva (m)		52,00
Dozvoljeni nagib (°): u radu / u transportu	5 / 3	5 / 3
Brzina kretanja (m/h)	90,00	75,00
Ugao okretanja gornjeg stroja (0 )	360	
Brzina obrtanja (o/min)	0,114	
Težina mašine (t)		360,30
Širina mašine (m)	14,60	
Dozvoljena brzina vjetra (m/s)	20,00	20,00
Visina gornje ivice prijemnog koša od terena (m)		4,80
Visina donje ivice prijemnog koša od terena (m)		2,65
Najmanji radijus krivine (m)	7,80	7,80
Vreme dizanja odlagajuće strijele (min)		6,60
Instalisana snaga (kW)	540,00	410,00
Specifični pritisak na podlogu (N/cm <sup>2</sup> )	13,00	
Radius prijemne strijele (m)	45,35	

Tehnološki parametri rada rotornog bagera ER 1250 i okviru I i II BTO sistema prikazani su u Tabeli 5.5.

Tabela 5.5. Tehnološki parametri rada rotornog bagera ER 1250 [IRM-Bor d.o.o. Zvornik, 2021.]

Parametar	Vrijednost
Visina kopanja (m)	15
Ugao okretanja bagera prema masivu (°)	90
Ugao okretanja bagera prema otkopanom prostoru (°)	22
Ugao nagiba bočne kosine etaže (°)	70
Ugao nagiba čeone kosine bloka (°)	70

## 5.2. Tehnologija sistema eksploracije na površinskom kopu Stanari

Eksploracija uglja u rudniku Stanari se obavlja korišćenjem kontinualne i diskontinualne tehnologije: potpuno modernizovanim BTO sistemom, hidrauličnim bagerima kašikarima i buldozerima za otkop međuslojne gline, kao i drugom pomoćnom mehanizacijom [Simić, 2012].

Otkopavanje otkrivke prolazilo je kroz različite razvojne faze i predstavljalo je, odnosno odražavalo dostignuti nivo razvoja površinskog kopa. Počeci modernog rudarstva u stanarskom ugljenom basenu vezani su za površinski kop „Raškovac“ i uvođenje BTO sistema. BTO sistem formiran je 1986 godine.

Od maja 2005. godine nakon preuzimanja većinskog vlasništva dokapitalizacijom od strane „EFT GROUP – Rudnik lignita Stanari“, nabavkom nove opreme i remontovanjem opreme koja se nalazila u rudniku povećana je količina otkopane otkrivke i otkopanog uglja.

Otkopavanje otkrivke na PK „Raškovac“ vrši se sa kontinuiranim i diskontinuiranim sistemom [Simić, 2012].

Diskontinuiranom tehnologijom otkopavaju se mase otkrivke koje su van dohvata bagera C-700 po visini, zatim na južnoj strani kopa ranije odložene mase otkrivke i mase otkrivke na sjevernoj strani kopa.

Otkrivka koja se otkopava bagerom C-700 naizmjenično se utovara na dva etažna transporter. Na prvom etažnom transporteru bager C -700 otkopava otkrivku sa dvije poluetaže, visine 7m (rampa) i 13m. Iznad dohvratne visine bagera C-700 rad se povremeno

odvija diskontinuiranom tehnologijom sa bagerima Komatsu PC 1250. a transport otkrivke kamionima Belaz nosivosti 45 t.

Najveći dio masa otkrivke na površinskom kopu Raškovac se otkopava sa BTO sistemom koji sačinjavaju:

- rotorni bager SchRs C 700,
- samohodni transporter BRs 1400/17.5+32.5 x15,
- bager dreglajn EŠ 5/45,
- transporteri E<sub>1</sub>; E<sub>2</sub>(V<sub>2</sub>); V<sub>1</sub> i O<sub>1</sub>, širine 1400 mm i brzine 4,5 m/s,
- odlagač ARs 1400/25+35 x14.

Kontinuirano otkopavanje otkrivke vrši se bagerom C 700, koji preko samohodne trake otkrivku utovara na etažni transporter i dalje preko veznog i odlagališnog transportera transportuje do odlagača, koji je odlaže na unutrašnje odlagalište. Za otkopavanje otkrivke angažovan je i bager dreglajn EŠ 5/45, koji u dubinskom radu otkriva ugalj i preko utovarnog koša utovara otkrivku na etažni transporter E<sub>2</sub> i dalje preko zajedničkog veznog do odlagališnog transportera.

Odlaganje otkrivke koja se otkopava sa diskontinuiranom tehnologijom vrši se na etaži BTO sistema, odakle se utovara bagerom C-700 na transportere BTO sistema.

Tehničke karakteristike rotornog bagera C-700 date su u tabeli 5.6, dok su tehnološko-konstruktivne karakteristike prikazane na slici 5.7.



Slika 5.7. Rotorni bager C-700 [foto dokumentacija rudnika]

Tabela 5.6. Tehničke karakteristike rotornog bagera C-700

<b>Parametar</b>	<b>Rotorni bager C-700</b>
Nominalne zapremine vedrice	700 l
Prečnik rotora (mjereno preko rezognog kruga)	7,70 m
Broj kašika	10 kom
Teoretski kapacitet	2900 m <sup>3</sup> /h
Dohvatna visina kopanja cca	15,00 m
Dohvatna visina kopanja pri selektivnom radu cca	10,50 m
Dohvat u dubinskom rezu cca	1,00 m
Dužina strijele radnog točka cca	13,20 m
Dužina odložne trake (horizontalno) cca	25,20 m
Radno zaokretno polje strijele radnog točka	210 <sup>0</sup>
Širina transportne trake	1400 mm
Brzina transportovanog materijala	4,20 m/s
Širina gusjenice	2,25 m
Dužina gusjenice	8,70 m
Brzina pri vožnji cca	10 m/min

## **6. REZULTATI ISTRAŽIVANJA**

### **6.1. Rezultati terenskih istraživanja**

Terenska istraživanja podrazumjevala su:

- odabir uzoraka za laboratorijska geomehanička ispitivanja;
- terenska mjerjenja otpornosti na kopanje vatmetarskom metodom.

Odabir uzoraka za laboratorijska geomehanička ispitivanja vršen je na tri lokacije: rudnik podvodne eksploatacije uglja „Kovin“, rudnik površinske eksploatacije uglja „Turija-Banovići“ i „Tamnava - istočno polje“.

- Tokom oktobra 2017. godine izvršen je obilazak lokacije rudnika uglja „Kovin“ kada su preuzeti rezultati prethodnih istraživanja i ispitivanja iz arhive rudnika [Gojković, 2004]. Ispitivanjima je obuhvaćeno 48 uzoraka uglja na kojima su izvršena laboratorijska ispitivanja u Laboratoriji za geomehaniku Rudarskog instituta iz Beograda.
- Na odabranim uzorcima prašinaste pontske gline (alevrit) sa površinskog kopa „Tamnava - istočno polje“ na 41 neporemećenom uzorku vršeno je određivanje geomehaničkih svojstava krovine.
- Na odabranim uzorcima iz jezgra geomehaničkih bušotina i sa otvorenih etaža (etaže 240, 252, 264, 275, 288, 300 i 312) koji su uzimani sa istočne kosine površinskog kopa „Turija – Banovići“, na 21 neporemećenom uzorku vršeno je određivanje geomehaničkih svojstava u laboratoriji Rudarskog instituta u Tuzli.

Određivanje otpora kopanja izvršeno je terenskim mjeranjima na bageru i pomoću penetrometra. Na lokaciji rudnika uglja „Kovin“ nisu rađena terenska mjerjenja na bageru, dok na površinskom kopu „Tamnava – istočno polje“ i površinskom kopu „Turija“ – Banovići vršena su terenska mjerjenja. Na površinskom kopu „Tamnava – istočno polje“ određivanje otpora kopanja izvršeno je vatmetarskom metodom tj. mjeranjem angažovane snage za pogon rotornog točka. Od terenskih ispitivanja na površinskom kopu „Turija“ – Banovići izvršeno je ispitivanje sile rezanja metodologijom loma uzorka prodiranjem klina pod pritiskom koje je vršeno specijalno konstruisanom aparaturom donijetom na teren, pri čemu su uzorci direktno uzimani iz masiva otvorenih etaža.

## **6.1.1. Kratak pregled tehnologije eksploatacije uglja na odabranim lokacijama**

### **6.1.1.1. Rudnik podvodne eksploatacije uglja „Kovin“**

Eksploatacija na rudniku uglja Kovin vrši se plovnim rotornim bagerom, a tehnologija otkopavanja podjeljena je na tri cjeline:

- Otkopavanje otkrivke (prašina) i dijela šljunka,
- Otkopavanja pijeska i šljunka i
- Otkopavanje uglja.

Otkopavanje otkrivke i dijela šljunka vrši se plovnim bagerima vedričarima. Transport otkrivke (prašina) se vrši senker baržama i odlaže na unutrašnje odlagalište ispod nivoa Dunava. Transport šljunka izvodi se baržama i izvozi van eksploatacionog polja.

Otkopavanje pijeska i šljunka vrši se plovnim bagerom okretanjem rezognog točka smjerom odozgo na dole i kružnim kretanjem katarke u jednu ili drugu stranu. Materijal se okretanjem rezognog točka odsijeca iz sloja, pune se vedrice koje otkopani materijal dovode u zonu usisa bagera, a zatim pumpama – zajedno sa vodom transportuje kroz plovni i dijelom kopneni cjevovod do zone unutrašnjeg odlagališta.

Transport od mjesta kopanja do postrojenja za klasiranje (EHS III) se vrši hidraulički, centrifugalnim pumpama kroz čelični cjevovod. Inicijalno su na plovnom bageru bile montirane tri pumpe, ali je vremenom jedna pumpa „premoštena“, tako da se danas transport obavlja sa dvije serijski vezane pumpe. Projektovani kapacitet tih pumpi, kada transportuju ugalj, je  $11.500 \text{ m}^3/\text{h}$ . Prečnik cjevovoda je 900 mm. Cjevovod ima dva dijela, plovni i kopneni. Plovni dio nema stalnu trasu, već predstavlja najkraće rastojanje između plovnog bagera i fiksne tačke (na adi) gdje se spaja sa kopnenim cjevovodom. Plovni dio cjevovoda se sastoji od segmenata (čelična cijev dužine 12 m i gumeni manžetna dužine 1,5 m) koji su tako ukomponovani da cjevovod može nesmetano da zauzme najpodesniji položaj. Segmenti se nalaze na plovnim pontonima. Prelaz sa plovnog na kopneni dio cjevovoda je obavljen preko gumenog dijela kojim se kompenzuju oscilacije nivoa Dunava u odnosu na fiksni dio cjevovoda. Na riječnoj adi pijesak i šljunak se deponuju, a kao finalne proizvode imamo šljunak garantovanog i negarantovanog kvaliteta koji se koristi u građevinarstvu.

#### **6.1.1.2. Rudnik površinske eksploatacije uglja „Turija-Banovići“**

Rudnik mrkog uglja „Banovići“ sa eksploatacijom je počeo još 1946. god. Trenutno aktivni površinski kopovi su „Čubrić“, „Turija“ i „Grivice“. Aktivan proizvodni objekat je i jama „Omazići“.

Površinski kopovi uglja u Banovićkom ugljenom basenu kao i jama „Omazići“, čine jedinstvenu organizacionu cjelinu RMU „Banovići“ u Banovićima. Povezanost ovih Rudnika sa termo - energetskim sistemom u Tuzlanskom Kantonu, a i šire relativno je dobra s obzirom na razvijen željeznički i drumski saobraćaj.

Banovićki ugljeni basen zauzima prostor oko  $27 \text{ km}^2$  i nalazi se u sjeveroistočnoj Bosni između Sprečke doline na sjeveru i planine Konjuh na jugu. Basen ima elipsast izdužen oblik pravca istok-zapad u dužini oko 12 km, po širini u srednjem dijelu dostiže oko 6 km.

Centralnim dijelom u pravcu istok-zapad prolazi uzdigniti serpentinski horst (lokalni naziv „pregradna greda“) koji banovićki basen dijeli na 2 dijela: na južni i sjeverni dio.

Sistem eksploatacije na površinskim kopovima RMU Banovići čine proizvodni procesi bušenja i miniranja, bagerovanja otkrivke i uglja i transporta kamionima (ugla do pretovarnih postrojenja i otkrivke na odlagališta). Ugalj sa pretovarnih postrojenja se transportuje željeznicom uskotračnog kolosjeka do separacije gdje se ugalj separiše. Proizvodni proces na dobijanju otkrivke i uglja je diskontinuiran, a u dogledno vrijeme planira se uvođenje kombinovanog sistema sa polustacionarnim drobilicama za otkrivku te transportnim sistemom i odlagačem za površinski kop Turija dok bi se na preostala dva kopa zadržao diskontinuirani sistem eksploatacije. Utovarni kapaciteti na ovom kopu su bageri MARION 4 i 5, dva hidraulična bagera TEREX 1 i 2, 12 damper kamiona, dva buldozera i jedan greder.

#### **6.1.1.3. Rudnik površinske eksploatacije uglja „Tamnava - istočno Polje“**

Kolubarski ugljeni basen nalazi se oko 50 km, južno od Beograda gdje njegov produktivni dio obuhvata površinu od oko  $520 \text{ km}^2$  u srednjem i donjem toku rijeke Kolubare i njenih glavnih pritoka Peštana, Turije, Uba, Tamnave i Kladnice.

Posmatran sa morfološkog aspekta basen obuhvata pretežno ravničarska i blago zatalasana zemljišta – aluvijalne ravni riječnih dolina i riječno – jezerske terase i zaravni sa nadmorskom visinom koja se kreće od 100 do 200 m.

Izuzetno povoljan geografski položaj se ogleda u odličnim komunikacijama koje prolaze kroz centralni dio basena: magistralni put Beograd – Kraljevo – Skoplje i pruga Beograd – Bar.

Dolinom rijeke Kolubare basen je podjeljen na istočni i zapadni dio. U istočnom dijelu basena geološki su istražena, otvorena, projektovana ili planirana za eksploataciju otkopna polja: „A“, „B“, „C“, „D“, „E“, „F“, „G“, „Šopić“ i „Veliki Crljeni“, a u zapadnom dijelu basena otkopna polja: „Tamnava – istočno polje“, „Tamnava – zapadno polje“, „Radljevo“ i „Zvizdar“.

Površinski kop „Tamnava – istočno polje“ nalazi se u zapadnom dijelu Kolubarskog basena. Radovi na otvaranju započeli su 1977. godine, a eksploatacija uglja počela je 1979. godine, a završena 2012. godine. Na otkopavanju otkrivke radila su dva BTO (rotorni bager – transporter – odlagač) sistema, a na otkopavanju uglja dva BTD (rotorni bager – transporter – drobilično postrojenje) sistema.

Lignit je u produktivnoj seriji grupisan uglavnom u tri ugljena sloja veće moćnosti i nekoliko slojeva male moćnosti u podinskom sloju serija. Krovinu i podinu ugljenih slojeva čine sedimenti gornjeg ponta, izuzev u dijelovima gdje je erozija odnijela krovini. Gornjopontski sedimenti su razvijeni u facije glina, pjeskovitih i prašinastih glina i pijeskova, koji se smjenjuju. U istočnom dijelu basena preovlađuju gline, a u zapadnom pijeskovi. Na površinskom kopu „Tamnava – istočno polje“ podina ugljenog sloja predstavljena je slojem pijeska debljine oko 100 m. Preko pijeska je glavni ugljeni sloj sa debljinom uglja od oko 10 – 30 m. Krovina je od prašinastih glina sa pojavnama sočiva sitnozrnih pijeskova debljine do 28 m. U tabeli 6.1. date su osnovne tehničke karakteristike opreme na površinskom kopu „Tamnava – istočno polje“.

Tabela 6.1. Osnovne tehničke karakteristike opreme na površinskom kopu „Tamnava – istočno polje“

Oznaka sistema	Proizvodač opreme	Bager (tip)	Kapacitet bagera ( $m^3\text{cm}/h$ )	Odlagač (tip)	Kapacitet odlagača ( $m^3\text{cm}/h$ )	Širina trake transpota sa trakom (m)	Kapacitet transportera ( $m^3\text{cm}/h$ )
BTO-I	O&K	SchRe90 0 25/6	4100	Ars14002 1/22+60	3500	1,6	4500- 6500
BTO-II	Krup	SchRe(e) 700 16/1,2	3000	BRs1600 15/28+50	2500	1,6	4500; 6500

Oznaka sistema	Proizvođač opreme	Bager (tip)	Kapacitet bagera ( $m^3\text{čm}/h$ )	Odlagač (tip)	Kapacitet odlagača ( $m^3\text{čm}/h$ )	Širina trake transfortera sa trakom (m)	Kapacitet transportera ( $m^3\text{čm}/h$ )
BTD-1	O&K	SchRs63 0 25/6	4100			1,6; 2	
BTD-II	O&K	Ers1000/20	1800			1,6; 2	

### 6.1.2. Terenska mjerena otpora na kopanje

Određivanje otpora kopanja izvršeno je na bageru SchRs 900 25/6 (proizvođača O&K), koji radi na otkopavanju otkrivke površinskog kopa „Tamnava - istočno polje“. Osnovni tehnički podaci rotornog bagera SchRs 900 25/6 (proizvođača O&K), su:

- instalisana snaga motora za pogon rotornog točka  $N_m=2 \times 230 \text{ kW}$ ,
- geometrijska zapremina vedrice  $q=0,9 \text{ m}^3$ ,
- broj vedrica  $z=14$ ,
- broj istresanja vedrica u minuti  $n=76 \text{ min}^{-1}$ ,
- ugaono rastojanje između vedrica  $v=0,4488 \text{ rad}$ ,
- prečnik rotornog točka  $D=10,2 \text{ m}$ ,
- dužina rotorne strijele  $L_s=35 \text{ m}$ ,
- obodna brzina rotornog točka  $V_k=2,89 \text{ m/s}$ .

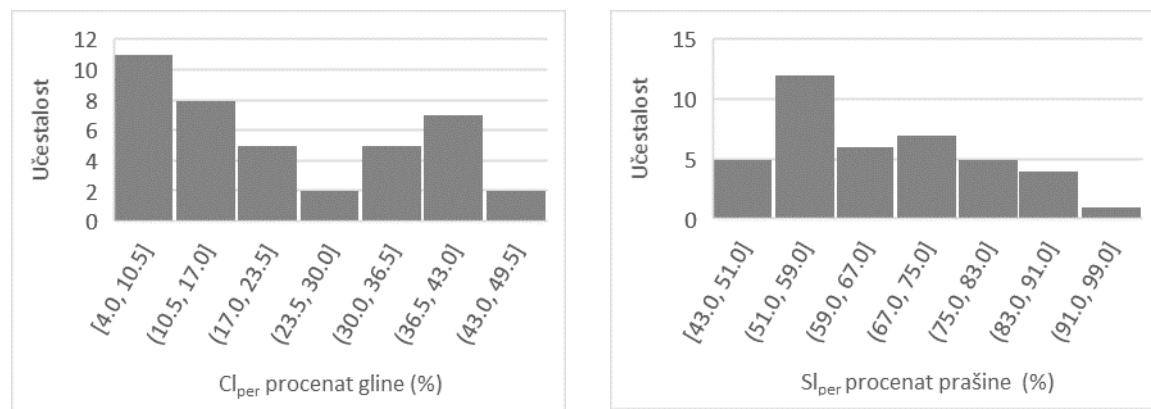
U okviru ugla zakretanja rotorne strijele u odnosu na produžnu osu bagera  $+/- 15^\circ$  izvršeno je sedam serija mjerena (ukupno 136 mjerena) specifičnog otpora kopanja, kapaciteta bagera i specifične potrošnje energije. Mjerena su vršena sa strelastim i ugaonim zubima, sa novim, djelimično i potpuno pohabanim zubima i to u cilju da se istakne uzajamna zavisnost između vrste i stanja reznih elemenata sa jedne strane i specifičnog otpora kopanja, kapaciteta bagera i specifične potrošnje energije sa druge strane.

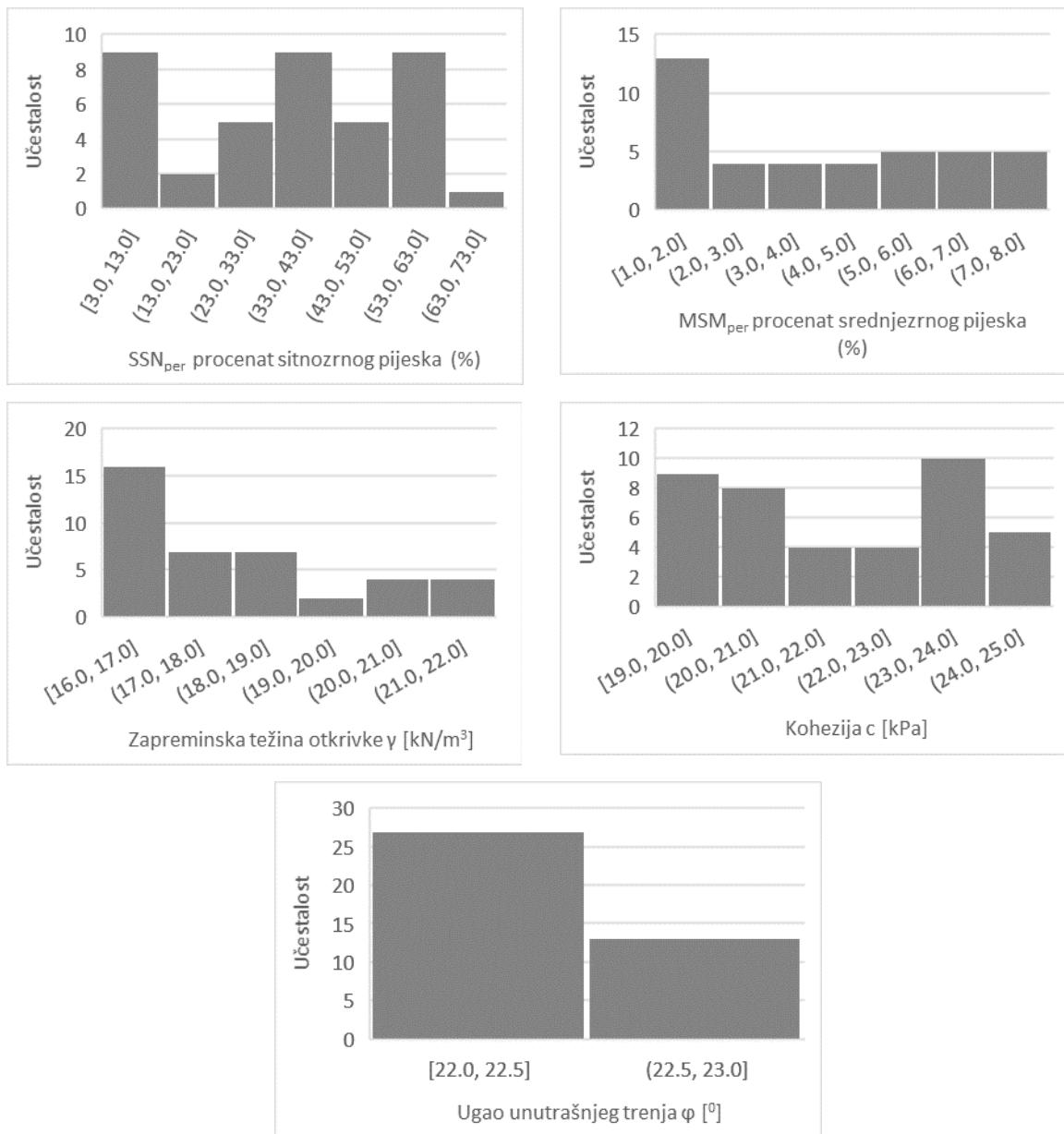
U doktoratu su korišteni podaci mjerena za nove zube rotornog bagera (I serija od 20 mjerena) i zube bagera poslije 250 sati rada (II serija od 22 mjerena) strelastih zuba proizvodnje livnice „Nikšić“. U tabeli 6.2. dati su statistički pokazatelji analiziranih vrijednosti parametara za nove zube bagera.

Tabela 6.2. Statistički pokazatelji analiziranih vrijednosti parametara za nove zube bagera

Analizirani parametri	Maksimalna vrijednost	Minimalna vrijednost	Srednja vrijednost	Standardna devijacija	Medijana
$Cl_{per}$ procenat gline (%)	45,00	4,00	22,15	13,30	20,00
$Sl_{per}$ procenat prašine (%)	92,00	43,00	65,30	13,33	65,00
$SSN_{per}$ procenat sitnozrnog pijeska (%)	64,00	3,00	36,48	18,86	38,00
$MSN_{per}$ procenat srednjezrnog pijeska (%)	8,00	1,00	4,38	2,37	4,00
Zapreminska težina otkrivke $\gamma$ ( $kN/m^3$ )	22,00	16,00	18,35	1,98	22,00
Kohezija c (kPa)	25,00	19,00	22,28	1,89	22,00
Ugao unutrašnjeg trenja $\phi$ (°)	23,00	22,00	22,33	0,47	22,00

Na slici 6.1. prikazani su histogrami učestalosti pojavljivanja analiziranih parametara za nove zube bagera ( $Cl_{per}$ ,  $Sl_{per}$ ,  $SSN_{per}$ ,  $MSM_{per}$ ,  $\gamma$ , c i  $\phi$ ).





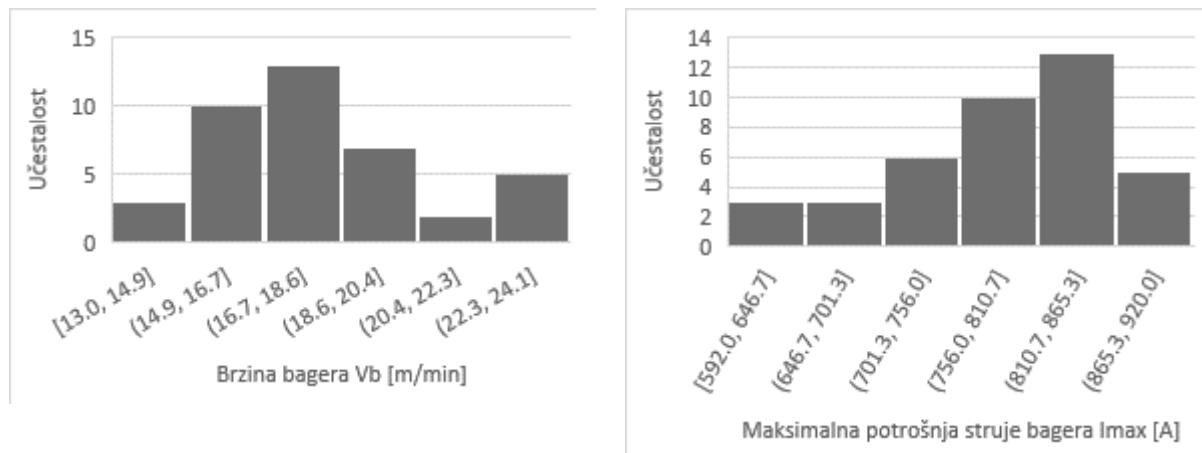
Slika 6.1. Učestalost pojavljivanja analiziranih vrijednosti parametara ( $Cl_{per}$ ,  $Sl_{pe}$ ,  $SSN_{per}$ ,  $MSM_{per}$ ,  $\gamma$ ,  $c$  i  $\phi$ )

U tabeli 6.3. dati su statistički pokazatelji izmjerenih vrijednosti parametara za nove zube bagera.

Tabela 6.3. Statistički pokazatelji izmjerениh vrijednosti parametara za nove zube bagera

Mjereni parametri	Maksimalna vrijednost	Minimalna vrijednost	Srednja vrijednost	Standardna devijacija	Medijana
Brzina bagera $V_b$ (m/min)	24,00	13,00	18,10	3,13	18,00
Maksimalna potrošnja struje na bageru $I_{max}$ (A)	920,00	592,00	789,55	81,61	804,00

Na slici 6.2. prikazani su histogrami učestalosti pojavljivanja izmjerениh parametara za nove zube bagera ( $V_b$  i  $I_{max}$  ).



Slika 6.2. Učestalost pojavljivanja izmjerenih vrijednosti parametara  $V_b$  i  $I_{max}$

U tabeli 6.4. dati su statistički pokazatelji analiziranih vrijednosti parametara za pohabane zube bagera.

Tabela 6.4. Statistički pokazatelji analiziranih vrijednosti parametara za pohabane zube bagera

Analizirani parametri	Maksimalna vrijednost	Minimalna vrijednost	Srednja vrijednost	Standardna devijacija	Medijana
$Cl_{per}$ procenat gline (%)	45,00	4,00	23,28	12,47	23,00
$SI_{per}$ procenat	92,00	43,00	68,20	15,62	71,00

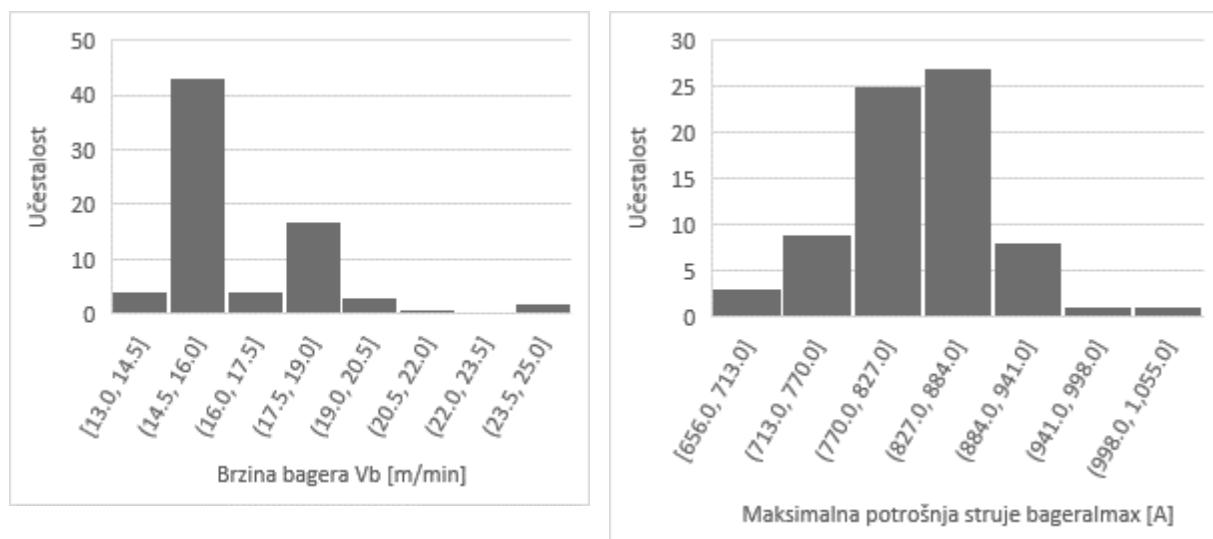
<b>Analizirani parametri</b>	<b>Maksimalna vrijednost</b>	<b>Minimalna vrijednost</b>	<b>Srednja vrijednost</b>	<b>Standardna devijacija</b>	<b>Medijana</b>
prašine (%)					
SSN <sub>per</sub> procenat sitnozrnog pijeska (%)	64,00	1,00	30,14	18,12	29,00
MSN <sub>per</sub> procenat srednjezrnog pijeska (%)	8,00	1,00	4,83	2,30	5,00
Zapreminska težina otkrivke $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	22,00	16,00	18,66	1,94	19,00
Kohezija c (kPa)	25,00	19,00	22,03	1,89	22,00
Ugao unutrašnjeg trenja $\varphi$ (°)	23,00	22,00	22,57	0,50	23,00

U tabeli 6.5. dati su statistički pokazatelji izmjerениh vrijednosti parametara za pohabane zube bagera.

Tabela 6.5. Statistički pokazatelji izmjerenih vrijednosti parametara za pohabane zube bagera

<b>Mjereni parametri</b>	<b>Maksimalna vrijednost</b>	<b>Minimalna vrijednost</b>	<b>Srednja vrijednost</b>	<b>Standardna devijacija</b>	<b>Medijana</b>
Brzina bagera V <sub>b</sub> (m/min)	24,00	13,00	16,42	2,14	16,00
Maksimalna potrošnja struje na bageru I <sub>max</sub> (A)	1000	656,00	827,00	60,90	824,00

Na slici 6.3 prikazani su histogrami učestalosti pojavljivanja izmjerenih parametara za pohabane zube bagera (V<sub>b</sub> i I<sub>max</sub>).



Slika 6.3. Učestalost pojavljivanja izmjerenih vrijednosti parametara  $V_b$  i  $I_{max}$

U tabeli 6.6. dati su analizirani i izmjereni parametri sa njihovim rasponom vrijednosti.

Tabela 6.6 Pregled analiziranih parametara i njihov raspon vrijednosti

<b>Novi zubi rotornog bagera</b>	
<b>Mjereni parametri</b>	<b>Raspon vrijednosti</b>
$I_{max}$ maksimalna potrošnja struje bagera (A)	592,00-920,00
$V_b$ brzina bagera (m/min)	13,00-24,00
<b>Analizirani parametri</b>	
$Cl_{per}$ procenat gline (%)	5,00-45,00
$SI_{per}$ procenat prašine (%)	43,00-92,00
$SSN_{per}$ procenat sitnozrnog pijeska (%)	2-61
$MSN_{per}$ procenat srednjezrnog pijeska (%)	1,00-8,00
$\gamma$ zapreminska težina otkrivke ( $kN/m^3$ )	16,00-22,00
c kohezija (kPa)	19,00-25,00
$\phi$ ugao unutrašnjeg trenja ( $^0$ )	22,00-23,00
<b>Zubi rotornog bagera poslije 250 sati rada</b>	
<b>Mjereni parametri</b>	<b>Raspon vrijednosti</b>
$I_{max}$ maksimalna potrošnja struje bagera (A)	656,00-1000,00
$V_b$ brzina bagera (m/min)	13,00-24,00
<b>Analizirani parametri</b>	
$Cl_{per}$ procenat gline (%)	4,00-45,00
$SI_{per}$ procenat prašine (%)	44,00-92,00
$SSN_{per}$ procenat sitnozrnog pijeska (%)	1,00-65,00
$MSN_{per}$ procenat srednjezrnog pijeska (%)	1,00-8,00
$\gamma$ zapreminska težina otkrivke ( $kN/m^3$ )	16,00-22,00
c kohezija (kPa)	19,00-25,00
$\phi$ ugao unutrašnjeg trenja ( $^0$ )	22,00-23,00

U prilogu br. 1. i br. 2. prikazane su analizirane vrijednosti parametara i izmjerene vrijednosti parametara za nove zube i pohabane zube bagera (poslije 250 sati rada) na površinskom kopu „Tamnava – istočno polje“, dok su u narednoj tabeli (tabela 6.7.) dati osnovni statistički pokazatelji veličina koje su mjerene.

Tabela 6.7. Pregled osnovnih statistički pokazatelja koji su mjereni

Mjereni parametri	Raspon vrijednosti
Brzina bagera $V_b$ (m/min)	13,00-24,00
Maksimalna potrošnja struje na bageru $I_{max}$ (A)	592,00-1000,00

## 6.2. Rezultati laboratorijskih istraživanja

U Laboratoriji za geomehaniku Rudarskog instituta iz Beograda u laboratorijskim uslovima gdje su u potpunosti simulirani radni uslovi otkopavanja – rezanja „in situ“ na 48 uzoraka uglja su izvršena laboratorijska ispitivanja. U okviru laboratorijskih ispitivanja obuhvaćena su sledeća svojstva uglja koja su ispitana na uzorcima: zapreminska težina uglja, parametri čvrstoće na smicanje (ugao unutrašnjeg trenja i kohezija), čvrstoća na pritisak i sila rezanja. U svrhu određivanja specifičnog otpora rezanja uglja, upotrebljen je posebno konstruisan klin firme Orenstein und Koppel.

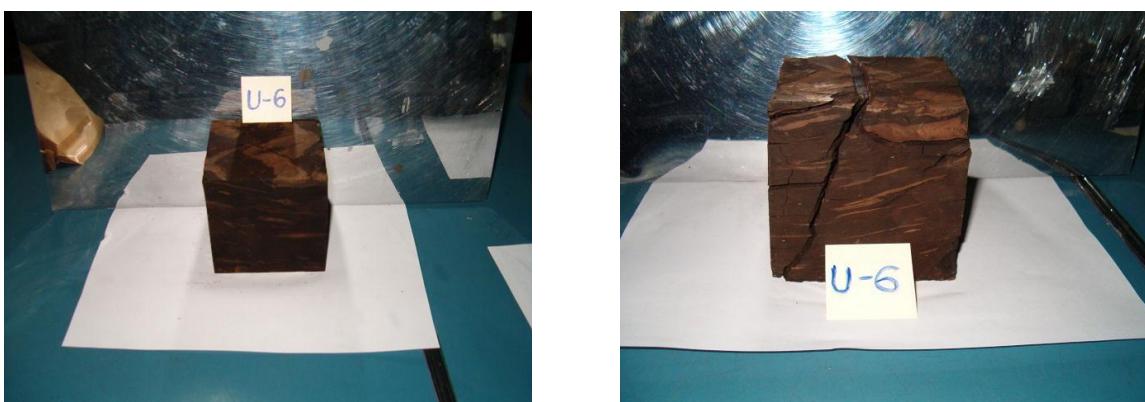
U laboratoriji Rudarskog instituta u Tuzli je utvrđena zapreminska težina otkrivke pomoću metode sa cilindrom, ispitivanje čvrstoće na pritisak hidrauličnom presom, zatezna čvrstoća brazilskom metodom, dok je ispitivanje direktnog smicanja korišteno za određivanje ugla unutrašnjeg trenja i kohezije. Otpor rezanja je određivan u laboratoriji pomoću reznog klatna tipa „Š“ na 21 uzorku otkrivke (sivi laporci), koji je konstruisan u Rudarskom institutu Tuzla.

U laboratoriji Rudarskog fakulteta u Beogradu su ispitivana sledeća svojstva otkrivke: granulometrijski sastav (procenat gline, prašine i pijeska), zapreminska težina (metodom sa cilindrom) i čvrstoća na smicanje (kohezija i ugao unutrašnjeg trenja korišćenjem metode direktnog smicanja) za uzorke sa površinskog kopa „Tamnava – istočno polje“.

### 6.2.1. Laboratorijska istraživanja otpora rezanja na površinskom kopu Kovin

U prilogu 3. prikazane su analizirane vrijednosti parametara na rudniku „Kovin“ sa podvodnom eksploatacijom uglja.

U laboratoriji je ispitano ukupno 48 uzoraka uglja. Prikaz uzorka prije i poslije određivanja sile rezanja dat je na slici 6.4., dok su rezultati laboratorijskih ispitivanja dati u tabeli 6.9. Sa geološkog aspekta, ispitani ugalj pripada grupi lignita, stvorenih u gornjem neogenu (Pont) i bogat je ksilitom (drvenom masom). Ugalj bogat ksilitom sastoji se od slojevite ili lenticularne koncentracije ksilita, uključujući sve fragmente sa dobro očuvanom drvenom strukturom prečnika od najmanje 1 cm, dok su manji fragmenti klasifikovani kao detritus (Mitrović et al., 2017).



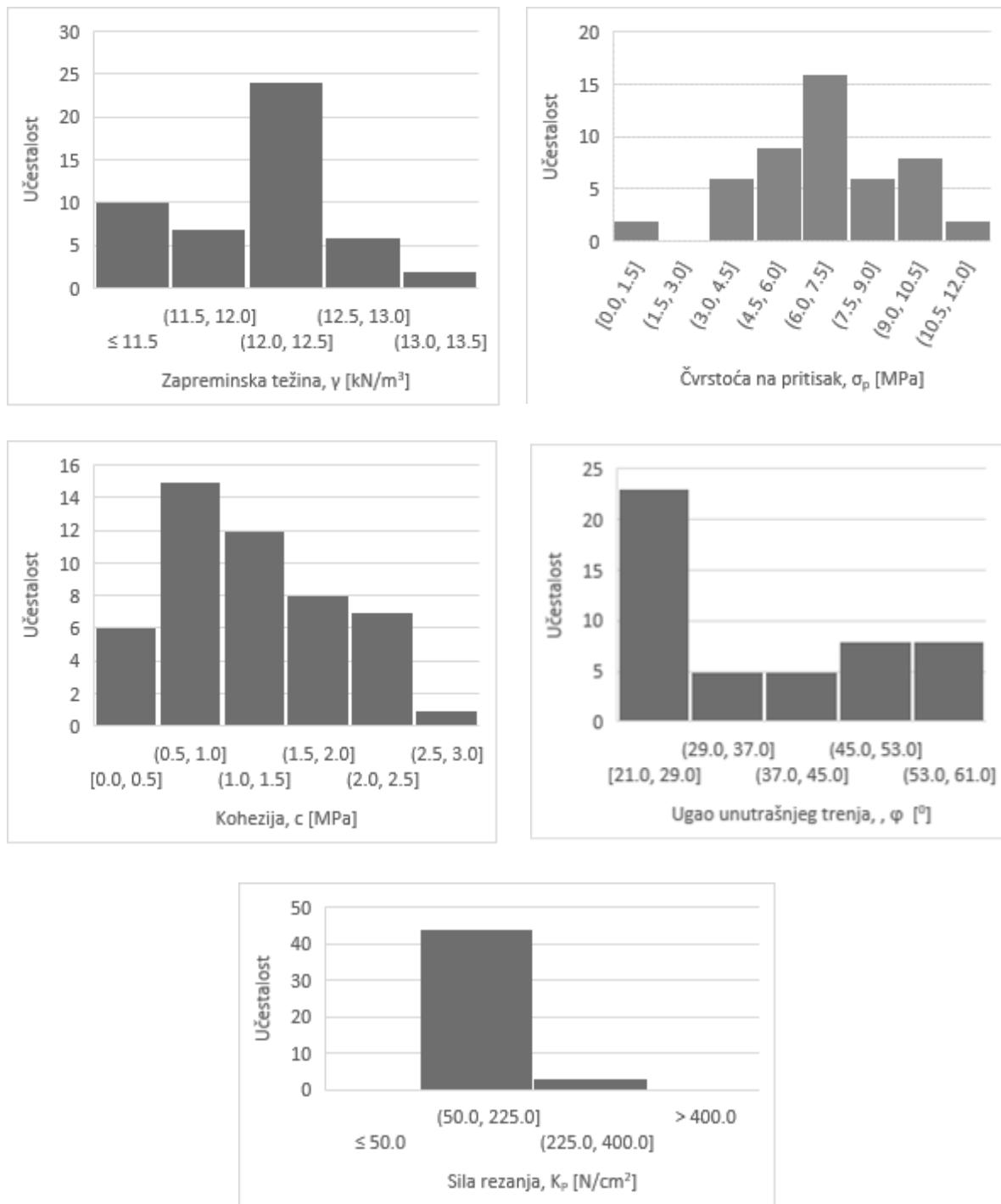
Slika 6.4. Uzorak uglja prije (a) i nakon (b) laboratorijskog određivanje sile rezanja [Kostić et al, 2018]

U tabeli 6.8. Dati su statistički pokazatelji analiziranih vrijednosti parametara.

Tabela 6.8. Statistički pokazatelji analiziranih vrijednosti parametara

<b>Analizirani parametri</b>	<b>Maksimalna vrijednost</b>	<b>Minimalna vrijednost</b>	<b>Srednja vrijednost</b>	<b>Standardna devijacija</b>	<b>Medijana</b>
Zapreminska težina, $\gamma$ [ $\text{kN/m}^3$ ]	13,47	11,12	12,08	0,53	12,14
Čvrstoća na pritisak, $\sigma_p$ [MPa]	11,05	0,85	6,80	2,19	6,85
Kohezija, $c$ [MPa]	2,85	0,05	1,28	0,665	1,22
Ugao unutrašnjeg trenja, $\phi$ [ $^{\circ}$ ]	61,00	21,00	36,78	13,20	33,00
Sila rezanja, $K_P$ [ $\text{N/cm}^2$ ]	401,30	48,26	130,12	72,13	116,70

Na slici 6.5. prikazani su histogrami učestalosti pojavljivanja analiziranih parametara ( $\gamma$ ,  $\sigma_p$ ,  $c$ ,  $\phi$  i  $K_p$ ).



Slika 6.5. Učestalost pojavljivanja analiziranih vrijednosti parametara  $\gamma$ ,  $\sigma_p$ ,  $c$ ,  $\phi$  i  $K_p$

U tabeli 6.9. dati su analizirani parametri sa njihovim rasponom vrijednosti.

Tabela 6.9. Raspon dobijenih laboratorijskih vrijednosti za uticajne faktore i silu rezanja uglja

Analizirani parametri	Raspon vrijednosti
Zapreminska težina, $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	11,12-13,47
Čvrstoća na pritisak, $\sigma_p$ [MPa]	0,85-11,05
Kohezija, c [MPa]	0,05-2,85
Ugao unutrašnjeg trenja, $\phi$ [°]	21,00-61,00
Sila rezanja, $K_p$ [N/cm <sup>2</sup> ]	48,26-401,30

### 6.2.2. Laboratorijska ispitivanja otpora rezanja na površinskom kopu „Turija – Banovići“

U prilogu br. 4. prikazane su analizirane vrijednosti parametara i izmjerene vrijednosti parametara na površinskom kopu „Turija – Banovići“.

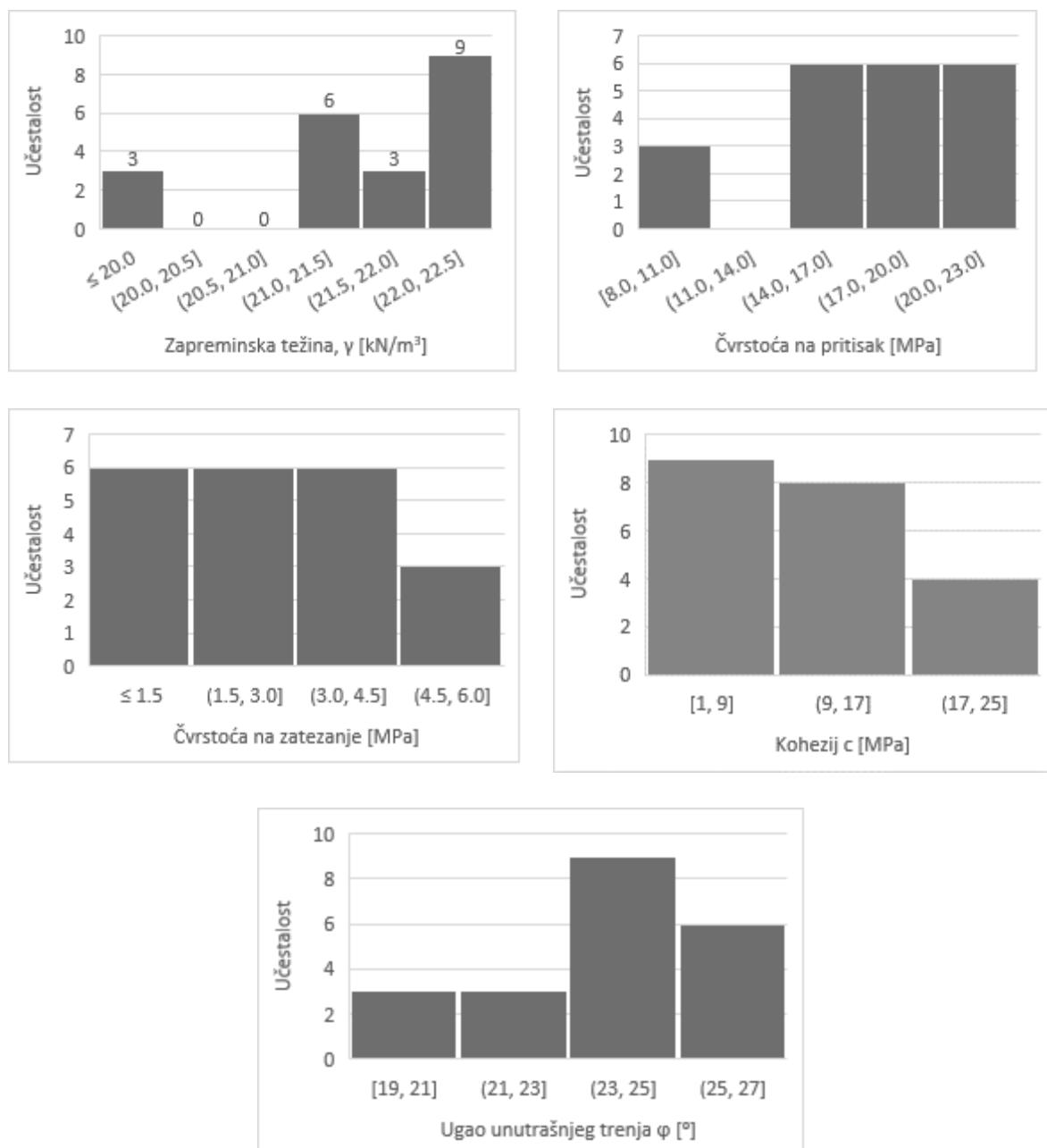
U tabeli 6.10. dati su statistički pokazatelji analiziranih vrijednosti parametara.

Tabela 6.10. Statistički pokazatelji analiziranih vrijednosti parametara

Analizirani parametri	Maksimalna vrijednost	Minimalna vrijednost	Srednja vrijednost	Standardna devijacija	Medijana
Zapreminska težina, $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	22,35	19,90	21,53	0,83	21,85
Čvrstoća na pritisak $\sigma_p$ [MPa]	22,60	8,00	17,20	4,68	18,65
Čvrstoća na zatezanje $\sigma_z$ [MPa]	4,80	1,40	2,93	1,27	7,50
Kohezija, c [MPa]	0,52	0,20	0,36	0,11	0,35
Ugao unutrašnjeg trenja $\phi$ [°]	27,00	19,00	24,14	2,47	25,00

Laboratorijski utvrđene vrijednosti mehaničkih svojstava otkrivke za različite dubine rezanja i za različite nivoe iskopa date su u tabeli 6.11. Raspon izlaznih vrijednosti dat je u tabeli 6.13.

Na slici 6.6. prikazani su histogrami učestalosti pojavljivanja analiziranih parametara ( $\gamma$ ,  $\sigma_p$ ,  $\sigma_z$ ,  $c$  i  $\phi$ ).



Slika 6.6. Učestalost pojavljivanja analiziranih vrijednosti parametara,  $\gamma$ ,  $\sigma_p$ ,  $\sigma_z$  c i  $\phi$

U tabeli 6.11. date su analizirane vrijednosti parametara sa njihovim rasponom vrijednosti.

Tabela 6.11. Raspon analiziranih vrijednosti parametara

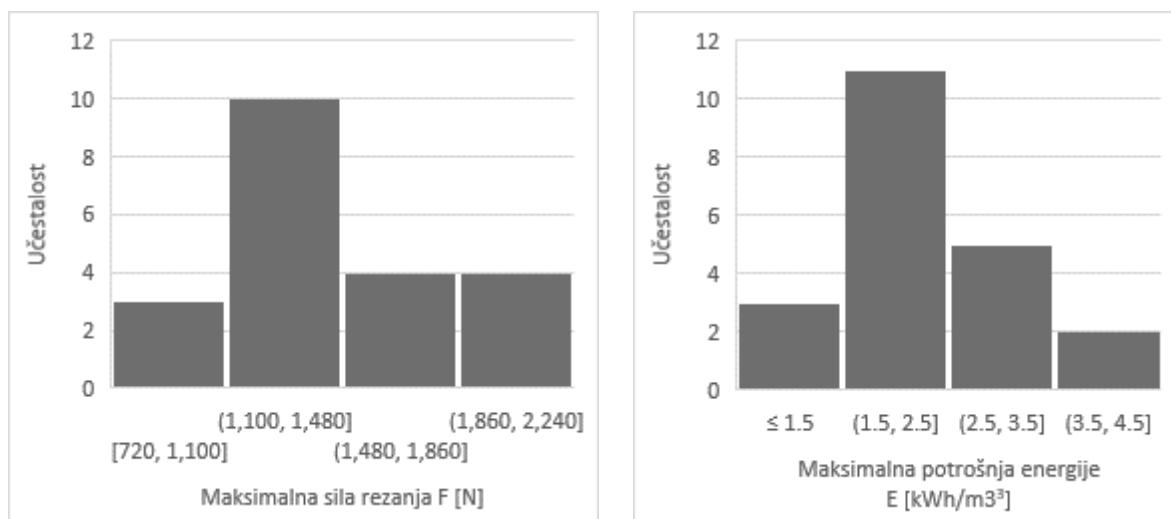
<b>Analizirani parametri</b>	<b>Raspon vrijednosti</b>
Zapreminska težina, $\gamma$ [ $\text{kN}/\text{m}^3$ ]	19,90-22,35
Čvrstoća na pritisak, $\sigma_p$ [MPa]	8,00-22,6
Čvrstoća na zatezanje, $\sigma_z$ [MPa]	1,40-4,80
Kohezija, c [MPa]	0,20-0,52
Ugao unutrašnjeg trenja $\phi$ [°]	19,00-27,00

U tabeli 6.12. prikazani su statistički pokazatelji izmjerene vrijednosti parametara.

Tabela 6.12. Statistički pokazatelji izmjerene vrijednosti parametara

Mjereni parametri	Maksimalna vrijednost	Minimalna vrijednost	Srednja vrijednost	Standardna devijacija	Medijana
Maksimalna sila rezanja, F [N]	2240,00	720,00	1488,10	388,145	1440,00
Maksimalna potrošnja energije, E [kWh/m <sup>3</sup> ]	3,90	1,29	2,27	0,69	2,14

Na slici 6.7. prikazani su histogrami učestalosti pojavljivanja izmjerene vrijednosti parametara (F i E).



Slika 6.7. Učestalost pojavljivanja izmjerene vrijednosti parametara, F i E

U tabeli 6.13. date su izmjerene vrijednosti parametara sa njihovim rasponom vrijednosti.

Tabela 6.13. Raspon analiziranih vrijednosti parametara

Analizirani parametri	Raspon vrijednosti
Maksimalna sila rezanja, F [N]	720,00-2240,00
Maksimalna potrošnja energije, E [kWh/m <sup>3</sup> ]	1,29-3,90

### **6.2.3. Laboratorijska ispitivanja otpora rezanja na površinskom kopu „Tamnava – Istočno polje“**

U prilogu br. 1. i br. 2. prikazani su analizirane vrijednosti parametara i izmjerene vrijednosti parametara za nove zube i pohabane zube bagera (poslije 250 sati rada) na površinskom kopu „Tamnava – istočno polje“.

Prema rezultatima obavljenih istraživanja, krovinu ugljenog sloja na ovome površinskom kopu čine:

- kompleks kvartarnih glina,
- kompleks aluvijalnih zaglinjenih pijeskova,
- kompleks aluvijalnih zaglinjenih šljunkova i
- kompleks prašinastih pontskih glina.

Određivanje otpora kopanja izvršeno je na litološkom članu prašinaste pontske gline (alevriti). Ovaj litološki član rasprostranjen je na cijelom kopu, čini neposrednu krovinu uglja, a debljina sloja kreće se od 7 metara na istočnoj granici kopa do 30 m na zapadnoj granici. Ovi materijali imaju relativno dobru homogenost i izotropnost, a mogu se svrstati u srednje do visokoplastične stijene. Prema rezultatima istraživanja, osnovne fizičko-mehaničke karakteristike ovih prašina su:

- granulometrijski sastav:
  - čiste gline 4-45%, srednja vrijednost 23%
  - prašina 43-92%, srednja vrijednost 70%
  - sitnozrni pijesak 1-65%, srednja vrijednost 6%
  - srednjezrni pijesak 1-8%, srednja vrijednost 1%,
- prirodni sadržaj vode:  $\omega=12-39\%$  (srednja vrijednost 32%),
- indeks konzistencije:  $I_c=0,64-1,07$  (srednja vrijednost 0,87),
- zapreminska težina:  $\gamma=16-22 \text{ kN/m}^3$  (srednja vrijednost 19,5),
- kohezija:  $c=19-25 \text{ kN/m}^2$  (srednja vrijednost 19,5),
- ugao unutrašnjeg trenja:  $\phi=22-23^\circ$ .

### 6.3. Analiza uticaja geomehaničkih svojstava na otpor na kopanje

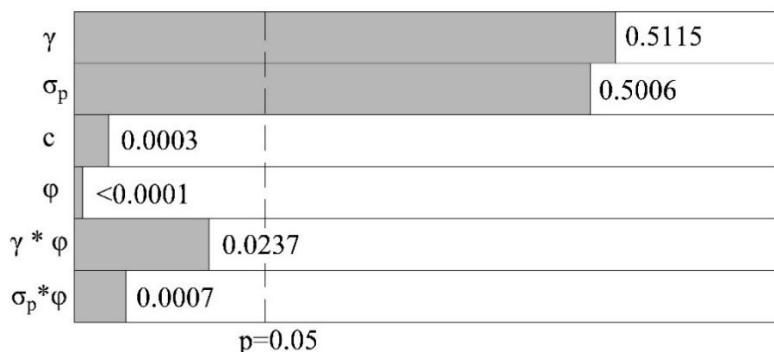
Na osnovu analiziranih podataka dobijenih otkopavanjem otkrivke i uglja rotornim bagerima na površinskim kopovima uglja na području Srbije i Bosne i Hercegovine izvršio se odabir pogodnih lokacija za formiranje modela, u zavisnosti od raznovrsnosti geološke građe i dostupnosti podataka. Površinski kopovi na kojima je su formirani modeli su sledeći:

- rudnik uglja-Kovin (Srbija) sa podvodnom eksploracijom;
- površinski kop Turija-Banovići (Bosna i Hercegovina) i
- površinski kop Tamnova-istočno polje (Srbija).

#### 6.3.1. Formiranje modela na PK „Kovin“

Da bi se formirao model na rudniku Kovin analizirana je sila rezanja uglja u funkciji geomehaničkih parametara: zapreminska težina, čvrstoća na pritisak, kohezija i ugao unutrašnjeg trenja.

Rezultati sprovedenih ANOVA testom pokazuju sljedeće. Čini se da ugao unutrašnjeg trenja ima najveći pozitivan uticaj na silu rezanja uglja, kako pojedinačno tako i u interakciji sa zapreminskom težinom i čvrstoćom na pritisak (slika 6.8).



Slika 6.8. Statistička značajnost uticaja ispitanih ulaznih parametara na silu rezanja uglja  
[Kostić et al, 2018]

Kohezija takođe ima statistički značajan uticaj na silu rezanja uglja ( $p = 0.0003$ ). S druge strane, uticaj zapreminske težine i čvrstoće na pritisak uglja nije statistički značajan. Ovakav efekat zapreminske težine, sa aspekta inženjerske prakse je očekivan: analizirani raspon vrijednosti je prilično mali, a tako mala varijabilnost ovog parametra ne može se osjetiti kao značajna promjena sile rezanja uglja. Što se tiče uticaja čvrstoće na pritisak, jasno je da se

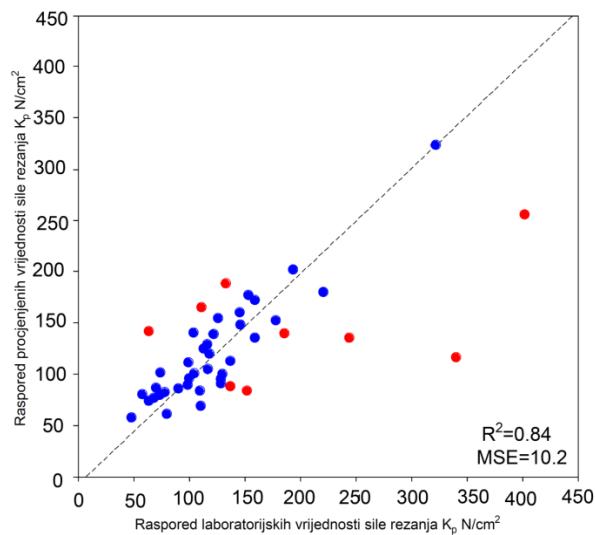
lom uzorka uglja dešava prije nego što se postigne čvrstoća na pritisak, tj. dolazi do loma prekoračenjem čvrstoće na smicanje.

Rezultati višestruke linearne regresije ukazuju na to da se korelacija između sile rezanja  $K_F$ , parametara čvrstoće na smicanja,  $c$  i  $\varphi$ , čvrstoće na pritisak uglja  $\sigma_p$  i zapreminske težine  $\gamma$  može se formulisati kao:

$$K_F = ((\exp(-5.381 + 1.623 \cdot \gamma + 2.244 \cdot \sigma_p + 2.016 \cdot c + 6.486 \cdot \varphi - 4.094 \cdot \gamma \cdot \varphi - 5.236 \cdot \sigma_p \cdot \varphi)) - 0.01) \cdot 353.04 + 48.26 \quad (6.1)$$

Jednačina (6.1.) pruža pouzdanu procjenu za najveći dio razmatranog raspona vrijednosti sile rezanja (slika 6.9.). Međutim, ova korelacija ne uspjeva da obuhvati vrlo visoke i veoma niske vrijednosti sile rezanja, što se može objasniti i sa statističke i sa geološke tačke gledišta.

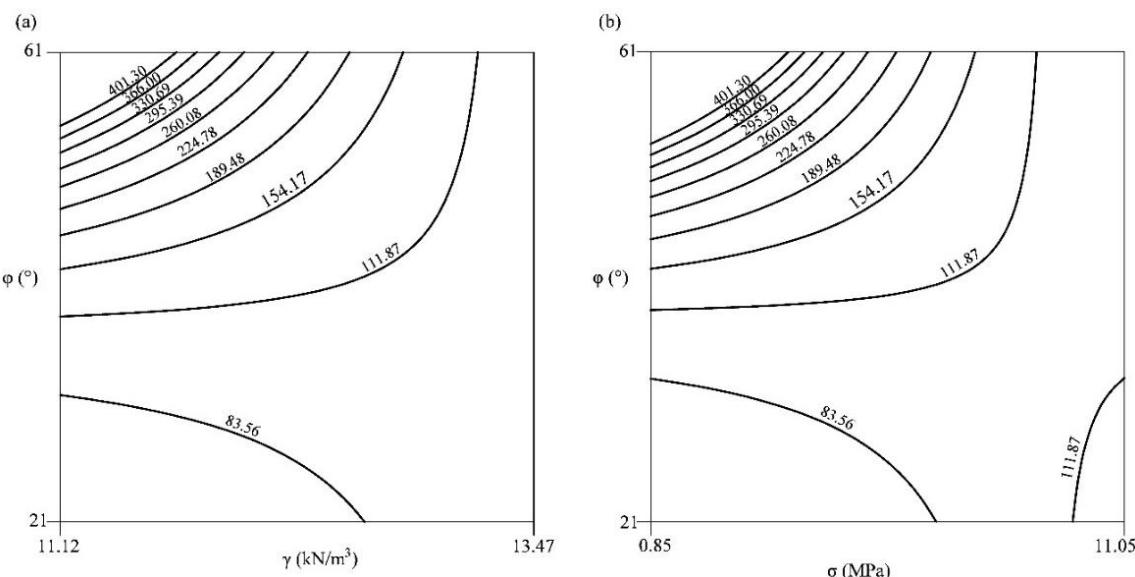
Sa stanovišta statistike, ispitani skup podataka je prilično mali, a nema dovoljno podataka u oblasti vrlo visokih i veoma niskih sila rezanja, tako da se za ove vrijednosti dobiju nepouzdani rezultati. Sa geološkog aspekta razlog za to se može naći u promjenljivom litološkom sastavu uzorka uglja. Drugim rječima, uzorci uglja sa malim procentom ksilita zahtjevaju, u opštem slučaju, veću силu rezanja da bi došlo do loma, i obrnuto.



Slika 6.9. Poređenje laboratorijskih vrijednosti sile rezanja i vrijednosti dobijene procjenom korištenjem jednačine (1). Procjena je data za skup podataka bez vrlo niskih i visokih vrijednosti označenih crvenom bojom [Kostić et al, 2018]

Da bi se potvrdilo da dobijena jednačina (6.1.) oslikava stvarne – fizički moguće odnose, potrebno je detaljno ispitati uticaj svakog značajnog parametra i dvofaktorskih interakcija. Kao što se vidi sa slike 6.9., oba parametra čvrstoće na smicanje, i kohezija i ugao unutrašnjeg trenja, imaju pozitivan uticaj na silu rezanja, tj. povećanje čvrstoće na smicanje zahtjeva povećanje sile rezanja uglja. Efekat kohezije i ugla unutrašnjeg trenja je kvalitativno isti, ali za jednak povećanje čvrstoće na smicanje, povećanja sile rezanja veća su za koheziju nego za ugao unutrašnjeg trenja.

Uticaj dvofaktorske interakcije na površinsku silu rezanja dat je na slici 6.10. Treba napomenuti da iako zapreminska težina i čvrstoća na pritisak imaju statistički beznačajan uticaj na silu rezanja uglja kao pojedinačni parametri, njihov uticaj postaje izražen u interakciji sa uglom unutrašnjeg trenja.



Slika 6.10. Uticaj geomehaničkih faktora na silu rezanja: (a)  $K_F = f (\gamma \cdot \phi)$ , (b)  $K_F = f (\sigma \cdot \phi)$ . Dok vrijednosti ugla unutrašnjeg trenja, zapremske težine ili čvrstoće na pritisak variraju, vrijednosti preostalih parametara se održavaju konstantnim na njihovim srednjim vrijednostima:  $\gamma=12.3\text{kN/m}^3$ ,  $\sigma=5.95\text{MPa}$ ,  $c=1.5\text{ MPa}$  [Kostić et al, 2018]

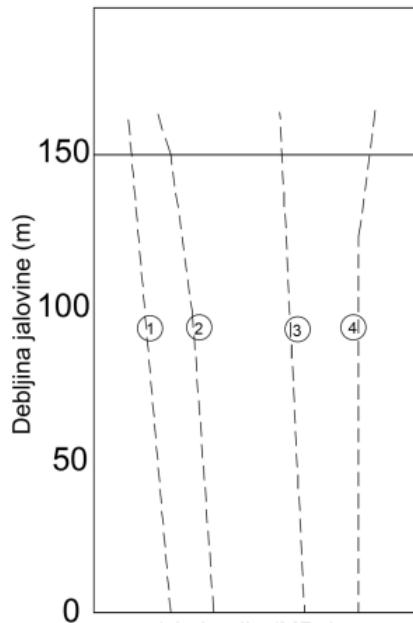
### 6.3.2. Formiranje modela na površinskom kopu „Turija - Banovići“

Druga lokacija na kojoj je formiran model jeste površinski kop mrkog uglja „Turija“ u banovićkom ugljonosnom basenu. Vršeno je ispitivanje uticaja mehaničkih svojstava otkrivke na silu rezanja i potrošnju energije i kašike bagera, kako bi se utvrdile glavne osobine

otkrivke i performanse bagera. Analizira se korelacija između maksimalne sile rezanja, maksimalne otpornosti na rezanje i maksimalne potrošnje energije, s jedne strane, i pojedinih fizičko-mehaničkih svojstava stijenskih masa, s druge strane, uključujući: čvrstoću na pritisak i zatezanje, zapreminsку težinu, koheziju i ugao unutrašnjeg trenja, i to za tri različite dubine rezanja koristeći složeni statistički pristup.

Zavisnost sile rezanja i potrošnje energije bagera od mehaničkih svojstava otkrivke ispitivane za tri različite rezanja (0,5m, 0,75m i 1,0m) ukazala je na dva ključna zaključka. Nema značajnih promjena u vrijednostima mehaničkih svojstava otkrivke sa različitih dubina iskopa (slika 6.11.). Drugi važan zaključak je da dubina rezanja nema značajniji statistički uticaj na rezultate analize, tj. ne mogu se uspostaviti statistički značajne korelacije za različite dubine rezanja. Ovaj rezultat, zajedno sa prethodnim, omogućio je da se u cjelini ispitaju rezultati laboratorijskih i terenskih ispitivanja sa različitim dubinama rezanja.

Dobijeni rezultati ANOVA testa i višestruke regresije dati su na slikama 6.12. i 6.13. Kao što se može vidjeti, zapreminska težina i čvrstoća na pritisak imaju pozitivan uticaj na silu rezanja. Dobijeni rezultati naročito ukazuju da povećanje ova dva gore navedena parametra dovodi do povećanja sile rezanja bagera. Isti efekat dolazi i od kohezije, dok bi se efekat ugla unutrašnjeg trenja mogao zanemariti (promjena ugla unutrašnjeg trenja izaziva 10% promjene sile rezanja, što je procenat greške koji odgovara greškama uslijed uzorkovanja i laboratorijskog ispitivanja). To bi se moglo objasniti sledećom činjenicom: kada dođe do loma stijenske mase, ugao unutrašnjeg trenja ne igra značajnu ulogu u promjeni sile rezanja. Takođe, dobijeni rezultati ukazuju na to da uticaj čvrstoće na zatezanje otkrivke nije statistički značajan.



Slika 6.11. Približno ista mehanička svojstva otkrivke sa povećanjem dubine: 1 – kohezija (MPa), 2 – čvrstoća na pritisak (MPa), 3 – ugao unutrašnjeg trenja ( $^{\circ}$ ), zapreminska težina ( $\text{kN}/\text{m}^3$ ) [Trivan et al, 2021]

Statistički značajna zavisnost sile rezanja od fizičko-mehaničkih svojstava otkrivke mogla bi se opisati na sledeći način:

$$F = 12,7 \cdot \gamma + 14,6 \cdot \sigma_p + 7458,9 \cdot c - 1479,5 \cdot b \quad (6.2)$$

gdje je

$F$  – maksimalna sila rezanja (N),

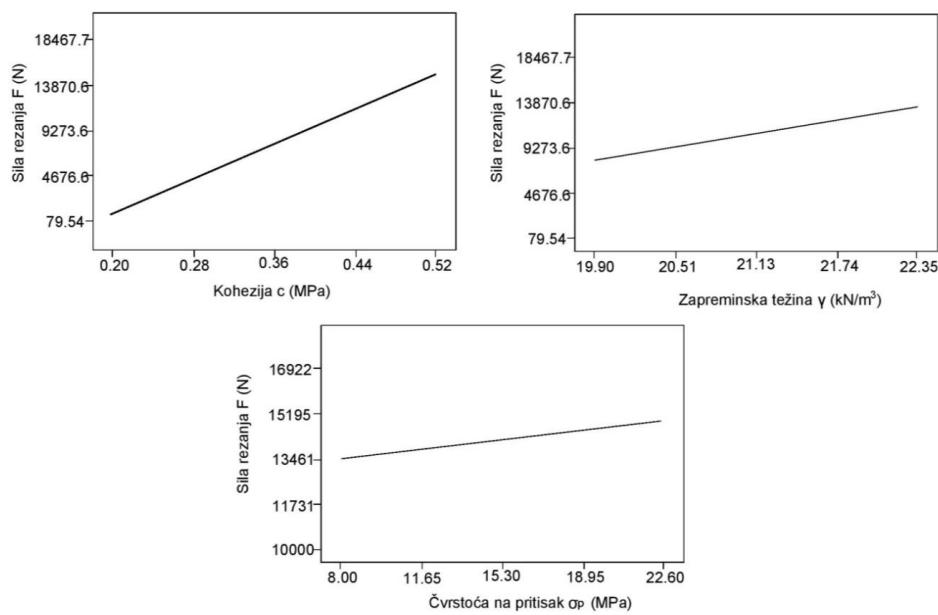
$\gamma$  – zapreminska težina stijenske mase ( $\text{kN}/\text{m}^3$ ),

$\sigma_p$  –čvrstoća na pritisak (MPa),

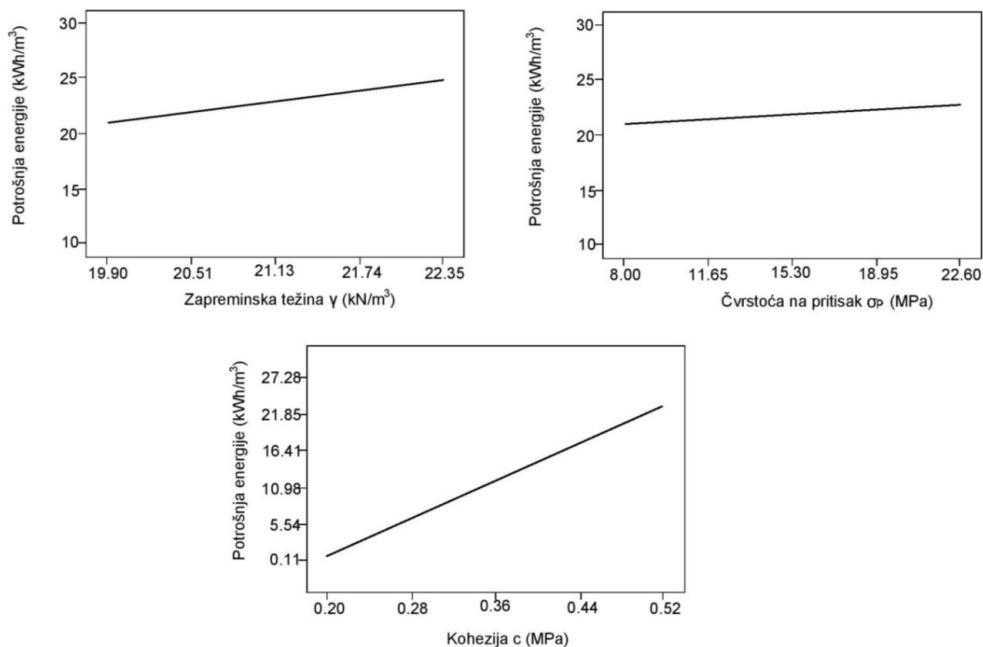
$c$  -kohezija (MPa),

dok je  $b$  empirijski parametar u opsegu 0,6-1,9.

Rezultati su pokazali da je jednačina 6.2. statistički značajna, sa  $R^2 = 0,88$ .



Slika 6.12. Uticaj mehaničkih svojstava otkrivke na silu rezanja bagera. Dok vrijednost jednog parametra varira, vrijednosti ostalih parametara su konstantne sa sledećim vrijednostima:  $\gamma=21\text{kN/m}^3$ ,  $\sigma_p=22.6 \text{ MPa}$ ,  $c=0.5 \text{ MPa}$  [Trivan et al, 2021]



Slika 6.13. Uticaj mehaničkih svojstava otkrivke na potrošnju energije bagera. Dok vrijednost jednog parametra varira, vrijednosti ostalih parametara su konstantne sa sledećim vrijednostima:  $\gamma=21\text{kN/m}^3$ ,  $\sigma_p=22.6 \text{ MPa}$ ,  $c=0.5 \text{ Mpa}$  [Trivan et al, 2021]

Tabela 6.14. Rezultati ANOVA testa za model (1) odnosno jednačina 6.2.[Trivan et al., 2021]

Ulazni podaci	Suma kvadrata	Df	Srednja kvadratna vrijednost	F vrijednost	P vrijednost
Model	4,34E+10	4	1,09E+10	30.37	< 0.0001
Zapreminska težina, $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	1,61E+10	1	1,61E+10	44.95	< 0.0001
Čvrstoća na pritisak, $\sigma_p$ [MPa]	1,61E+09	1	1,61E+09	4.49	0.0490
Kohezija, c [MPa]	1,40E+10	1	1,40E+10	39.15	< 0.0001

Suma kvadrata je statistički alat koji se koristi za identifikaciju disperzije podataka, kao i za to koliko se podaci mogu uklopiti u model u regresionoj analizi. Suma kvadrata je dobila ime jer se računa tako što se pronađe zbir kvadrata razlika. Suma kvadrata je zbir kvadrata varijacije, gdje se varijacija definiše kao raspon između svake pojedinačne vrijednosti i srednje vrijednosti. Da bi se odredila suma kvadrata, rastojanje između svake tačke podataka i linije koja najbolje pristaje, se kvadrira, a zatim sabira.

U statistici, broj stepeni slobode (Df) je broj vrijednosti u finalnoj računici statistike, koji je slobodan da varira.

Srednja kvadratna vrijednost predstavlja drugi korijen količnika zbiru kvadrata svih varijanata i obima uzorka.

F vrijednost pokazuje može li se ostati na početnoj hipotezi, prema kojoj nema razlika među aritmetičkim sredinama različitih grupa ispitanika koji su bili pod uticajem jedne ili više nezavisnih promjenljivih, odnosno pokazuje samo da postoje statistički značajne razlike, ali ne pokazuje gdje su te razlike, između kojih aritmetičkih sredina. Potrebna su dodatna provjeravanja.

P vrijednost se definiše u statističkom testiranju hipoteza kao mjera vjerovatnosti rezultata, kada je nulta hipoteza određenog statističkog testa tačna. Glavno tumačenje P vrijednosti je da li postoji dovoljno dokaza za odbacivanje nulte hipoteze. Ako je P vrijednost niska (0,10, 0,05 i 0,01, a 0,05 je najčešće korišćena), možemo potvrditi da postoji dovoljno dokaza da se odbaci početna hipoteza.

S druge strane, uticaj mehaničkih svojstava otkrivke na potrošnju energije bagera mogao bi se predstaviti kao:

$$E = 0,03 \cdot \gamma + 0,012 \cdot \sigma_p + 10,9 \cdot c - 0,84 \cdot b \quad (6.3)$$

gdje je

$E$  – maksimalna potrošnja energije, ( $\text{kWh/m}^3$ )

$\gamma$  – zapreminska težina stijenske mase ( $\text{kN/m}^3$ )

$\sigma_p$  - čvrstoća na pritisak, (MPa)

$c$  - kohezija, (MPa)

$b$  - empirijski parametar u opsegu 1,4-4,8.

Rezultati su pokazali da je jednačina 6.3. statistički značajna, sa  $R^2 = 0,85$ .

Tabela 6.15. Rezultati ANOVA testa za model (2) odnosno jednačina 6.3.[Trivan et al., 2021]

Ulazni podaci	Suma kvadrata	Df	Srednji kvadrat	F vrijednost	P vrijednost
Model	101,28	4	25,32	24,82	< 0,0001
Zapreminska težina, $\gamma$ [ $\text{kN/m}^3$ ]	39,18	1	39,18	38,39	< 0,0001
Čvrstoća na pritisak, $\sigma_p$ [MPa]	3,31	1	3,31	3,25	0,0893
Kohezija, $c$ [MPa]	33,16	1	33,16	32,50	< 0,0001

### 6.3.3. Formiranje modela na površinskom kopu „Tamnava – Istočno polje“

Na trećoj lokaciji na kojoj je formiran model ispitivan je uticaj geomehaničkih svojstava otkrivke na brzinu rotornog bagera  $V_b$  i maksimalnu potrošnju struje na bagru  $I_{max}$  za nove zube i zube bagera nakon najmanje 250 sati rada, na osnovu podataka prikupljenih na rotornom bageru SchRss 900 25/6 koji radi na površinskom kopu uglja „Tamnava-istočno polje“ u Srbiji. Korištenjem analize višestruke linearne regresije razvijene su eksplisitne matematičke korelacije između  $I_{max}$ -a i  $V_b$ -a i svojstava otkrivke u obliku nelinearnih jednačina.

Glavna ideja istraživanja bila je definisati najznačajnije faktore koji utiču na efikasnost bagera, u cilju formulisanja strategije za optimizovanu upotrebu bagera, omogućavajući na taj način duži radni vijek i smanjenje troškova popravke bagera.

Drugim riječima, analizom zavisnosti izmjerenih parametara  $I_{max}$  i  $V_b$ , mogli smo da sudimo o uticaju geomehaničkih svojstava na relevantne parametre otpora rezanja:  $E_{max}$ ,  $K_{Lmax}$  i  $K_{Fmax}$ . Analiza je urađena za rezanje visine i dubine u rasponu 3-4 m, odnosno 0-1 m.

### 6.3.3.1. Novi zubi bagera

Rezultati izvršene analize prikazani su u sledećim izrazima:

$$V_b = -553,08 - 0,025 \cdot CL_{per} + 0,178 \cdot SI_{per} + 1,596 \cdot SSN_{per} + 1,891 \cdot MSN_{per} + \\ 25,08 \cdot \gamma - 5,09 \cdot c + 29,604 \cdot \varphi + 0,0296 \cdot SI_{per} \cdot MSN_{per} + 0,038 \cdot SSN_{per} \cdot c - 0,107 \cdot \\ SSN_{per} \cdot \varphi + 0,208 \cdot \gamma \cdot c - 1,304 \cdot \gamma \cdot \varphi \quad (6.4)$$

$$I_{max} = -12096,79 + 30,065 \cdot CL_{per} + 115,92 \cdot SI_{per} - 19,78 \cdot SSN_{per} - 182,77 \cdot \\ MSN_{per} + 766,63 \cdot \gamma - 508,25 \cdot c + 621,79 \cdot \varphi - 0,165 \cdot CL_{per} \cdot SI_{per} + 1,149 \cdot CL_{per} \cdot \\ \gamma - 1,77 \cdot CL_{per} \cdot c + 0,085 \cdot SI_{per} \cdot SSN_{per} - 5,006 \cdot SI_{per} \cdot \varphi - 0,597 \cdot SSN_{per} \cdot \gamma + \\ 1,175 \cdot SSN_{per} \cdot c - 6,857 \cdot MSN_{per} \cdot \gamma + 13,871 \cdot MSN_{per} \cdot \varphi + 4,882 \cdot \gamma \cdot c - 37,486 \cdot \gamma \cdot \\ \varphi + 18,619 \cdot c \cdot \varphi \quad (6.5)$$

gdje je

$I_{max}$  - maksimalna potrošnja struje na bageru (A),

$V_b$  - brzina bagera (m / min),

$H$  - visina adreska (m),

$s$  - dubina adreska (m),

$CL_{per}$ ,  $SI_{per}$ ,  $SSN_{per}$ ,  $MSN_{per}$  - procenat gline, praštine, sitnozrnog pijeska, odnosno srednjezrnog pijeska;

$\gamma$  - zapreminska težina otkrivke ( $kN/m^3$ ),

$c$  ( $kPa$ ) i  $\varphi$  ( $^\circ$ ) - kohezija i ugao unutrašnjeg trenja otkrivke.

Tabela 6.16. predstavlja rezultate ANOVA testova za jednačinu 6.4.

Tabela 6.16. Rezultati ANOVA testova za jednačinu 6.4.

Jednačina 6.4			
Ulazni podaci	Suma kvadrata	F vrijednost	P vrijednost
CL <sub>per</sub>	2,840	0,383	0,541
SI <sub>per</sub>	15,209	2,051	0,164
SSN <sub>per</sub>	3,430	0,462	0,502
MSN <sub>per</sub>	2,514	0,339	0,563
$\gamma$	11,362	1,532	0,227
c	1,947	0,262	0,613
$\varphi$	12,510	1,687	0,205
SI <sub>per</sub> · MSN <sub>pe</sub>	23,992	3,235	0,083
SSN <sub>per</sub> · c	61,426	8,281	0,0077
SSN <sub>per</sub> $\varphi$	34,636	4,670	0,040
$\gamma$ · c	20,408	2,751	0,109
$\gamma$ · $\varphi$	50,655	6,829	0,015

Tabela 6.17. predstavlja rezultate ANOVA testova za jednačinu 6.5.

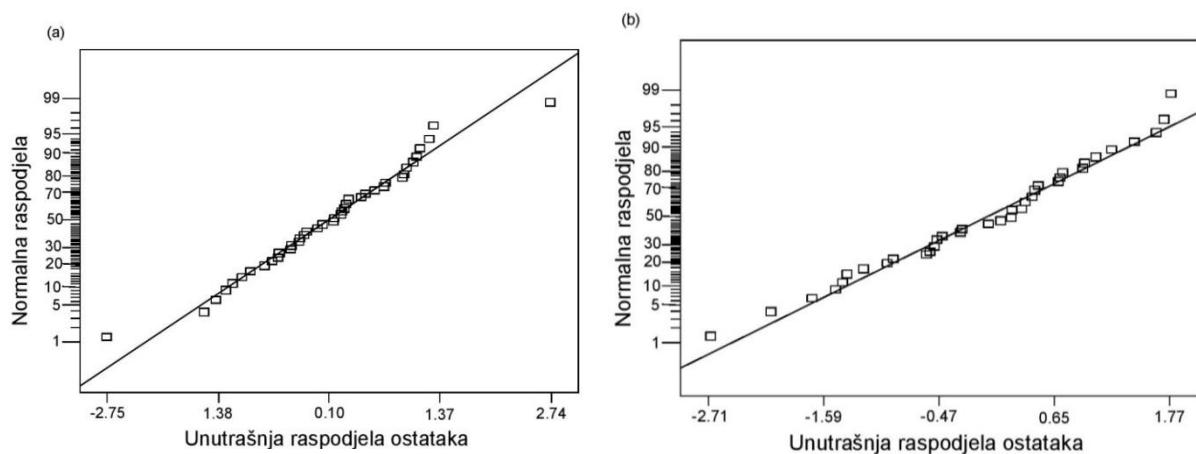
Tabela 6.17. Rezultati ANOVA testova za jednačinu 6.5.

Jednačina 6.5.			
Ulazni podaci	Suma kvadrata	F vrijednost	P vrijednost
CL <sub>per</sub>	8106,801	5,505	0,0294
SI <sub>per</sub>	22343,33	15,173	0,0009
SSN <sub>per</sub>	2408,977	1,636	0,2155
MSN <sub>per</sub>	87,28346	0,0592	0,8101
$\gamma$	7508,749	5,099	0,0353
c	40,47598	0,0274	0,8700
$\varphi$	10835,7	7,359	0,0134
CL <sub>per</sub> · SI <sub>per</sub>	18675,28	12,682	0,0020
CL <sub>per</sub> · $\gamma$	14557,72	9., 86	0,0051
CL <sub>per</sub> · c	36069,69	24,495	<0,0001
SI <sub>per</sub> · SSN <sub>per</sub>	14423,96	9,795	0,0053
SI <sub>per</sub> · $\varphi$	27143,13	18,433	0,0004
SSN <sub>per</sub> · $\gamma$	9710,659	6,595	0,0184
SSN <sub>per</sub> · c	44092,04	29,943	<0,0001
MSN <sub>per</sub> · $\gamma$	18829,00	12,787	0,0019
MSN <sub>per</sub> · c	6232,796	4,233	0,0529
$\gamma$ · c	11426,43	7,760	0,0114
$\gamma$ · $\varphi$	26797,54	18,198	0,0004
c · $\varphi$	8617,625	5,852	0,0252

Statističke analize su pokazale visoku vrijednost koeficijenta korelacije i male vrijednosti RMSE: R = 0,7, RMSE = 2,24 (za jednačinu 5.4) i R = 0,94, RMSE = 27,10 (za jednačinu)

6.5). Vidljivo je iz dijagrama normalne vjerovatnoće na slici 6.14. da su greške normalno raspoređene (reziduali greške mjerena).

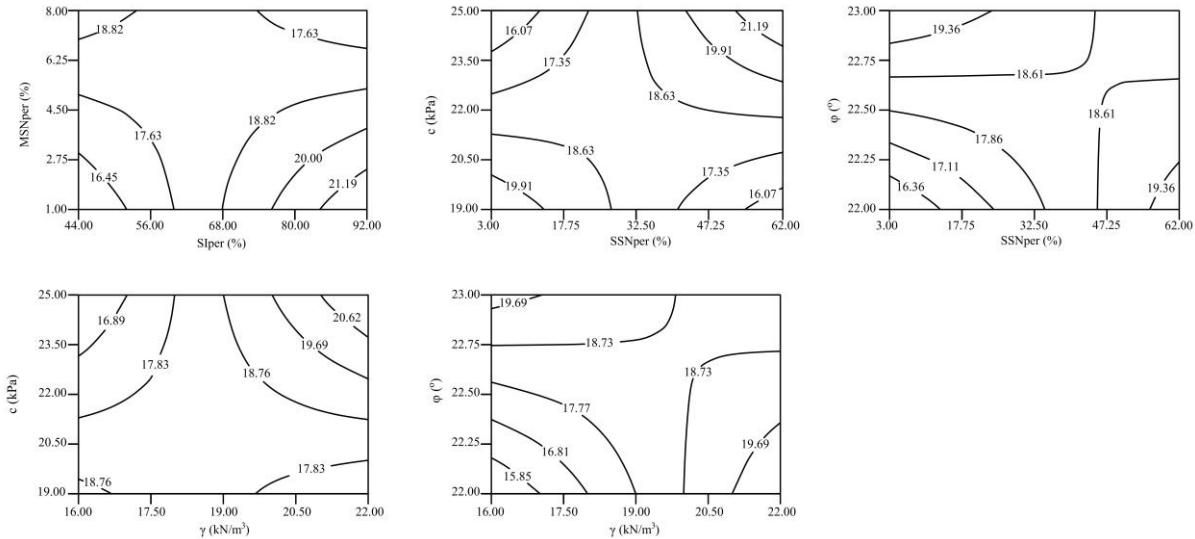
Greška srednje kvadratne vrijednosti (RMSE) je standardna devijacija ostataka (greške predviđanja). Ostaci su mjera udaljenosti tačaka podataka od linije regresije; RMSE je mjera rasprostranjenosti ovih ostataka. Drugim riječima, govori vam koliko su podaci koncentrisani oko linije najboljeg uklapanja. Kvadratna greška srednjeg korijena se obično koristi u klimatologiji, predviđanju i regresijskoj analizi radi provjere eksperimentalnih rezultata.



Slika 6.14. Grafikoni normalnih vjerovatnoća ostataka za jednačinu 6.4 (a) i jednačinu 6.5.

(b). [Kostić i Trivan, 2021]

Kao što se može vidjeti iz tabele 6.17. za pojedine faktore nije dobijen značajan uticaj na brzinu kretanja bagera. Međutim, značajne dvofaktorske interakcije su dobijene i prikazane na slici 6.15. Konkretno, kao parametri sa statistički značajnim dvofaktorskim interakcijama izdvojeni su procenti pjeska i prašine, zapreminska težina i čvrstoća na smicanje. Čini se da se veće vrijednosti  $V_b$  dobijaju za niže vrijednosti kohezije i veće vrijednosti ugla unutrašnjeg trenja. S druge strane, priroda efekta zapreminske težine i procenta sitnozrnog pjeska zavisi od vrijednosti parametara čvrstoće na smicanje: za niže vrijednosti kohezije, povećanje zapreminske težine dovodi do smanjenja  $V_b$ , dok za male vrijednosti ugla unutrašnjeg trenja povećanje zapreminske težine dovodi do povećanja  $V_b$ . Procenat prašine i procenat srednjezrnog pjesku pozitivno utiču na  $V_b$ .



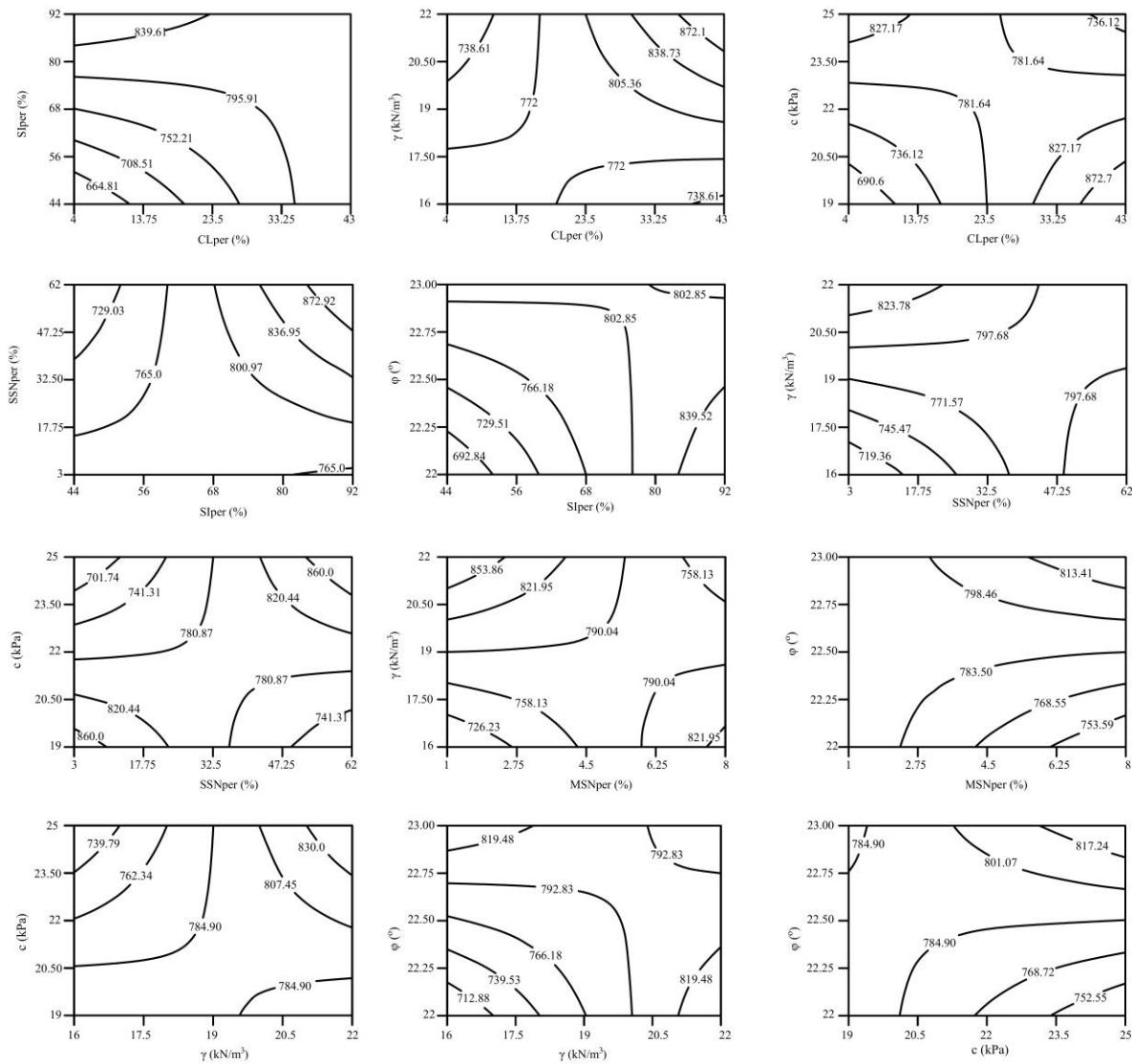
Slika 6.15. Uticaj mehaničkih svojstava otkrivke na brzinu rotornog bagera: slučaj novih zuba bagera. Dok vrijednost jednog parametra varira, vrijednosti ostalih parametara su konstantne sa sledećim vrijednostima:  $CL_{per} = 24,5\%$ ,  $SI_{per} = 68\%$ ,  $SSN_{per} = 33,5\%$ ,  $MSN_{per} = 4,5\%$ ,  $\gamma = 19\text{ kN/m}^3$ ,  $c = 22 \text{ kPa}$ ,  $\varphi = 22,5^\circ$  [Kostić i Trivan, 2021]

Što se tiče utroška struje dobijeni rezultati ukazuju na to da statistički značajni faktori,  $CL_{per}$ ,  $SI_{per}$ ,  $\gamma$  i  $\varphi$  imaju izraženi individualni (pozitivan) uticaj, odnosno povećanje sadržaja gline i prašine i njihove zapreminske težine i ugla unutrašnjeg trenja dovode do povećane potrošnje struje bagera.

Pored uticaja ovih individualnih faktora, izvršene analize ukazuju na postojanje statistički značajnih dvofaktorskih interakcija. Kao što se može vidjeti sa slike 6.16. značajne dvofaktorske interakcije su sledeće:

- *Granulometrijski sastav:*
  - Učinak procenta gline zavisi od vrste drugog faktora u interakciji. Konkretno, procenat gline pozitivno utiče na  $I_{max}$  za srednje do visoke vrijednosti zapreminske težine i za niske do srednje vrijednosti kohezije. Povećanje procenta gline i prašine dovodi do povećanja  $I_{max-a}$ ;
  - Efekat procenta prašine zavisi od procenta sitnozrnog pijeska - za male vrijednosti sitnozrnog pijeska, povećanje procenta prašine dovodi do smanjenja  $I_{max-a}$ . U svim ostalim interakcijama sa procentom gline i uglom unutrašnjeg trenja - povećanje procenta prašine dovodi do povećanja  $I_{max-a}$ ;

- Povećanje procenta sitnozrnog pjeska dovodi do smanjenja  $I_{max}$ -a za niske do srednje vrijednosti procenta prašine i kohezije. Pozitivan efekat procenta sitnozrnog pjeska ne zavisi od zapreminske težine otkrivke;
- Efekat procenta srednjezrnog pjeska je negativan za srednje do visoke vrijednosti zapreminske mase, a za male do srednje vrijednosti ugla unutrašnjeg trenja.



Slika 6.16. Uticaj mehaničkih svojstava otkrivke na utrošak struje: slučaj novih zuba bagera.  
Dok vrijednost jednog parametra varira, vrijednosti ostalih parametara su konstantne sa sledećim vrijednostima:  $CL_{per} = 24,5\%$ ,  $SI_{per} = 68\%$ ,  $SSN_{per} = 33,5\%$ ,  $MSN_{per} = 4,5\%$ ,

$$\gamma = 19 \text{ kN} / \text{m}^3, c = 22 \text{ kPa}, \phi = 22,5^\circ \quad [\text{Kostić i Trivan, 2021}]$$

- *Geomehanička svojstva:*
- Uticaj zapreminske težine otkrivke zavisi od prirode faktora u interakciji. Negativan efekat zapreminske težine primjećen je za male do srednje procente gline i za visoke vrijednosti ugla unutrašnjeg trenja. U svim ostalim slučajevima,  $I_{max}$  se povećava sa povećanjem zapreminske težine otkrivke;
- Priroda uticaja kohezije otkrivke je slična efektu zapreminske težine. Negativni efekat kohezije na  $I_{max}$  primjećen je za visok procenat gline i za male do srednje vrijednosti zapreminske težine, ugla unutrašnjeg trenja i procenta sitnozrnog pijeska;
- Uticaj ugla unutrašnjeg trenja na  $I_{max}$  je važan u svim statistički značajnim interakcijama.

### 6.3.3.2. Zubi bagera poslije 250 sati rada

U slučaju da se otkopavanje vrši sa korištenim zubima bagera, analiza pokazuje da ne postoji značajna korelacija (veza) između geomehaničkih svojstava otkrivke i brzine rotornog bagera. To znači da je brzina rotornog bagera nezavisna o geomehaničkim svojstvima otkrivke kada su zubi bagera istrošeni.

Sa druge strane, može se postići određena korelacija (veza) između geomehaničkih svojstava otkrivke i potrošnje struje.

$$I_{max} = -392,34 + 38,42 \cdot CL_{per} - 36,83 \cdot SI_{per} + 35,44 \cdot SSN_{per} - 3,92 \cdot MSN_{per} + 59,39 \cdot \gamma + 60,83 \cdot c + 3,97 \cdot \varphi - 1,69 \cdot CL_{per} \cdot \varphi + 1,67 \cdot SI_{per} \cdot \varphi + 0,54 \cdot SSN_{per} \cdot c - 2,04 \cdot SSN_{per} \cdot \varphi - 3,29 \cdot \gamma \cdot c \quad (6.6)$$

gdje je

$I_{max}$  – maksimalna potrošnja struje bagera (A),

H - visina adreska (m),

c – dubina adreska (m),

$CL_{per}$ ,  $SI_{per}$ ,  $SSN_{per}$ ,  $MSN_{per}$  – procenat gline, prašine, sitnozrnog pijeska i srednjezrnog pijeska,

$\gamma$  – zapreminska težina otkrivke ( $kN/m^3$ ),

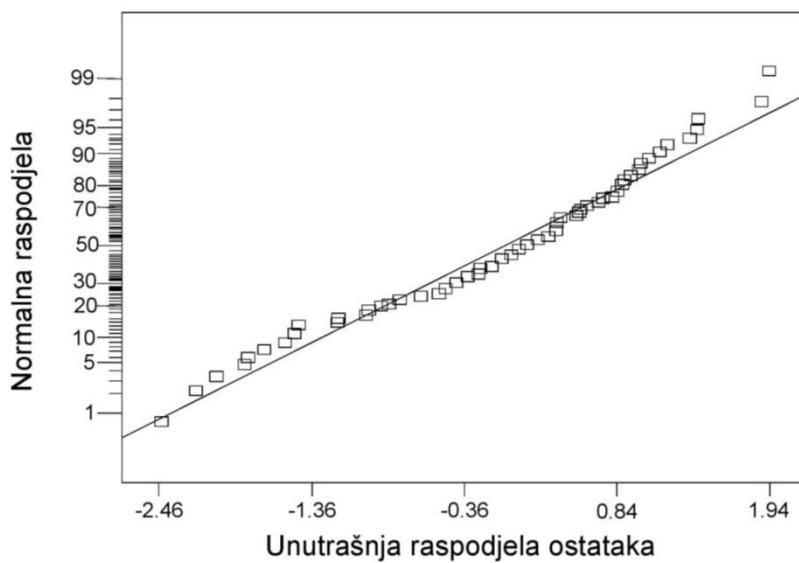
$c$  (kPa) i  $\phi$  ( $^{\circ}$ ) – kohezija i ugao unutrašnjeg trenja otkrivke.

Tabela 6.18. predstavlja rezultate ANOVA testova za jednačinu (6.6)

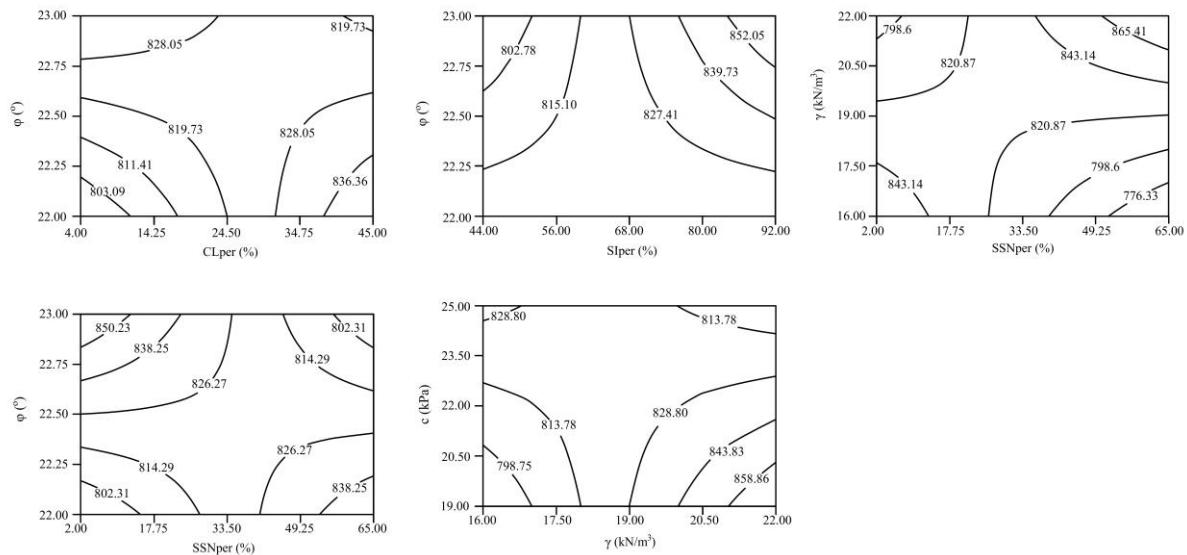
Tabela 6.18. Rezultati ANOVA testova za jednačinu 6.6.

Ulagani parametri	Suma kvadrata	F vrijednost	P vrijednost
CL <sub>per</sub>	1550,75	3,34	0,0010
SI <sub>per</sub>	5999,13	0,64	0,4257
SSN <sub>per</sub>	146,47	2,49	0,1200
MSN <sub>per</sub>	5721,26	0,061	0,8062
$\gamma$	6273,15	2,37	0,1288
$c$	741,61	2,60	0,1120
$\phi$	850,23	0,31	0,5812
CL <sub>per·φ</sub>	8195,72	0,35	0,5549
SI <sub>per·φ</sub>	8289,71	3,40	0,0702
SSN <sub>per γ</sub>	18253,45	3,44	0,0687
SSN <sub>per φ</sub>	15693,54	7,7	0,0079
$\gamma·c$	10125,86	6,51	0,0133

Statističke analize su pokazale nižu vrijednost koeficijenta korelacije i veće vrijednosti RMSE u poređenju sa slučajem sa novim zubima bagera:  $R = 0,64$ ,  $RMSE = 44,4$  (za jednačinu 6.6.). Vidljivo je iz dijagrama normalne vjerovatnoće na slici 6.17. da su greške normalno raspoređene (reziduali greške mjerena).



Slika 6.17. Grafikoni normalnih vjerovatnoća ostataka za jednačinu 6.6. [Kostić i Trivan, 2021]



Slika 6.18. Uticaj mehaničkih svojstava otkrivke na potrošnju struje bagera: slučaj zuba bagera poslije 250 sati rada. Dok vrijednost jednog parametra varira, vrijednosti ostalih parametara su konstantne sa sledećim vrijednostima:  $CL_{per} = 24,5\%$ ,  $SI_{per} = 68\%$ ,  $SSN_{per} = 33,5\%$ ,  $MSN_{per} = 4,5\%$ ,  $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$ ,  $c = 22 \text{ kPa}$ ,  $\phi = 22,5^\circ$  [Kostić i Trivan, 2021]

Što se tiče maksimalne potrošnje struje bagera, dobijeni rezultati ukazuju na to da statistički značajni faktori,  $CL_{per}$ ,  $SI_{per}$ ,  $\gamma$  i  $\phi$  imaju izražen individualni (pojedinačni) pozitivan uticaj, odnosno povećanje sadržaja gline i prašine i njihove zapremske težine i ugla unutrašnjeg trenja dovodi do povećanja maksimalne potrošnje struje bagera.

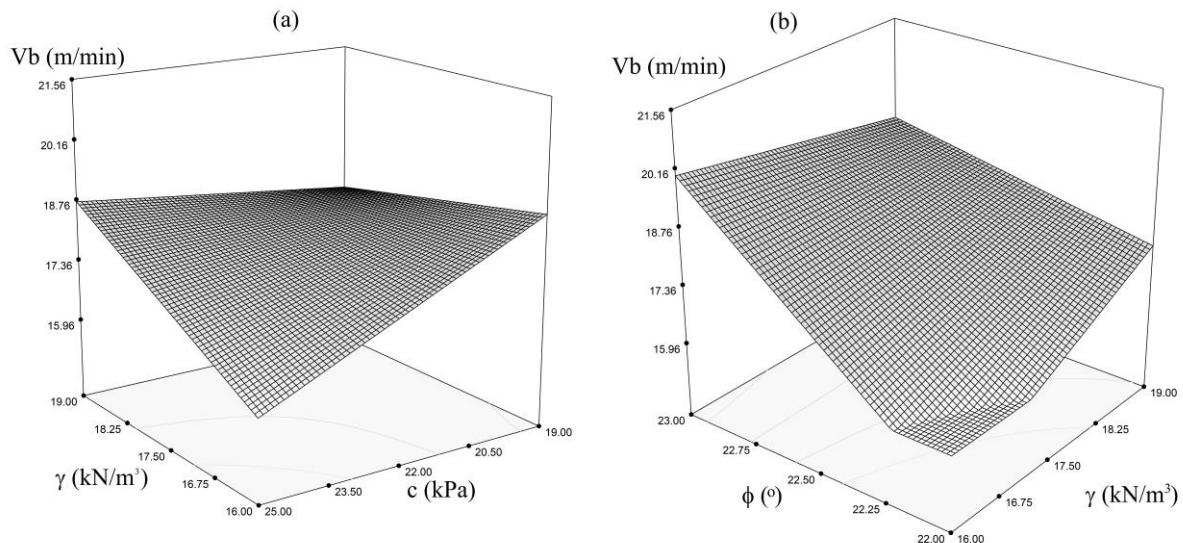
Pored uticaja ovih individualnih (pojedinačnih) faktora, izvršene analize ukazuju na postojanje statistički značajnih dvofaktorskih interakcija. Kao što se može vidjeti sa slike 6.18. statistički značajne dvofaktorske interakcije ukazuju na sledeće:

- Procenat srednjezrnog pijeska ne ulazi u značajne dvofaktorske interakcije;
- Procenat gline i sitnozrnog pijeska negativno utiče na  $I_{max}$  za veliki ugao unutrašnjeg trenja, dok procenat prašine pozitivno utiče na  $I_{max}$  bez obzira na ugao unutrašnjeg trenja. Takođe, procenat sitnozrnog pijeska negativno utiče na  $I_{max}$  za male do srednje vrijednosti zapreminske težine otkrivke;
- Kohezija negativno utiče na  $I_{max}$  za visoke vrijednosti zapreminske težine, dok ugao unutrašnjeg trenja negativno utiče na maksimalnu potrošnju struje za male do srednje vrijednosti procenta prašine, za srednje do visoke vrijednosti gline i procenta sitnozrnog pijeska.

Izvršene analize ukazuju na to da postoji statistički značajni efekat granulometrijskog sastava otkrivke i njegovih geomehaničkih svojstava kako za nove, tako i za pohabane zube bagera. Iako se kvalitet i kvantitet ovih uticaja nedvosmisleno dokazuju opsežnim statističkim analizama, moglo bi se zapitati da li ovi efekti imaju bilo kakvo fizičko, a time i geomehaničko značenje. Sa geomehaničkog stanovišta, utvrđeni uticaj posmatranih faktora mogao bi se objasniti na sledeći način:

### **Novi zubi bagera: brzina bagera**

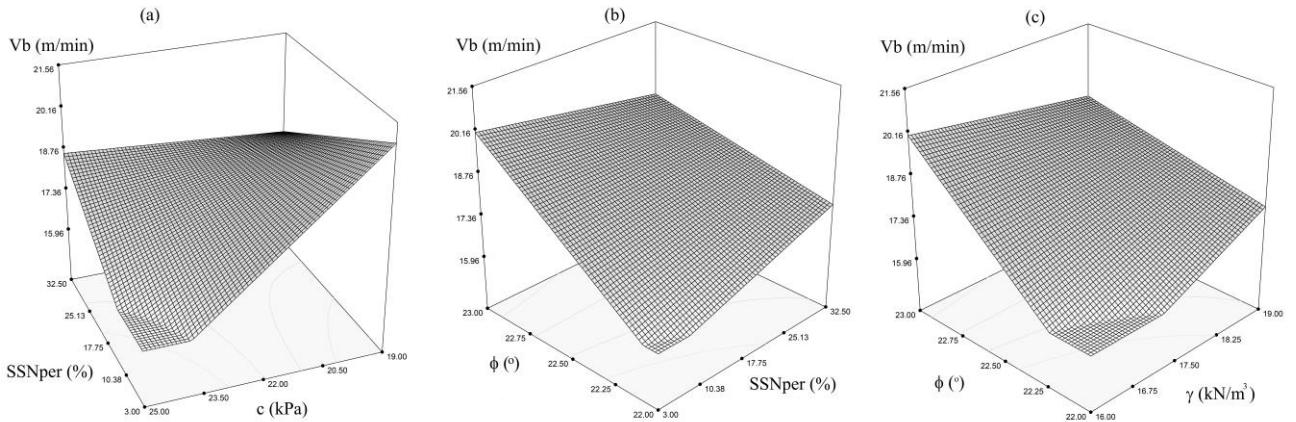
- Efekat zapreminske težine otkrivke - dobijeni rezultati pokazuju da zapreminska težina otkrivke pokazuje statistički značajne dvofaktorske interakcije sa parametrima čvrstoće na smicanje. Što se tiče koefekta sa kohezijom, za male do srednje vrijednosti  $\gamma$  ( $16-19 \text{ kN/m}^3$ ), koje odgovaraju otkrivci sa pretežno glinovitim česticama, povećanje  $\gamma$  dovodi do povećanja brzine bagera, što ukazuje da je potrebna veća snaga za čestice sa većom zapreminskom težinom otkrivke (slika 6.19a). Što se tiče interakcije sa uglom unutrašnjeg trenja, pozitivan efekat  $\gamma$  na  $V_b$  gotovo je nezavisan od  $\phi$  (slika 6.19b).



Slika 6.19. Zavisnost brzine bagera od koefekta zapreminske težine i (a) kohezije, (b) ugla unutrašnjeg trenja; slučaj novih zuba bagera [Kostić i Trivan, 2021]

- Efekat kohezije otkrivke - kohezija otkrivke ulazi u značajnu interakciju sa procentom sitnozrnih pjeskovitih čestica (SSN<sub>per</sub>) i zapreminskom težinom. Za SSN<sub>per</sub> od male do srednje vrijednosti, povećanje kohezije dovodi do smanjenja brzine bagera, što znači da je potrebna manja brzina za otkopavanje sa većom kohezijom (slika 6.20a). Ovo bi

se moglo objasniti povećanim procentom prašine/gline, gdje se kohezija uglavnom postiže na račun zapreminske težine. Sličan koefekat se takođe primjećuje za male do srednje vrijednosti zapreminske težine (slika 6.19a).



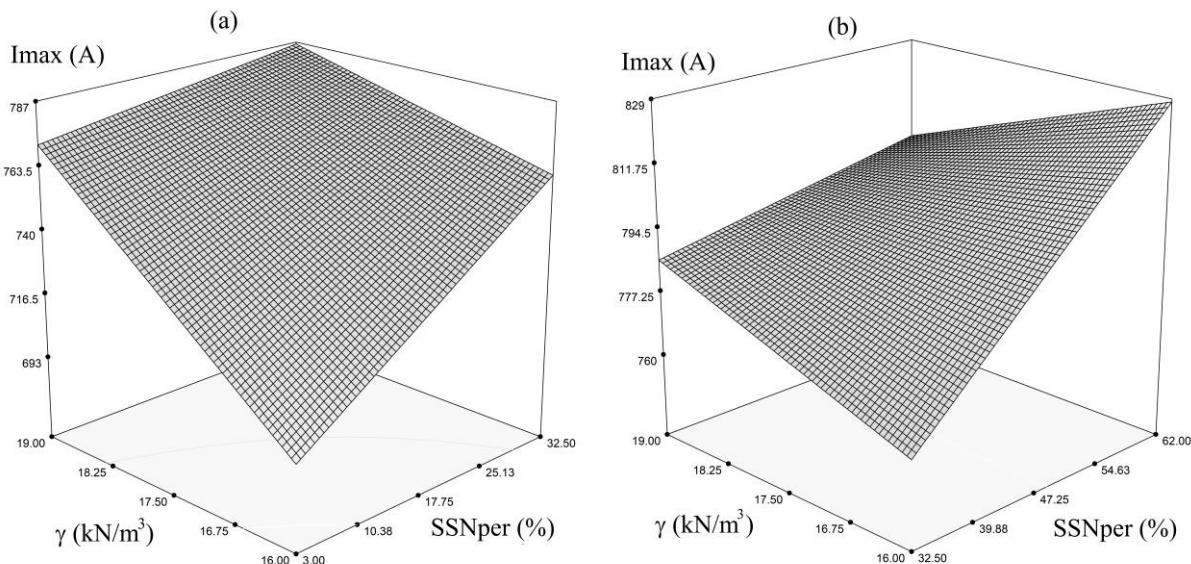
Slika 6.20. Zavisnost brzine bagera od koefekta (a) kohezije i, (b) ugla unutrašnjeg trenja i  $SSN_{per}$ , i (c) ugla unutrašnjeg trenja i zapreminske težine, slučaj novih zuba bagera [Kostić i Trivan, 2021]

- Efekat ugla unutrašnjeg trenja otkrivke - slično koheziji, ugao unutrašnjeg trenja ulazi u značajnu dvofaktorsku interakciju sa zapreminskom težinom i  $SSN_{per}$ , ali sa suprotnim uticajem na  $V_b$ . Konkretno, za male do srednje vrijednosti  $SSN_{per}$  i zapreminsku težinu, povećanje ugla unutrašnjeg trenja dovodi do povećanja  $V_b$  (slike 6.20b i 6.20c). To se očekuje, jer ugao unutrašnjeg trenja zahtijeva veću snagu za otkopavanje, što posljedično dovodi do povećanja brzine bagera.
- Efekat granulometrijskog sastava u otkrivci - koefekat  $I_{max}$  i  $MSN_{per}$  jedina je statistički značajna dvofaktorska interakcija. Čini se da povećanje procenta prašine u otkrivci povećava brzinu bagera. Na prvi pogled se ne očekuje takav efekat  $SI_{per}$  na  $V_b$ , jer je povećanje procenta prašine obično povezan sa povećanjem kohezije i smanjenjem ugla unutrašnjeg trenja, što znači smanjenje  $V_b$ . Međutim, takav rezultat, koji je suprotan očekivanom, mogao bi ukazati na to da neko drugo svojstvo otkrivke takođe značajno utiče na brzinu bagera. Takav uticaj bi se mogao lako pripisati stanju konzistencije otkrivke (indeks konzistencije,  $I_c$ ) ili karakteristike stišljivosti otkrivke. Konkretno, otkrivka u stanju čvrste konzistencije ili sa visokim modulom stišljivosti (koje vrijednosti se mogu povećati sa povećanjem procenta prašine) može dovesti do povećanja brzine bagera.

-Novi zubi bagera: potrošnja struje bagera

➤ Efekat zapreminske težine otkrivke:

- U interakciji sa granulometrijskim sastavom: za mali ili umjereni sadržaj sitnozrnih čestica pjeska raste zapreminska težina u rasponu  $16\text{-}19 \text{ kN/m}^3$  (što je značajno, pošto nizak  $\text{SSN}_{\text{per}}$  ukazuje na viši procenat glinovito-pjeskovitih čestica čime se umanjenje zapreminske težine dovodi do povećanja  $I_{\max}$  (6.21a). Za srednje do visoke vrijednosti  $\text{SSN}_{\text{per}}$ , efekat zapreminske težine na  $I_{\max}$  gotovo je nezavisan od  $\text{SSN}_{\text{per}}$  (slika 6.21b). To dalje znači da povećanje zapreminske težine dovodi do smanjenja  $I_{\max}$ -a samo za prašinasto-pjeskovitu otkrivku, dok se pozitivan efekat  $\gamma$  na  $I_{\max}$  postiže za pjeskovito-glinovitu otkrivku. Povećanje zapreminske težine ukazuje na porast krupnih pjeskovitih/prاشinastih čestica, sa malom ili bez kohezije, što zauzvrat zahtjeva manju potrošnju struje bagera.



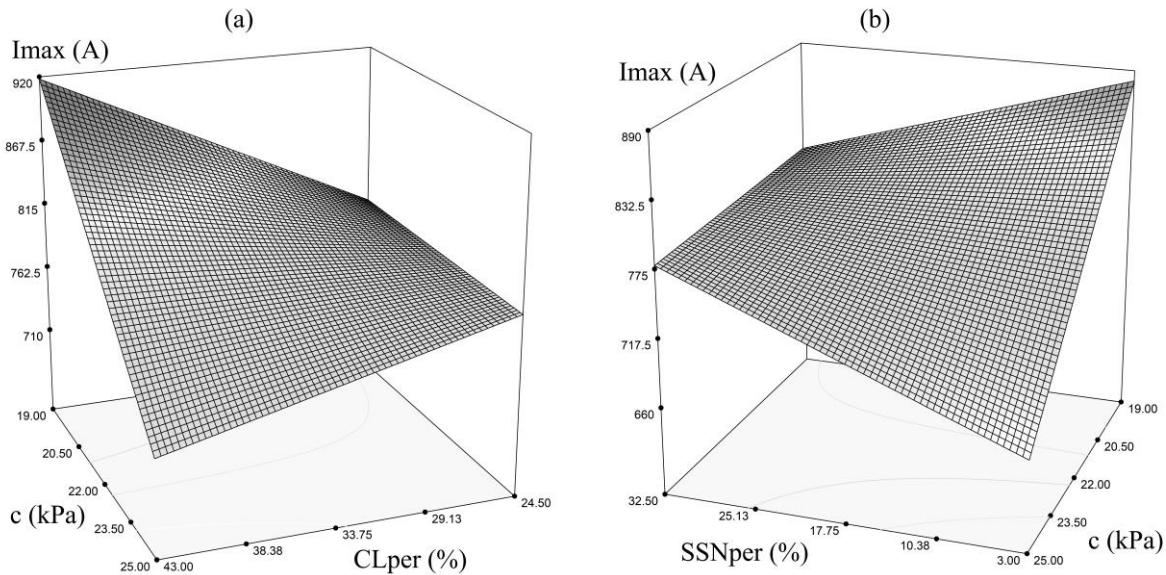
Slika 6.21 Zavisnost trenutne potrošnje struje bagera od koefekta zapreminske težine i (a)  $\text{SSN}_{\text{per}}$  (3-32,5%), (b)  $\text{SSN}_{\text{per}}$  (32,5-62%), slučaj novih zuba bagera [Kostić i Trivan, 2021]

- Interakcija sa parametrima čvrstoće na smicanje otkrivke: zapreminska težina pozitivno utiče na  $I_{\max}$  za sve vrijednosti kohezije i ugla unutrašnjeg trenja, osim za najveće vrijednosti ugla unutrašnjeg trenja, koja odgovara pretežno pjeskovitoj otkrivci i koja je kompatibilna sa interakcijom zapreminske težine i granulometrijskog sastava.

➤ Efekat kohezije otkrivke:

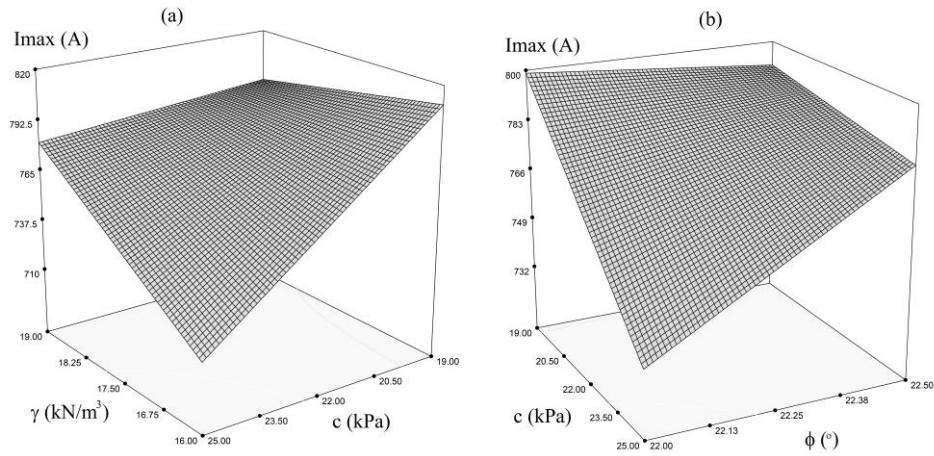
- Interakcija sa granulometrijskim sastavom: za srednje do visoke vrijednosti procenta gline (što je samo fizički značajno), povećanje kohezije dovodi do smanjenja  $I_{\max}$ -a (slika 6.22a). Iako bi se ovaj efekat kohezije na potrošnju

struje bagera mogao smatrati suprotnim stvarnoj fizičkoj prirodi, tako da se  $I_{max}$  od kohezije može objasniti na osnovu činjenice da se kohezija glinovite otkriva postiže međumolekularnom vezom pora i vode i čestica gline koja na makro (najvišem) nivou ne pruža nikakav otpor kopanja. To potvrđuje statistički beznačajni pojedinačni efekat kohezije na  $I_{max}$  (Tabele 6.16 i 6.17.). Isti efekat kohezije primjećen je kod niskog do srednjeg procenta sitnozrnog pjeska (slika 6.22b).



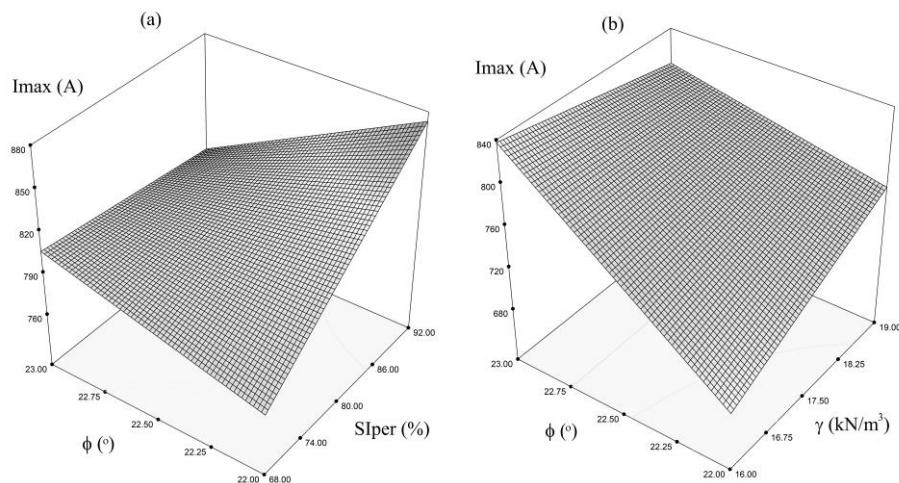
Slika 6.22. Zavisnost maksimalne potrošnje struje bagera od koefekta kohezije i (a) zapreminske težine, (b) ugla unutrašnjeg trenja, slučaj novih zuba bagera [Kostić i Trivan, 2021]

- Interakcija sa zapreminskom težinom i uglom unutrašnjeg trenja: za male do srednje vrijednosti zapreminske težine, koje su relevantne samo sa stanovišta kohezije (čestice gline obično imaju niže vrijednosti zapreminske težine), povećanje kohezije dovodi do smanjenja  $I_{max}$ -a (slika 6.23a). Isti efekat kohezije na  $I_{max}$  primjećen je za male do srednje vrijednosti ugla unutrašnjeg trenja (slika 6.23b). Interakcija sa zapreminskom težinom i uglom unutrašnjeg trenja: za male do srednje vrijednosti zapreminske težine, koje su relevantne samo sa stanovišta kohezije (čestice gline obično imaju niže vrijednosti zapreminske težine), povećanje kohezije dovodi do smanjenja  $I_{max}$ -a (slika 6.22a).



Slika 6.23. Zavisnost maksimalne potrošnje struje bagera od koefekta kohezije i (a) zapreminske težine, (b) ugla unutrašnjeg trenja, slučaj novih zuba bagera [Kostić i Trivan, 2021]

- Učinak ugla unutrašnjeg trenja: za niži do srednji procenat prašine, gdje je opseg od  $\phi = 22\text{-}23^\circ$ , povećanje ugla unutrašnjeg trenja dovodi do povećanja  $I_{max}$ -a, što se i očekuje, jer veći ugao unutrašnjeg trenja izaziva jače trenje između točka rotora i otkrivke, što dovodi do veće potrošnje struje (slika 6.24a). Takav efekat ugla unutrašnjeg trenja na  $I_{max}$  ustanovljen je bez obzira na procenat srednjezrnog pijeska (slika 6.16.). Za male do srednje vrijednosti zapreminske težine, gdje je opseg  $\phi = 22\text{-}23^\circ$ , povećanje ugla unutrašnjeg trenja dovodi do povećanja  $I_{max}$ -a (slika 6.24b). Takođe, za sve vrijednosti kohezije, povećanje ugla unutrašnjeg trenja dovodi do veće potrošnje struje (slika 6.16.).

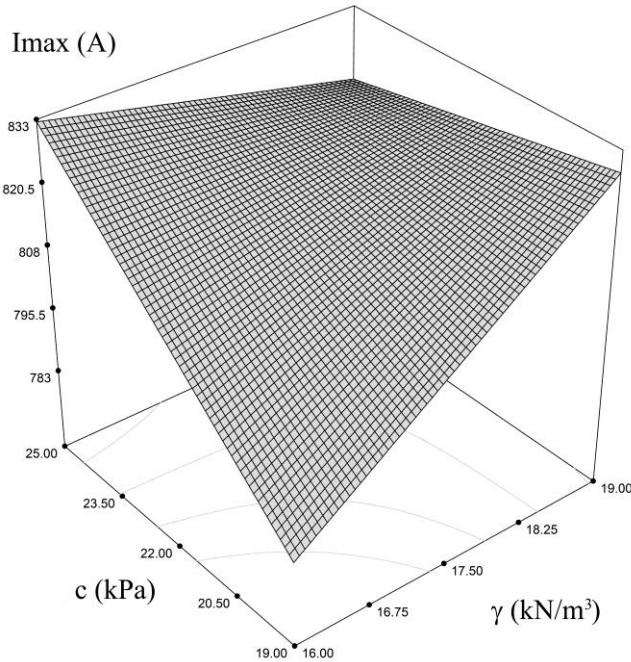


Slika 6.24. Zavisnost maksimalne potrošnje struje bagera od koefekta ugla unutrašnjeg trenja i (a) zapreminske težine  $I_{max}$  (b), slučaj novih zuba bagera [Kostić i Trivan, 2021]

- Efekat granulometrijskog sastava u otkrivci: za ispitivani opseg procenata gline i prašine maksimalne potrošnja struje bagera raste sa povećanjem  $SI_{per}$  i  $CL_{per}$ . Uticaj procentualnog sadržaja na  $I_{max}$  je uglavnom nezavisan od procentualnog učešća sitnozrnih pjeskova u rasponu više od  $SSN_{per}$  do 32,50%, značajan opseg ispitivane vrijednost zapreminske težine (slika 6.20). S druge strane, za male vrijednosti  $SI_{per}$ , povećanje  $SSN_{per}$  dovodi do smanjenja  $I_{max}$ -a. Takav efekat ispitivanih dvofaktorskih interakcija  $SI_{per} \times CL_{per}$  i  $SSN_{per} \times SI_{per}$  na  $I_{max}$  ne odgovara uočenom efektu kohezije i ugla unutrašnjeg trenja. Moglo bi se očekivati da povećanje  $SI_{per}$  i  $CL_{per}$ , što dovodi do povećanja kohezije i smanjenja ugla unutrašnjeg trenja, uzrokuje smanjenje  $I_{max}$ -a. Slično tome, očekuje se da povećanje  $SSN_{per}$  dovodi do povećanja  $I_{max}$ -a. Ovi rezultati ukazuju na to da neka druga svojstva koja nisu ispitana takođe utiču na potrošnju struje bagera. Jedna važna karakteristika koja može objasniti ovu zavisnost  $I_{max} = f(CL_{per}, SL_{per}, SI_{per}, SSN_{per})$  je zbijenost otkrivke i stepen konsolidacije. U slučaju prekonsolidacije, koji čine otkrivku, sa visokim vrijednostima modula stišljivosti, da bi povećanje procenta prašine i gline zaista moglo dovesti do povećanja potrošnje struje. Slično tome, kada porast procenta pjeska ukazuje na veće umanjenje otkrivke,  $I_{max}$  može da se smanji sa povećanjem  $SSN_{per}$ .

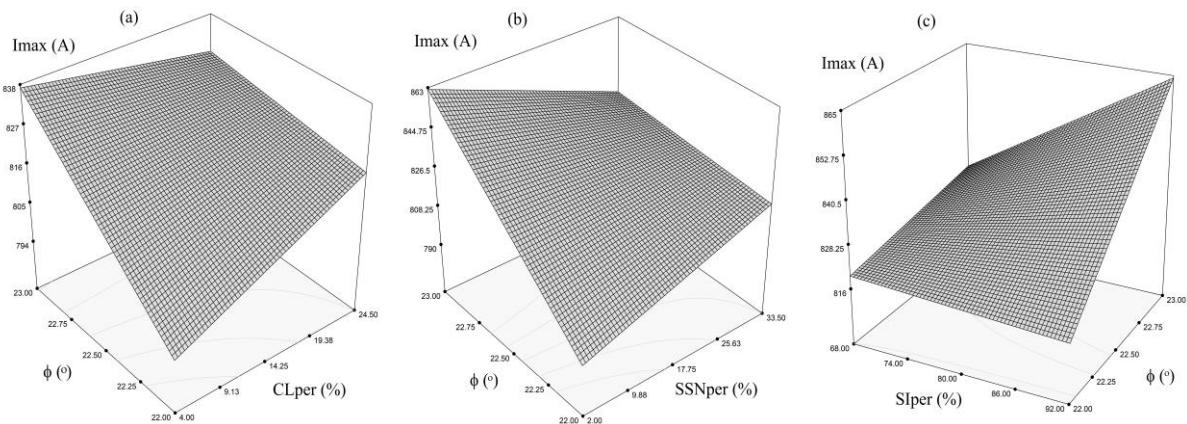
- Pohabani zubi bagera: maksimalna potrošnja struje bagera

- Efekat kohezije otkrivke: kohezija otkrivke ulazi u značajnu dvofaktorsku interakciju samo sa zapreminskom težinom. Za male do srednje vrijednosti zapreminske težine, koje odgovaraju pretežno prašinasto-glinovitoj otkrivci, povećanje kohezije dovodi do povećanja  $I_{max}$ -a (slika 6.25). Ovo je interesantan rezultat, jer za slučaj novih zuba bagera, povećanje kohezije dovodi do smanjenja  $I_{max}$ -a. U ovom slučaju, sa pohabanim Zubima bagera, takvi rezultati mogu ukazivati na manju mogućnost otkopavanja sa korištenim Zubima bagera, pa je potrebna veća potrošnja struje tokom otkopavanja.



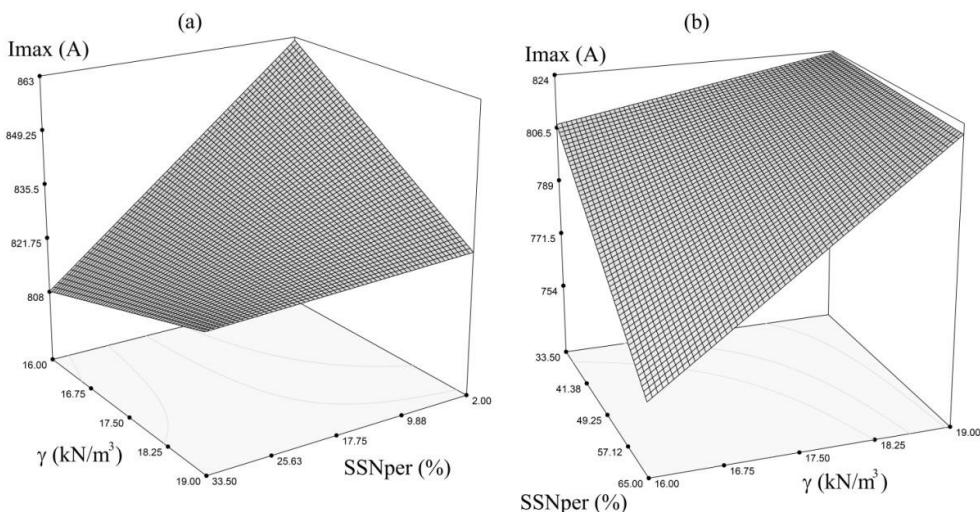
Slika 6.25. Zavisnost maksimalne potrošnje struje bagera od koefekta kohezije i zapreminske težine, slučaj pohabanih zuba bagera [Kostić i Trivan, 2021]

- Efekat ugla unutrašnjeg trenja otkrivke: ugao unutrašnjeg trenja otkrivke pokazuje značajan koefekat sa svim česticama otkrivke, osim srednjezrnnog pjeska. Povećanje ugla unutrašnjeg trenja dovodi do povećanja  $I_{max}$ -a za sve relevantne raspone granulometrijskog sastava: niske do srednje vrijednosti  $CL_{per}$  (slika 6.26a) i  $SSN_{per}$  (slika 6.26b), a za srednje do visoke vrijednosti  $SI_{per}$  (slika 6.26c). Takav efekat se očekuje jer veći ugao trenja zahtjeva veću snagu iskopa, tj. veću maksimalnu potrošnju struje bagera.



Slika 6.26. Zavisnost maksimalne potrošnje struje bagera od koefekta ugla trenja i (a)  $CL_{per}$  (b)  $SSN_{per}$ , (c)  $SI_{per}$ , slučaj pohabanih zuba bagera [Kostić i Trivan, 2021]

- Efekat zapreminske težine otkrivke: zapreminska težina ulazi u značajne dvofaktorske interakcije sa kohezijom i procentom sitnozrnog pijeska. Za sve vrijednosti kohezije, povećanje zapreminske težine dovodi do povećanja  $I_{max}$ -a . Za niske do srednje vrijednosti  $SSN_{per}$ , povećanje zapreminske težine gotovo da nema uticaja na  $I_{max}$ , što se očekuje, jer ne postoji statistički značajna interakcija zapreminske težine sa drugom frakcijom tla (slika 6.27a). Za srednje do visoke vrijednosti  $SSN_{per}$ , povećanje zapreminske težine dovodi do povećanja  $I_{max}$ -a , što se i očekuje, jer povećanje procenta pijeska u jalovini obično dovodi do povećanja ugla unutrašnjeg trenja (slika 6.27b).



Slika 6.27. Zavisnost maksimalne potrošnje struje bagera od koefekta zapreminske težine i (a)  $SSN_{per}$  (2-33,5%) (b)  $SSN_{per}$  (33,5-65%), slučaj pohabanih zuba bagera [Kostić i Trivan, 2021]

Što se tiče koefekta zapreminske težine i kohezije, za male do srednje vrijednosti zapreminske težine - povećanje zapreminske težine dovodi do povećanja potrošnje struje bagera za ispitivani raspon vrijednosti kohezije (19-25 kPa), vidjeti sliku 6.23.

## **7. ZAKLJUČAK**

### **7.1. Opšti pregled**

Realizovanim istraživanjima u okviru doktorske disertacije uspostavljena je fizička moguća i statistički značajna korelacija između geomehaničkih karakteristika stijenskih masa, otpora kopanja i karakteristika rada rotornog bagera, za sledeće slučajeve:

- (1) Na uzorcima čvrstih stijenskih masa iz krovine, u laboratorijskim uslovima,
- (2) Na uzorcima nevezanih i slabo vezanih stijenskih masa iz otkrivke u terenskim i laboratorijskim uslovima,
- (3) Na uzorcima uglja, u laboratorijskim uslovima.

Geomehaničke karakteristike stijenskih masa koje su izučavane su:

- za uzorke čvrstih stijenskih masa iz krovine: čvrstoća na pritisak i zatezanje, zapreminska težina, kohezija i ugao unutrašnjeg trenja,
- za uzorke nevezanih i slabo vezanih stijenskih masa iz otkrivke: granulometrijski sastav (procenat gline, prašine i pijeska), zapreminska težina i čvrstoća na smicanje (kohezija i ugao unutrašnjeg trenja),
- za uzorke uglja: zapreminska težina, parametri čvrstoće na smicanje (ugao unutrašnjeg trenja i kohezija), čvrstoća na pritisak.

Karakteristike otpora kopanja koje su izučavane su: koeficijent otpora kopanja i rezanja i sila rezanja.

Karakteristike rada rotornog bagera koje su izučavane su: brzina bagera  $V_b$  i maksimalna potrošnja struje bagera  $I_{max}$  za nove zube i zube bagera nakon najmanje 250 sati rada na bageru.

U doktorskoj disertaciji formirani su modeli primjenom savremenih matematičkih metoda višestruke linearne regresije gdje su modeli razvijeni kao nelinearne funkcije karakteristika otpora kopanja od fizičko-mehaničkih karakteristika stijenske mase. Istraživanja su izvedena u nekoliko faza:

- U fazi terenskih istraživanja pristupilo se odabiru i uzimanju reprezentativnih uzoraka stijenske mase za utvrđivanje otpora kopanja na odabranim lokacijama površinskih

kopova, takođe pristupilo se terenskim mjeranjima otpora kopanja i potrošnji struje bagera u zavisnosti od dostupnosti podacima i mogućnostima na terenu.

- U fazi laboratorijskih ispitivanja na odabranim uzorcima izvršilo se određivanje fizičko-mehaničkih karakteristika stijenske mase (zapreminska težina, kohezija, ugao unutrašnjeg trenja, modul elastičnosti, čvrstoća na zatezanje i pritisak), kao i karakteristike otpornosti kopanja (koeficijent otpora kopanja i rezanja i sila rezanja).
- U posljednjoj fazi izvršena je obrada terenskih i laboratorijskih dobijenih podataka i formirani su prognozni modeli. Obrada podataka podrazumjevala je statističku analizu rezultata prethodnih faza istraživanja i formiranje matematičkih modela sa određivanjem greške procjene i intervalima pouzdanosti.

## 7.2. Čvrste stijenske mase

Na površinskom kopu mrkog uglja „Turija“ u banovićkom ugljonosnom basenu vršena je kalibracija sile rezanja i potrošnje struje bagera na osnovu uticaja mehaničkih svojstava otkrivke. U tu svrhu sprovedena su terenska i laboratorijska mjerjenja. Prvo su izvršena terenska mjerjenja potrošnje struje bagera i sile rezanja, nakon čega je u laboratoriji analiziran 21 uzorak otkrivke (sivi laporci). Laboratorijske analize su izvedene korištenjem metoda sa cilindrom, hidrauličnom presom, testa direktnog smicanja i brazilskog testa. Izvršeno istraživanje je pokazalo da i sila rezanja i potrošnja struje bagera zavise od zapreminske težine, čvrstoće na pritisak i kohezije, dok ugao unutrašnjeg trenja i čvrstoća na zatezanje ne pokazuju statistički značajni uticaj. Obezbjedena je statistički značajna povezanost potrošnje struje bagera i sile rezanja i mehaničkih svojstava otkrivke.

## 7.3. Slabo vezane i nevezane stijenske mase

U slučaju površinskog kopa „Tamnava istočno polje“ u Srbiji analiza je izvršena u cilju optimizacije procesa otkopavanja u odnosu na svojstva otkrivke u zavisnosti od stanja zuba, prije svega granulometrijskog sastava (procenat gline, prašine i pijeska), zapreminska težina i čvrstoća na smicanje (kohezija i ugao trenja), za dva različita stanja zuba bagera: novi i upotrebljeni nakon najmanje 250 sati rada na bageru. Analiza je izvedena primjenom pristupa višestruke linearne regresije, ukoliko su svojstva otkrivke (maksimalna potrošnja struje bagera  $I_{max}$  i brzina bagera  $V_b$ ) tretirana kao nelinearne funkcije ispitivanih svojstava otkrivke. Kao rezultat, izdvojena su statistički značajna geomehanička svojstva otkrivke i detaljno je ispitana njihov uticaj na  $I_{max}$  i  $V_b$ .

Rezultati sprovedenih istraživanja na površinskom kopu „Tamnava istočno polje“ ukazuju na sledeće:

- Svojstva otkrivke gotovo u potpunosti ulaze samo u statistički značajne dvofaktorske interakcije. Izuzetak su samo procenat prašine, zapreminska težina i ugao unutrašnjeg trenja koji utiču na trenutnu potrošnju za nove zube bagera i procenat gline koji utiče na  $I_{max}$  za pohabane zube bagera;
- Nije moguće dobiti statistički značajne korelacije između svojstava otkrivke i brzine bagera  $V_b$  za pohabane zube. Takođe, nema statistički značajnog uticaja granulometrijskog sastava na  $I_{max}$  za pohabane zube bagera;
- Efekat zapreminske težine je pozitivan za skoro sve ispitane slučajeve ( $V_b$  i  $I_{max}$  se povećavaju sa porastom zapreminske težine), osim za prašinasto pjeskovitu otkrivku, gdje se  $I_{max}$  smanjuje sa povećanjem zapreminske težine, vjerovatno zbog niske kohezije prašinasto pjeskovite otkrivke;
- Efekat ugla unutrašnjeg trenja na  $V_b$  i  $I_{max}$  je takođe pozitivan za nove zube bagera, odnosno povećanje ugla unutrašnjeg trenja dovodi do povećanja  $I_{max}$ -a, što se i očekuje, jer veći ugao unutrašnjeg trenja izaziva jače trenje između točka rotora i otkrivke, što dovodi do veće potrošnje struje;
- - Efekat kohezije na  $V_b$  i  $I_{max}$  je negativan za nove zube bagera, odnosno povećanje kohezije dovodi do smanjenja  $I_{max}$ , što bi se moglo objasniti povećanim procentom prašine/gline, gdje kohezija nastaje zbog međumolekularne veze između vode i čestica gline. Međutim, kohezija ima pozitivan uticaj na  $I_{max}$  za pohabane zube bagera, što bi moglo ukazivati na manju sposobnost iskopavanja pohabanih zuba bagera, pa je potrebna veća potrošnja struje tokom otkopavanja;
- Efekat granulometrijskog sastava na  $V_b$  i  $I_{max}$  je takav da povećanje procenta prašine u otkrivci povećava  $V_b$  i  $I_{max}$ , što bi se moglo objasniti velikim uticajem nekog drugog svojstva otkrivke a koji nije razmatran u ovoj disertaciji, npr. stanje konzistencije otkrivke, stepen konsolidacije ili stišljivosti.

Pored detaljne analize statistički značajnih faktora koji utiču na maksimalnu potrošnju struje bagera i brzinu bagera, izvršena analiza je dala i eksplicitne matematičke izraze u obliku nelinearne funkcije  $I_{max}$ -a (kako za nove, tako i za pohabane zube) i  $V_b$  (samo za nove zube), i značajna svojstva otkrivke. Ovi izrazi omogućavaju pouzdana predviđanja  $I_{max}$ -a i  $V_b$ -a prije početka otkopavanja, isključivo na osnovu svojstava otkrivke, koja omogućavaju optimizaciju rada rotornog bagera.

## **7.4. Ugalj**

Izvedeno istraživanje u rudniku Kovin je pokazalo da zapreminska težina i čvrstoća na pritisak nemaju statistički značajan uticaj na silu rezanja, što se može objasniti njihovim uskim intervalom dobijenih laboratorijskih vrijednosti. Sa druge strane, parametari čvrstoće na smicanje, odnosno ugao unutrašnjeg trenja ima najznačajniji uticaj na silu rezanja. I kohezija i ugao unutrašnjeg trenja imaju kvalitativno sličan efekat na silu rezanja, ali efekat kohezije je izraženiji, tako da se za isti prirast kohezije javlja veći porast sile rezanja. Treba napomenuti da ugao unutrašnjeg trenja takođe pokazuje značajnu dvofaktorsku interakciju sa zapreminskom težinom i čvrstoćom na pritisak.

Pored utvrđivanja značajnih geomehaničkih parametara koji utiču na silu rezanja, još jedan važan rezultat predstavljenog istraživanja je izvedena jednačina za procjenu površinske sile rezanja, zasnovanu na zavisnosti od prethodno utvrđenih statistički značajnih faktora. Koliko je autoru poznato, ovo je prvi put da se takva korelacija uspostavlja u pouzdanom analitičkom obliku. Jednačina 6.1. u opštem slučaju daje pouzdane rezultate ( $R^2 = 0,84$ ,  $MSE = 10,2$  u poređenju sa vrijednostima dobijenim u laboratoriji), ali ne uspjeva da obuhvati visoke vrijednosti sile rezanja. Ovo se može objasniti promjenljivim sastavom uzoraka uglja, gdje se očekuje da će uzorci sa manjim procentom ksilita pokazivati veće vrijednosti sile rezanja uglja.

## **7.5. Ocijena naučnog doprinosa rezultata**

Iz svega navedenog nedvosmisleno se može zaključiti da je disertacija orginalni primjer uspostavljanja korelacije između otpora kopanja i karakteristika rada bagera (koeficijent otpora kopanja i rezanja i sila rezanja, brzina bagera  $V_b$  i maksimalne potrošnje struje bagera  $I_{max}$ ) u odnosu na više geomehaničkih svojstava otkrivke/uglja (čvrstoća na pritisak i zatezanje, zapreminska težina, kohezija i ugao unutrašnjeg trenja i maksimalne sile rezanja i granulometrijskog sastava), što do sad нико nije pokušao uspostaviti.

## **7.6. Ocjena mogućnosti primjene u praksi i značaja za rad na površinskim kopovima**

Na osnovu rezultata u disertaciji može se konstatovati da se razvijeni modeli mogu direktno primjeniti na površinskim kopovima (na rudniku „Kovin“, PK „Tamnava-istočno polje“ i PK „Turije“). Modeli koji su korišteni u ovoj disertaciji mogu se primjenjivati i na drugim površinskim kopovima na kojima nisu vršena istraživanja, tako što će se uspostaviti

korelacija otpora kopanja i karakteristika rada bagera u odnosu na jedan ili više geomehaničkih svojstava otkrivke/uglja.

Cilj razvoja modela je smanjivanje mogućnosti havarija odnosno ublažavanje njihovog efekta na vijek rada rotornog bagera, manje zastoje u proizvodnji, efikasniju proizvodnju i dr.

### **7.7. Prijedlog mogućeg pravca daljih istraživanja**

Sadašnja istraživanja mogu se dalje proširiti u dva pravca. Prvo, mogu se simulirati stvarni uslovi otkopavanja uglja mjeranjem sile rezanja uglja za različite vrijednosti pritiska vode, pošto se u rudniku Kovin vrši podvodna eksploracija uglja. Drugo, vršila bi se terenska mjerena sile rezanja uglja, tj. mjerjenje oscilacija snage rotornog bagera za različite veličine odrezaka. Na taj način dobila bi se kompletna slika otpornosti uglja, a na koju značajno utiče varijabilnost geomehaničkih parametara.

Prvi put je uspostavljena povezanost potrošnje energije i sile rezanja i mehaničkih karakteristika otkrivke u pouzdanom analitičkom obliku za čvrste stijenske mase. Istraživanja su ukazala na statistički značajan efekat ugla unutrašnjeg trenja, njegov uticaj na otpor rezanja i rad bagera treba dalje ispitati za različita geomehanička svojstva čvrstih stijena.

Dalja istraživanja kada su upitanju nevezane i slabo vezane stijene u otkrivci bi trebala da budu usmjerena na razvoj modela koja uključuju više svojstava otkrivke (modul stišljivosti, stanje konzistencije, stepen konsolidacije), kako bi se potvrdio efekat granulometrijskog sastava (procenat gline/prăšine) na  $I_{max}$  i  $V_b$ . Štaviše, sličan pristup bi se mogao koristiti u slučaju otkopavanja čvrstih stijena na površinskim kopovima.

## 8. LITERATURA

- [1] Amar, P., Vemavarapu, M., Ramachandra, M.S., Bahadur, S.K., 2013. Rock excavation using surface miners: An overview of some design and operational aspects. International Journal of Mining Science and Technology, 23, 33–40 str.
- [2] Banković, M. 2018. Optimizacija utovarno transportnih sistema u funkciji planiranja površinskog kopa. Doktorska disertacija. Univerzitet u Beogradu Rudarsko-geološki fakultet, 205 str.
- [3] Bolukbassi, N., Koncagul, O., Gunhan Passamehmetoglu, A. 1991. Correlation of rock properties and cutting resistances in assessment of diggability with bucket-wheel excavators. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology, 100, 189-193. str.
- [4] Bošković, S. 2016. Optimizacija parametara reza rotornog bagera pri otkopavanju materijala sa povećanom čvrstoćom. Doktorska disertacija. Univerzitet u Beogradu Rudarsko-geološki fakultet, 173 str.
- [5] Coleman, J.R., Fitzhardinge, C.F.R., 1979. Geotechnology of excavation equipment selection with particular emphasis on bucket wheel excavators, Proc. Int. Conf. on Mining and Machinery, Inst. Engineers, Australia, Brisbane, Australia, 139-146 str.
- [6] Dey, K. Ghose, A.K. 2008. Predicting "cuttability" with surface miners - A rockmass classification approach. Journal of Mines, Metals and Fuels, 56, 85-91 str.
- [7] Dey, K., Ghose, A.K., 2011. Review of cuttability indices and a new rockmass classification approach for selection of surface miners. Rock Mechanics and Rock Engineering, 44, 601-611 str.
- [8] Dizdar, D. 2006. Kvantitativne metode. Kineziološki fakultet Sveučilišta u Zagrebu, udžbenik, 356 str.
- [9] Домбровский, Н. Г. 1972. Многоковшовые экскаваторы. Конструкция, теория и расчет. М., «Машиностроение», 1972. — 432 с. — 15000 экз.

- [10] Durst, W., Vogt, W. ,1988. Bucket wheel excavator. Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Germany, 375 str.
- [11] Đukić, D. 1984. Geomehanika u površinskoj eksploraciji. Institut za rudarska istraživanja Tuzla IGTRO „Univerzal“ OOUR Izdavačka djelatnost Tuzla, udžbenik, 536 str.
- [12] Energetski bilans Republike Srpske plan za 2019. Godinu, 2019, Republika Srpska Vlada
- [13] Energetski bilans Republike Srpske plan za 2020. godinu, 2020, Republika Srpska Vlada
- [14] Ignjatović, D. 1993. Izbor metode za određivanje otpora na kopanje rotornim bagerima u uslovima površinskim kopovima lignita Kolubare. Magistarski rad. Univerzitet u Beogradu Rudarsko-geološki fakultet, 136 str.
- [15] Inal, A. 1984. The development of a diggability index for bucket wheel excavators. The University of New South Wales School of Mining Engineering Faculty of Applied Science, Master work, pp 167.
- [16] Knežević, K. 2017. Analiza varijance i dizajn eksperimenata. Poslijediplomski seminar, Statističke metode za dubinsku obradu podataka. Sveučilište u Zagrebu. Fakultet elektrotehnike i računarstva, 47 str.
- [17] Kostić, S., Trivan, J., 2021. Optimization of coal overburden excavation considering variable geomechanical properties and states of excavator teeth, Archives of Mining Sciences (under review)
- [18] Kostić, S., Trivan, J., Gojković, N., 2018. Estimation of coal cutting force based on the impact of geomechanical factors, EUROCK2018: Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses, Volume 2, Saint Petersburg, Russia, Editor: Vladimir Litvinenko, CRC Press, Taylor and Francis Group, ISBN 978-1-138-61736-0, 1229-1234 str.
- [19] Kun, J. 1981. Površinska eksploracija lignita. Rudarski Institut Zemun - Beograd, 331 str.

- [20] Langham-Williams, J., Hagan, P. 2014. An assessment of the correlation between the strength and cuttability of rock. Proceedings of the 14th Coal Operators' Conference, University of Wollongong, The Australian Institute of Mining and Metallurgy & Mine Managers Association of Australia, 186-192.
- [21] Malbašić, V., 2010. Rudarska mehanizacija. Univerzitet u Banjoj Luci Rudarski fakultet Prijedor, skripta za studente, 254 str.
- [22] Malbašić, V., 2021. Strategija upravljanja i korišćenja mineralnih sirovina Republike Srpske u eri globalizacije, Arhiv za tehničke nauke, Bjeljina 25, 31 – 43 str.
- [23] Paunović, N., Karličić, N., 2016. Revitalizacija rotornog bagera SRs 1300 24/2.5 pogonski br. 10 – polje „D“ Rudarski basen Kolubara, Zbornik radova sa 29. Međunarodnog kongresa o procesnoj industriji – Procesing'16, ISBN-978-86-8105-81-6, Beograd, 137-147 str.
- [24] Pavlović, V., Ignjatović, D., 2012. Selektivna površinska eksploracija uglja kontinualnim sistemima, Univerzitet u Beogradu Rudarsko-geološki fakultet, udžbenik, 450 str.
- [25] Petrović, B., 2016. Optimizacija dužine strele rotornih bagera u funkciji stabilnosti kosina i efektivnosti rada na površinskim kopovima lignita Srbije. Doktorska disertacija. Univerzitet u Beogradu Rudarsko-geološki fakultet, 172 str.
- [26] Popović, N. 1984. Naučne osnove projektovanja površinskih kopova. NIŠRO Oslobođenje Sarajevo, 971 str.
- [27] Razz, V. 1999. Assesment of the Digging Force and optimum selection of the and Operational parameters of Bucket Wheel Excavators for mining of Overburden Coal and partings, Braunkohle, Krupp Fördertechnik GmbH: Essen, Germany, “referenca preuzeta iz Bošković, 2016., Optimizacija parametara reza rotornog bagera pri otkopavanju materijala sa povećanom čvrstoćom. Doktorska disertacija. Univerzitet u Beogradu Rudarsko-geološki fakultet, 173 str.“

- [28] Scheffler, D. 1997. Laboratory and in-situ methods of measurement as the basis for predicting cutting resistances in mining machines. ZKG International 50 (7), 347-352. str.
- [29] Simić. D., 2012. Elaborat o Klasifikaciji i kategorizaciji rezervi uglja u ležištu „Raškovac“ kod Doboja, stanje na dan 31.05.2012., Jantar group
- [30] Stjepanović, S., 2021. Dopunski rudarski projekat površinskog kopa Gacko-Centralno Polje za kapacitet od  $2,3 \cdot 10^6$  tona rovnog uglja, IRM-Bor d.o.o. Zvornik,
- [31] Stojanović, C., Borović, B., 2019. Regionalna industrija uglja u uslovima energetske tranzicije, 9 Međunarodna konferencija Zlatibor, Ugalj 2019, Zbornik radova, Jugoslovenski komitet za površinsku eksploataciju, 354 str., 281-291 str.
- [32] Su, O., Akcin, N.A., 2005. Investigation of the relationships between Cerchar hardness index and some index properties of coal. Proceedings of the 19th International Mining Congress and fair of Turkey, IMCET2005, 1-5 str.
- [33] Szepietowski, W. 1991. Klasyfikacia urabialosci skal nadkładowich Wielonaczyniowymi koparkami kolowymi. Gornictwo odkrywkowe XXXIII, I “referenca preuzeta iz Bošković, 2016., Optimizacija parametara reza rotornog bagera pri otkopavanju materijala sa povećanom čvrstoćom. Doktorska disertacija. Univerzitet u Beogradu Rudarsko-geološki fakultet, 173 str.“
- [34] Šalović, M. 1987. Kompleksno izučavanje otpora kopanju za izbor bagera i primjenu BTO kompleksa u uslovima čvrstih stijena na površinskim kopovima, Knjiga 1, Institut za rudarska istraživanja, Naučno istraživački projekat Tuzla. 227 str.
- [35] Šekulić, S., Sekulić, Z., 2019. Proizvodnja električne energije, udžbenik za drugi razred srednje škole, obrazovani program elektrotehničar energetike, zavod za udžbenike i nastavna sredstva Podgorica, 236 str.
- [36] Trivan, J., Kostić, S., Šalović, M., 2022. Calibration of excavator cutting force and energy consumption considering the impact of the overburden mechanical properties, VIII Balkanski rudarski kongres, Beograd, Rudarski institut Beograd, (accepted for publication)

- [37] Vetrov, J. A. 1965. Rasčeti sil rezanja i kopanja gruntov. Izdatelstvo kievskogo universiteta Moskva, “ referenca preuzeta iz Bošković, 2016., Optimizacija parametara reza rotornog bagera pri otkopavanju materijala sa povećanom čvrstoćom. Doktorska disertacija. Univerzitet u Beogradu Rudarsko-geološki fakultet, 173 str.“
- [38] Wojkiewitch, H. 1963. Der specifische Grabwiderstand in Abhangigkeit von der Spanfläche und der Spanform bei verschiedenen, Bodenarten, “ referenca preuzeta iz Bošković, 2016., Optimizacija parametara reza rotornog bagera pri otkopavanju materijala sa povećanom čvrstoćom. Doktorska disertacija. Univerzitet u Beogradu Rudarsko-geološki fakultet, 173 str.“
- [38] Wojkiewitch, H. 1974. Wpływ radzaju skrawania na wybór jednostokowych oporów urabania, Wrocław, “ referenca preuzeta iz Bošković, 2016., Optimizacija parametara reza rotornog bagera pri otkopavanju materijala sa povećanom čvrstoćom. Doktorska disertacija. Univerzitet u Beogradu Rudarsko-geološki fakultet, 173 str.“

**PRILOZI**

Prilog br.1. Tabelarni prikaz analiziranih i izmjerena vrijednosti parametara za nove zube na površinskom kopu “Tamnava – istočno polje”

Broj mjerjenja	Sadržaj gline (%)	Sadržaj prašine (%)	Sadržaj sitnozrnog pijeska (%)	Sadržaj srednjezrnog pijeska (%)	Zapreminska težina $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Kohezija c (kN/m <sup>2</sup> )	Ugao unutrašnjeg trenja $\varphi$ (°)	Brzina bagera V <sub>b</sub> (m/min)	Maksimalna potrošnja struje na bageru I <sub>max</sub> (A)
1	5,00	70,00	52,00	5,00	16,00	23,00	22,00	24,00	832,00
2	23,00	52,00	33,00	7,00	18,00	24,00	22,00	22,00	816,00
3	22,00	69,00	27,00	8,00	17,00	23,00	23,00	20,00	920,00
4	33,00	61,00	55,00	7,00	20,00	24,00	22,00	16,00	840,00
5	7,00	79,00	32,00	7,00	20,00	20,00	23,00	22,00	840,00
6	4,00	57,00	54,00	4,00	21,00	20,00	22,00	20,00	800,00
7	13,00	71,00	45,00	2,00	19,00	20,00	23,00	24,00	920,00
8	20,00	89,00	49,00	2,00	16,00	24,00	22,00	24,00	920,00
9	10,00	48,00	51,00	4,00	19,00	21,00	22,00	24,00	804,00
10	8,00	66,00	58,00	8,00	17,00	19,00	22,00	24,00	784,00
11	32,00	76,00	11,00	2,00	22,00	24,00	22,00	17,00	890,00
12	16,00	50,00	13,00	6,00	22,00	25,00	22,00	18,00	824,00
13	37,00	87,00	22,00	8,00	18,00	25,00	22,00	18,00	856,00
14	38,00	56,00	58,00	2,00	19,00	22,00	22,00	19,00	816,00
15	11,00	88,00	41,00	2,00	18,00	22,00	23,00	20,00	840,00
16	28,00	54,00	10,00	5,00	16,00	21,00	22,00	18,00	920,00
17	22,00	52,00	55,00	6,00	17,00	20,00	22,00	18,00	810,00
18	8,00	74,00	11,00	2,00	19,00	24,00	22,00	18,00	800,00
19	35,00	70,00	37,00	7,00	22,00	20,00	22,00	20,00	800,00
20	10,00	86,00	58,00	6,00	17,00	21,00	22,00	20,00	830,00
21	41,00	80,00	5,00	3,00	16,00	24,00	22,00	13,00	768,00

Broj mjeranja	Sadržaj gline (%)	Sadržaj prašine (%)	Sadržaj sitnozrnog pijeska (%)	Sadržaj srednjezrnog pijeska (%)	Zapreminska težina $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Kohezija c (kN/m <sup>2</sup> )	Ugao unutrašnjeg trenja $\phi$ (°)	Brzina bagera V <sub>b</sub> (m/min)	Maksimalna potrošnja struje na bageru I <sub>max</sub> (A)
22	44,00	69,00	62,00	7,00	21,00	20,00	23,00	14,00	752,00
23	12,00	49,00	39,00	8,00	16,00	21,00	23,00	18,00	640,00
24	6,00	55,00	34,00	1,00	18,00	22,00	22,00	17,00	664,00
25	41,00	77,00	29,00	2,00	18,00	21,00	23,00	15,00	600,00
26	35,00	43,00	43,00	1,00	21,00	24,00	22,00	15,00	592,00
27	45,00	56,00	38,00	1,00	21,00	21,00	22,00	13,00	752,00
28	43,00	52,00	3,00	6,00	17,00	23,00	23,00	17,00	816,00
29	31,00	72,00	63,00	4,00	19,00	25,00	22,00	15,00	720,00
30	19,00	82,00	42,00	1,00	16,00	25,00	23,00	15,00	736,00
31	14,00	52,00	53,00	4,00	16,00	20,00	23,00	17,00	824,00
32	10,00	65,00	64,00	3,00	16,00	24,00	22,00	16,00	840,00
33	15,00	65,00	7,00	6,00	18,00	25,00	22,00	18,00	680,00
34	12,00	67,00	11,00	5,00	17,00	19,00	22,00	19,00	704,00
35	37,00	59,00	12,00	2,00	19,00	24,00	22,00	15,00	792,00
36	8,00	92,00	43,00	2,00	16,00	24,00	23,00	15,00	808,00
37	9,00	46,00	61,00	5,00	22,00	21,00	22,00	18,00	720,00
38	40,00	59,00	16,00	8,00	18,00	22,00	23,00	18,00	696,00
39	12,00	63,00	34,00	3,00	17,00	23,00	22,00	15,00	800,00
40	30,00	54,00	28,00	3,00	19,00	21,00	23,00	15,00	816,00

Prilog br.2. Tabelarni prikaz analiziranih i izmjerениh vrijednosti parametara za pohabane zube bagera (poslije 250 sati rada) na površinskom kopu "Tamnava – istočno polje"

Broj mjeranja	Sadržaj gline (%)	Sadržaj prašine (%)	Sadržaj sitnozrnog pijeska (%)	Sadržaj srednjezrnog pijeska (%)	Zapreminska težina $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Kohezija $c$ (kN/m <sup>2</sup> )	Ugaо unutrašnjeg trenja $\phi$ (°)	Brzina bagera V <sub>b</sub> (m/min)	Maksimalna potrošnja struje na bageru I <sub>max</sub> (A)
1	19,00	57,00	10,00	5,00	17,00	20,00	23,00	18,00	864,00
2	33,00	74,00	56,00	5,00	17,00	21,00	22,00	13,00	850,00
3	34,00	64,00	14,00	8,00	18,00	22,00	23,00	13,00	880,00
4	18,00	84,00	35,00	4,00	18,00	22,00	23,00	17,00	896,00
5	12,00	92,00	60,00	4,00	17,00	20,00	23,00	16,00	832,00
6	14,00	85,00	3,00	5,00	18,00	21,00	23,00	15,00	704,00
7	22,00	59,00	29,00	2,00	16,00	22,00	23,00	18,00	736,00
8	10,00	74,00	42,00	6,00	22,00	24,00	22,00	18,00	856,00
9	42,00	55,00	37,00	5,00	22,00	23,00	23,00	17,00	656,00
10	5,00	45,00	46,00	6,00	17,00	19,00	23,00	17,00	824,00
11	6,00	59,00	43,00	4,00	21,00	20,00	22,00	16,00	832,00
12	23,00	66,00	60,00	2,00	17,00	21,00	23,00	22,00	696,00
13	19,00	90,00	12,00	6,00	22,00	21,00	23,00	17,00	864,00
14	6,00	47,00	8,00	1,00	19,00	23,00	22,00	18,00	920,00
15	8,00	78,00	39,00	4,00	18,00	20,00	22,00	20,00	832,00
16	41,00	84,00	27,00	4,00	18,00	25,00	22,00	18,00	840,00
17	10,00	70,00	17,00	1,00	19,00	20,00	22,00	20,00	900,00
18	21,00	45,00	40,00	1,00	16,00	21,00	23,00	18,00	824,00
19	27,00	82,00	1,00	5,00	16,00	19,00	22,00	18,00	824,00
20	33,00	87,00	49,00	3,00	21,00	25,00	23,00	18,00	824,00
21	30,00	87,00	21,00	5,00	17,00	24,00	23,00	18,00	900,00

Broj mjerjenja	Sadržaj gline (%)	Sadržaj prašine (%)	Sadržaj sitnozrnog pijeska (%)	Sadržaj srednjezrnog pijeska (%)	Zapreminska težina $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Kohezija c (kN/m <sup>2</sup> )	Ugao unutrašnjeg trenja $\varphi$ (°)	Brzina bager V <sub>b</sub> (m/min)	Maksimalna potrošnja struje na bageru I <sub>max</sub> (A)
22	12,00	84,00	14,00	7,00	19,00	24,00	23,00	18,00	920,00
23	24,00	64,00	47,00	1,00	22,00	23,00	22,00	16,00	864,00
24	22,00	78,00	15,00	6,00	19,00	22,00	22,00	16,00	824,00
25	15,00	73,00	24,00	1,00	21,00	19,00	23,00	16,00	808,00
26	12,00	83,00	45,00	2,00	19,00	24,00	22,00	15,00	880,00
27	35,00	72,00	43,00	7,00	16,00	20,00	22,00	15,00	840,00
28	21,00	45,00	17,00	8,00	16,00	21,00	22,00	16,00	840,00
29	8,00	62,00	39,00	3,00	20,00	25,00	23,00	16,00	824,00
30	4,00	59,00	41,00	1,00	20,00	21,00	23,00	14,00	880,00
31	44,00	43,00	14,00	4,00	21,00	22,00	23,00	14,00	792,00
32	18,00	45,00	12,00	1,00	20,00	22,00	22,00	18,00	960,00
33	19,00	49,00	28,00	7,00	20,00	23,00	22,00	18,00	900,00
34	7,00	84,00	35,00	6,00	19,00	24,00	22,00	16,00	800,00
35	26,00	65,00	29,00	4,00	19,00	23,00	23,00	24,00	864,00
36	12,00	78,00	62,00	2,00	16,00	24,00	23,00	18,00	768,00
37	36,00	52,00	44,00	2,00	16,00	23,00	23,00	15,00	800,00
38	19,00	87,00	9,00	5,00	16,00	25,00	23,00	15,00	792,00
39	45,00	85,00	18,00	2,00	17,00	20,00	23,00	18,00	784,00
40	27,00	69,00	7,00	2,00	21,00	24,00	22,00	18,00	752,00
41	20,00	47,00	6,00	1,00	18,00	21,00	23,00	16,00	744,00
42	4,00	54,00	39,00	8,00	16,00	22,00	23,00	15,00	720,00
43	33,00	62,00	23,00	5,00	19,00	23,00	23,00	19,00	880,00
44	33,00	91,00	46,00	6,00	20,00	25,00	22,00	24,00	840,00
45	23,00	81,00	60,00	6,00	17,00	20,00	22,00	16,00	728,00

Broj mjerjenja	Sadržaj gline (%)	Sadržaj prašine (%)	Sadržaj sitnozrnog pijeska (%)	Sadržaj srednjezrnog pijeska (%)	Zapreminska težina $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Kohezija c (kN/m <sup>2</sup> )	Ugao unutrašnjeg trenja $\varphi$ (°)	Brzina bager V <sub>b</sub> (m/min)	Maksimalna potrošnja struje na bageru I <sub>max</sub> (A)
46	41,00	47,00	26,00	6,00	19,00	25,00	22,00	16,00	720,00
47	23,00	56,00	37,00	5,00	20,00	23,00	22,00	18,00	1000,00
48	41,00	82,00	54,00	8,00	19,00	19,00	22,00	20,00	920,00
49	29,00	45,00	55,00	6,00	20,00	23,00	23,00	15,00	736,00
50	23,00	78,00	16,00	8,00	18,00	25,00	23,00	15,00	776,00
51	7,00	88,00	14,00	5,00	20,00	23,00	22,00	15,00	840,00
52	11,00	67,00	62,00	1,00	16,00	21,00	22,00	15,00	832,00
53	45,00	60,00	19,00	6,00	18,00	19,00	22,00	15,00	840,00
54	37,00	43,00	17,00	1,00	18,00	24,00	23,00	15,00	840,00
55	6,00	73,00	25,00	3,00	19,00	21,00	23,00	15,00	824,00
56	25,00	45,00	30,00	8,00	22,00	24,00	23,00	15,00	816,00
57	32,00	85,00	63,00	6,00	17,00	20,00	22,00	15,00	890,00
58	32,00	45,00	9,00	8,00	20,00	24,00	22,00	15,00	880,00
59	25,00	69,00	15,00	2,00	17,00	24,00	22,00	15,00	800,00
60	43,00	48,00	39,00	3,00	20,00	22,00	22,00	15,00	784,00
61	17,00	71,00	20,00	5,00	17,00	21,00	23,00	15,00	816,00
62	33,00	69,00	39,00	5,00	22,00	19,00	23,00	15,00	784,00
63	5,00	71,00	64,00	8,00	21,00	22,00	23,00	15,00	840,00
64	27,00	53,00	57,00	1,00	21,00	23,00	23,00	15,00	816,00
65	42,00	92,00	17,00	3,00	18,00	21,00	22,00	15,00	880,00
66	6,00	51,00	57,00	4,00	17,00	21,00	23,00	15,00	860,00
67	40,00	79,00	7,00	7,00	17,00	19,00	23,00	15,00	840,00
68	45,00	71,00	38,00	7,00	16,00	19,00	23,00	15,00	824,00
69	10,00	91,00	4,00	6,00	16,00	25,00	23,00	15,00	850,00

Broj mjerjenja	Sadržaj gline (%)	Sadržaj prašine (%)	Sadržaj sitnozrnog pijeska (%)	Sadržaj srednjezrnog pijeska (%)	Zapreminska težina $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Kohezija c (kN/m <sup>2</sup> )	Ugao unutrašnjeg trenja $\varphi$ (°)	Brzina bager V <sub>b</sub> (m/min)	Maksimalna potrošnja struje na bageru I <sub>max</sub> (A)
70	8,00	46,00	14,00	3,00	22,00	20,00	23,00	15,00	816,00
71	39,00	91,00	3,00	1,00	19,00	21,00	23,00	15,00	824,00
72	37,00	72,00	23,00	5,00	22,00	22,00	22,00	15,00	808,00
73	25,00	79,00	8,00	2,00	20,00	22,00	22,00	15,00	768,00
74	17,00	84,00	32,00	8,00	17,00	25,00	23,00	15,00	792,00

Prilog br. 3. Tabelarni prikaz analiziranih vrijednosti parametara na rudnika-„Kovin“ sa podvodnom eksploracijom uglja

Broj mjerena	Oznaka uzorka	Zapreminska težina	Čvrstoća na pritisak	Kohezija	Ugao unutrašnjeg trenja	Specifična sila rezanja
		$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\sigma_c$ (MPa)	c (MPa)	$\phi$ (°)	$K_p$ (N/cm <sup>2</sup> )
1	U – 6	11,24	9,78	0,90	33,00	108,60
2	U – 7	11,38	6,97	0,17	28,00	48,26
3	U – 8	11,22	7,44	0,10	43,00	151,77
4	U – 9	11,12	9,34	0,58	36,00	74,87
5	U – 10	11,20	8,04	0,28	42,00	70,57
6	U – 11	11,43	7,90	0,28	41,00	57,38
7	U – 12	11,27	6,63	0,05	33,00	79,92
8	U – 13	11,13	10,82	0,95	33,00	89,19
9	U – 14	11,51	9,74	0,81	28,00	70,70
10	U – 15	11,63	9,09	0,38	39,00	75,91
11	F II – 1	12,25	9,70	2,36	21,00	154,00
12	F II – 2	12,37	6,64	1,93	22,00	105,00
13	F II – 3	12,05	9,83	1,99	23,00	159,00
14	F II – 4	12,86	4,92	1,31	24,00	77,00
15	F IV - 1	11,85	3,69	1,48	29,00	66,00
16	F IV – 2	12,43	6,64	2,40	28,00	105,00
17	F IV – 3	12,29	6,88	1,95	28,00	136,00
18	F IV – 5	12,29	8,11	1,30	23,00	129,00
19	F IV – 5	12,17	8,60	1,24	22,00	137,00
20	F IV – 5	13,47	3,69	0,82	23,00	62,00
21	F IV – 10	12,68	7,37	1,89	22,00	117,00
22	F IV – 12	12,43	8,11	1,41	24,00	129,00

Broj mjerena	Oznaka uzorka	Zapreminska težina	Čvrstoća na pritisak	Kohezija	Ugao unutrašnjeg trenja	Specifična sila rezanja
		$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\sigma_c$ (MPa)	c (MPa)	$\phi$ (°)	$K_p$ (N/cm <sup>2</sup> )
23	F IV – 13	12,36	9,09	2,23	29,00	145,00
24	F IV – 15	12,11	7,32	1,80	28,00	117,00
25	F II – 2	12,57	6,14	2,12	23,00	99,00
26	F II – 3	12,22	7,37	2,85	24,00	110,00
27	F II – 4	12,25	4,42	2,12	24,00	71,00
28	F IV – 3	13,07	4,67	1,66	28,00	74,00
29	F IV – 5	12,64	6,14	1,62	23,00	100,00
30	F IV – 10	12,57	6,14	1,61	23,00	99,00
31	F IV – 12	12,72	0,85	2,15	22,00	110,00
32	B – 14	11,80	4,36,0	0,90	48,00	125,40
33	B – 14	12,10	4,23	0,87	48,00	120,90
34	B – 17	11,50	7,10	1,08	59,00	401,30
35	B – 17	12,50	4,82	0,89	52,00	243,60
36	B – 21	12,10	11,05	2,24	48,00	177,50
37	B – 21	12,50	5,23	1,01	50,00	116,40
38	B – 21	12,00	4,53	1,18	37,00	128,00
39	B – 22	11,20	4,86	0,82	55,00	322,40
40	B – 23	12,10	6,59	1,29	50,00	145,50
41	B – 24	12,00	10,07	1,47	61,00	110,80
42	B – 24	12,30	3,96	0,67	56,00	220,00
43	B – 25	11,70	7,14	1,19	56,00	193,50
44	B – 25	12,20	5,09	1,02	49,00	62,70
45	B – 25	12,20	5,22	0,86	56,00	159,50
46	B – 28	12,40	4,23	0,94	45,00	337,80

Broj mjerena	Oznaka uzorka	Zapreminska težina	Čvrstoća na pritisak	Kohezija	Ugao unutrašnjeg trenja	Specifična sila rezanja
		$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\sigma_c$ (MPa)	c (MPa)	$\phi$ (°)	$K_p$ (N/cm <sup>2</sup> )
47	B – 34	12,10	4,89	0,81	56,00	132,00
48	B – 36	12,10	6,91	1,47	46,00	185,00
49	B – 36	12,10	8,34	1,21	61,00	65,40

Prilog br. 4. Tabelarni prikaz analiziranih i izmjerenih vrijednosti parametara na površinskom kopu „Turija“ – Banovići

Broj mjerjenja	Mjesto uzorkovanja	Zapreminska težina $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Čvrstoća na pritisak $\sigma_p$ (MPa)	Čvrstoća na zatezanje $\sigma_z$ (MPa)	Kohezija c (MPa)	Ugao unutrašnjeg trenja $\phi$ (°)	Koefficijent otpora kopanja $K_F$ (MPa)	Dubina reza (cm)	Maksimalna sila rezanja F (N)	Maksimalna potrošnja struje na bageru E (kWh/m <sup>3</sup> )
1	240	21,10	14,90	2,5	0,35	24	3,48	0,50	1080	2,51
4	252	22,35	18,65	4,8	0,52	25	7,60	0,50	1650	3,88
7	264	21,15	22,60	3,3	0,40	25	6,60	0,50	1160	2,69
10	276	19,90	18,90	2,5	0,35	23	2,76	0,50	1680	3,90
13	288	21,85	21,65	4,5	0,49	26	7,06	0,50	1200	2,75
16	300	22,10	15,75	1,5	0,22	27	2,54	0,50	900	2,18
19	312	22,25	8,00	1,4	0,20	19	4,18	0,50	720	1,77
2	240	21,10	14,90	2,5	0,35	24	3,48	0,75	1440	2,06
5	252	22,35	18,65	4,8	0,52	25	7,60	0,75	1920	2,80
8	264	21,15	22,60	3,3	0,40	25	6,60	0,75	1680	2,41
11	276	19,90	18,90	2,5	0,35	23	2,76	0,75	1860	2,66
14	288	21,85	21,65	4,5	0,49	26	7,06	0,75	1380	1,94
17	300	22,10	15,75	1,5	0,22	27	2,54	0,75	1460	2,21
20	312	22,25	8,00	1,4	0,20	19	4,18	0,75	1300	2,02
3	240	21,10	14,90	2,5	0,35	24	3,48	1,00	1440	1,44
6	252	22,35	18,65	4,8	0,52	25	7,60	1,00	1980	2,02
9	264	21,15	22,60	3,3	0,40	25	6,60	1,00	2100	2,10
12	276	19,90	18,90	2,5	0,35	23	2,76	1,00	2240	2,24
15	288	21,85	21,65	4,5	0,49	26	7,06	1,00	1320	1,29
18	300	22,10	15,75	1,5	0,22	27	2,54	1,00	1420	1,52
21	312	22,25	8,00	1,4	0,20	19	4,18	1,00	1320	1,46

## **BIOGRAFIJA AUTORA**

Jelena Vukašina Trivan, rođena je 25.08.1978. godine u Drvaru. Osnovnu školu je završila u Bosanskom Grahovu, a gimnaziju u Bosanskom Grahovu i Prijedoru.

Na Rudarskom odsjeku Prijedoru, Tehnološki fakultet Banja Luka, Univerzitet Banja Luka diplomirala je na temu „Stanje stabilnosti nasute zemljane brane „Međeđa“ Rudnik „Omarska“ RŽR „Ljubija“ Prijedor“, 16.09.2004. godine.

Postdiplomske studije je upisala 2005. godine na Rudarsko – geološkom fakultetu Univerzitet u Beogradu, Rudarski odsjek, naučno područje Mehanika stijena, smjer Mehanika stijena, i magistrirala na tenu „Komparativna analiza stabilnosti kosina i njihova sanacija na primjeru površinskog kopa uglja „Bogutovo selo“ – Ugljevik, RS, 05.04.2013. godine.

Od maja 2005. godine zaposlena na Tehnološkom fakultetu u Banjoj Luci, Rudarski odsjek Prijedor na mjesto saradnik – asistent na predmetu Geomehanika. Od maja 2009. godine zaposlena na Rudarskom fakultetu Prijedor, Univerzitet Banja Luka na mjestu saradnika na užim naučnim oblastima: Površinska eksploatacija mineralnih sirovina i Podzemna eksploatacija mineralnih sirovina na predmetima: Ventilacija u rudarstvu, Odvodnjavanje u rudarstvu, Geomehanika i Mehanika stijena i tla.

U svom dosadašnjem radu stekla je obrazovno, naučno – istraživačko kao i stručno iskustvo, učestvujući sa radovima na naučnim skupovima i časopisima nacionalnog i međunarodnog značaja, objavivši 28 naučnih i stručnih radova.

Majka jednog djeteta.

## **Spisak radova objavljenih nakon prijave teme doktorske disertacije**

*Spisak naučnih radova iz teme doktorske disertacije::*

1. Kostić, S., **Trivan, J.**, Gojković, N. 2018. Estimation of coal cutting force based on the impact of geomechanical factors, EUROCK2018: Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses, May, Saint Petersburg, 1229-1234 str. (čl.19. st 16.)
2. **Trivan, J.**, Kostić, S., Šalović, M. 2022. Calibration of excavator cutting force and energy consumption considering the impact of the overburden mechanical properties, VIII Balkanski rudarski kongres, Beograd, Rudarski institut Beograd, (accepted for publication) (čl.19. st. 16.)
3. Kostić, S., **Trivan, J.** 2021. Optimization of coal overburden excavation considering variable geomechanical properties and states of excavator teeth, Archives of Mining Sciences (under review) (čl.19. st. 7.)

*Spisak naučnih radova iz uže naučne oblasti:*

1. Todorović, V., Petrović, D., **Trivan, J.** 2017. Injuries frequency of employees in underground coal mines in Serbia, Underground Mining Engineering 32 (2017) 67-76, Universityof Belgrade-Faculty of Mining and Geology, UDK:62, ISSN: 03542904, 67-76 str. (čl. 19, st. 9.)
2. Todorović, V., **Trivan, J.**, Tošić, D., Figun, Lj. 2020. Characteristics of the main fans of the active underground mines JP PEU – RESAVICA, Mining and Metallurgy Engineering Bor, DOI 10.5937/mmeb2002035T, UDK: 622.272/.45(045)=111, SSN: 2334-8836 (Štampano izdanie), SSN: 2406-1395 (Online), status K<sub>52</sub>, K<sub>53</sub> (CEON WoS IF<sub>2</sub> 0,014, CEON WoS IF<sub>5</sub> 0,026), No. 1-2/2020, Dec. 2020, 35-41 str. (čl. 19, st. 9. i čl. 23.)
3. **Trivan, J.**, Tošić, D., Todorović, V. 2020. The physical-mechanical characteristics of coal seams of immediate floor and roof influences on the choice of excavation system in the coal deposit in Serbia, Archives for Technical Sciences, DOI10.7251/afts.2020.1223.037T, UDK 622.274.5:622.33.013(497.11), COBISS.RS-ID 129653761, V. 5, No. 23, Oct. 2020. *Review article*, 37-44 str. (čl. 19, st. 11.)
4. Stojanović, L., Figun, Lj., **Trivan, J.**, 2020. Risk management on medjedja dam on tailing storage facility, omarska mine prijedor, АРХИВ ЗА ТЕХНИЧКЕ НАУКЕ,

5. Todorović, V., Tošić, D., Trivan, J., 2020. Analiza uticaja fizičko-mehaničkih svojstava ugljene serije na izbor metode otkopavanja u jamama RMU "REMBAS"-Resavica, Naučno-stručni simpozijum Geo-expo 2020, Zbornik radova, doi.org/10.35123/GEO-EXPO\_20202\_3, ISSN 2303-4262, Nov 2020, 17-24 str. (čl.19. st. 16. i čl. 23)

*Spisak stručnih radova iz uže naučne oblasti:*

1. Trivan, J., Figun, Lj., Rajlić, I., 2017. Assessment of the situatin of the drainage system on the open pit of Buvač in the period from 2013 to 2016, Book of Proceedings I, pp. 151-158, Oct, 2017.- 7th Balkan Mining Congress, (čl.22. st.5. i čl. 23)
2. Zdjelar, N., Figun, Lj., Cvjetić, N., Trivan, J., 2017. Systematization of injuries at work in "EFT Rudnik i Termoelektrana Stanari", Book of Proceedings I, pp. 375-382, Oct, 2017.- 7th Balkan Mining Congress, (čl.22. st.5. i čl. 23)
3. Todorović, V-, Tošić, D., Trivan, J., 2020. Dimension specifies of the production capacity of underground coal mines in Serbia, Archives for Technical Sciences, DOI 10.7251/afts.2020.1223.045T, UDK 622.235:622.411.52(497.11), COBISS.RS-ID 129654529, V. 6, No. 23, Oct. 2020. *Professional article*, 45-52 str. (čl.22. st.3. i čl. 23)
4. Ivković, Z., Dramlić, D., Kotaran, R., Trivan, J., 2020. Problematika upravljanja rudarskim otpadom u podzemnim rudnicima uglja u Srbiji /Problems of managing of mining waste in underground coal mines in Serbia, Zbornik radova Rudarstvo 2020, Beograd 2020, UDK: 622 (082), DOI: 502/504, ISBN: 978-86-82867-28-9, 10-15 str. (čl. 22, st. 5. i čl. 23)

*Ostali radovi:*

1. Ivković, M., Tošić, D., Trivan, J., 2006, Sanacija degradiranih površina uzrokovanih podzemnom eksploatacijom uglja u ležištu rudnika "Soko" Sokobanja, I simpozijum o reciklažnim tehnologijama i održivom razvoju sa međunarodnim učešćem, 01-04 novembar, Sokobanja, 360-368 str.

2. Tankosić, Lj., **Trivan, J.**, Tošić, D., Figun, Lj., 2007, Uticaj sitnih emitovanih čestica krečnjačke prašine na životnu sredinu u rudniku “Drenovača” i mogućnost njene valorizacije, Zbornik radova sa I okruglog stola sa međunarodnim učešćem, Zaštita životne sredine u industrijskim područjima, 19-20 april, Kosovska Mitrovica, 166-174 str.
3. **Trivan, J.**, Tankosić, Lj., Tošić, D., Figun, Lj., 2007, Analiza kvaliteta vode rijeke Sane na području opštine Prijedor u periodu od 1960 do 2005 godine, Zbornik radova sa skupa Ekološka istina sa međunarodnim učešćem, 27-28 maj, Sokobanja, 367-372 str.
4. Čelebić, M., Agbaba, G., **Trivan, J.**, Tošić, D., 2008, Verifikacija kontinualnog sistema transporta otkrivke na površinskom kopu Buvač, 7. Internacionalni simpozijum o transportu i izvozu, 01-04 jun, Tara, 158-162 str.
5. Miljanović, J., **Trivan, J.**, Ivković, M., 2011, Istraživanje uslova radne sredine u jami “Strmosten” RMU “Rembas” u cilju uvođenja mehanizovane hidraulične podgrade (MHP) za otkopavanje uglja, TEHNIKA, časopis saveza inženjera i tehničara Srbije, Vol.8. No.3, oktobar, 223-229 str.
6. **Trivan, J.**, Tošić, D., Figun, Lj., Tankosić, Lj., 2012, Istraživanja opasnosti od iznenadnih prodora vode u podzemnim rudnicima uglja u Srbiji, Zbornik radova, Rudarstvo 2012, III simpozijum sa međunarodnim učešćem, 07-10 maja, Zlatibor, 238-241 str.
7. Đukić, D., **Trivan, J.**, 2005, Geotehnički aspekti pojave nestabilnosti eksploatacionih komora u rudniku kamene soli “Tušanj”, Stručni skup nacionalnog značaja, Rudarstvo-Geotehnika u funkciji zaštite okoline, decembar, Tuzla, 133-143 str.
8. Ivković, M., Tošić, D., **Trivan, J.**, 2007, Uticaj sistema podzemne eksploatacije ležišta uglja na degradaciju površine terena, Zbornik radova sa skupa Ekološka istina sa međunarodnim učešćem, 27-28 maj, Sokobanja, 106-110 str.
9. Ivković, M., Tošić, D., **Trivan, J.**, 2007, Specifični uticaj sistema eksploatacije ležišta uglja na degradaciju površine terena, Stručni skup Nove tehnologije i dostignuća u rudarstvu i geologiji,oktobar, Trebinje, 8-15 str.
10. Đukić, D., **Trivan, J.**, 2007, Problemi zaštite dubokih temeljnih iskopa i okolnih objekata u urbanim uslovima, Stručni skup Nove tehnologije i dostignuća u rudarstvu i geologiji,oktobar, Trebinje, 258-262 str.

11. Ivković, M., Tošić, D., Trivan, J., 2009, Ispitivanje svojstva zemljišta odlagališta jalovine rudnika Soko u cilju njegove rekultivacije, Zbornik radova sa Naučno-stručnog skupa Ekološka istina, 31 maj-01 jun, Kladovo, 297-299 str.
12. Ivković, M., Trivan, J., Tošić, D., 2010, Istraživanje metanonosnosti i metanskih uslova u podzemnim rudnicima uglja, Zbornik radova sa naučno-stručnog skupa Rudarstvo u budućnosti Republike Srpske, 12-13 maj, Prijedor, 59-65 str.
13. Malbašić, V., Stojanović, L., Kovačević, Ž., Trivan, J., 2012, Ekonomski elementi optimizacije tehnološke faze otkopavanja i transporta jalovine na površinskom kopu "Buvač", ARHIV ZA TEHNIČKE NAUKE, UDC: 622.272:622.3(497.6 Buvač, DOI: 10.5825/afts.2012.0406.027M, ISSN: 1840-4855, Vol.4, No.6, mart, 27-36 str.
14. Trivan, J., 2012, Analiza uticajnih faktora kod izbora tehnološkog procesa podzemnog otkopavanja ugljenih slojeva, ARHIV ZA TEHNIČKE NAUKE, Vol. 4, No.6, mart, 43-49 str.
15. Majstorović, S., Malbašić, V., Trivan, J., Figun, Lj., Čelebić, M., 2013, Aspekti bezbjednosti i zaštite životne i radne sredine prilikom upotrebe anfo eksploziva u rudniku "Sase" srebrenica, RUDARSKI RADOVI, YU ISSN:1451-0162, UDK:65.015:519,21:330,322(0,45)=861, doi:105937/rudrad 1301103S No.2-3/2013, februar, 81-93 str.
16. Tošić, D., Majstorović, V., Malbašić, V., Trivan J., 2016, Uticaj primjene prednapregnutih sidara na razvoj deformacija stijenske mase prostorije otvaranja u rudniku sa podzemnom eksploatacijom, Zbornik radova sa II Rudarsko-geološkog foruma, Stanje i pravci razvoja rudarstva i geologije u Republici Srpskoj, 15-17 jun, Prijedor, 144-153 str.
17. Figun, Lj., Cvjetić, A., Trivan, J., 2016, Mogućnost upravljanja bukomna površinskom kopu "Buvač", Zbornik radova sa II Rudarsko-geološkog foruma, Stanje i pravci razvoja rudarstva i geologije u Republici Srpskoj, 15-17 jun, Prijedor, 395-404 str.
18. Trivan, J., Čebašek, V., Kostić, S., Gojković, N., 2016, Verifikacija prijedloga sanacije kosina površinskog kopa uglja "Bogutovo selo"-Ugljevik, republika Srpska, XV Simpozijum iz inženjerske geologije i geotehničke, naučni skup sa međunarodnim učešćem, septembar, Beograd, 483-497 str.

**УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ**  
**ФАКУЛТЕТ:** Рударски



## ИЗВЈЕШТАЈ *о оцјени урађене докторске дисертације*

### I ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ

На основу члана 61. и 141. Закона о високом образовању („Службени Гласник РС“ број: 67/20), члана 54. Статута Универзитета у Бањој Луци, те члана 21. Статута Рударског факултета Универзитета у Бањој Луци, Научно – наставно вијеће Рударског факултета је на 94. сједници одржаној дана 15.10.2021. године донијело Одлуку број: 21/3.652/21 којом је именована комисија за преглед, оцјену и одбрану урађене докторске дисертације кандидата mr Јелене Триван под називом: „Комплексно изучавање отпора копања за примјену БТО система у условима чврстих стијена на површинским коповима“ у саставу:

1. др Небојша Гојковић, редовни професор, Рударско – геолошки факултет Београд, Универзитет у Београду, ужа научна област Механика стијена – предсједник;
2. др Драган Игњатовић, редовни професор, Рударско – геолошки факултет Београд, Универзитет у Београду, ужа научна област Механизација у рударству и енергетици – члан;
3. др Дражана Тошић, доцент, Рударски факултет, Универзитет у Бањој Луци, ужа научна област Подземна експлоатација минералних сировина – члан

Комисија је у предложеном року прегледала и оцијенила докторску дисертацију кандидата mr Јелене Триван под називом „Комплексно изучавање отпора копања за примјену БТО система у условима чврстих стијена на површинским коповима“, те у складу са важећим универзитетским правилницима и прописима, Научно – наставном вијећу Рударског факултета Универзитета у Бањој Луци и Сенату Универзитета у Бањој Луци подноси извјештај.

- 1) Навести датум и орган који је именовао комисију;
- 2) Навести састав комисије са назнаком имена и презимена сваког члана, научно-наставног звања, назива у же научне области за коју је изабран у звање и назива универзитета/факултета/института на којем је члан комисије запослен.

### II ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

Јелена (Вукашин) Триван, рођена је 25.08.1978. године у Дрвару. Основну школу је завршила у Босанском Грахову, а гимназију у Босанском Грахову и Приједору. На Рударском одсјеку у Приједору, Технолошког факултета Бања Лука, Универзитет Бања Лука, дипломирала је на тему „Стање стабилности насуте земљане бране „Међећа“ Рудник „Омарска“ РЖР „Љубија“ Приједор“, 16.09.2004. године.

Постдипломске студије је уписала 2005. године на Рударско – геолошком факултету Универзитет у Београду, Рударски одсјек, научно подручје Механика стијена, смјер

Механика стијена, и магистрирала са темом „Компаративна анализа стабилности косина и њихова санација на примјеру површинског копа угља „Богутово село“ – Угљевик, Република Српска”, 05.04.2013. године и стекла звање магистар техничких наука из области рударства.

Процедуру пријаве докторске дисертације кандидат је започео 2016. године. Одлуком Наставно-научног Вијећа Рударског факултета Универзитета у Бањој Луци број: 21/3.274/16 од дана 02.09.2016. године именована је Комисија за оцјену подобности теме „ Комплексно изучавање отпора копања за примјену БТО система у условима чврстих стијена на површинским коповима“ и кандидата мр Јелене Триван. На 57. редовној сједници, одржаној дана 18.05.2017. године, Наставно-научно Вијеће Рударског факултета је донијело Одлуку о усвајању измјењеног извјештаја комисије о оцјени подобности теме и кандидата за израду докторске дисертације кандидата мр Јелене Триван. За ментора при изради дисертације именован је др Небојша Гојковић, редовни професор, а за коментатора др Срђан Костић, ванредни професор. На Сенату Универзитета у Бањој Луци од 28.10.2021. године одлуком број: 02/04-3.2453-53/21 именује се за ментора др Срђан Костић, ванредни професор уместо др Небојше Гојковића, редовног професора.

Мр Јелена Триван је од тренутка пријаве докторске дисертације аутор и коаутор радова из области подземне и површинске експлоатације минералних сировина.

- 1) Име, име једног родитеља, презиме;
- 2) Датум рођења, општина, држава;
- 3) Назив универзитета и факултета и назив студијског програма академских студија II циклуса, односно послиједипломских магистарских студија и стечено стручно/научно звање;
- 4) Факултет, назив магистарске тезе, научна област и датум одбране магистарског рада;
- 5) Научна област из које је стечено научно звање магистра наука/академско звање мастера;
- 6) Година уписа на докторске студије и назив студијског програма.

### III УВОДНИ ДИО ОЦЈЕНЕ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Сенат Универзитета у Бањој Луци је дана 25.05.2017. године донио Одлуку број: 02/04-3.1466-70/17 којом се даје сагласност на Извјештај о оцјени подобности теме, кандидата и ментора за израду докторске дисертације на Рударском факултету докторанта мр Јелене Триван под насловом „ Комплексно изучавање отпора копања за примјену БТО система у условима чврстих стијена на површинским коповима“ Докторска дисертација кандидата мр Јелене Триван је написана латиничним писом (Times New Roman, величина слова 12, проред 1,5 и формат А4). Дисертација је написана јасно и језички исправно на 149 (149) страна писаног текста. Докторска дисертација садржи 64 табеле, 31 слику и 4 прилога. У дисертацији је кориштено 38 литературних извора.

Садржај докторске дисертације представљен је следећим поглављима:

1.УВОД.....	1
2. ПРЕГЛЕД РЕЗУЛТАТА ДОСАДАШЊИХ ИСТРАЖИВАЊА.....	8
3. МЕТОДОЛОГИЈА ИСТРАЖИВАЊА.....	24
3.1 Теренска - ватметарска метода.....	26
3.1.1. Одређивање специфичног отпора на копање помоћу ватметарске методе на ПК „Тамнова-источно поље“.....	28
3.2 Лабораторијска метода клина (метода Оренстеин & Коппел, тзв. О&К метода).....	31
3.3 Лабораторијско одређивање резне силе методом резног клатна типа „Ш“.....	32
3.4 Математичко-статистичка анализа.....	34
3.4.1 Регресијска анализа.....	34
3.4.2 Анализа варијансе .....	40

3.4.3. Двофакторски модел анализе варијансе .....	43
<b>4. ОПШТИ ПОЈМОВИ.....</b>	<b>46</b>
4.1. Роторни багер.....	46
4.1.1 Класификација роторних багера.....	46
4.1.2 Конструктивни дијелови роторног багера.....	48
4.1.3 Технологија рада роторног багера.....	51
4.1.4. Капацитет роторних багера.....	52
4.2. Транспортна опрема континуалног дејства.....	54
4.3. Одлагачи.....	55
4.3.1. Типови одлагача.....	57
4.4. Опште о отпору копања.....	59
4.4.1. Укупни отпор материјала на копање.....	59
4.4.2. Специфични отпор материјала на копање.....	61
<b>5. УПОТРЕБА БТО СИСТЕМА НА ПОВРШИНСКИМ КОПОВИМА У РЕПУБЛИЦИ СРПСКОЈ.....</b>	<b>62</b>
5.1. Технологија система експлоатације на површинском копу Гацко.....	62
5.2. Технологија система експлоатације на површинском копу Станари.....	67
<b>6. РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА.....</b>	<b>70</b>
6.1. Резултати теренских истраживања.....	70
6.1.1. Кратак преглед технологије експлоатације угља на одабраним локацијама.....	71
6.1.1.1. Рудник подводне експлоатације угља „Ковин“.....	71
6.1.1.2. Рудник површинске експлоатације угља „Турија-Бановићи“.....	72
6.1.1.3. Рудник површинске експлоатације угља „Тамнава - источно Поље“.....	72
6.1.2. Теренска мјерења отпора на копање.....	74
6.2. Резултати лабораторијских истраживања.....	80
6.2.1. Лабораторијска истраживања отпора резања на површинском копу Ковин.....	81
6.2.2. Лабораторијска испитивања отпора резања на површинском копу „Турија Бановићи“.....	83
6.2.3. Лабораторијска испитивања отпора резања на површинском копу „Тамнава – Источно поље“.....	86
6.3. Анализа утицаја геомеханичких својстава на отпор на копање.....	87
6.3.1. Формирање модела на ПК „Ковин“.....	87
6.3.2. Формирање модела на површинском копу „Турија - Бановићи“.....	89
6.3.3. Формирање модела на површинском копу „Тамнава – Источно поље“.....	94
6.3.3.1. Нови зуби багера.....	95
6.3.3.2. Зуби багера послије 250 сати рада .....	100
<b>7. ЗАКЉУЧАК.....</b>	<b>112</b>
7.1. Општи преглед.....	112
7.2. Чврсте стијенске масе.....	113
7.3. Слабо везане и невезане стијенске масе.....	113
7.4. Угљ.....	115
7.5. Оцења научног доприноса резултата.....	115
7.6. Оцјена могућности примјене у пракси и значаја за рад на површинским коповима.....	115
7.7. Приједлог могућег правца даљих истраживања.....	116
<b>8. ЛИТЕРАТУРА.....</b>	<b>117</b>
<b>9.ПРИЛОЗИ</b>	

На почетку дисертације налази се 17 страница које нису нумерисане, а на којима се налазе наслов, резиме на српском и енглеском језику, попис табела и слика, садржај, те захвалница приликом израде докторске дисертације. На крају дисертације се налази 4 стране које нису нумерисане, а на којима се налази биографија аутора као и

три изјаве према Правилнику о садржају, изгледу и дигиталном репозиторијуму докторских дисертација на Универзитету у Бањој Луци.

- 1) Наслов докторске дисертације;
- 2) Вријеме и орган који је прихватио тему докторске дисертације
- 3) Садржај докторске дисертације са страничењем;
- 4) Истачи основне податке о докторској дисертацији: обим, број табела, слика, шема, графика, број цитиране литературе и навести поглавља.

#### IV УВОД И ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ

Одређивање отпора стијенске масе према копању представља један од најважнијих задатака при геомеханичким истраживањима на површинским коповима. Различите врсте стијенских маса пружају различите отпоре копању, што зависи од субјективних и објективних чинилаца. Субјективни чиниоци условљени су самим петролошким, физичко-механичким и техничко-технолошким својствима стијенског масива. Од петролошких својстава највећи утицај на отпор стијена према копању има минерални састав, структура и текстура стијенске масе, и врста везива код посредно везаних стијена. Очекивано је да стијене са минералима веће тврдоће по Мосовој скали (оливини, ортокласи, и др.), који су свежи (нераспаднути) пружају веће отпоре копању. Такође, магматске стијене са зраштом структуром и масивном текстуром отпорније су према копању у односу на магматске стијене порфирске структуре и планпаралелне текстуре, или у односу на услојене посредно везане седиментне стијене (нпр. пјешчари). Од механичких својстава највећи утицај имају чврстоћа стијенске масе на притисак, затезање и смицање, док су од техничко-технолошких својстава примарни фактори тврдоћа и жилавост. Сва ова својства стијенских маса могу да се утврде лабораторијски, испитивањем на узорцима. Међутим, на отпор стијенске масе према копању значајан утицај имају и својства стијенског масива ин ситу: испуцалост, природна напрегнутост и степен површинског распадања. Квантификација утицаја ових фактора врши се на основу теренских испитивања, детаљним геотехничким картирањем терена – косина и примјеном одговарајућих класификација терена као радне средине. Најважнији објективни чиниоци који утичу на отпор стијенске масе према копању јесу карактеристике алата и технологија копања.

Предмет дисертације је истраживање везано за физичко-механичке карактеристике стијенске масе, укључујући запреминску тежину, гранулометријски састав, параметре отпорности стијенске масе на смицање (кохезију и угао унутрашњег трења), и чврстоћу на притисак. Све наведене физичко-механичке карактеристике стијенске масе имају статистички значајан утицај на отпор према копању, изражен преко сile резања, коефицијента отпора према резању и копању и потрошњи енергије.

Циљ истраживања спроведених у оквиру дисертације је био да се установе статистички значајни утицаји поједињих параметара геомеханичких својстава стијенских маса на отпоре копања. При томе, основна хипотеза од које се кренуло је да процес резања стијенских маса које граде откривку утиче на промјену напонско-деформацијског понашања стијенских маса, а што је директно одређено њиховим физичко-механичким својствима.

Посебно треба истачи да је предметним истраживањима обухваћена много шира област од оне која је била предвиђена самом темом дисертације. Премда је својом темом, дисертација везана за површинске копове у условима чврстих стијена, поред изучавања чврстих стијенских маса, на примјеру површинског копа „Турија-

Бановићи”, у оквиру дисертације вршена су истраживања везе отпора копања, рада багера и геомеханичким карактеристика угља (рудник подземне експлоатације „Ковин“) и невезаних и слабо везаних стијенских маса у откривке (површински коп „Тамнава Источно поље“). На тај начин, предметном дисертацијом обухваћени су сви могући случајеви појаве стијенских маса на површинским коповима, чиме дисертација добија свеобухватнији значај.

Примјењеном методологијом су обухваћени искусствени подаци и досадашња истраживања, савремени поступци и методе истраживања у овој области, а математички модели су развијени као нелинеарне функције карактеристика отпора копању од физичко-механичких карактеристика стијенске масе.

#### Литература:

- [1] Amar, P., Vemavarapu, M., Ramachandra, M.S., Bahadur, S.K., 2013. Rock excavation using surface miners: An overview of some design and operational aspects. International Journal of Mining Science and Technology, 23, 33–40 str.
- [2] Banković, M. 2018. Optimizacija utovarnotransportnih sistema u funkciji planiranja površinskog kopa. Doktorska disertacija. Univerzitet u Beogradu Rudarsko-geološki fakultet, 205 str.
- [3] Bolukbassi, N., Koncagul, O., Gunhan Passamehmetoglu, A. 1991. Correlation of rock properties and cutting resistances in assessment of diggability with bucket-wheel excavators. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology, 100, 189-193. str.
- [4] Bošković, S. 2016. Optimizacija parametara reza rotornog bagera pri otkopavanju materijala sa povećanom čvrstoćom. Doktorska disertacija. Univerzitet u Beogradu Rudarsko-geološki fakultet, 173 str.
- [5] Coleman, J.R., Fitzhardinge, C.F.R., 1979. Geotechnology of excavation equipment selection with particular emphasis on bucket wheel excavators, Proc. Int. Conf. on Mining and Machinery, Inst. Engineers, Australia, Brisbane, Australia, 139-146.
- [6] Dey, K. Ghose, A.K. 2008. Predicting "cuttability" with surface miners - A rockmass classification approach. Journal of Mines, Metals and Fuels, 56, 85-91 str.
- [7] Dey, K., Ghose, A.K., 2011. Review of cuttability indices and a new rockmass classification approach for selection of surface miners. Rock Mechanics and Rock Engineering, 44, 601-611 str.
- [8] Dizdar, D. 2006. Kvantitativne metode. Kineziološki fakultet Sveučilišta u Zagrebu, udžbenik, 356 str.
- [9] Домбровский, Н. Г. 1972. Многоковшовые экскаваторы. Конструкция, теория и расчет. М., «Машиностроение», 1972. — 432 с. — 15000 экз.
- [10] Durst, W., Vogt, W., 1988. Bucket wheel excavator. Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Germany, pp. 375.
- [11] Đukić, D. 1984. Geomehanika u površinskoj eksploraciji. Institut za rudarska istraživanja Tuzla IGTRO „Univerzal“ OOУR Izdavačka djelatnost Tuzla, udžbenik, 536 str.
- [12] Energetski bilans Republike Srpske plan za 2019. Godinu, 2019, Republika Srpska

Vlada

- [13] Energetski bilans Republike Srpske plan za 2020. godinu, 2020, Republika Srpska Vlada
- [14] Ignjatović, D. 1993. Izbor metode za određivanje otpora na kopanje rotornim bagerima u uslovima površinskim kopovima lignita Kolubate. Magistarski rad. Univerzitet u Beogradu Rudarsko-geološki fakultet, 136 str.
- [15] Inal, A. 1984. The development of a diggability index for bucket wheel excavators. The University of New South Wales School of Mining Engineering Faculty of Applied Science, Master work, pp 167.
- [16] Knežević, K. 2017. Analiza varijance i dizajn eksperimenata. Poslijediplomski seminar, Statističke metode za dubinsku obradu podataka. Sveučilište u Zagrebu. Fakultet elektrotehnike i računarstva, 47 str.
- [17] Kostić, S., Trivan, J., 2021. Optimization of bucket wheel overburden excavation: case study "Tamnava Eastern field" open-pit coal mine (Serbia), Archives of Mining Sciences (accepted for publication)
- [18] Kostić, S., Trivan, J., Gojkovoć, N., 2018. Estimation of coal cutting force based on the impact of geomechanical factors, EUROCK2018: Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses, Volume 2, Saint Petersburg, Russia, Editor: Vladimir Litvinenko, CRC Press, Tazlor and Francis Group, ISBN 978-1-138-61736-0, 1229-1234 str.
- [19] Kun, J. 1981. Površinska eksploatacija lignita. Rudarski Institut Zemun - Beograd, 331 str.
- [20] Langham-Williams, J., Hagan, P. 2014. An assessment of the correlation between the strength and cuttability of rock. Proceedings of the 14th Coal Operators' Conference, University of Wollongong, The Australian Institute of Mining and Metallurgy & Mine Managers Association of Australia, 186-192.
- [21] Malbašić, V., 2010. Rudarska mehanizacija. Univerzitet u Banjoj Luci Rudarski fakultet Prijedor, skripta za studente, 254 str.
- [22] Malbašić, V., 2021. Strategija upravljanja i korišćenja mineralnih sirovina Republike Srpske u eri globalizacije, Arhiv za tehničke nauke, Bjeljina 25, 31 – 43 str.
- [23] Paunović, N., Karličić, N., 2016. Revitalizacija rotornog bagera SRs 1300 24/2.5 pogonski br. 10 – polje „D“ Rudarski basen Kolubara, Zbornik radova sa 29. Međunarodnog kongresa o procesnoj industriji – Procesing'16, ISBN-978-86-8105-81-6, Beograd, 137-147 str.
- [24] Pavlović, V., Ignjatović, D., 2012. Selektivna površinska eksploatacije uglja kontinualnim sistemima, Univerzitet u Beogradu Rudarsko-geološki fakultet, udžbenik, 450 str.
- [25] Petrović, B., 2016. Optimizacija dužine strele rotornih bagera u funkciji stabilnosti kosina i efektivnosti rada na površinskim kopovima lignita srbije. Doktorska disertacija. Univerzitet u Beogradu Rudarsko-geološki fakultet, 172 str.
- [26] Popović, N. 1984. Naučne osnove projektovanja površinskih kopova. NIŠRO

Oslobođenje Sarajevo, 971 str.

- [27] Razz, V. 1999. Assesment of the Digging Force and optimum selection of the and Operational parameters of Bucket Wheel Excavators for mining of Overburden Coal and partings. Braunkohle, Krupp Fördertechnik GmbH: Essen, Germany, " referenca preuzeta iz Bošković, 2016., Optimizacija parametara reza rotornog bagera pri otkopavanju materijala sa povećanom čvrstoćom. Doktorska disertacija. Univerzitet u Beogradu Rudarsko-geološki fakultet, 173 str."
- [28] Scheffler, D. 1997. Laboratory and in-situ methods of measurement as the basis for predicting cutting resistances in mining machines. ZKG International 50 (7), 347-352. str.
- [29] Simić, D., 2012. Elaborat o Klasifikaciji i kategorizaciji rezervi uglja u ležištu „Raškovac“ kod Doboja, stanje na dan 31.05.2012., Jantar group
- [30] Stjepanović, S., 2021. Dopunski rudarski projekat površinskog kopa Gacko-Centralno Polje za kapacitet od  $2,3 \cdot 10^6$  tona rovnog uglja, IRM-Bor d.o.o. Zvornik,
- [31] Stojanović, C., Borović, B., 2019. Regionalna industrija uglja u uslovima energetske tranzicije, 9 Međunarodna konferencija Zlatibor, Ugalj 2019, Zbornik radova, Jugoslovenski komitet za površinsku eksploataciju, 354 str., 281-291 str.
- [32] Su, O., Akcin, N.A., 2005. Investigation of the relationships between Cerchar hardness index and some index properties of coal. Proceedings of the 19th International Mining Congress and fair of Turkey, IMCET2005, 1-5 str.
- [33] Szepietowski, W. 1991. Klasyfikacia urabialosci skal nadkładowich Wielonaczyniowymi koparkami kolowymi. Gornictwo odkrywkowe XXXIII, I " referenca preuzeta iz Bošković, 2016., Optimizacija parametara reza rotornog bagera pri otkopavanju materijala sa povećanom čvrstoćom. Doktorska disertacija. Univerzitet u Beogradu Rudarsko-geološki fakultet, 173 str."
- [34] Šalović, M. 1987. Kompleksno izučavanje otpora kopanju za izbor bagera I primjenu BTO kompleksa u uslovima čvrstih stijena na površinskim kopovima, Knjiga 1, Institut za rudarska istraživanja, Naučno istraživački projekt Tuzla. 227 str.
- [35] Šekulić, S., Sekulić, Z., 2019. Proizvodnja električne energije, udžbenik za drugi razred srednje škole, obrazovani program elektrotehničar energetike, zavod za udžbenike I nastavna sredstva Podgorica, 236 str.
- [36] Trivan, J., Kostić, S., Šalović, M., 2021. Calibration of excavator cutting force and energy consumption considering the impact of the overburden mechanical properties, VIII Balkanski rudarski kongres, Beograd 2020, Rudarski institut Beograd, (rad prihvaćen ali nije publikovan).
- [37] Vetrov, J. A. 1965. Rasčeti sil rezanja i kopanja gruntov. Izdatelstvo kievskogo universiteta Moskva, " referenca preuzeta iz Bošković, 2016., Optimizacija parametara reza rotornog bagera pri otkopavanju materijala sa povećanom čvrstoćom. Doktorska disertacija. Univerzitet u Beogradu Rudarsko-geološki fakultet, 173 str."
- [38] Wojkiewitch, H. 1963. Der specifische Grabwiderstand in Abhangigkeit von der Spanfläche und der Spanform bei verschiedenen, Bodenarten, " referenca preuzeta iz Bošković, 2016., Optimizacija parametara reza rotornog bagera pri otkopavanju materijala sa povećanom čvrstoćom. Doktorska disertacija. Univerzitet u Beogradu Rudarsko-

geološki fakultet, 173 str.“

[38] Wojkiewitch, H. 1974. Wplw radzaju skrawania na wybor jednostokowych oporow urabania, Wroclaw, “ referencia preuzeta iz Bošković, 2016., Optimizacija parametara reza rotornog bagera pri otkopavanju materijala sa povećanom čvrstoćom. Doktorska disertacija. Univerzitet u Beogradu Rudarsko-geološki fakultet, 173 str.“

Игњатовић Д. [Игњатовић, 1993] се у магистарској тези бавио избором методе за одређивање отпора на копање роторним багерима у условима површинских копова лигнита Колубаре. Код избора методологије посебан акценат је ставио на усклађивање силе копања са отпорима на копање стијенског материјала, при чему је указао на значај правилног избора снаге погона ротора од чега зависи капацитет роторног багера и његова цијена. Такође, истраживао је утицај квалитета и облика зuba и утицај технолошких параметара одредска, на вриједности специфичног отпора на копање. За одређивање специфичног отпора материјала на копање коришћене су двије теренске (ватметарска и пенетрометријска), двије лабораторијске (разарање узорка клином и разарање узорка једноаксијалним притиском) и двије корелационе методе које почивају на судносу између специфичног отпора на копање са једне стране и кохезије, односно процентуалног удјела прашинастих фракција у материјалу и влажности материјала.

Scheffler [Scheffler, 1997] је анализирао могућност предвиђања отпора резања на багерима са зубима под утицајем параметара структуре стијене.

Razz, V. [из Бошковић, 2016, према Razz., 1999] је анализирао утицај радне средине, конструктивних и технолошких параметара на резну силу користећи методологију теренског испитивања материјала и оригинални софтвер за оптимизацију технолошких параметара рада и геометрије зuba.

Su i Akcin, [Su i Akcin, 2005], су предложили однос између Шоровог индекса тврдоће и неколико својстава угља: једноаксијалне чврстоће на притисак, Шоровог индекса тврдоће, индекс динамичке чврстоће и вриједности продирања конуса. Релације између свих параметара дате су као једноставне линеарне функције, засноване на резултатима испитивања десет узорака угља.

Други приступ у изучавању отпорности стијена према копању подразумијева дефинисање посебних класификација терена као радне средине, односно дефинисање квалитативних карактеристика стијенске масе преко посебних нумеричких показатеља, односно индекса, узимајући у обзир једноаксијалну чврстоћу на притисак, брзину простирања сеизмичких таласа, индекс квалитета језгра, модул еластичности, абразивности, својства пукотина, попут њихове храпавости, степена алтерације, броја фамилија, и др. [Dey, i Ghose, 2008] [Dey i Ghose, 2011].

Dey, i Ghose, [2011] предложили су нови систем класификације стијенске масе за површинску експлоатацију, који се базира на зависности индекса резивости од тачкастог оптерећења, степена испуцалости стијене, абразивности, правца резања у односу на правац главне пукотине и снаге механизације.

Amar и др. [Amar et al, 2013], који уводе индекс резивости, као функцију више нумеричких показатеља придржених квалитативним својствима стијенске масе (процјене индекса тачкасте чврстоће, процјене абразивности, запреминског кофицијента испуцалости, утицаја оријентације сјечива у односу на положај главних дисконтинуитета у стијенској маси и процјене примјењене снаге механизације). Такав приступ је од значаја у првим, прелиминарним процјенама отпорности стијенске масе према копању, али то захтијева додатне методе процјене у каснијим, детаљнијим фазама одређивања карактеристика стијенске масе ради

адекватног избора механизације. С друге стране, такав приступ подразумева значајан утицај субјективне процјене, у смислу одређивања карактеристика пукотина, што, код финалног модела, може значајно утицати на његову поузданост и тачност.

Langham-Williams и Hagan [Langham-Williams i Hagan,2014] су предложили неке једноставне корелације између једноаксијалне чврстоће на притисак неколико врста стијена (пјешчар, шљунак, угља, конгломерати и ињекциона маса) и њихових својстава резања (специфична енергија, сила резања и нормална сила). Резултати добијени анализом 44 узорка показали су високу вриједност коефицијента детерминације ( $\geq 0,63$ ).

Спроведена истраживања су дефинисала једну методологију која се може користити при избору и оптималном коришћењу роторних багера на површинским коповима у условима радне средине са повећаним отпором копању чији резултат треба да буде постизање позитивних економских ефеката у производњи.

Научни допринос дисертације огледа се у формирању оригиналних модела за прогнозу отпора копању и рада роторног багера (потрошње струје на багеру и брзине багера), у функцији основних геомеханичких карактеристика стијенске масе. Колико је аутору познато, резултати представљени у овој дисертацији представљају прве и оригиналне резултате на пољу успостављања функционалне зависности између геомеханичких карактеристика стијенске масе и отпора копању и карактеристика рада багера. Овако развијени модели могу наћи своју директну примјену на површинским коповима који су анализирани у предметној дисертацији. Осим тога, на другим површинским коповима, спроведеним истраживањем је дефинисана методологија креирања прогнозних модела, која може послужити да се коришћењем података са конкретних копова формирају модели који ће бити прилагођени специфичностима услова рада на различитим површинским коповима.

- 1) Укратко истаћи разлог због којих су истраживања предузета и представити проблем, предмет, циљеве и хипотезе;
- 2) На основу прегледа литературе сажето приказати резултате претходних истраживања у вези проблема који је истраживан (водити рачуна да обухвата најновија и најзначајнија сазнања из те области код нас и у свијету);
- 3) Навести допринос тезе у рјешавању изучаваног предмета истраживања;
- 4) Навести очекиване научне и прагматичне доприносе дисертације.

## V МАТЕРИЈАЛ И МЕТОД РАДА

Имајући у виду комплексну проблематику изучавања отпора копања, примјењени методолошки принцип реализације планираних активности у оквиру дисертације подразумјевају је фазност у поступку изучавања, истраживања и испитивања, и то кроз четири фазе:

- 1) У првој фази истраживања извршена је анализа постојеће литературе и фондовске документације. У овој фази главна пажња је била усмјерена на анализу резултата студија претходних истраживања у вези са изучавањем отпора копања. Такође, приступило се анализи резултата истраживања објављених у радовима у референтним међународним часописима. На крају ове фазе, извршио се одабир погодних локација (површински кпови „Ковин“, „Турија“ и „Тамнава источно поље“) за формирање модела, у зависности од специфичности геомеханичких својстава терена.
- 2) У другој фази истраживања извршена су теренска истраживања, односно мјерења отпора копању и потрошњи енергије багера ватметарском методом, при чему су за анализу кориштени и подаци регистровани на терену из претходних истраживања, а све у циљу добијања што бројнијег узорка за поуздану статистичку анализу.

- 3) У трећој фази истраживања приступило се лабораторијском испитивању отпора копања на узорцима стјенских маса, при чему су и у овој фази прикупљани и резултати претходних лабораторијских испитивања, ради добијања што већег узорка за валидну статистичку анализу.
- 4) У четвртој фази истраживања је извршена обрада добијених и претходних теренских података и лабораторијских резултата, на основу чега се приступило формирању прогнозних модела. Обрада података подразумјевала је статистичку анализу резултата истраживања и формирање математичких модела са одређивањем грешке процјене и интервалима поузданости. Формирање модела је извршено примјеном савремених математичких метода вишеструке линеарне регресије. Модели су развијени као нелинеарне функције карактеристика отпора копању од физичко-механичких карактеристика стијенске масе. Поузданост формiranог модела проверена је одређивањем коефицијента детерминације и средње квадратне грешке, као испитивањем расподјеле и аутокорелације резидуала. Изведена математичко-статистичка анализа података истраживања спроведена је адекватно, и омогућила формирање поузданих модела прогнозе отпора копања стијенске масе.

Примјењене методе су адекватне, савремене и у складу са свјетским нивоима и достигнућима науке и праксе у предметној области.

Истраживања су спроведена на три различите локације – пилот подручја, са различитом технологијом експлоатације минералних сировина:

- Истраживања на првој локацији - рудник угља са подводном експлоатацијом „Ковин“ обухватила су анализу отпорности на копање угља, тако што је на узорцима угља одређивана сила отпора на копање односно испитивање линијског и површинског отпора резања у воденој средини под различitim хидростатичким притиском;
- На другој локацији истраживања - рудник мрког угља са површинском експлоатацијом „Турија-Бановићи“ успостављена је корелација између параметара стијенске масе и отпора копања односно механичких својстава стијенске масе, с једне стране, укључујући: чврстоћу на притисак и затезање, запреминску тежину, кохезију и угао унутрашњег трења и максималне силе резања, максималне отпорности на резање и максималне потрошње струје, с друге стране;
- На трећој локацији истраживања – површински коп угља „Тамнава Источно поље“ извршена је анализа отпора на копање откривке на брзину багера  $V_b$  и максималну потрошњу струје багера  $I_{max}$  за нове зубе и зубе багера након најмање 250 сати рада на багеру SchRsc 900 25/6.

Реализованим истраживањима у оквиру докторске дисертације успостављена је физички могућа и статистички значајна корелација између геомеханичких карактеристика стијенских маса, отпора копању и карактеристика рада роторног багера, за следеће случајеве:

- 1) На узорцима чврстих стијенских маса из кровине, у лабораторијским условима,
- 2) На узорцима невезаних и слабо везаних стијенских маса из откривке у теренским и лабораторијским условима,
- 3) На узорцима угља, у лабораторијским условима.

Геомеханичке карактеристике стијенских маса које су изучаване су:

- за узорке чврстих стијенских маса из кровине: чврстоћа на притисак и затезање, запреминска тежина, кохезија и угао унутрашњег трења,

- за узорке невезаних и слабо везаних стијенских маса из откривке: гранулометријски састав (проценат глине, прашине и пијеска), запреминска тежина и чврстоћа на смицање (кохезија и угао унутрашњег трења),
- за узорке угља: запреминска тежина, параметри чврстоће на смицање (угао унутрашњег трења и кохезија), чврстоћа на притисак.

Параметри физичко-механичких својстава стијенских маса који су испитивани у лабораторији, и који су касније анализирани математичко-статистичким методама представљају најчешће одређивање параметре откривке на површинским коповима, те је у потпуности оправдано тражити корелацију између наведених параметара стијенске масе и отпора копања.

Карактеристике отпора копању које су изучаване су: коефицијент отпора копању и резању и сила резања.

Карактеристике рада роторног багера које су изучаване су: брзина багера  $V_b$  и максимална потрошња струје багера  $I_{max}$  за нове зубе и зубе багера након најмање 250 сати рада на багеру.

Истраживање у оквиру предметне дисертације изведено је у потпуности у складу са планом истраживања, предвиђеним у оквиру пријаве теме докторске дисертације.

1) Објаснити материјал који је обрађиван, критеријуме који су узети у обзир за избор материјала;

2) Дати кратак увид у примењени метод истраживања при чemu је важно оцијенити сљедеће:

1. Да ли су примењене методе истраживања адекватне, довољно тачне и савремене, имајући у виду достигнућа на том пољу у свјетским нивоима;
2. Да ли је дошло до промјене у односу на план истраживања који је дат приликом пријаве докторске тезе, ако јесте зашто;
3. Да ли испитивани параметри дају довољно елемената или је требало испитивати још неке, за поуздано истраживање;
4. Да ли је статистичка обрада података адекватна.

## VI РЕЗУЛТАТИ И НАУЧНИ ДОПРИНОС ИСТРАЖИВАЊА

На површинском копу мрког угља "Турија" у бановићком угљоносном басену вршена је калибрација силе резања и потрошње струје багера на основу утицаја механичких својстава откривке. У ту сврху спроведена су теренска и лабораторијска мјерења. Прво су извршена теренска мјерења потрошње струје багера и силе резања, након чега је у лабораторији анализиран 21 узорак откривке (сиви лапорци). Лабораторијске анализе су изведене кориштењем метода са цилиндром, хидрауличном пресом, теста директног смицања и бразилског теста. Извршено истраживање је показало да и сила резања и потрошња струје багера зависе од запреминске тежине, чврстоће на притисак и кохезије, док угао унутрашњег трења и чврстоћа на затезање не показују статистички значајни утицај. Обезбеђена је статистички значајна повезаност потрошње струје багера и силе резања и механичких својстава откривке.

У случају површинског копа „Источно поље Тамнава“ у Србији анализа је извршена у циљу оптимизације процеса откопавања у односу на својства откривке у зависности од стања зуба, прије свега гранулометријског састава (проценат глине, прашине и пијеска), запреминске тежине и чврстоће на смицање (кохезија и угао трења), за два различита стања зуба багера: нови и употребљени након најмање 250 сати рада на багеру. Анализа је изведена примјеном приступа вишеструког линеарне регресије, уколико су својства откривке (максимална потрошња струје багера  $I_{max}$  и брзина багера  $V_b$ ) третирана као нелинеарне функције испитиваних својстава откривке. Као резултат, издвојена су статистички значајна геомеханичка својства откривке и детаљно је испитан њихов утицај на  $I_{max}$  и  $V_b$ .

Поред детаљне анализе статистички значајних фактора који утичу на максималну потрошњу струје багера и брзину багера, извршена анализа је дала и експлицитне математичке изразе у облику нелинеарне функције  $I_{max}$ -а (како за нове, тако и за похабане зубе) и  $V_b$  (само за нове зубе), и значајна својства откривке. Ови изрази омогућавају поуздана предвиђања  $I_{max}$ -а и  $V_b$ -а прије почетка откопавања, искључиво на основу својстава откривке, која омогућавају оптимизацију рада роторног багера.

Изведено истраживање у руднику Ковин је показало да запреминска тежина и чврстоћа на притисак немају статистички значајан утицај на силу резања, што се може објаснити њиховим уским интервалом добијених лабораторијских вриједности. Са друге стране, параметри чврстоће на смицање, односно угао унутрашњег трења има најзначајнији утицај на силу резања. И кохезија и угао унутрашњег трења имају квалитативно сличан ефекат на силу резања, али ефекат кохезије је израженији, тако да се за исти прираст кохезије јавља већи пораст силе резања. Треба напоменути да угао унутрашњег трења такође показује значајну двофакторску интеракцију са запреминском тежином и чврстоћом на притисак.

Поред утврђивања значајних геомеханичких параметара који утичу на силу резања, још један важан резултат представљеног истраживања је изведена једначина за процјену површинске сile резања, засновану на зависности од претходно утврђених статистички значајних фактора. Колико је аутору познато, ово је први пут да се таква корелација успоставља у поузданом аналитичком облику. Једначина 6.1. у општем случају даје поуздане резултате ( $R^2 = 0,84$ ,  $MSE = 10,2$  у поређењу са вриједностима добијеним у лабораторији), али не успјева да обухвати високе вриједности сile резања. Ово се може објаснити промјенљивим саставом узорака угља, где се очекује да ће узорци са мањим процентом ксилита показивати веће вриједности сile резања угља.

Из свега напријед наведеног недвосмислено се може закључити да је дисертација оригинални примјер успостављања корелације између отпора копању и карактеристика рада багера (кофицијент отпора копању и резању и сила резања, брзина багера  $V_b$  и максималне потрошње струје багера  $I_{max}$ ) у односу на више геомеханичких својстава откривке/угља (чврстоћа на притисак и затезање, запреминска тежина, кохезија и угао унутрашњег трења и максималне сile резања и гранулометријског састава), што до сад нико није покушао успоставити. Добијени резултати су јасно приказани, правилно, логично и јасно тумачени. Оригиналност резултата истраживања спроведених у предметној дисертацији доказан је презентовањем радова и саопштења у референтним часописима и на научно-стручним скуповима.

На основу резултата у дисертацији може се констатовати да се развијени модели могу директно примјенити на површинским коповима (на руднику „Ковин“, ПК „Тамнава-Источно поље, и ПК „Турије“). Модели који су кориштени у овој дисертацији могу се примјењивати и на другим површинским коповима на којима нису вршена истраживања, тако што ће се успоставити корелација отпора копању и карактеристика рада багера у односу на један или више геомеханичких својстава откривке/угља.

Циљ развоја модела је смањивање могућности хаварија односно ублажавање њиховог ефекта на вијек рада роторног багера, мање застоје у производњи, ефикаснију производњу и др.

Садашња истраживања могу се даље проширити у два правца. Прво, могу се симулирати стварни услови откопавања угља мјерењем сile резања угља за

различите вриједности притиска воде, пошто се у руднику Ковин врши подводна експлоатација угља. Друго, вршила би се теренска мјерења силе резања угља, тј. мјерење осцилације снаге роторног багера за различите величине одрезака. На тај начин добила би се комплетна слика отпорности угља, а на коју значајно утиче варијабилност геомеханичких параметара.

Први пут је успостављена повезаност потрошње енергије и силе резања и механичких карактеристика откривке у поузданом аналитичком облику за различите врсте стијенских маса које изграђују откривку. Истраживања су указала на статистички значајан ефекат угља унутрашњег трења, његов утицај на отпор резања и рад багера треба даље испитати за различита геомеханичка својства чврстих стијена. Даља истраживања када су упитању невезане и слабо везане стијене у откривци би требала да буду усмјерена на развој модела која укључују више својстава откривке (модул стишљивости, стање конзистенције, степен консолидације), како би се потврдио ефекат гранулометријског састава (проценат глинене/прашине) на  $I_{max}$  и  $V_b$ . Штавише, сличан приступ би се могао користити у случају откопавања чврстих стијена.

- 1) Укратко навести резултате до којих је кандидат дошао;
- 2) Оцијенити да ли су добијени резултати јасно приказани, правилно, логично и јасно тумачени, упоређујући са резултатима других аутора и да ли је кандидат при томе испољавао довољно критичности;
- 3) Посебно је важно истаћи до којих нових сазнања се дошло у истраживању, који је њихов теоријски и практични допринос, као и који нови истраживачки задаци се на основу њих могу утврдити или назирати.

## VII ЗАКЉУЧАК И ПРИЈЕДЛОГ

Докторска дисертација кандидата mr Јелене Триван по називом „Комплексно изучавање отпора копања за примјену БТО система у условима чврстих стијена на површинским коповима“ садржи све неопходне елементе које захтијева један научно-истраживачки рад. Дисертација је урађена у складу са савременим принципима и методологијом научно-истраживачког рада, те у складу са постављеном хипотезом коју је кандидат дао приликом пријаве дисертације. Сви елементи у дисертацији су изложени на јасан и коректан начин, са научним утемељењем. На основу прегледа и анализе докторске дисертације, Комисија сматра да дисертација mr Јелене Триван представља самосталан и оригиналан научни рад. Комисија констатује да је кандидат овладао методама научног рада, а проведена истраживања у дисертацији дају допринос науци и примјенљива су у пракси. Оригиналност резултата кандидаткиња је потврдила презентовањем радова из области дисертације на реномираним међународним научно-стручним скуповима, као и публиковањем рада у референтном међународном часопису. Шире посматрано, кандидаткиња је показала самосталност у научном раду кроз објављивање више научних радова у домаћим и иностраним часописима, и презентовањем саопштења из ужे научне области на релевантним домаћим и међународном научно-стручним скуповима.

На основу укупне оцјене докторске дисертације и свега изложеног у овом Извјештају, Комисија једногласно даје позитивну оцјену урађеној докторској дисертацији кандидата mr Јелене Триван под називом „Комплексно изучавање отпора копања за примјену БТО система у условима чврстих стијена на површинским коповима“ и предлаже Научно – наставном вијећу Рударског факултета и Сенату Универзитета у Бањој Луци да се докторска дисертација прихвати и кандидату одобри одбрана.

1) Навести најзначајније чињенице што тези даје научну вриједност, ако исте постоје дати

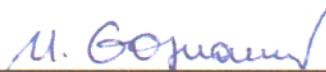
позитивну вриједност самој тези;

2) На основу укупне оцјене дисертације комисија предлаже:

- да се докторска дисертација прихвати, а кандидату одобри одбрана,
- да се докторска дисертација враћа кандидату на дораду (да се допуни или измијени) или
- да се докторска дисертација одбија.

### **ПОТПИС ЧЛАНОВА КОМИСИЈЕ**

Датум: 04.11.2021. године

1.   
др Небојша Гојковић, редовни професор,  
Рударско – геолошки факултет,  
Универзитет у Београду - предсједник
2.   
др Драган Игњатовић, редовни професор,  
Рударско – геолошки факултет,  
Универзитет у Београду - члан
3.   
др Дражана Тошић, ванредни професор,  
Рударски факултет у Приједору,  
Универзитет у Бањој Луци - члан

**ИЗДВОЈЕНО МИШЉЕЊЕ:** Члан комисије који не жели да потпише извјештај јер се не слаже са мишљењем већине чланова комисије, дужан је да унесе у извјештај образложение, односно разлог због којих не жели да потпише извјештај.

## Изјава 1

### ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем  
да је докторска дисертација

Наслов рада: **Комплексно изучавање отпора копања за примјену БТО система у условима чврстих стијена на површинским коповима**

Наслов рада на енглеском језику: **Complex study of excavation resistance for application of cross-pit spreader system in conditions of hard rock masses at surface mines**

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да докторска дисертација, у цјелини или у дијеловима, није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

У Бањој Луци/Приједор 01.11.2021. године

Потпис докторанта



## Изјава 2

### Изјава којом се овлашћује Универзитет у Бањој Луци да докторску дисертацију учини јавно доступном

Овлашћујем Универзитет у Бањој Луци да моју докторску дисертацију под насловом

### КОМПЛЕКСНО ИЗУЧАВАЊЕ ОТПОРА КОПАНЈА ЗА ПРИМЈЕНУ БТО СИСТЕМА У УСЛОВИМА ЧВРСТИХ СТИЈЕНА НА ПОВРШИНСКИМ КОПОВИМА

која је моје ауторско дјело, учини јавно доступном.

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

Моју докторску дисертацију похрањену у дигитални репозиторијум Универзитета у Бањој Луци могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (*Creative Commons*) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство – некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – дијелити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – дијелити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

У Бањој Луци/Приједор, 01.11.2021. године

Потпис докторанта



### **Изјава 3**

#### **Изјава о идентичности штампане и електронске верзије докторске дисертације**

Име и презиме аутора: Јелена Триван

Наслов рада: Комплексно изучавање отпора копања за примјену БТО система у условима  
чврстих стијена на површинским коповима

Ментор: др Срђан Костић, ванредни професор

Изјављујем да је штампана верзија моје докторске дисертације идентична електронској верзији  
коју сам предао/ла за дигитални репозиторијум Универзитета у Бањој Луци.

У Бањој Луци/Приједору, 01.11.2021. године

Потпис докторанта

