

UNIVERZITET U BEOGRADU
RUDARSKO-GEOLOŠKI FAKULTET

Saša D. Bošković

**OPTIMIZACIJA PARAMETARA REZA
ROTORNOG BAGERA PRI
OTKOPAVANJU MATERIJALA SA
POVEĆANOM ČVRSTOĆOM**

Doktorska disertacija

Beograd, 2016.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MINING AND GEOLOGY

Saša D. Bošković

**OPTIMIZATION OF BUCKET WHEEL
EXCAVATOR CUTTING PARAMETERS
AT MINING OF MATERIALS WITH
INCREASED STRENGTH**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2016

Mentor:

Prof. Dr Dragan Ignjatović, redovni profesor, Mehanizacija u rudarstvu i energetici,
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

Članovi komisije:

Dr Vladimir Čebašek, docent,
Mehanika stena,
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

Prof. Dr Taško Maneski, redovni profesor,
Otpornost konstrukcija
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

Datum odbrane:

OPTIMIZACIJA PARAMETARA REZA ROTORNOG BAGERA PRI OTKOPAVANJU MATERIJALA SA POVEĆANOM ČVRSTOĆOM

Rezime

Otkopavanje materijala rotornim bagerom je veoma složen fizičko-mehanički proces. Pokazatelji efektivnosti tog procesa zavise od velikog broja raznovrsnih činilaca od kojih se posebno mogu istaći: fizičko-mehaničke karakteristike materijala koji se otkopava, režim rada bagera i izbor tehnoloških parametara bloka, odreska i reza, geometrije vedrica i zuba itd. Poseban problem se javlja kod otkopavanja materijala povećane čvrstoće, što je čest slučaj na našim površinskim kopovima. Dimenzionisanje specifične sile kopanja bagera prema manjim masama izuzetno čvrstog materijala je neracionalno i rešenje treba tražiti ili u otkopavanju ovih masa drugom opremom ili optimizaciji rada rotornog bagera tj. izboru optimalne vrste reza i parametara odreska u cilju smanjenja otpora na kopanje, smanjenja potrošnje energije i smanjenje dinamičkih uticaja na konstrukciju rotornog bagera.

Dosadašnjim istraživanjima ove problematike, ustanovljeno je da se izvesna poboljšanja u radu rotornog bagera na otkopavanju materijala sa povećanom čvrstoćom mogu postići optimizacijom određenih konstruktivnih i tehnoloških parametara, čiji je osnovni cilj praktično povećanje raspoložive rezne sile bagera i maksimalno iskorišćenje raspoloživih mogućnosti bagera uz maksimalnu zaštitu bagera od nepovoljnih dinamičkih udara tokom rada.

Vrsta i parametri reza su osnovni tehnološki parametri čijom se optimizacijom može uticati na: smanjenje otpora kopanju u materijalima sa povećanom čvrstoćom, povećanje kapaciteta rotornog bagera, minimizaciju potrošnje energije i povoljnije dinamičko ponašanje konstrukcije bagera. To je ujedno i predmet istraživanja ove disertacije, a osnovni cilj je da se kroz sprovedena istraživanja definiše metodologija koja će se koristiti pri izboru i optimalnom korišćenju rotornih bagera na površinskim kopovima u uslovima radne sredine sa povećanim otporom kopanju.

Istraživanja u okviru doktorske disertacije su realizovana na teorijskom i eksperimentalnom nivou. Na taj način je sagledan, otvoren i determinisan problem,

sagledana moguća i odabrana optimalna rešenja i izvršena praktična provera dobijenih rezultata u konkretnim uslovima radne sredine.

Terenska ispitivanja, analiza dobijenih rezultata i optimizacija parametara reza pri otkopavanju materijala sa povećanom čvrstoćom na površinskom kopu Gacko pokazala su da se najbolji efekti rada rotornog bagera postižu sa vertikalnim rezom debljine 0,20 m, širine 0,30 m, odnosno sa brzinom obrtanja strele rotora od 24 m/min. Dokazano je da je neophodno promeniti postojeću tehnologiju otkopavanja rotornim bagerom, ali i daljim kompleksnim istraživanjima postaviti metodologiju optimizacije konstrukcije reznih elemenata rotora.

Ključne reči: *rotorni bager, parametri reza, otpor na kopanje, dinamika bagera, kapacitet, optimizacija, specifična potrošnja energije.*

Naučna oblast: *Rudarsko inženjerstvo*

Uža naučna oblast: *Mehanizacija u rudarstvu i energetici*

UDC: 621.879.44:622.271(043.3)
622.232:624.042:624.13(043.3)

OPTIMIZATION OF BUCKET WHEEL EXCAVATOR CUTTING PARAMETERS AT MINING OF MATERIALS WITH INCREASED STRENGTH

Summary

Mining of material by a bucket wheel excavator is a very complex physical physical-mechanical process. Indicators of the effectiveness of this process depends on a number of various factors, of which in particular may be emphasized: physical-mechanical characteristics of the material to be mined, mode of excavator operation and selection of block technological parameters, slice and cut, and the geometry of the buckets and teeth, etc. A particular problem occurs in the excavation of materials with increased strength, which is often the case in our opencast mines. Sizing of excavator specific digging forces towards smaller masses of extremely hard material is irrational and a solution should be sought either in the excavation of these masses by other equipment or by optimization of bucket wheel excavator operation i.e. in the selection of the optimal type of cut and parameters of slices in order to reduce resistance to digging, reducing energy consumption and reducing the dynamic effects on the structure of the bucket wheel excavator.

Current research of this issue, it was found that certain improvements in the operation of the bucket wheel excavator on the mining of materials with increased strength can be achieved by optimizing of some structural and technological parameters, whose main goal is virtually increasing the available cutting forces of the excavator and maximum utilization of the available options with maximum protection of the excavator from the adverse impact of dynamic impacts during operation.

Type and parameters of cut are the basic technological parameters that contribute to optimizing may affect: reduction of mining resistance in materials with the increasing strength, increasing the capacity of the bucket wheel excavator, minimizing energy consumption and more favorable dynamic behavior of excavator structure. It is also the subject of this thesis, and the primary goal through conducted researches is to define methodology to be used during selection and the optimal use of bucket wheel excavators in opencast mines in the working environment with the increased resistance to mining.

Researches within this thesis were implemented at the theoretical and experimental levels. In this way was perceived an open and determined problem, was reviewed possible, selected optimal solutions, and carried out in practice checkups of results obtained in the concrete conditions of the working environment.

Field tests, analysis of the obtained results and optimization of cutting parameters during the mining of materials with increased strength in the opencast mine Gacko has shown that the best effects of excavator operation are achieved with vertical cut and thickness of 0.20 m, width 0.30 m, i.e. with the slewing speed of bucket wheel boom of 24 m/min. It has been demonstrated that it is necessary to change the existing mining technology by the bucket wheel excavator, but also with further complex research to set up a methodology of optimizing the structure of the bucket wheel cutting elements.

Keywords: *bucket wheel excavator, cutting parameters, resistance to digging, excavator dynamics, capacity, optimization, specific energy consumption*

Scientific field: *Mining Engineering*

Special scientific field: *Mine and Energy Mechanization*

UDC: 621.879.44:622.271(043.3)
622.232:624.042:624.13(043.3)

Sadržaj

1. UVOD	1
1.1. Predmet istraživanja.....	2
1.2. Cilj istraživanja	3
1.3. Osnovne hipoteze	4
1.4. Metodologija istraživanja	5
1.5. Načni doprinos disertacije	7
1.6. Primenjivost rezultata istraživanja	8
1.7. Struktura disertacije sa kratkim pregledom poglavlja	8
2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA U PREDMETNOJ OBLASTI	10
2.1. Svetska i domaća iskustva u istraživanju predmetne problematike.....	10
2.2. Dosadašnja iskustva predmetne problematike u konkretnim uslovima radne sredine na primeru Površinskog kopa Gacko	15
3. TEORETSKE OSNOVE RADA ROTORNOG BAGERA	41
3.1. Opšte o rotornim bagerima	41
3.2. Otkopavanje materijala rotornim bagerima – tehnologija rada	47
3.3. Otpor materijala na kopanje	70
3.4. Kapacitet rotornog bagera	79
4. MODELIRANJE PROCESA OTKOPAVANJA I PRORAČUN ELEMENATA REZA I ODRESKA	85
4.1. Rezultati proračuna kapaciteta rotornog bagera ER-1250 16/1,5	92
5. MODELIRANJE STRUKTURE RADNOG ORGANA I STATIČKI I DINAMIČKI PRORAČUN	105
5.1. Metoda konačnih elemenata, osnovne postavke.....	105
5.1.1. Konačni element grede – ukupno naprezanje, matrica krutosti, opterećenja, masa	105
5.1.2. Konačni element ploče	108
5.2. Proračun nosećih struktura	118
5.3. Analiza razvijenih programa	123
5.4. Model radnog organa rotornog bagera ER-1250 16/1,5 metodom konačnih elemenata	123
5.5. Statički i dinamički proračun radnog organa rotornog bagera ER-1250 16/1,5 metodom konačnih elemenata.....	125
6. METODOLOGIJA OPTIMIZACIJE PARAMETARA REZA ROTORNIH BAGERA	131
6.1. Definisane zadatka optimizacije	131
6.2. Izbor metodologije optimizacije reza rotornih bagera	131
7. TERENSKA ISPITIVANJA RADA ROTORNOG BAGERA ER-1250 16/1,5	136
8. ANALIZA PONAŠANJA ROTORNOG BAGERA ER-1250 16/1,5 PRI OTKOPAVANJU MATERIJALA SA POVEĆANOM ČVRSTOĆOM	148

9. OPTIMIZACIJA PARAMETARA REZA ROTORNOG BAGERA ER-1250 16/1,5	157
10. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA	162
11. PRAVCI DALJEG ISTRAŽIVANJA	165
12. LITERATURA	166
13. BIOGRAFIJA AUTORA	173

Spisak slika

Slika 1.1. Program istraživanja	6
Slika 2.1. Rotorni bager ER-1250 16/1,5 u BTO sistemu	15
Slika 2.2. Način kopanja rotornim bagerom na Površinskom kopu Gacko	16
Slika 2.3. Brazde koje u ostavljaju zubi na rotoru bagera u stenskom materijalu	17
Slika 2.4. Inženjersko-geološki model terena po parametru otpora rezanju sredine 8N	22
Slika 2.5. Uzorci za ispitivanje izdvojeni iz neporemećenog uzorka upravno (vertikalni) i u pravcu slojevitosti (paralelni)	23
Slika 2.6. Habanje alata (zuba) u zavisnosti od debljine reza i vrste stenskog materijala	25
Slika 2.7. Aparatura HXS 1000-50 za merenje rezne sile	26
Slika 2.8. Izgled površine i modela površine testiranog uzorka	26
Slika 2.9. Računar DEWE 5000 sa prikazom merenja i video zapisom	26
Slika 2.10. Alati za rezanje korišćeni za ispitivanje rezne sile	27
Slika 2.11. Uticaj brzine rezanja na: a) rezu silu i b) specifičnu potrošnju energije	28
Slika 2.12. Uticaj ugla rezanja na: a) rezu silu i b) specifičnu potrošnju energije	29
Slika 2.13. Uticaj debljine reza na: a) rezu silu i b) specifičnu potrošnju energije	30
Slika 2.14. Uticaj debljine reza na odnos između razmaka zuba i dubine reza ...	31
Slika 2.15. Uticaj debljine reza na vrednost rezne sile	33
Slika 2.16. Uticaj debljine reza na specifičnu potrošnju energije	33
Slika 2.17. Model rotora i koordinate tačaka zuba	35
Slika 2.18. Šema za kinematski proračun: a) prikaz preseka rotora; b) prikaz odozgo; c) proces kopanja	35
Slika 2.19. Vedrice rotora sa zubima: a) Pokretni vektor zuba; b) Površina trenja zuba	36
Slika 2.20. Raspored zuba na vedricama	37
Slika 2.21. Predloženi oblik zuba trapezoidnog oblika: a) u planu; b) u boku	38
Slika 2.22. Prikaz aktivnih vedrica u procesu kopanja: a) fotografija u radnoj sredini; b) model	38
Slika 3.1. Rotorni bager ER-1250 16/1,5	41
Slika 3.2. Tipovi rotornih bagera	45
Slika 3.3. Konstrukcija rotornog bagera	47
Slika 3.4. Osnovni radni parametri rotornog bagera	49
Slika 3.5. Vrste reza rotornog bagera	50
Slika 3.6. Vertikalni (a) i horizontalni (b) rez	51
Slika 3.7. Parametri vertikalnog odreska i reza rotornog bagera: a) vertikalni presek odreska; b) prostorni izgled i dimenzije reza rotornog bagera	53
Slika 3.8. Bagerski blok u planu sa maksimalnim iskorišćenjem radnih dimenzija bagera	54
Slika 3.9. Promene brzine okretanja strele rotora u bloku (a) i slaganje brzina okretanja strele i rotora (b)	55

Slika 3.10. Parametri odreska	56
Slika 3.11. Parametri horizontalnog odreska rotornog bagera: a) vertikalni presek odreska; b) prostorni izgled i dimenzije reza	57
Slika 3.12. Broj i dužine pomeranja bagera kod kopanja vertikalnim višerednim (a) i kombinovanim (b) odrescima	58
Slika 3.13. Dimenzije rotora i horizontalnog odreska	59
Slika 3.14. Šema za proračun zapremine reza u bloku	59
Slika 3.15. Promene poprečnog preseka vertikalnog (a) i horizontalnog odreska rotornog bagera (b)	61
Slika 3.16. Promene debljine, širine i poprečnog preseka odreska: a) vertikalni odrezak; b) horizontalni odrezak	62
Slika 3.17. Funkcija promena ukupnog trenutnog poprečnog preseka svih odrezaka: a) vertikalni odrezak; b) horizontalni odrezak	63
Slika 3.18. Oblik ivice sečiva vedrice rotornog bagera	64
Slika 3.19. Promena aktivnih dužina sečiva vedrice za vertikalni (a) i horizontalni (b) odrezak	65
Slika 3.20. Srednja i trenutna aktivna dužina rezanja u funkciji ugla za vertikalni (a) i horizontalni (b) odrezak	65
Slika 3.21. Oznake delova rezne ivice vedrice rotornog bagera	67
Slika 3.22. Rotor sa strelom rotora	71
Slika 3.23. Oblici kidanja (loma) i kretanje rezne sile za različite materijale	72
Slika 3.24. Sile koje deluju na vedricu pri otkopavanju materijala (P – rezultanta sile kopanja, P_t – tangentna sila kopanja, P_b – bočna sila kopanja, P_n – normalna sila kopanja)	73
Slika 3.25. Šematski prikaz određivanja specifičnog otpora na kopanje; a) u odnosu na površinu poprečnih preseka odrezaka, b) u odnosu na dužinu rezne ivice u kontaktu sa materijalom	78
Slika 3.26. Geometrijski elementi za proračun zapremine reza	83
Slika 4.1. Forma za unos tehničkih parametara rotornog bagera	92
Slika 4.2. Forma za unos tehnoloških parametara rotornog bagera	93
Slika 4.3. Forma sa izlaznim podacima	93
Slika 4.4. Kapacitet rotornog bagera pri radu sa kombinovanim (horizontalnim i vertikalnim) i vertikalnim rezovima	103
Slika 4.5. Uporedni dijagram potrebne snage za dizanje materijala pri radu sa horizontalnim i vertikalnim rezovima	103
Slika 4.6. Uporedni dijagram raspoložive sile kopanja pri radu sa horizontalnim i vertikalnim rezovima	104
Slika 5.1. Oznake i pozitivni smerovi veličina grede	106
Slika 5.2. Matrica transformacije	108
Slika 5.3. Naprezanja ploče	109
Slika 5.4. Trougaoni membranski element	109
Slika 5.5. Naponi i sile i momenti u savijenoj ploči	112
Slika 5.6. Stepni slobode trougaone ploče pri savijanju	114
Slika 5.7. Element naprezanja	117
Slika 5.8. Model strele rotora	124
Slika 5.9. Model rotora	125
Slika 5.10. Računski modeli strele rotora	125

Slika 5.11. Deformacija strele rotora	126
Slika 5.12. Ekvivalentni naponi (MPa)	126
Slika 5.13. Prvih sedam sopstvenih oblika oscilovanja strele rotora	127
Slika 5.14. Računski model rotora za prvi slučaj opterećenja.....	128
Slika 5.15. Deformacija rotora za prvi slučaj opterećenja.....	128
Slika 5.16. Ekvivalentni naponi rotora za prvi slučaj opterećenja (MPa)	129
Slika 5.17. Računski model rotora za drugi slučaj opterećenja.....	129
Slika 5.18. Deformacija rotora za drugi slučaj opterećenja.....	130
Slika 5.19. Ekvivalentni naponi rotora za drugi slučaj opterećenja (MPa)	130
Slika 7.1. Rad rotornog bagera ER-1250 16/1,5 u bloku	136
Slika 8.1. Angažovana struja za pogon rotora za različite tipove rezova i parametre odreska.....	149
Slika 8.2. Specifična potrošnja energije za različite tipove rezova i parametre odreska.....	149
Slika 8.3. Specifična potrošnja energije za debljinu reza 10 cm i širine odrezaka 16 cm (1), 24 cm (2) i 30 cm (3).....	150
Slika 8.4. Specifična potrošnja energije za debljinu reza 15 cm i širine odrezaka 16 cm (1), 24 cm (2) i 30 cm (3).....	150
Slika 8.5. Specifična potrošnja energije za debljinu reza 20 cm i širine odrezaka 16 cm (1), 24 cm (2) i 30 cm (3).....	151
Slika 8.6. Specifična potrošnja energije za širinu odreska 16 cm i debljinu reza 10cm (1), 15 cm (2) i 20 cm (3).....	151
Slika 8.7. Specifična potrošnja energije za širinu odreska 24 cm i debljinu reza 10cm (1), 15 cm (2) i 20 cm (3).....	152
Slika 8.8. Specifična potrošnja energije za širinu odreska 30 cm i debljinu reza 10cm (1), 15 cm (2) i 20 cm (3).....	152
Slika 8.9. Uporedni prikaz izmerenih otpora na kopanje pri otkopavanju horizontalnim i vertikalnim rezom	153
Slika 8.10. Odnos raspoložive sile kopanja i izmerenih otpora na kopanje kod otkopavanja sa horizontalnim rezom	153
Slika 8.11. Odnos raspoložive sile kopanja i izmerenih otpora na kopanje kod otkopavanja sa vertikalnim rezom	154
Slika 8.12. Karakteristična ubrzanja u frekventnom domenu i ubrzanja na 5,1 Hz.....	155
Slika 8.13. Uporedni prikaz ubrzanja u vremenskom domenu za horizontalni rez (a) i vertikalni rez (b).....	155
Slika 8.14. Uporedni prikaz ubrzanja u frekventnom domenu za horizontalni rez (a) i vertikalni rez (b).....	156
Slika 8.15. Prikaz loše geometrije zuba na bageru ER-1250 16/1,5	156

Spisak tabela

Tabela 2.1.	Konstruktivni parametri rotornog bagera ER-1250 16/1,5	16
Tabela 2.2.	Fizičko-mehanička svojstva litoloških članova	19
Tabela 2.3.	Kategorizacija otkrivke	20
Tabela 2.4.	Fizičko-mehaničke karakteristike ispitivanih uzoraka	23
Tabela 2.5.	Mineralni sastav ispitivanih uzoraka	24
Tabela 2.6.	Abrazivnost ispitivanih uzoraka	24
Tabela 2.7.	Vrednost rezne sile i specifične potrošnje energije za uzorak MT-10	31
Tabela 2.8.	Vrednost rezne sile i specifične potrošnje energije za uzorak MT-60	32
Tabela 2.9.	Vrednost rezne sile i specifične potrošnje energije za uzorak OT-100	32
Tabela 2.10.	Tehničke karakteristike rotornog bagera korišćene za proračun	34
Tabela 2.11.	Sila rezanja za aktivne zube	39
Tabela 3.1.	Uporedni parametri različitih tipova rotornih bagera	45
Tabela 4.1.	Rezultati proračuna pri otkopavanju horizontalnim rezovima debljine 0,10 m i brzinom okretanja strele rotora od 12 m/min	94
Tabela 4.2.	Rezultati proračuna pri otkopavanju horizontalnim rezovima debljine 0,15 m i brzinom okretanja strele rotora od 12 m/min	94
Tabela 4.3.	Rezultati proračuna pri otkopavanju horizontalnim rezovima debljine 0,20 m i brzinom okretanja strele rotora od 12 m/min	94
Tabela 4.4.	Rezultati proračuna pri otkopavanju horizontalnim rezovima debljine 0,10 m i brzinom okretanja strele rotora od 18 m/min	95
Tabela 4.5.	Rezultati proračuna pri otkopavanju horizontalnim rezovima debljine 0,15 m i brzinom okretanja strele rotora od 18 m/min	95
Tabela 4.6.	Rezultati proračuna pri otkopavanju horizontalnim rezovima debljine 0,20 m i brzinom okretanja strele rotora od 18 m/min	95
Tabela 4.7.	Rezultati proračuna pri otkopavanju horizontalnim rezovima debljine 0,10 m i brzinom okretanja strele rotora od 24 m/min	96
Tabela 4.8.	Rezultati proračuna pri otkopavanju horizontalnim rezovima debljine 0,15 m i brzinom okretanja strele rotora od 24 m/min	96
Tabela 4.9.	Rezultati proračuna pri otkopavanju horizontalnim rezovima debljine 0,20 m i brzinom okretanja strele rotora od 24 m/min	96
Tabela 4.10.	Rezultati proračuna pri otkopavanju vertikalnim rezovima debljine 0,10 m i brzinom okretanja strele rotora od 12 m/min	97
Tabela 4.11.	Rezultati proračuna pri otkopavanju vertikalnim rezovima debljine 0,15 m i brzinom okretanja strele rotora od 12 m/min	97
Tabela 4.12.	Rezultati proračuna pri otkopavanju vertikalnim rezovima debljine 0,20 m i brzinom okretanja strele rotora od 12 m/min	98
Tabela 4.13.	Rezultati proračuna pri otkopavanju vertikalnim rezovima debljine 0,10 m i brzinom okretanja strele rotora od 18 m/min	98
Tabela 4.14.	Rezultati proračuna pri otkopavanju vertikalnim rezovima debljine 0,15 m i brzinom okretanja strele rotora od 18 m/min	99
Tabela 4.15.	Rezultati proračuna pri otkopavanju vertikalnim rezovima debljine 0,20 m i brzinom okretanja strele rotora od 18 m/min	99

Tabela 4.16. Rezultati proračuna pri otkopavanju vertikalnim rezovima debljine 0,10 m i brzinom okretanja strele rotora od 24 m/min	100
Tabela 4.17. Rezultati proračuna pri otkopavanju vertikalnim rezovima debljine 0,15 m i brzinom okretanja strele rotora od 24 m/min	100
Tabela 4.18. Rezultati proračuna pri otkopavanju vertikalnim rezovima debljine 0,20 m i brzinom okretanja strele rotora od 24 m/min	101
Tabela 4.19. Rezultati proračunatih vrednosti pri radu sa horizontalnim rezovima	102
Tabela 4.20. Rezultati proračunatih vrednosti pri radu sa vertikalnim rezovima	102
Tabela 4.21. Uporedni rezultati proračunskih vrednosti	102
Tabela 6.1. Matrica odlučivanja	135
Tabela 7.1. Rezultati merenja angažovane struje za pogon rotora i otpora na kopanje	137
Tabela 7.2. Uporedni prikaz rezultata izvršenih merenja	138
Tabela 7.3. Rezultati merenja za vertikalni rez debljine 0,25 m i brzinu okretanja strele rotora od 24 m/min	147
Tabela 8.1. Prosečne srednje vrednosti ubrzanja u radu sa horizontalnim i vertikalnim rezovima	155
Tabela 9.1. Rezultati merenja pri radu rotornog bagera ER-1250 16/1,5 u tvrdim materijalima	157
Tabela 9.2. Kriterijumi odlučivanja, važnost i težina kriterijuma	159
Tabela 9.3. Mere za donošenje alternativnih odluka	160
Tabela 9.4. Vrednosti alternativa za odlučivanje	160
Tabela 9.5. Rangiranje varijanti parametara vertikalnog reza	161

1. UVOD

Površinska eksploatacija mineralnih sirovina, iako poznata od najstarijih vremena, širu primenu dobija tek u XX veku, zahvaljujući usavršavanju parne mašine i otkriću motora sa unutrašnjim sagorevanjem, a puni zamah dobija pronalaskom i usavršavanjem rotornih bagera. Masovna proizvodnja rotornih bagera počinje tridesetih, a najšira primena šezdesetih godina prošlog veka. Zahvaljujući velikim kapacitetima i stepenu korisnog dejstva, rotorni bageri su našli najveću primenu u velikim rudarskim basenima uglja širom Evrope i sveta. Pri tome su se rotorni bageri stalno usavršavali i prilagođavali različitim uslovima radne sredine.

Na našim prostorima rotorni bageri su našli primenu u Kolubarskom, Kostolačkom, Kosovskom i Gatačkom ugljenom basenu, kao i na eksploataciji laporca u Beočinu. U dosadašnjem radu su generalno gledano pokazali dobre rezultate, ali se stepen njihove efikasnosti razlikuje od basena do basena, što je posledica niza različitih faktora. Pri izboru opreme za otkopavanje mineralnih sirovina svakako je najvažnije definisanje radne sredine u kojoj će ta oprema raditi. Pravilno definisanje radne sredine zavisi od obima i kvaliteta izvršenih geoloških istraživanja. Pri tome je za izbor rotornih bagera najbitnije utvrditi fizičko-mehaničke karakteristike radne sredine, prostorni položaj i debljinu slojeva otkrivke ili korisne mineralne sirovine koja se namerava otkopavati. Praksa na našim površinskim kopovima je pokazala da se poseban problem javlja kod otkopavanja materijala sa povećanom čvrstoćom, odnosno povećanim otporom na kopanje, što dovodi do drastičnog smanjenja kapaciteta rotornog bagera. Zato, ako se pri definisanju parametara radne sredine napravi greška, to može dovesti do nesagledivih posledica u eksploataciji rotornog bagera, pošto su njegove konstruktivne karakteristike uglavnom tipske i njihovo menjanje nakon nabavke ili nije moguće ili iziskuje ogromna finansijska sredstva i dug period revitalizacije. U praksi nije redak slučaj da se napravi greška u izboru rotornih bagera i zbog nedostatka znanja, ili iz određenih *subjektivnih* razloga, gde posledice mogu da budu i dalekosežnije nego u prethodnom slučaju.

Ukoliko se desi ovakav slučaj, a imajući u vidu visoku cenu nabavke rotornog bagera, odnosno celog sistema (sa samohodnim pretovarnim transporterom, transporterima sa trakom i odlagačem), preostaju samo dve mogućnosti. Prva je prodaja

celog sistema kao polovne opreme ili otpadnog železa (što je realno teško izvesti), a druga je da se pristupi određenim istraživanjima u cilju poboljšanja performansi rotornog bagera, a zatim i primeni rezultata tih istraživanja u konkretnim uslovima. Dosadašnjim istraživanjima ove problematike, ustanovljeno je da se izvesna poboljšanja u radu rotornog bagera na otkopavanju materijala sa povećanom čvrstoćom mogu postići optimizacijom određenih konstruktivnih i tehnoloških parametara čiji je osnovni cilj praktično povećanje raspoložive rezne sile bagera i maksimalno iskorišćenje raspoloživih mogućnosti bagera uz maksimalnu zaštitu bagera od nepovoljnih dinamičkih udara tokom rada.

Konstruktivni parametri čijom optimizacijom se može postići povećanje rezne sile bagera su snaga pogona rotora, oblik vedrica, oblik, dimenzije i raspored zuba na vedricama i ugao rezanja.

Vrsta i parametri reza su osnovni tehnološki parametri čijom se optimizacijom može uticati na smanjenje otpora kopanju u materijalima sa povećanom čvrstoćom i povećanje kapaciteta rotornog bagera. To je ujedno i predmet istraživanja ove disertacije, a osnovni cilj je da se kroz sprovedena istraživanja definiše metodologija koja će se koristiti pri izboru i optimalnom korišćenju rotornih bagera na površinskim kopovima u uslovima radne sredine sa povećanim otporom kopanju.

1.1. Predmet istraživanja

Rotorni bager predstavlja samohodnu mašinu kontinualnog dejstva, namenjenu za otkopavanje jalovine i korisne mineralne sirovine na površinskim kopovima. Otkopavanje materijala vrši se vedricama koje su ravnomerno raspoređene i pričvršćene na obodu rotora. Istovremenim obrtanjem rotora u vertikalnoj ravni i okretanjem strele rotora zajedno sa platformom u horizontalnoj ravni, svaka vedrica otkopava iz masiva odrezak koji je određen oblikom i geometrijskim parametrima.

Otkopavanje materijala rotornim bagerom je veoma složen fizičko-mehanički proces. Pokazatelji efektivnosti tog procesa zavise od velikog broja raznovrsnih činilaca od kojih se posebno mogu istaći: fizičko-mehaničke karakteristike materijala koji se otkopava, režim rada bagera i izbor tehnoloških parametara bloka, odreska i reza, geometrije vedrica i zuba itd.

Izbor rotornog bagera i naročito ostvarivanje njegovog projektovanog kapaciteta u realnim uslovima na jednom površinskom kopu u najvećoj meri zavisi od usaglašenosti mehaničkih i radnih parametara odnosno sile kopanja tog bagera i otpora na kopanje radne sredine u kojoj ostvaruje eksploatacione zadatke.

Poseban problem se javlja kod otkopavanja materijala povećane čvrstoće. Na našim površinskim kopovima čest je slučaj da se u okviru materijala koji se otkopava nalaze i delovi materijala sa povećanim otporom na kopanje kao što je slučaj na Površinskom kopu Gračanica u Gacku, kopu Filijala u Beočinu, delovi čvrstih pontskih glina u rudarskom basenu Kolubara i dr.

Predmet ovog rada je istraživanje vezano za izbor optimalne vrste i parametara reza rotornim bagerima pri otkopavanju materijala sa povećanom čvrstoćom u funkciji smanjenja otpora na kopanje, minimizacije potrošnje energije i povoljnog dinamičkog ponašanja konstrukcije bagera.

1.2. Cilj istraživanja

Iz navedenog se vidi da je **osnovni cilj teme** da se analizom teoretskih i eksperimentalnim istraživanjima rada rotornog bagera izvrši optimizacija parametara reza i odreska rotornog bagera u funkciji otpora na kopanje, potrošnje energije i dinamičkog ponašanja bagera pri otkopavanju materijala na površinskim kopovima sa povećanom čvrstoćom, odnosno otporom na kopanje.

Primenjenom metodologijom su obuhvaćeni iskustveni podaci i dosadašnja istraživanja, savremeni postupci i metode istraživanja u ovoj oblasti, a algoritam istraživanja treba da omogući da se uz primenu računara obezbedi ukupan istraživački tok do optimalnog izbora.

Sprovedena istraživanja su definisala jednu metodologiju koja se može koristiti pri izboru i optimalnom korišćenju rotornih bagera na površinskim kopovima u uslovima radne sredine sa povećanim otporom kopanju čiji rezultat treba da bude postizanje pozitivnih ekonomskih efekata u proizvodnji.

1.3. Osnovne hipoteze

Jedan od osnovnih preduslova za zadovoljavajuće vremensko i kapacitativno iskorišćenje rotornih bagera leži u njihovom pravilnom izboru, tj. u usaglašavanju sile kopanja bagera i očekivanih otpora na kopanje u konkretnim uslovima radne sredine. Predimenzionisana snaga pogona rotora u odnosu na stvarne otpore na kopanje dovodi do osetnog povećanja mase bagera, a samim tim i njegove nabavne cene, i obrnuto, poddimenzionisana snaga pogona, tj. sila kopanja ima za posledicu osetan pad vremenskog i kapacitativnog iskorišćenja, velika opterećenja konstrukcije zbog velikih vibracija i udara, učestale havarije ili jednostavno nemogućnost rada bagera. S druge strane, precenjene vrednosti otpora na kopanje mogu da budu jedini razlog da se još u fazi izbora mehanizacije odustane od primene tehnoloških kompleksa kontinualnog dejstva i usvoji manje efektivna mehanizacija diskontinualnog dejstva.

Poseban problem se javlja kada se na površinskim kopovima javljaju manje partije izuzetno čvrstog materijala. Dimezionisanje specifične sile kopanja bagera prema manjim masama izuzetno čvrstog materijala je neracionalno i rešenje treba tražiti ili u otkopavanju ovih masa drugom opremom (riperi, kombajni, bageri sa jednim radnim elementom i dr.) ili optimizaciji rada rotornog bagera tj. izboru optimalne vrste reza i parametara odreska u cilju smanjenja otpora na kopanje, smanjenja potrošnje energije i smanjenje dinamičkih uticaja na konstrukciju rotornog bagera.

Na površinskim kopovima uglja na prostorima bivše Jugoslavije evidentno je nezadovoljavajuće vremensko i kapacitativno iskorišćenje rotornih bagera, pa time i kontinualnih sistema u celini, u poređenju sa zemljama u Evropi. Razlozi za ovo su brojni. Neki od njih su objektivni i ogledaju se u činjenicama da su isporučeni tipski rotorni bageri, često nedovoljno usaglašeni uslovima rada u konkretnim radnim sredinama, i nedovoljnim ulaganjima u održavanje opreme u dužem vremenskom periodu. Drugi se pak ogledaju u nedovoljnoj motivaciji u procesu rada i održavanja i nedovoljnoj spremnosti da se u naučno istraživačkom smislu iznađu nova rešenja i izvrši optimizacija određenih parametara rada.

Polazeći od prethodno navedenog i već pomenute činjenice da još uvek ne postoji opšte prihvaćena metodologija određivanja uticaja vrste reza i parametara odreska rotornog bagera u funkciji otpora na kopanje, kao i njihovom uticaju na konstrukciju

bagera u doktorskoj disertaciji je definisana metodologija istraživanja navedenog problema. Izvršena je analiza i sistematizovana su saznanja u ovoj oblasti kao i rezultati dosadašnjih istraživanja. Za potrebe analize i definisanja željene metodologije izvršena su ispitivanja u konkretnim uslovima radne sredine na Površinskom kopu Gacko, gde su prvenstveno ispitivani uticaj vrste reza (horizontalni, vertikalni, kombinovani) i promene parametara odreska (debljina, širina i visina odreska i njihovi međusobni odnosi) na otpore kopanju i dinamičko ponašanje bagera, za rotorni bager ER-1250 16/1,5 sa softverskom obradom podataka.

Predmetnim istraživanjem je definisan simulacioni model rada rotornih bagera i metodologija terenskih merenja za potrebe optimizacije tehnoloških parametara reza. Takav jedinstven model sadrži u sebi elemente za modeliranje radne sredine, modeliranje tehnologije rada rotornih bagera, analizu uticaja tehnoloških parametara reza i analizu troškova rada sistema.

Rezultati ovog istraživanja treba da daju doprinos izboru optimalnih parametara odreska u cilju povećanja vremenskog i kapacitetnog iskorišćenja i boljoj eksploataciji rotornih bagera na našim površinskim kopovima.

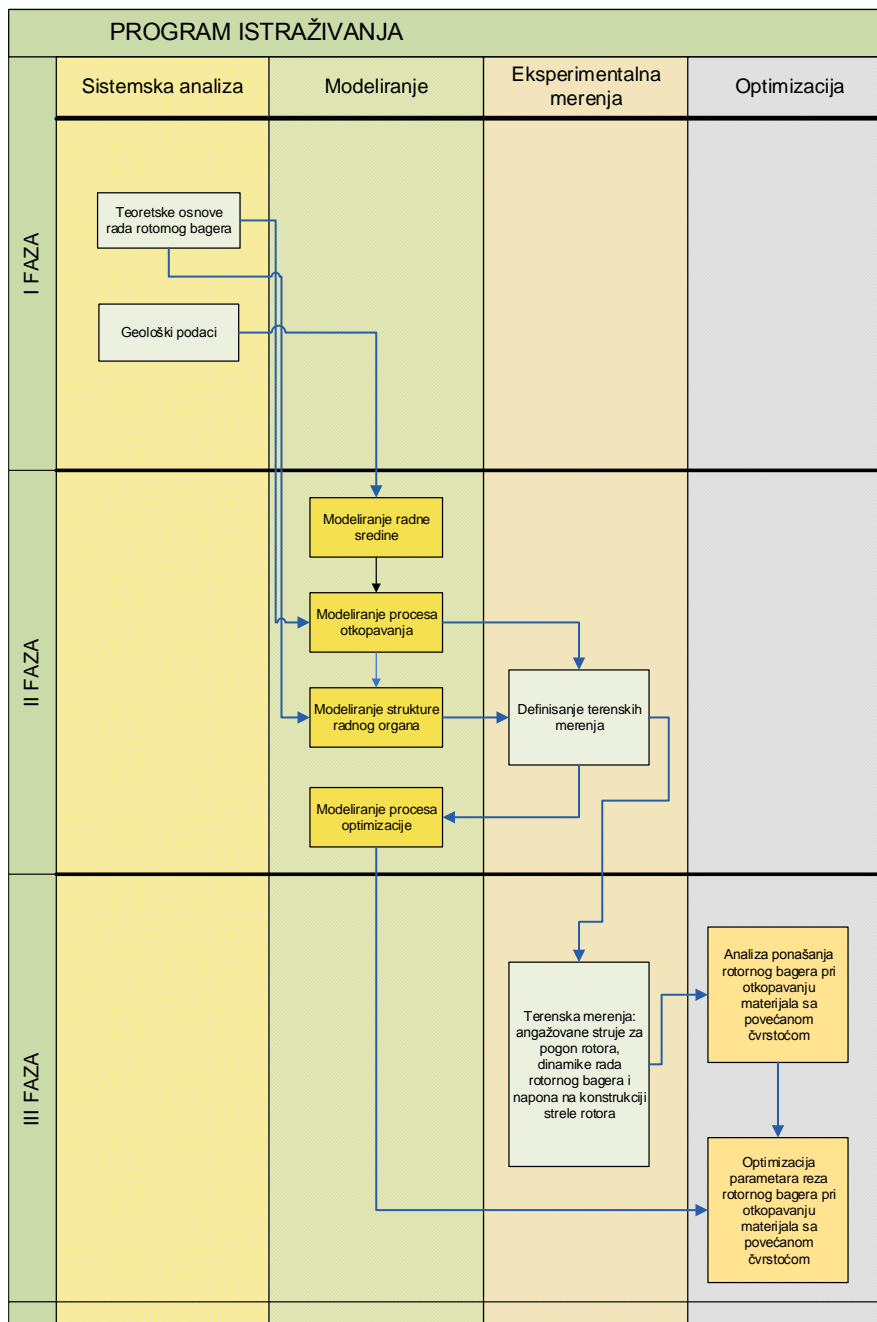
1.4. Metodologija istraživanja

Istraživanja u okviru doktorske disertacije su realizovana na teorijskom i eksperimentalnom nivou. Na taj način je otvoren, sagledan i determinisan problem, sagledana moguća i odabrana optimalna rešenja, kao i izvršena praktična provera dobijenih rezultata.

Pri izradi doktorske disertacije definisan je model radne sredine, a potom su primenjene metode diskretno-vremenskog sistema simulacije za modeliranje rada rotornog bagera kao i metoda konačnih elemenata za modeliranje radnog organa rotornog bagera u cilju određivanja dinamičkog ponašanja. Na kraju je izvršena optimizacija izbora vrste i parametara reza rotornim bagerima pri otkopavanju materijala sa povećanom čvrstoćom u funkciji smanjenja otpora na kopanje, minimizacije potrošnje energije i povoljnog dinamičkog ponašanja konstrukcije bagera.

Provera definisane metodologije istraživanja je obavljena sa realnim podacima sa Površinskog kopa Gacko, terenskim merenjima otpora na kopanje, kapaciteta, utroška

energije, kao i dinamičkog ponašanja rotornog bagera radi izbora optimalnih parametara reza rotornih bagera, a dobijeni rezultati treba da budu korišćeni za planiranje tehnologije rada, odnosno izbor vrste reza i optimizaciju odnosa debljine i širine odreska.



Slika 1.1. Program istraživanja

Program istraživanja je prikazan na Slici 1.1. i sastoji se iz tri faze koje obuhvataju sistemska analizu, modeliranje, eksperimentalna istraživanja i optimizaciju.

Istraživanjem je obuhvaćeno:

- Analiza celokupne problematike, posebno pristup uticajnim faktorima radne sredine, dijagnostika ponašanja rotornog bagera i proučavanje postojeće literature;
- Proračun sopstvene frekvence i dinamičkog ponašanja rotora;
- Izrada simulacionog modela rada rotornog bagera i proračun parametra bloka i podetaže za različite vrste i parametre odreska;
- Terenska merenja otpora na kopanje, utroška energije i dinamičkog ponašanja strele za različite vrste rezova i parametara odreska i potvrda modela;
- Optimizacija;
- Diskusija i zaključak.

1.5. Naučni doprinos disertacije

Tema doktorske disertacije obuhvata istraživanje veoma aktuelne i značajne problematike iz oblasti eksploatacije rotornih bagera na površinskim kopovima lignita kao osnove za njihov efikasan i bezbedan rad. Posebna pažnja je posvećena detaljnom izučavanju i analizi uticaja geometrijskih parametara reza i odreska na efektivnost procesa rada bagera kao i dinamičkog ponašanja rotornog bagera.

Na osnovu postavljenih ciljeva i zadataka, posebno se očekuje da disertacija pruži naučni doprinos kroz definisanje metodologije, izradu simulacionog modela rada rotornog bagera, izradu modela radnog organa rotornog bagera (strele i rotora) metodom konačnih elemenata i terenska merenja koja će verifikovati model rada bagera i dinamičko ponašanje pri otkopavanju materijala sa povećanom čvrstoćom sa različitim tipovima rezova kao i različitim odnosom širine i debljine odreska. Realizacijom ovako postavljenih istraživanja stvoriće se uslovi za optimalno korišćenje rotornih bagera na površinskim kopovima sa povećanim otporom na kopanje.

Sumarno doprinos ove teze treba da bude u sledećem:

- Doprinos detaljnom izučavanju i analizi uticaja geometrijskih parametara reza i odreska na efektivnost procesa rada bagera;
- Doprinos detaljnom izučavanju i analizi uticaja geometrijskih parametara reza i odreska na dinamičko ponašanje rotornog bagera;

- Definisanje metodologije kroz izradu simulacionog modela rada rotornog bagera, izradu modela radnog elementa rotornog bagera (strele i rotora) metodom konačnih elemenata i terenska merenja koja će verifikovati model rada bagera i dinamičko ponašanje pri otkopavanju materijala sa povećanom čvrstoćom u zavisnosti od vrste reza i dimenzija odreska;
- Sa realizacijom ovako postavljenih istraživanja stvoriće se uslovi za optimalno korišćenje rotornih bagera na površinskim kopovima lignita u radnoj sredini sa povećanim otporom na kopanje uz minimalnu potrošnju energije.

1.6. Primenljivost rezultata istraživanja

Dobijeni rezultati istraživanja mogu se primeniti na svim površinskim kopovima na kojima rade rotorni bageri. Posebnu primenljivost imaće na kopovima na kojima se pojavljuju partije izuzetno čvrstog materijala sa povećanim otporom na kopanje kao što su na primer Površinski kop Gacko, površinski kop Filijala u Beočinu i dr. Svakako je neracionalno da se za relativno male mase materijala sa povećanim otporom na kopanje odustaje od kontinualnog sistema otkopavanja, ili da se prema njima dimenzioniše oprema za otkopavanje. Dobijeni rezultati omogućiće lakšu i ekonomičniju proizvodnju na ovim površinskim kopovima.

1.7. Struktura disertacije sa kratkim pregledom poglavlja

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

U prvom poglavlju se daje opis problema, ciljevi, osnovne hipoteze, metodologija istraživanja, naučni doprinos disertacije, primenljivost rezultata istraživanja na površinskim kopovima na kojima se pojavljuju partije čvrstog materijala sa povećanim otporom na kopanje i kratak prikaz sadržaja disertacije.

U drugom poglavlju je dat pregled dosadašnjih istraživanja predmetne problematike u zemlji i inostranstvu, sa posebnim osvrtom na istraživanja otkopavanja otkrivke sa povećanom čvrstoćom u basenu uglja u Gacku.

U trećem poglavlju su date teorijske osnove rada rotornog bagera, a poseban akcenat je stavljen na teoretske parametre odreska i reza rotornog bagera.

Četvrto poglavlje predstavlja modeliranje procesa otkopavanja i daje postupak i rezultate modeliranja u konkretnim uslovima radne sredine.

U petom poglavlju je izvršeno modeliranje strukture radnog organa (rotora i strele rotora) i predstavljeni su rezultati statičkog i dinamičkog proračuna.

Šesto poglavlje opisuje metodologiju optimizacije parametara reza rotornih bagera.

U sedmom poglavlju su prikazani rezultati terenskih ispitivanja u konkretnim uslovima radne sredine, odnosno na Površinskom kopu Gacko. Istraživanje se sastojalo u određivanju kapaciteta i merenju angažovane struje za pogon rotora, preko koje je izračunavana angažovana snaga za kopanje, specifični otpor materijala na kopanje i specifična potrošnja energije. Istovremeno sa merenjem angažovane struje, vršeno je i merenje dinamičkog ponašanja bagera, merenjem ubrzanja na karakterističnim tačkama (momentna poluga reduktora), kao i merenje napona.

U osmom poglavlju je prikazana analiza ponašanja rotornog bagera ER-1250 16/1,5 pri otkopavanju materijala sa povećanom čvrstoćom.

U devetom poglavlju je izvršena optimizacija parametara reza rotornog bagera, koja nedvosmisleno ukazuje na izbor optimalne vrste i parametara reza.

U desetom poglavlju su, na osnovu dobijenih rezultata, data zaključna razmatranja vezana za optimizaciju parametara reza rotornog bagera pri otkopavanju materijala sa povećanom čvrstoćom.

Jedanaesto poglavlje daje pravce daljih istraživanja, obzirom da su uočeni određeni tehničko-tehnološki nedostaci radnog organa, koji se negativno odražavaju na kapacitet i konstrukciju rotornog bagera, a koji nisu bili predmet istraživanja ove disertacije.

U dvanaestom poglavlju je dat pregled korišćene literature.

2.0. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA U PREDMETNOJ OBLASTI

Rotorni bager je predmet stalnih istraživanja od početka njegove primene na površinskim kopovima do današnjih dana. Mnogobrojna istraživanja su rađena u naučnim ustanovama, kompanijama koje se bave proizvodnjom rotornih bagera i kompanijama koje koriste rotorne bagere za otkopavanje mineralnih sirovina.

Istraživanja rada rotornog bagera uvek idu u pravcu poboljšanja performansi bagera, sa ciljem povećanja njegove produktivnosti i smanjenja troškova eksploatacije. Posebna pažnja se poklanja istraživanjima koja imaju za cilj optimizaciju konstruktivnih i tehnoloških parametara rotornih bagera predviđenih za otkopavanje materijala sa povećanom čvrstoćom.

2.1. Svetska i domaća iskustva u istraživanju predmetne problematike

Istraživanja vezana za optimizaciju konstruktivnih i tehnoloških parametara rotornih bagera predviđenih za otkopavanje materijala sa povećanom čvrstoćom imaju za cilj pravilan izbor rotornog bagera za konkretne uslove radne sredine i povećanje kapaciteta uz smanjenje troškova eksploatacije za već postojeće bagere na površinskim kopovima.

Vetrov J. A. [67] je istraživao uticaj više parametara na reznu silu, a u prvom redu fizičko-mehaničkih karakteristika radne sredine, geometrije reznih alata i njihove pohabanosti, pri čemu je uzimao u obzir ugao zakošenja rotora u odnosu na rotornu strelu, nagib rotora u horizontalnoj ravni i položaj zuba na vedricama.

Dombrovski N. G. [16] je na terenu vršio eksperimente sa bagerskim vedricama i adekvatnim modelima, pri čemu je zaključio da specifični otpor na kopanje zavisi od geometrijskih parametara odreska i reza, fizičko-mehaničkih karakteristika radne sredine, te oblika i dimenzija radnog organa.

Wojtkiewitch H. [72], [73] je ispitivao otpor na kopanje u zavisnosti od površine i oblika reza, u skladu sa čim je definisao metodologiju određivanja dužine reznih ivica i specifičnog otpora na kopanje, a vršio je i ispitivanja veka trajanja zuba u različitim uslovima radne sredine.

Beljakov J. I. i Vladimirov V. M. [4] su ispitivali odnos između parametara reza i specifičnog otpora na kopanje, a definisali su i dinamički karakter opterećenja.

Himel W. [21] je u istraživanju *Specifični otpor kopanja u zavisnosti od površine i oblika reza kod različitih vrsta tla* definisao optimalni odnos debljine i širine odreska za meke materijale koji se otkopavaju na površinskim kopovima lignita u DDR-u. Određena je zavisnost površine odreska i specifičnog otpora materijala na kopanje.

Pratz K. H. [53] je vršio merenja sila na zubima rotornog bagera pri čemu je na rekonstruisanoj vedrici postavio merna sečiva sa mernim trakama pomoću kojih je pri otkopavanju dobijao vrednosti uzdužnih sila. Merenja je vršio na uglju i glini i došao do zaključka da je značajno različit uticaj dimenzije odreska na silu kopanja u različitim uslovima radne sredine. Definisan je uticaj širine i debljine odreska na reznu silu, zavisnost rezne sile od debljine reza, zavisnost rezne sile od širine reza, zavisnost apsolutne vrednosti rezne sile u funkciji dužine odsečka i dr.

Bieniawski Z. T. [5] se bavio klasifikacijom stena proučavajući aksijalne i tangencijalne napone, naprezanje i brzinu prostiranja longitudinalnih talasa.

Szepiatowski W. [62] je u svojim ispitivanjima na primeru površinskih kopova u Poljskoj uspostavio zavisnost specifičnog otpora na kopanje od kohezije, zapreminske težine i rastresitosti, kao i od vrste vedrica i zuba.

Razz V. [55] je analizirao uticaj radne sredine, konstruktivnih i tehnoloških parametara na reznu silu i razvio metodologiju terenskog ispitivanja materijala (Point-load) i originalni softver za optimizaciju tehnoloških parametara rada i geometrije zuba.

Drebenstedt C. i Paessler S. [17] su na osnovu svojih istraživanja došli do formule izračunavanja kapaciteta rotornog bagera u zavisnosti od otpora kopanju računatog preko specifičnog utroška energije na pogonu rotora. Pri tome je izrađen matematički model u kome je u obzir uzeta i promena brzine okretanja rotora što povećava kapacitet bagera i do 5%. Autori koriste virtuelnu realnost u kojoj korisnik može da se kreće ili je menja, odnosno prilagođava konkretnim uslovima. Pri tome model može simulirati kompletan proces otkopavanja stenskog materijala.

Kressner M. i Drebenstedt C. [35] su vršili ispitivanja optimizacije reznih alata za otkopavanje glinovitih materijala što je značajno sa aspekta mogućnosti primene korišćene metodologije i za druge vrste stenskog materijala.

Atanacković H. [2] je vršio teoretsko i praktično utvrđivanje otpora kopanju i specifične potrošnje energije i uspostavio je korelacionu vezu između otpora na kopanje i specifičnih reznih sila.

Radojević J. [54] je u okviru svoje doktorske disertacije pod nazivom *Optimizacija brzina i uglova rezanja rotornim bagerima u odnosu na utrošenu energiju i instalisanu snagu mašine*, dao osnovne principe teorije kopanja rotornim bagerima i određivanja sila koje se javljaju u procesu kopanja.

Popović N. [52] je u monografiji *Naučne osnove projektovanja površinskih kopova*, poglavlje 13.07 (Izbor, šeme rada, parametri otkopa i kapacitet rotornih bagera) dao teoretske osnove rada rotornog bagera sa detaljnim osvrtom na proračun parametara odreska i reza rotornog bagera.

Bošnjak S. [14] je modelirao delove konstrukcije rotornog bagera i analizirao uticaj konstruktivnih i radnih parametara na dinamičko ponašanje bagera.

Ignjatović D. [22] se u magistarskoj tezi bavi izborom metode za određivanje otpora na kopanje rotornim bagerima u uslovima površinskih kopova lignita Kolubare. Kod izbora metodologije poseban akcenat je stavio na usklađivanje sile kopanja sa otporima na kopanje stenskog materijala, pri čemu je ukazao na značaj pravilnog izbora snage pogona rotora od čega zavisi kapacitet rotornog bagera i njegova cena. Takođe, istraživao je uticaj kvaliteta i oblika zuba i uticaj tehnoloških parametara odreska, na vrednosti specifičnog otpora na kopanje.

Ivković S., Ignjatović D., Jovančić P. i Tanasijević M. [30] su se bavili projektovanjem održavanja površinskih kopova pri čemu su posebnu pažnju poklonili održavanju rotornog bagera. Na osnovu dugogodišnjih istraživanja i praćenja rada rotornih bagera na površinskim kopovima u Srbiji jasno ukazuju na značaj usklađenosti sistema za kopanje sa radnom sredinom, od čega direktno zavisi trajnost noseće konstrukcije. Konstrukcija rotora i reznih elemenata u velikoj meri utiču na dinamička opterećenja strele rotora, a i celog bagera. Zaključili su da je pogodnom strelom rotora,

adekvatnim brojem vedrica i prilagođenom geometrijom zuba, moguće u velikoj meri smanjiti dinamička opterećenja koja se javljaju u procesu kopanja. Zato je, sa aspekta revitalizacije starih bagera, neophodno izvršiti opsežna ispitivanja promene naponskih stanja pri radu bagera. Sagledavanje promene naponskih stanja konstrukcije može ukazati na stepen zamorenosti pojedinih delova, ili noseće konstrukcije u celini. Takođe, pored revitalizacije čelične konstrukcije bagera, naophodno je izvršiti i modernizaciju mašinske i elektro opreme.

Stojanović D. [59] je u okviru istraživanja *Analiza tehnoloških i proizvodnih mogućnosti bagera glodara SRs 1200 24/4 +VR* izvršio analizu uticaja parametara odreska na kapacitetno iskorišćenje rotornog bagera. Ispunjenje uslova maksimalnog kapaciteta prema tom istraživanju treba tražiti u odgovarajućem izboru debljine i širine odreska. Razmatrane su različite širine i debljine odreska u funkciji kapaciteta bagera.

Kun J. [36] je u knjizi *Teorija bagerovanja rotornim bagerima* izneo teoretske osnove otkopavanja rotornim bagerima sa posebnim osvrtom na parametre reza i odreska. Definisani su uticaj dužine i površine odreska na specifični otpor kopanju i uticaj na kapacitet rotornog bagera. Definisani su optimalni odnos parametara odreska.

Jakovljević I. [31] je u okviru doktorske disertacije pod nazivom *Određivanje optimalnih parametara odreska rotornih bagera u funkciji otpora na kopanje*, istraživao uticaj parametara odreska na specifične otpore na kopanje po površini poprečnog preseka odreska k_F , po dužini reznih ivica vedrica k_L i po količniku proizvoda površine odreska i reznih ivica vedrica k_{FL} . Programom istraživanja i primenjenom metodologijom obuhvaćena su obimna teoretska istraživanja i direktna merenja otpora kopanju na rotornim bagerima.

Pavlović V., Ignjatović D. [49] u monografiji *Selektivna površinska eksploatacija uglja kontinualnim sistemima*, daju teorijske osnove rada rotornog bagera sa značajnim osvrtom na tehnološke parametre reza, kao i ukazivanjem na prednosti i nedostatke horizontalnog i vertikalnog reza. Takođe se ukazuje na uticaj otpora kopanju kod definisanja tehnoloških parametara rada bagera, koji se analizira u zavisnosti od snage pogona rotora i tehnoloških parametara reza.

Lazić A. [38], [39] je za potrebe istraživanja selektivnog otkopavanja razvio Model simulacije rada rotornog bagera i Dinamički model planiranja proizvodnje.

Modeli simulacije su zasnovani na usklađivanju kinematsko-konstruktivnih karakteristika bagera sa karakteristikama radne sredine i omogućavaju analiziranje rada rotornog bagera korišćenjem većeg broja ulaznih parametara u relativno kratkom periodu obrade. Lako se mogu prilagoditi različitim tipovima rotornih bagera i različitim uslovima radne sredine.

Lazić A., Klačar R., Bošković S. [40] su u monografiji *Selektivno otkopavanje uglja na površinskim kopovima* razradili tehnologiju selektivnog otkopavanja rotornim bagerima, hidrauličnim bagerima kašikarima, kombajnima (Surface Miner) i ripovanja buldozerima, pri čemu su za definisanje optimalne tehnologije rada pomenute opreme korišćeni i modeli simulacije rada rotornog bagera, hidrauličnog bagera kašikara, kombajna, ripovanja buldozerom i dinamički model planiranja proizvodnje.

Bošković S. [6] u magistarskoj tezi *Kombinovana tehnologija selektivnog otkopavanja na primjeru površinskog kopa Gračanica - Gacko*, se bavi istraživanjem optimalnih tehničko-tehnoloških rešenja otkopavanja mineralne sirovine u zavisnosti od tri osnovna kriterijuma i to: kvalitet otkopane mineralne sirovine, kapacitet opreme i troškovi eksploatacije. Analizirana su tehnološka rešenja selektivnog otkopavanja rotornim bagerom, kombajnom i ripovanjem.

Bošković S. [7], [8], [9], [10], [12], [15], [25], [50], [70], [71] se bavio i učestvovao u istraživanjima: izbora optimalne opreme i tehnologije eksploatacije na površinskim kopovima uz primenu i razvijanje modela simulacije, otpora kopanju u funkciji fizičko-mehaničkih karakteristika radne sredine, primeni geofizičkih istraživanja pri rešavanju problema otkopavanja otkrivke, optimizacijom parametara reza rotornog bagera, mogućnostima otkopavanja otkrivk sa povećanim otporima kopanju i uticaju radne sredine na raspoloživost BTO sistema.

Bošković S., Jovančić P., Ignjatović D., Rakićević D., Maneski T. [11] su u radu *Vibration as deciding parameter during revitalization process for replacing the bucket wheel drive* su istraživali uticaj povećanja snage pogona rotora na ponašanje konstrukcije strele rotora. Merenjima vibracija pre i posle zamene reduktora, dokazana je ispravnost postupka jer su izmerene vibracije sa novim pogonom i do 15 puta manje nego sa starim pogonom.

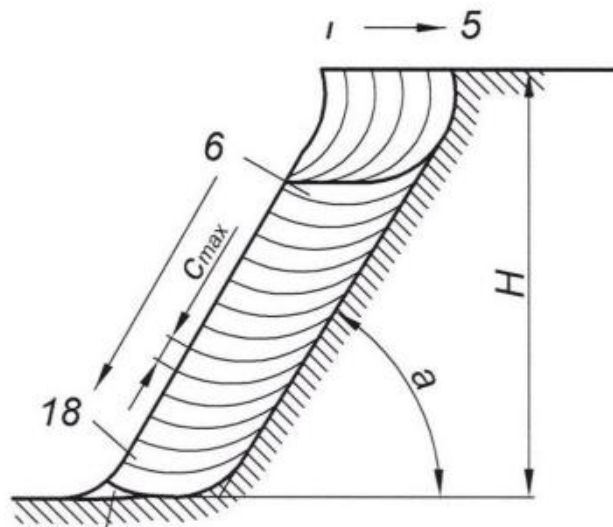
2.2. Dosadašnja iskustva istraživanja predmetne problematike u konkretnim uslovima radne sredine na primeru Površinskog kopa Gacko

Površinski kop Gračanica u Gacku, godišnjeg kapaciteta 2,2 miliona tona uglja, je otvoren 1978. god. i bio je podeljen na dva eksploataciona polja: Polje A i Polje B.

Do 1999. godine, proizvodnja uglja i otkrivke je vršena uglavnom primenom kontinualne tehnologije. Eksploatacija uglja je vršena rotornim bagerom, odnosno BTD sistemom (rotorni bager - transporter sa trakom - deponija uglja), a proizvodnja otkrivke se vršila sa dva rotorna bagera, odnosno BTO sistema (rotorni bager - transporter sa trakom - odlagač) [66], [70], [71]. Rotorni bageri su radili u bloku (Slika 2.1.), a otkopavanje je vršeno kombinovanim rezovima, pri čemu je samo u prvom, najgornjem pojasu, otkopavanje vršeno vertikalnim rezovima, a ostali pojasevi su otkopavani horizontalnim rezovima (Slika 2.2.). Rezultat toga, ili bolje rečeno posledice su bile nepovoljno dinamičko ponašanje konstrukcije bagera, pucanje vedrica, veće habanje zuba, veća potrošnja električne energije, manja rezna sila, manji kapacitet bagera i dr.



Slika 2.1. Rotorni bager ER-1250 16/1,5 u BTO sistemu



Slika 2.2. Način kopanja rotornim bagerom na Površinskom kopu Gacko

Konstruktivni parametri rotornog bagera ER-1250 16/1,5 su dati u Tabeli 2.1.

Tabela 2.1. Konstruktivni parametri rotornog bagera ER-1250 16/1,5

Parametar	Vrednost
Teoretski kapacitet (m ³ /h)	1250/1000
Specifična sila kopanja (N/cm ²)	7/10
Broj vedrica (n)	9
Zapremina vedrica (m ³)	0,375
Broj istresanja u minuti	76,50
Brzina rezanja (m/min)	2,90
Brzina kretanja bagera (m/h)	375
Dozvoljeni nagib (°)	
a) u radu	3
b) u transportu	5
Snaga pogona rotora (kW)	315
Dovodni napon (V)	6000
Visina kopanja (m)	16
Dubina kopanja (m)	1,50
Dužina strele rotora (m)	21,30
Radijus kopanja - gornji (m)	23,83
Radijus kopanja - donji (m)	21,23
Prečnik rotora (m)	6,45
Radijus istresanja (m)	22,60
Visina istresanja (m)	
-max	6,50
-min	3,30
Maksimalna brzina strele rotora (m/min)	30,00
Brzina vertikalnog kretanja strele rotora (m/min)	3,00
Maksimalni ugao dizanja strele rotora (°)	20
Minimalni ugao spužtanja strele rotora (°)	19

Nekako istovremeno, krajem 90-ih godina, ukazala se potreba za izmenom sistema eksploatacije, kako na proizvodnji uglja tako i na proizvodnji otkrivke.

Eksploatacija uglja rotornim bagerom je, usled raslojavanja ugljenog sloja i pojave velikog broja proslojaka jalovine u uglju, postala ekonomski neopravdana. Zato je primenjena tehnologija selektivnog otkopavanja uglja diskontinualnom opremom, čime je postignuto značajno poboljšanje kvaliteta otkopanog ulja, što se direktno odrazilo na pouzdaniji rad kotlovskog postrojenja termoelektrane i povećanje proizvodnje električne energije.

Što se tiče proizvodnje otkrivke, u Polju B površinskog kopa, došlo je pojave materijala sa povećanom čvrstoćom u litološkom članu 8N , koji nisu bili registrovani dotadašnjim istražnim radovima.

Povećana čvrstoća, odnosno povećan otpor kopanju radne sredine prouzrokovao je niz problema na rotornom bageru: prekomerno habanje zuba na vedricama, pucanje vedrica, pucanje rotora, pucanje strele rotora, a značajna opterećenja je trpila i sama konstrukcija bagera. Zubi na vedricama su praktično samo ostavljali tragove na stenskom materijalu, a u sledećem rezu odlamali komadiće materijala između stvorenih brazdi (Slika 2.3.). Sve je to prouzrokovalo drastično povećanje zastoja i pad kapaciteta rotornog bagera. Situacija se sve više pogoršavala, kako je rasla debljina sloja otkrivke sa povećanim otporom na kopanje, pa je rad rotornog bagera u ovakvoj sredini postao ekonomski neopravdan i čak fizički potpuno onemogućen.



Slika 2.3. Brazde koje u ostavljaju zubi na rotoru bagera u stenskom materijalu

Prethodna istraživanja navedene problematike, koja su poslužila kao osnova za dalja istraživanja su vršili Geoinženjering - Sarajevo i Institut za rudarska istraživanja Tuzla.

Geoinženjering – Sarajevo [20] je vršio *Laboratorijska ispitivanja petrografskih svojstava, sile rezanja i fizičko mehaničkih osobina stenskih masa litostratigrafskog člana ⁸N područja PK Gračanica - Gacko* u okviru kojih je ispitivanje otpora kopanju vršeno metodom *rasklinjavanja*. Eksperimenti su vršeni na po tri probna tela za svaki ispitivani uzorak pri čemu je registrovana maksimalno dostignuta rezna sila i dubina penetracije u trenutku dostizanja maksimalne sile, kao i površina preseka uzorka zahvaćenog penetracijom. Na osnovu ispitivanja izvršena je klasifikacija stena sa otporima kopanju od 379 do 1216 kN/cm² i čvrstoćom na pritisak od 17 do 64,65 daN/cm².

Institut za rudarska istraživanja Tuzla [27], [28], [29] je u periodu od 1980. do 1986. godine vršio ispitivanja fizičko-mehaničkih karakteristika otkrivke i uglja u Gatačkom ugljenom basenu sa ciljem utvrđivanja otpora kopanju i dokazivanja kapaciteta rotornih bagera. Istraživanja su su bila bazirana na ispitivanju rezne sile u zavisnosti od debljine, širine i visine reza i brzine okretanja strele rotora. Metodologija ispitivanja se zasnivala na merenju snage na pogonu rotora i specifičnog utroška energije u zavisnosti od nabrojanih parametara i analizi dobijenih rezultata.

Obzirom da navedena istraživanja nisu bila dovoljna za izbor optimalnog rešenja otkopavanja slojeva otkrivke sa povećanim otporom kopanju, pristupilo se novim istraživanjima, koja su se odvijala u dve faze.

Prva faza je imala cilj da se geološkim istraživanjima utvrde fizičko-mehaničke karakteristike, prostorni položaj i debljina slojeva litološkog člana ⁸N sa povećanim otporom na kopanje. Geološka istraživanja su vršena kako u polju B, tako i u Centralnom polju u kome je predviđen nastavak eksploatacije u Gatačkom ugljenom basenu nakon zatvaranja Površinskog kopa Gračanica.

Geoinj Group Beograd [19] je vršio Ispitivanja fizičko-mehaničkih svojstava radne sredine površinskog kopa Gračanica Gacko sa analizom stabilnosti kosina. Izveštaj su radili autori Prof. Dr Milan Cvetković, Mr Jelena Majstorović, Mr Branko Petrović, Dragana Savić, dipl. ing. geol. i Siniša Jovović, dipl. ing. geol. U toku

istraživanja na uzorcima su ispitivani: vlažnost, zapreminska težina, poroznost, granulometrijski sastav, Atterberg-ove granice konsistencije, stišljivost tla, otpornost smicanju, otpori rezanju, jednoosna čvrstoća na pritisak, čvrstoća na zatezanje, brzina prostiranja elastičnih talasa, dinamički modul elastičnosti i dinamički Poisson-ov koeficijent. Po svom obimu navedena istraživanja predstavljaju najkompleksnija istraživanja fizičko-mehaničkih karakteristika otkrivke sa povećanom čvrstoćom u Gatačkom ugljenom basenu i omogućila su dalja istraživanja na izboru optimalnog rešenja otkopavanja otkrivke sa povećanim otporom kopanju.

Rezultati fizičko-mehaničkih svojstava otkrivke za svaki litološki član su dati u Tabeli 2.2.

Tabela 2.2. Fizičko-mehanička svojstva litoloških članova

Br.	Materijal	γ (kN/m ³)	C (kN/m ²)	ϕ (o)
1.	Kvartarna glina (Q)	20,14	82	9.5
2.	Lapor krečnjački ⁸ N	22	60 - 180	22 - 38
3.	Lapor ⁷ N	18 - 20	95 - 120	19 - 22
4.	Glina-ugljevita i sivozelena ⁶ N	18	5	6
5.	Sivozelena glina i glinoviti lapor ⁶ N	18	20	12
6.	Ugalj, laporovit ⁶ N	14	50	22 - 54
7.	Lapor glinovit ⁵ N	19	87	13,5
8.	Odloženi materijal	17,77	31,64	15,52

Litološki član ⁸Ng predstavlja najveći deo masa otkrivke uglja na Površinskom kopu Gračanica. Ova sredina je definisana kao laporoviti krečnjaci i laporci, a javljaju se u gornjoj zoni krovine ugljenog sloja. Debljina varira od nekoliko metara do 82,5 m. Heterogenog su sastava i anizotropnih fizičko-mehaničkih svojstava, kako u vertikalnom tako i u horizontalnom smeru.

Petrografski ovu stensku masu čine varijante laporovitih krečnjaka sa proslojcima lapora i laporovitih glina. U pogledu čvrstoće, sredina pripada, uglavnom, umereno čvrstim do čvrstim stenskim masama, zavisno od petrografskog sastava, dok su neke partije svrstane u meke stenske mase. U celini posmatrano, sredina je kompaktna, masivne teksture, pukotinski slabo izdeljena, osim zona tektonske aktivnosti.

Na osnovu ispitivanja stenske mase sa terenskim ispitivanjima i na uzorcima u laboratoriji, dobijena fizičko-mehanička svojstva su pokazala heterogene rezultate.

Istraživanjima je definisana otkrivka po parametru otpora rezanja u uslovima radne sredine što je veoma važno za projektovanje tehnologije eksploatacije zbog drastične promene kapaciteta rotornih bagera u zavisnost od specifičnog otpora kopanja (K_F), odnosno otpora rezanju (K_L).

Rezultati geoelektričnih istraživanja i istražnog bušenja omogućili su definisanje položaja i rasprostiranje (lateralno i po dubini) stena unutar litostratigrafskog člana 8N , dok je laboratorijskim ispitivanjima izvršena preciznija determinacija stenske mase prema svojim petrološkim, hemijskim i fizičko-mehaničkim svojstvima (sa posebnim osvrtom na otpor rezanju i brzini prostiranja V_p i V_s talasa).

Ovakav pristup rešavanju problema omogućio je rejonizaciju stenskih masa unutar ovog člana prema parametrima dobijenim terenskim i laboratorijskim ispitivanjima. Kategorizacija stenske mase otkrivke glavnog ugljenog sloja na Površinskom kopu Gračanica u Gacku izvršena je u četiri kategorije prema otporu rezanja i brzini prostiranja elastičnih longitudinalnih talasa (Tabela 2.3.).

Tabela 2.3. Kategorizacija otkrivke

Radna sredina	Kategorija stene	Otpor rezanju	Seizmička brzina prostiranja uzdužnih talasa	Vrsta stena
	K_n	$K_L(N/cm)$	(m/s)	
Sredina I	K_1	$K_L < 500$	500-1000	Kvartar (humus, ilovača) i rastresiti materijali
	K_2	$K_L = 500-1000$	1000-2000	Glinoviti lapori 8N , krečnjački lapori 7N
Sredina II	K_3	$K_L = 1000-1500$	2000-3000	Krečnjački lapori 8N
	K_4	$K_L > 1500$	> 3000	Tufitični vezani lapori 8N i peščari

Stenske mase sa povećanim otporom kopanju koje su svrstane u kategorije K_3 i K_4 , prate slojevitost i izgrađuju veći deo terena obuhvaćenog istraživanjima. Predstavljene su sa tri međusobno odvojena sloja sa otporima rezanju > 1000 N/cm u uslovima radne sredine.

I sloj sa otporima kopanja > 1000 N/cm u uslovima radne sredine se u hemijskom pogledu razlikuje od ostala dva sloja sa otporima pri rezanju > 1000 N/cm u uslovima radne sredine, jer se pored laporovitih krečnjaka javlja i vitrokristaloklastičan tuf kod koga je procenat SiO_2 do 56,42%.

Laboratorijskim ispitivanjima dobijeni su sledeći fizičko-mehanički parametri tufa:

- prirodna vlažnost odmah po otvaranju uzorka $\omega = 17,50 - 30,27$ (%),
- brzina longitudinalnih talasa $V_p = 2145 - 2733$ (m/s),
- otpor pri rezanju odmah po otvaranju uzorka $K_L = 784,60 - 1209,23$ (N/cm²),
- otpor pri rezanju $K_L = 830 - 1384,61$ (N/cm²) u opsegu vlaga 6,45 - 14,28 (%).

U ovom sloju se pored vitrokristaloklastičnog tufa javljaju i laporoviti krečnjaci sa vrlo visokim procentom $\text{CaCO}_3 > 85$ % i sledećim dobijenim vrednostima fizičko-mehaničkih parametara:

- prirodna vlažnost odmah po otvaranju uzorka $\omega = 3,81 - 7,85$ (%),
- brzina longitudinalnih talasa $V_p = 2400 - 3511$ (m/s),
- otpor pri rezanju odmah po otvaranju uzorka $K_L = 806,00 - 1230,77$ (N/cm²),
- otpor pri rezanju $K_L = 953,84 - 1200,00$ (N/cm²) za vlagu 2,01 - 6,45 (%).

II i III sloj sa otporima pri rezanju > 1000 N/cm u uslovima radne sredine su po svom hemijskom sastavu i fizičko-mehaničkim svojstvima jako slični i u litološkom pogledu predstavljaju laporovite mikritske i intramikritske krečnjake sa visokim procentom karbonatne komponente. Slojevi su stratigrafski razdvojeni sredinom I.

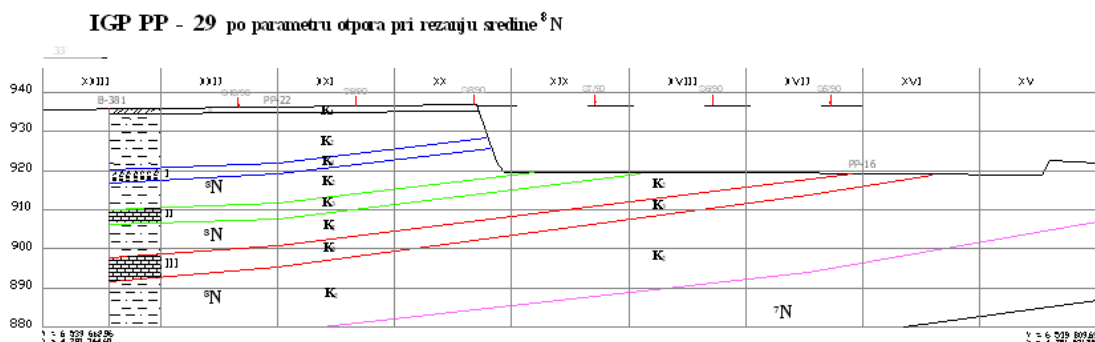
Laboratorijskim ispitivanjima dobijeni su sledeći fizičko-mehanički parametri:

- prirodna vlažnost odmah po otvaranju uzorka $\omega = 3,52 - 12,65$ (%),
- brzina longitudinalnih talasa $V_p = 2000 - 3591$ (m/s),
- otpor pri rezanju odmah po otvaranju uzorka $K_L = 806,00 - 1200,00$ (N/cm²),
- otpor pri rezanju $K_L = 815,38 - 1384,60$ (N/cm²) u opsegu vlaga 1,30 - 5,23.

Analizirajući sve dobijene rezultate kompleksnih istraživanja (geofizičkih, geomehničkih, istražnog bušenja, hemijskih i petroloških ispitivanja) načinjen je inženjersko-geološki model terena (Slika 2.4.) po zastupljenim kategorijama stenske mase, gde su izdvojene dve sredine čija su svojstva data pojedinačno:

- Sredina I (Kategorija stene K_1 i K_2) koja ne predstavlja problem pri okopavanju otkrivke glavnog ugljenog sloja;

- Sredina II (Kategorija stene K₃ i K₄) predstavlja problem za rad kontinualne opreme koji se ispoljava u padu kapaciteta i smanjenju pouzdanosti rada sistema. U litološkom pogledu stenske mase Sredine II odgovaraju vitrokristaloklastičnom tufu i laporovitim krečnjacima sa procentom CaCO₃ > 85 %.



Slika 2.4. Inženjersko-geološki model terena po parametru otpora pri rezanju sredine ⁸N

Druga faza u istraživanju otkopavanja otkrivke sa povećanom čvrstoćom na Površinskom kopu Gračanica u Gacku, je bio da se sagledaju svi aspekti mogućnosti primene rotornih bagera u konkretnim uslovima radne sredine.

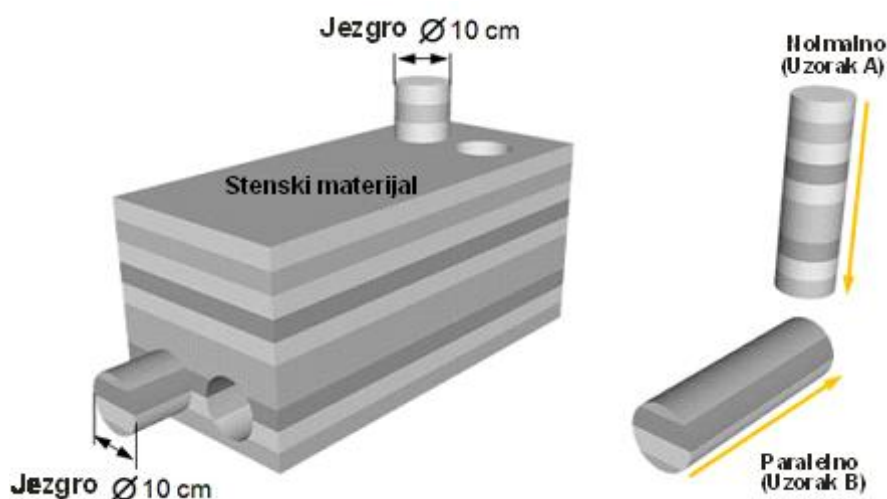
Pri tome je Man Takraf [42] vršio ispitivanja specifičnog otpora rezanja otkrivke na Površinskom kopu Gračanica u Gacku u cilju procene mogućnosti otkopavanja materijala sa povećanom čvrstoćom i davanja preporuke za nabavku novog rotornog bagera sa povećanom reznom silom. Za te potrebe su izvršena dva testa i to sondiranje udarom i test klinom na osnovu čega je kompanija Man Takraf predložila isporuku rotornog bagera SRs 500 sa snagom pogona rotora od 700 kW, ali nije došlo do nabavke ovog rotornog bagera zbog nedostatka finansijskih sredstava.

Zato se pristupilo istraživanju mogućnosti povećanja rezne sile, odnosno kapaciteta postojećeg rotornog bagera ER-1250 16/1,5. Ova istraživanja su vršena u dva dela.

Prvi deo je obuhvatio istraživanja optimizacije procesa otkopavanja u laboratoriji Technische Universitat Bergakademie iz Frajberga [18]. Istraživanja su vodili Prof. Drebenstedt C., Vorona M., Gassner W., a obuhvatila su: *ispitivanje radne sredine* (fizičko-mehaničke karakteristike, mineralni sastav i abrazivnost), *rezne sile* (ispitivanje

uticaja konstruktivnih parametara na rezu silu) i vrste reza kao osnovnog tehnološkog parametra za optimizaciju procesa otkopavanja.

Za potrebe ovih istraživanja izvršeno je reprezentativno uzorkovanje stenskog materijala na površinskom kopu, a iz neporemećenog uzorka izdvojena su jezgra uzoraka za dalja ispitivanja i to u pravcu i normalno na pravac slojevitosti (Slika 2.5.).



Slika 2.5. Uzorci za ispitivanje izdvojeni iz neporemećenog uzorka upravno (vertikalni) i u pravcu slojevitosti (paralelni)

Na uzorcima su ispitivane fizičko-mehničke karakteristike radne sredine, hemijski sastav, rezna sila, kao i optimizacija snage pogona rotora i optimizacija vrste reza.

Ispitivanja radne sredine su obuhvatila ispitivanje fizičko-mehaničkih karakteristika (Tabela 2.4.), mineralnog sastava (Tabela 2.5.) i abrazivnosti (Tabela 2.6.).

Tabela 2.4. Fizičko-mehaničke karakteristike ispitivanih uzoraka

Parametar	Vertikalni uzorci (A)	Horizontalni uzorci (B)
Prečnik x dužina (mm)	100·100	
Gustina (g/cm ³)	2,03	
Čvrstoća na pritisak (Mpa)	17,20 ± 3,37	15,17 ± 3,65
Čvrstoća na zatezanje (Mpa)	0,85 ± 0,26	1,22 ± 0,26
Lomljivost	20,24	12,43
Sadržaj vlage (%)	0,24	
Dinamički modul elastičnosti (E-modul; GPa)	14,42 ± 0,76	10,14 ± 1,88
Poisson-ov koeficijent	0,20 ± 0,02	0,23 ± 0,02

Rezultati eksperimenta su pokazali razliku u zavisnosti od pravca opterećenja. Prosečna čvrstoća na pritisak je bila za 2 MPa (20%) manja kod uzorka B (horizontalno

jezgro), nego kod uzorka A (vertikalno jezgro), a za razliku od pritisne čvrstoće, zatezna čvrstoća je veća za 0,4 MPa (30%). To pokazuje da je lomljivost (čvrstoća na pritisak/zatezna čvrstoća) uzorka A znatno veća (62%), nego uzorka B.

Dinamički modul elastičnosti kod uzorka A je veći za 4 MPa, nego kod uzorka B.

Rezultati ispitivanja mineralnog sastava ukazuju (kao i u prethodnim istraživanjima u Gatačkom ugljenom basenu) na visok sadržaj kalcijum karbonata (CaCO_3) - između 88% i 93%, dok je istovremeno sadržaj silicijum dioksida nizak i iznosi samo 2% do 6%. Prisustvo ovog minerala je i glavni uzročnik habanja alata za rezanje.

Tabela 2.5. Mineralni sastav ispitivanih uzoraka

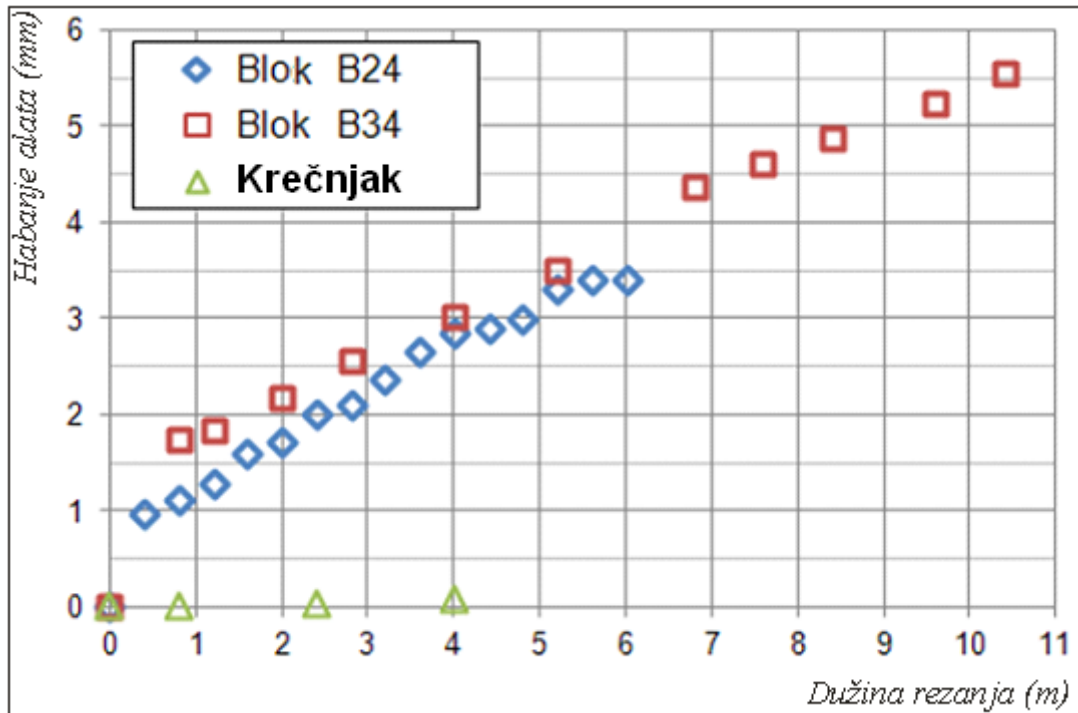
Mineral	Uzorak/Sadržaj (%)					Prosek
	1	2	3	4	5	
SiO_2	4,02	6,19	2,20	1,57	3,80	3,56
Al_2O_3	3,64	2,46	2,99	3,01	1,26	2,67
Fe_2O_3	0,43	0,43	0,52	0,57	0,54	0,50
MgO	0,71	0,69	0,68	0,64	0,63	0,67
CaO	52,50	0,69	51,20	54,50	49,80	51,54
CO_2	36,12	38,02	41,25	38,52	41,80	39,14

Rezultati ispitivanja mineralnog sastava su pokazali da testirana otkrivka nije abrazivna. Ipak je izvršen eksperiment i upoređivanje uzorka sa drugim materijalima, kako bi se proverio i procenio nivo abrazije, a rezultati su dati u Tabeli 2.6.

Tabela 2.6. Abrazivnost ispitivanih uzoraka

Stena	Pritisna čvrstoća (MPa)	Zatezna čvrstoća (MPa)	Abrazija	Lomljivost
Blok B24	24,0	2,35	1,1	10,2
Blok B34	34,0	3,40	1,5	10,0
Uzorak - Gacko	16,0	1,00	nepoznato	16,0

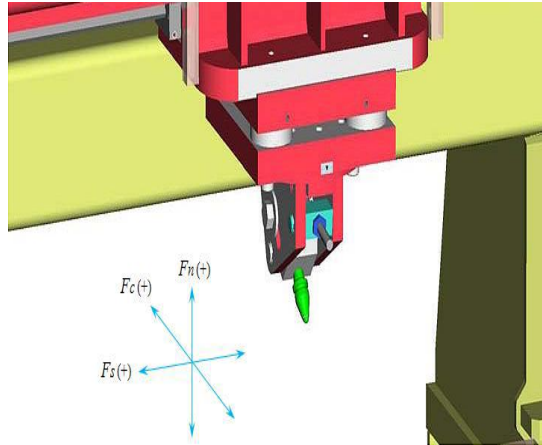
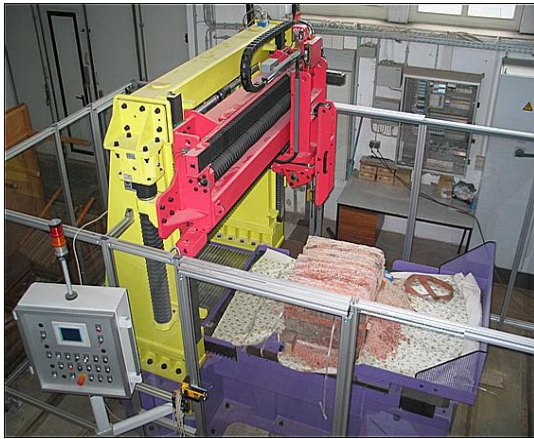
Eksperiment se sastoji od rezanja u uzorku, alatom od mekog materijala (poput aluminijuma) pod uglom od 45° . Dubina reza je 20 mm, razmak između rezova 40 mm, a brzina rezanja 1 m/s. Rezultati ispitivanja dati na Slici 2.6., potvrđuju ocenu o abrazivnim svojstvima otkrivke, odnosno mali uticaj na habanje alata za rezanje.



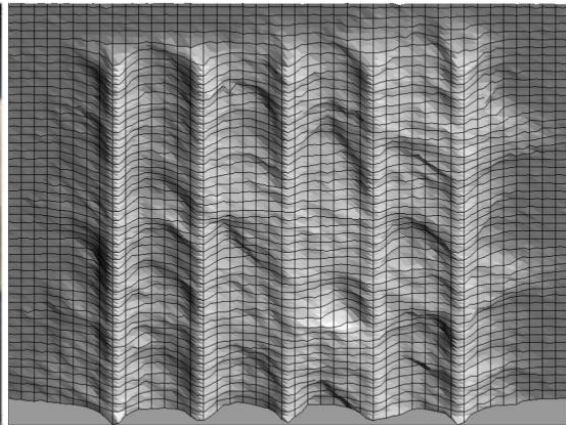
Slika 2.6. Habiranje alata (zuba) u zavisnosti od debljine reza i vrste stenskog materijala

Ispitivanje rezne sile je vršeno na specijalizovanoj aparaturi HXS 1000-50 (Slika 2.7.), koja omogućava izvođenje eksperimenata sa različitim alatima za rezanje i podešavanjima ugla rezanja. Aparatura je opremljena kamerom koja se koristi za snimanje procesa rezanja i uređajem za lasersko skeniranje. Kamera ima mogućnost zapisa od 120.000 frejmova u sekundi, a uređaj za skeniranje omogućuje merenje rastojanja između lasera i površine uzorka sa preciznošću od $\leq 70 \mu\text{m}$. Analiza rezultata merenja rezne sile i izrada modela površine testiranog uzorka (Slika 2.8.) je vršena na računaru DEWE 5000, opremljenim specijalnim programskim paketom (Slika 2.9.).

U eksperimentu su korišćeni originalni alat za rezanje (zub rotornog bagera ER-1250 16/1,5 (Slika. 2.10.a) i specijalno napravljeni alati MT-10 i MT-60 (Slika 2.10. b, c).



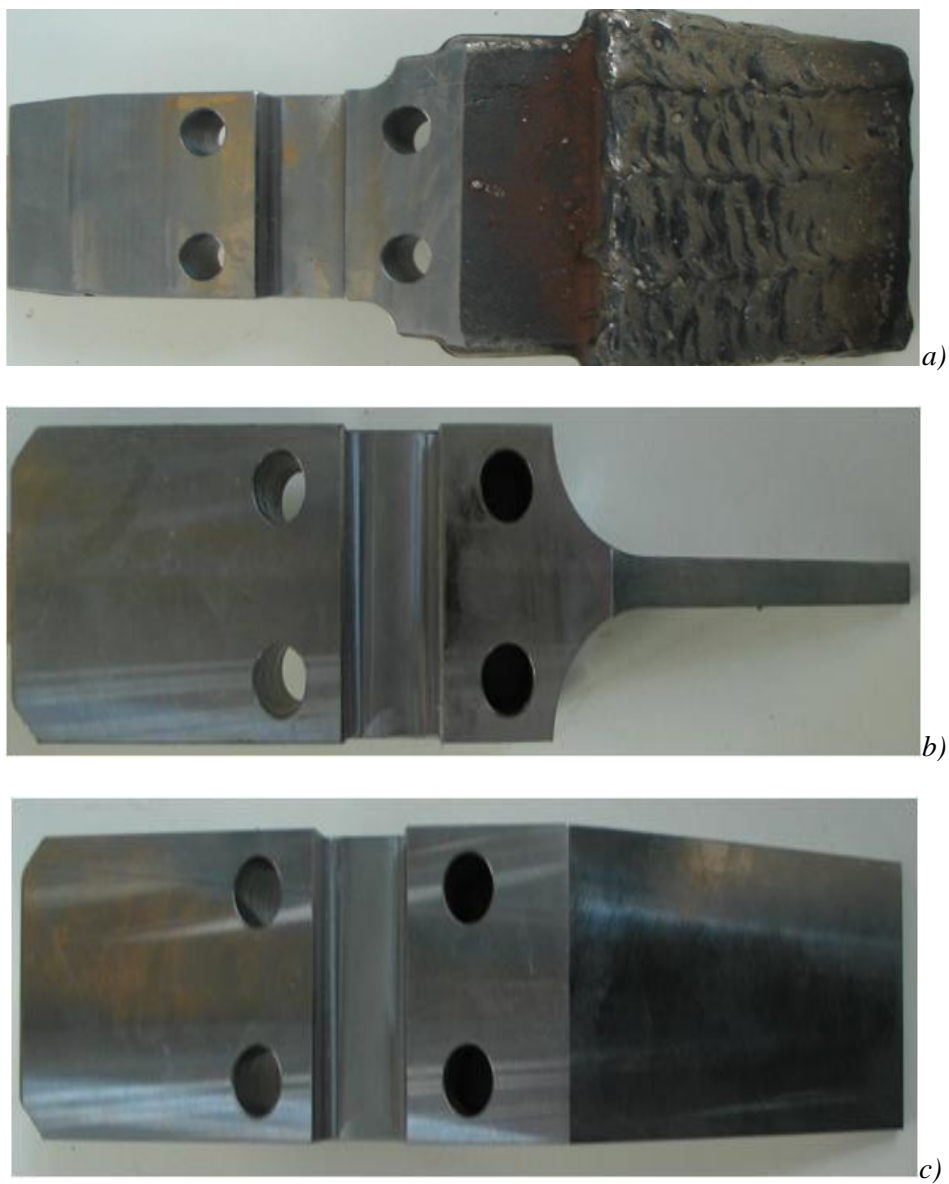
Slika 2.7. Aparatura HXS 1000-50 za merenje rezne sile



Slika 2.8. Izgled površine i model površine testiranog uzorka



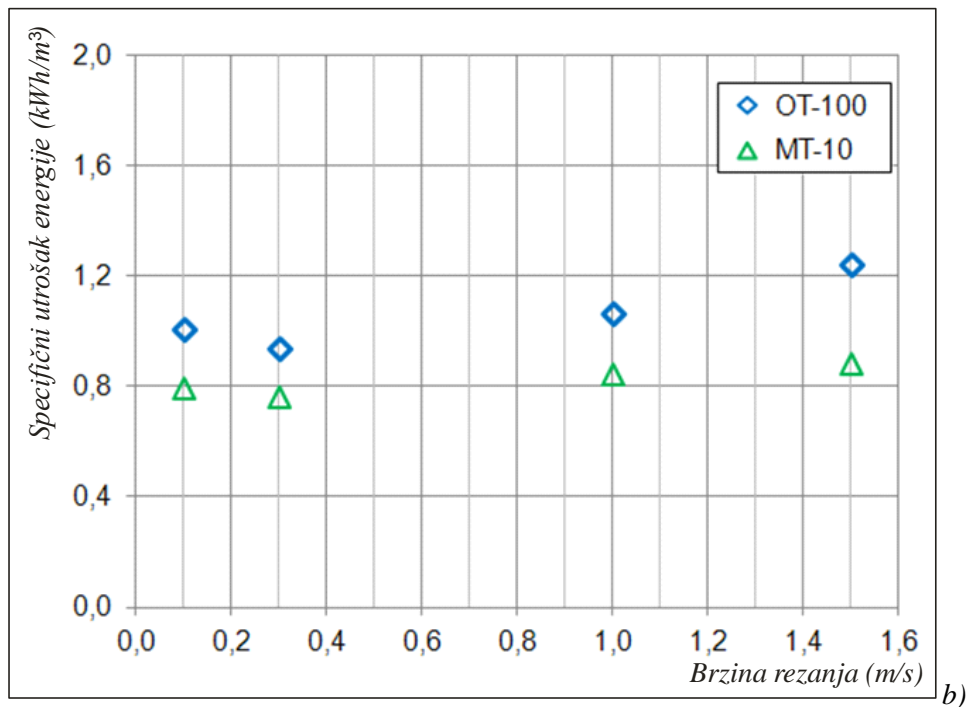
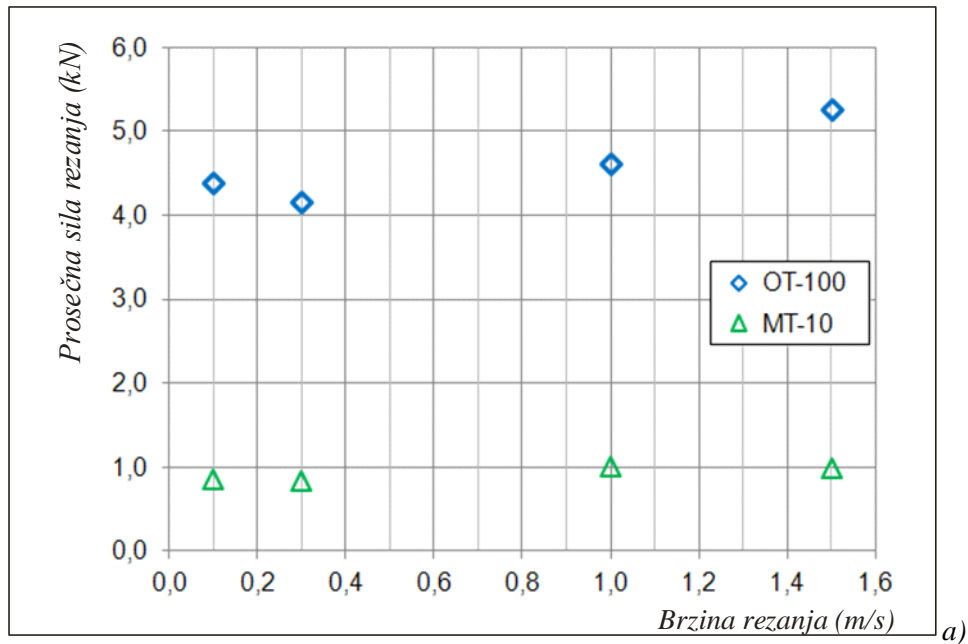
Slika 2.9. Računar DEWE 5000 sa prikazom merenja i video zapisom



Slika 2.10. Alati za rezanje korišćeni za ispitivanje rezne sile

Ispitivanje rezne sile i specifičnog utroška energije je vršeno u zavisnosti od brzine rezanja (Slika 2.11.), ugla rezanja (Slika 2.12.) i debljine reza (Slika 2.13.).

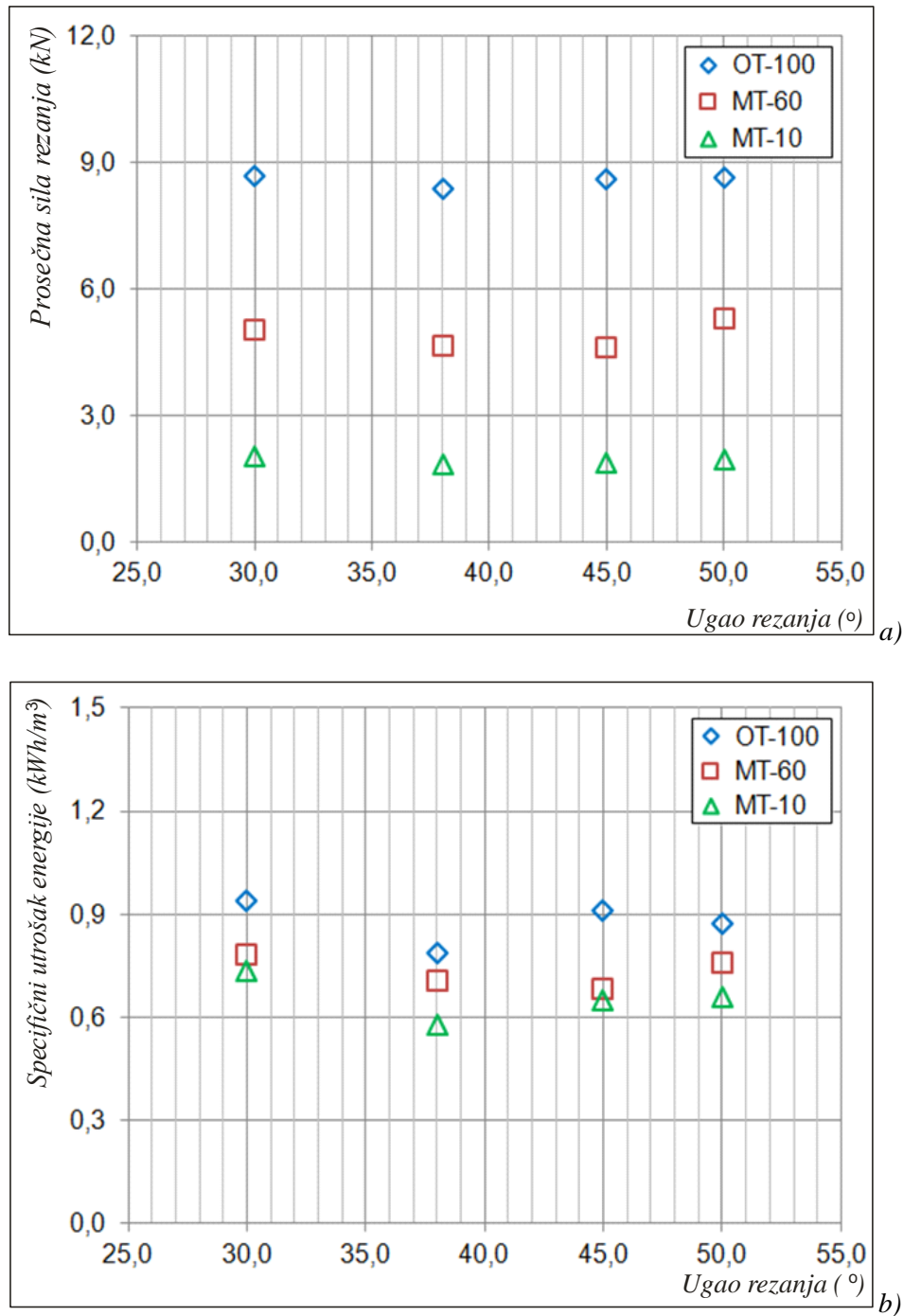
Uticao brzine rezanja



Slika 2.11. Uticao brzine rezanja na: a) reznu silu i b) specifičnu potrošnju energije

Rezultati merenja ukazuju da sa porastom brzine rezanja dolazi do blagog porasta rezne sile, ali i specifične potrošnje energije.

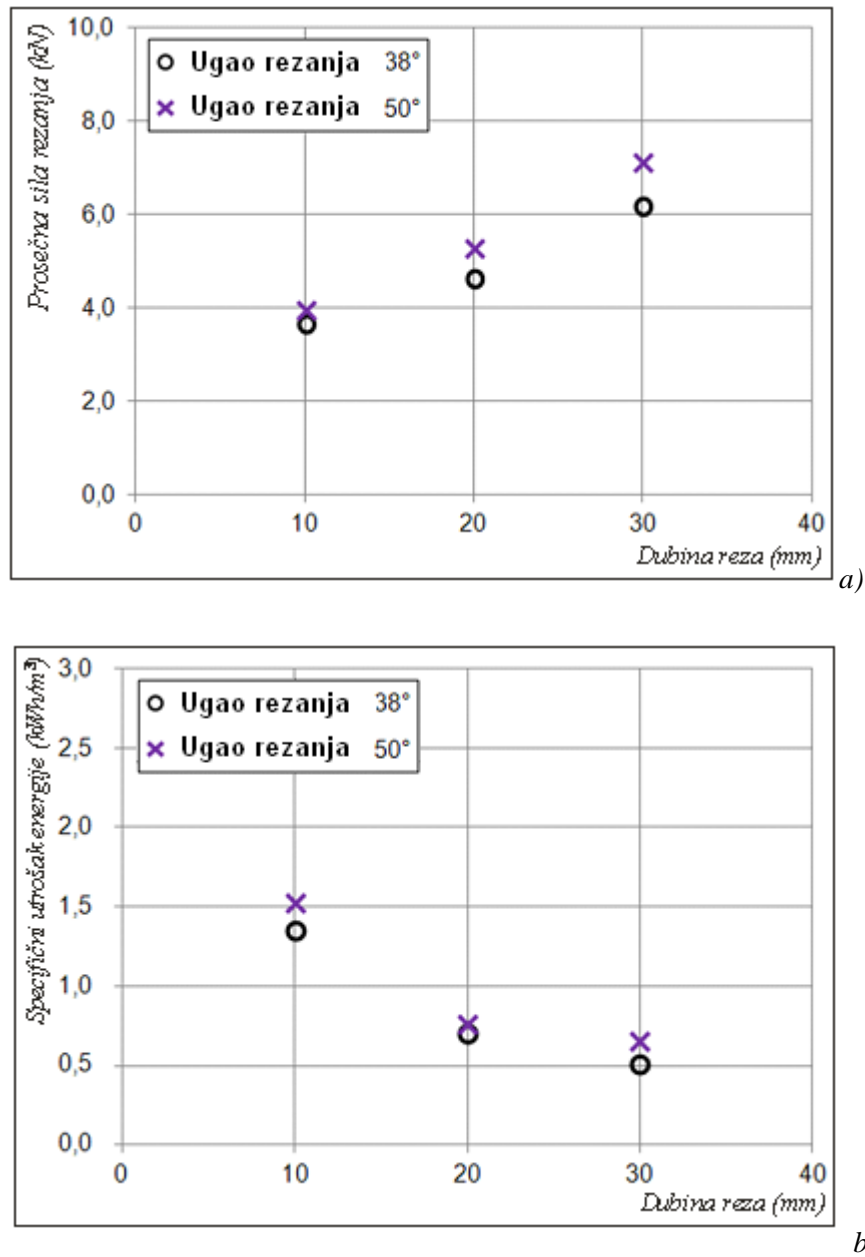
Uticađ ugla rezanja



Slika 2.12. Uticađ ugla rezanja na: a) reznu silu i b) specifičnu potrošnju energije

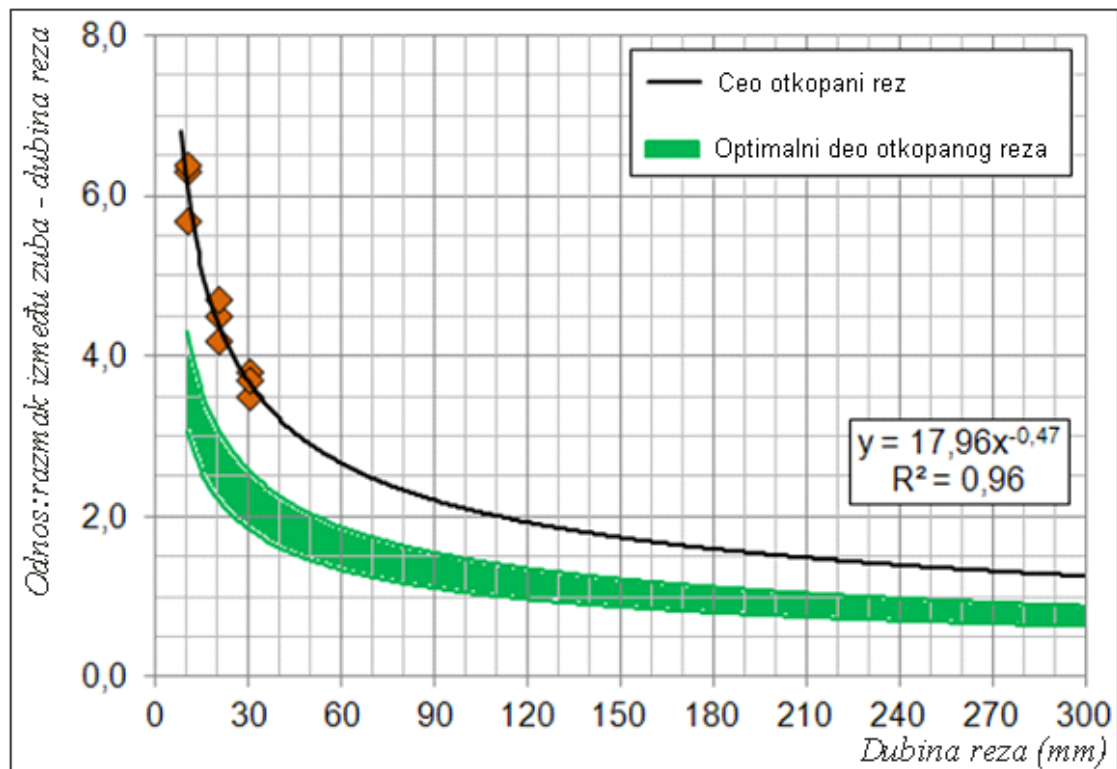
Sa prethodnih dijagrama se uočava da rezna sila ima minimalnu vrednost za uglove rezanja od 30 do 50°, a specifična potrošnja energije ima svoj minimum za ugao od 38°.

Uticaoj debljine reza



Slika 2.13. Uticaoj debljine reza na: a) reznu silu i b) specifičnu potrošnju energije

Uticaoj dubine reza na reznu silu i specifičnu potrošnju energije je ispitivan na alatu MT-60 i sa dijagrama se može zaključiti da sa povećanjem debljine reza dolazi do linearnog povećanja rezne sile, dok specifična potrošnja energije ne opada proporcionalno sa povećanjem debljine reza. U ovom eksperimentu utvrđen je i odnos razmaka između zuba u zavisnosti od dubine rezanja (Slika 2.14.).



Slika 2.14. Uticaj debljine reza na odnos između razmaka zuba i dubine reza

U Tabelama 2.7. do 2.9. su date izmerene i proračunate vrednosti rezne sile i specifične potrošnje energije za sve tri vrste zuba koji su korišćeni u eksperimentu u zavisnosti od debljine reza i ugla rezanja.

Tabela 2.7. Vrednost rezne sile i specifične potrošnje energije za uzorak MT-10

Debljina reza (mm)	Ugao rezanja (°)	Sila rezanja (kN)	Specifična potrošnja energije (kWh/m ³)
10	30	1,061	1,170
	38	1,095	1,187
	45	1,062	1,017
	50	1,138	1,190
20	30	2,017	0,737
	38	1,844	0,580
	45	1,877	0,653
	50	1,934	0,660
30	30	3,258	0,507
	38	2,955	0,473

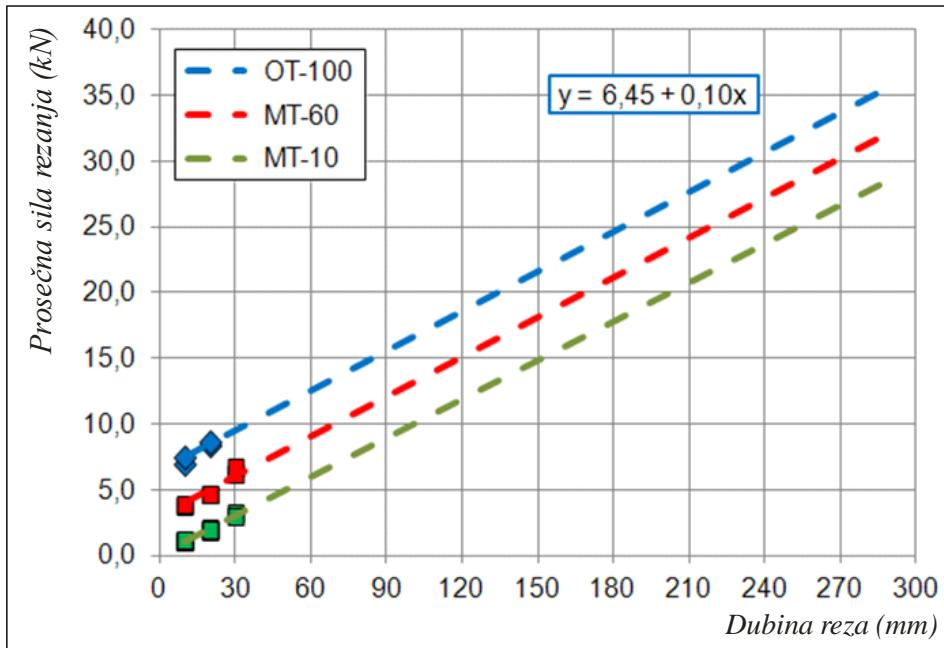
Tabela 2.8. Vrednost rezne sile i specifične potrošnje energije za uzorak MT-60

Debljina reza (mm)	Ugao rezanja (°)	Sila rezanja (kN)	Specifična potrošnja energije (kWh/m ³)
10	30	3,923	1,476
	38	3,652	1,348
	45	3,792	1,417
	50	3,971	1,525
20	30	5,028	0,783
	38	4,626	0,708
	45	4,609	0,686
	50	5,284	0,763
30	30	7,321	0,701
	38	6,176	0,514
	45	6,698	0,582
	50	7,126	0,656

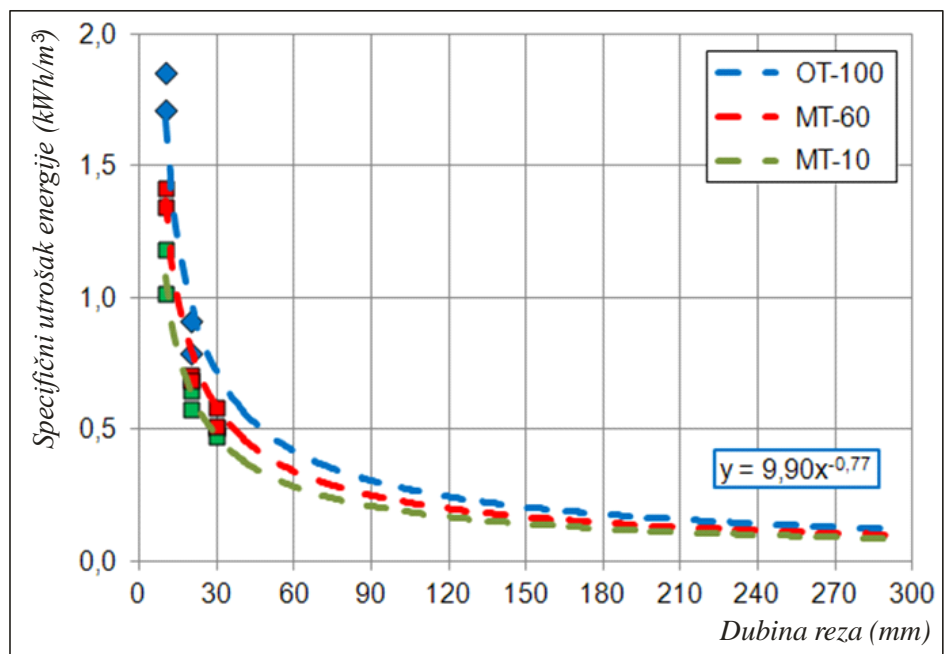
Tabela 2.9. Vrednost rezne sile i specifične potrošnje energije za uzorak OT-100

Debljina reza (mm)	Ugao rezanja (°)	Sila rezanja (kN)	Specifična potrošnja energije (kWh/m ³)
10	30	7,394	1,801
	38	6,996	1,712
	45	7,440	1,852
	50	7,410	1,924
20	30	8,687	0,942
	38	8,360	0,789
	45	8,586	0,912
	50	8,618	0,873

Na osnovu ovih rezultata moguće je predviđanje procesa rezanja za različite debljine reza i ugla rezanja od 30 do 50°. Vrednost rezne sile (y) u zavisnosti od debljine reza (x) može se računati po formuli: $y = 6,45 + 0,10 \cdot x$, a specifična potrošnja energije $y = 9,90 \cdot x^{-0,77}$. Predviđanje uticaja debljine reza na reznu silu i specifičnu potrošnju energije je dato na Slikama 2.15. i 2.16.



Slika 2.15. Uticaj debljine reza na vrednost rezne sile



Slika 2.16. Uticaj debljine reza na specifičnu potrošnju energije

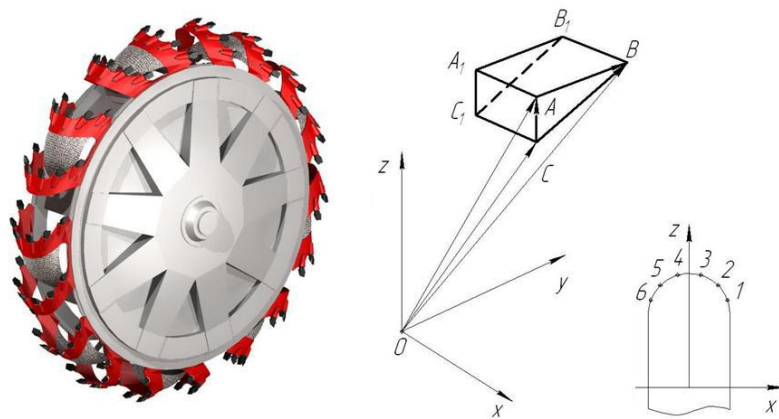
Ispitivanje zuba

Ispitivanje zuba, odnosno kinematike procesa kopanja, je vršeno sa aspekta izbora optimalnog oblika i vrste zuba, ugla rezanja i međusobnih rastojanja na vedricama rotora, sa ciljem postizanja što dužeg radnog veka i njihove dalje modernizacije.

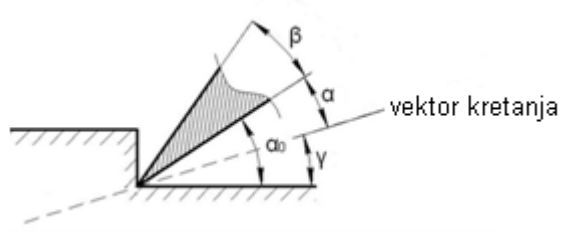
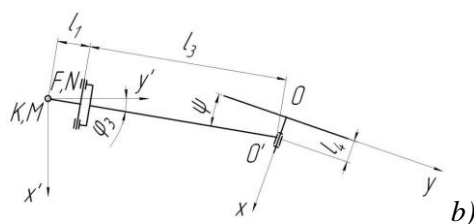
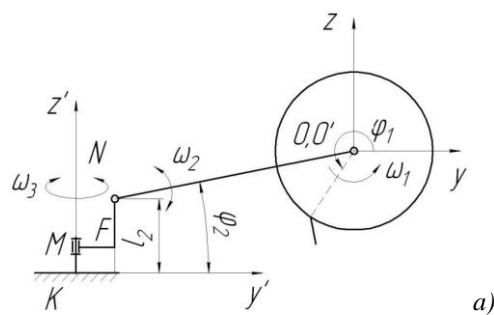
Za kinematsku analizu su korišćene određene tehničke karakteristike rotornog bagera ER-1250 16/1,5 (Tabela 2.10.) i konstruktivne šeme rotora i strele rotora. Koordinate tačaka zuba za analizu su određene pomoću modela rotora (Slika 2.17.), a šema za kinematski proračun je data na Slici 2.18.

Tabela 2.10. Tehničke karakteristike rotornog bagera korišćene za proračun

Oznaka	Karakteristika
φ_1	Obrtni ugao rotora u odnosu na ravan ZOY
φ_2	Ugao nagiba strele rotora u odnosu na Y osu
φ_3	Obrtni ugao strele bagera u odnosu na X osu
ψ	Ugao između rotora i strele rotora
l_1	Rastojanje između ose obrtne platforme i strele rotora bagera
l_2	Rastojanje između ose rotornog bagera i ose strele bagera
l_3	Dužina strele rotora
l_4	Rastojanje između strele i rotora
ω_1	Ugaona brzina rotora
ω_2	Ugaona brzina strele rotora
ω_3	Ugaona brzina obrtne platforme
α	Ugao zazora
α_0	Ugao između vektora zuba i površine prolaza bagera
β	Maksimalni ugao
γ	Ugao između oštrice zuba i površine



Slika 2.17. Model rotora i koordinate tačaka zuba



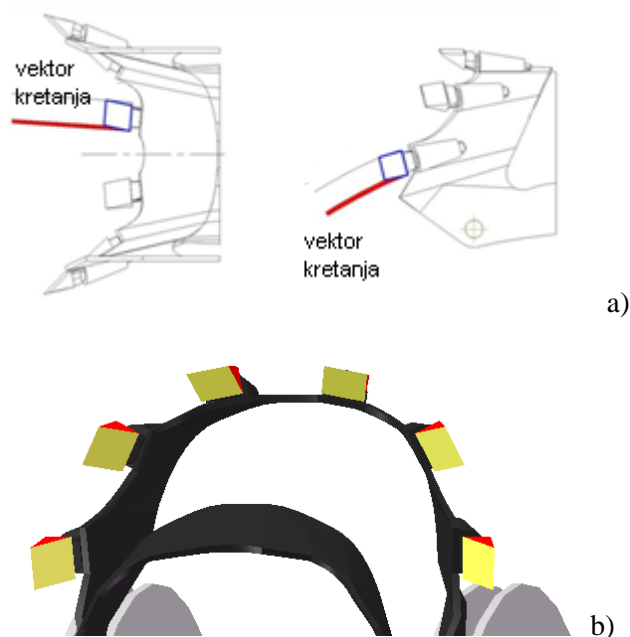
Slika 2.18. Šema za kinamtski proračun: a) prikaz preseka rotora; b) prikaz odozgo;

c) proces kopanja

Kinematska analiza je vršena analitičkom metodom, pri čemu se kretanje zuba razmatra u 2 koordinatna sistema: XYZ - vezano za rotor i $X'Y'Z'$ - vezano za osnovu bagera. Proračun je rađen za proces kopanja u horizontalnoj ravni sa okretanjem rotora

u levu i desnu stranu sa spuštanjem strele rotora. Ugao φ_1 se menja od 45° do 225° sa povećanjem od 15° , dok ugao φ_3 iznosi 20° .

U zavisnosti od strane u koju se rotor okreće, zavisi i koji su zubi u kontaktu sa stenskim materijalom. Na primer, pri okretanju u levu stranu, u kontaktu su zubi 4, 5 i 6, pa zazor projekcije ugla na $X'Y'Z'$ ravan ima negativne vrednosti. To povlači prisustvo trenja između bočne ivice zuba i radne površine, što dovodi do povećanja potrebne snage za proces otkopavanja i izaziva brzo habanje zuba. Na Slici 2.19. su crvenom bojom označene ivice zuba koje imaju kontakt sa stenskim materijalom. Sadašnji pravougaoni oblik zuba uzrokuje trenje bočne ivice, a samim tim i habanje, pod bilo kojim uslovima kopanja, što ukazuje na potrebu promene oblika zuba, čime bi se smanjila potrebna specifična sila razaranja stene i produžio vek trajanja zuba.

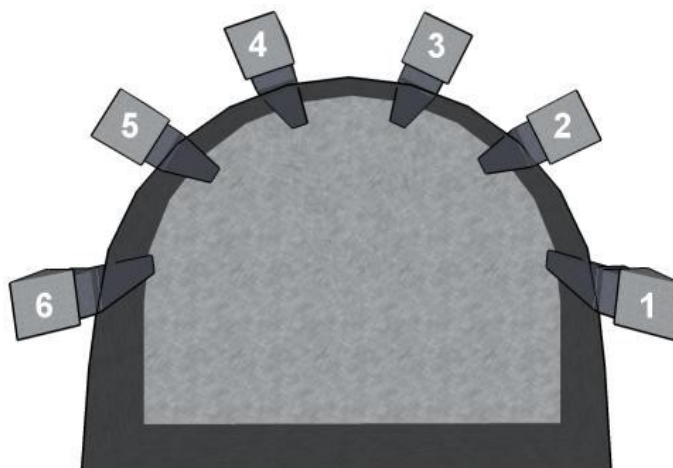


Sl. 2.19. Vedrice rotora sa zubima: a) Pokretni vektor zuba; b) Površina trenja zuba

Na osnovu rezultata izvršenih eksperimenata izvedeni su određeni zaključci za vrednost optimalnog ugla rezanja, odnos razmaka između zuba i dubine reza, oblik zuba i vrstu zuba.

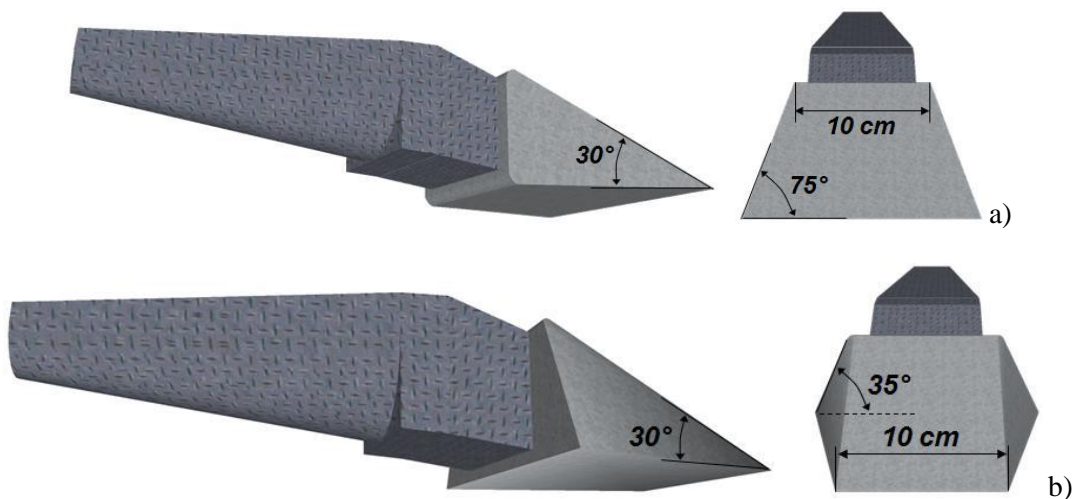
Optimalni ugao rezanja iznosi približno 40° , a njemu odgovara ugao zazora od 20° , na osnovu čega se izvodi zaključak da je neophodno podešavanje ugla rezanja. Na taj način se može smanjiti specifični utrošak energije i do 10 %. Osim toga, habanje zuba će biti značajno manje (10-30%) kod preporučenog ugla rezanja.

Neravnomerno habanje zuba raspoređenih na vedricama, kao i brazde u stenskom materijalu (Slika 2.3.) jasno ukazuju da je odnos razmaka između zuba (Slika 2.20.) i dubine reza neodgovarajući i da ga je neohodno izmeniti u cilju optimizacije procesa. Primećeno je da zubi 2, 3 i 4 ne učestvuju ravnomerno u otkopavanju, odnosno ne ostvaruju istu debljinu reza, usled čega se i pojavljuju brazde u stenskom materijalu. Takođe zubi različitih vedrica ostavljaju tragove rezanja na istom mestu, što zahteva dodatnu snagu. Promenom debljine reza, kao i brzine okretanja rotora, postižu se različiti efekti - u jednom slučaju dolazi do ravnomernijeg rada, ali i do pada kapaciteta, a u drugom slučaju je to obrnuto. Iz svega toga se izvodi zaključak da je neophodno smanjiti razmak između zuba 2, 3, 4 i 5 pogotovu i zbog toga što se debljina reza u procesu kopanja smanjuje od maksimuma do 0.



Slika 2.20. Raspored zuba na vedricama

Oblik zuba je veoma bitan kod optimizacije kopanja, jer su rezultati ispitivanja jasno pokazali da zona trenja između bočnih ivica zuba i radne sredine nastaje pri preopterećenom radu rotora. To dovodi do značajnog povećanja otpora kopanju i većem habanju zuba. Ovo trenje je teško izbeći podešavanjem uglova kod originalnih zuba koji su pravougaonog oblika, pa su predložena dva oblika zuba trapezoidnog oblika sa izmenama oblika u planu (TP) i boku (TC) (Slika 2.21.).

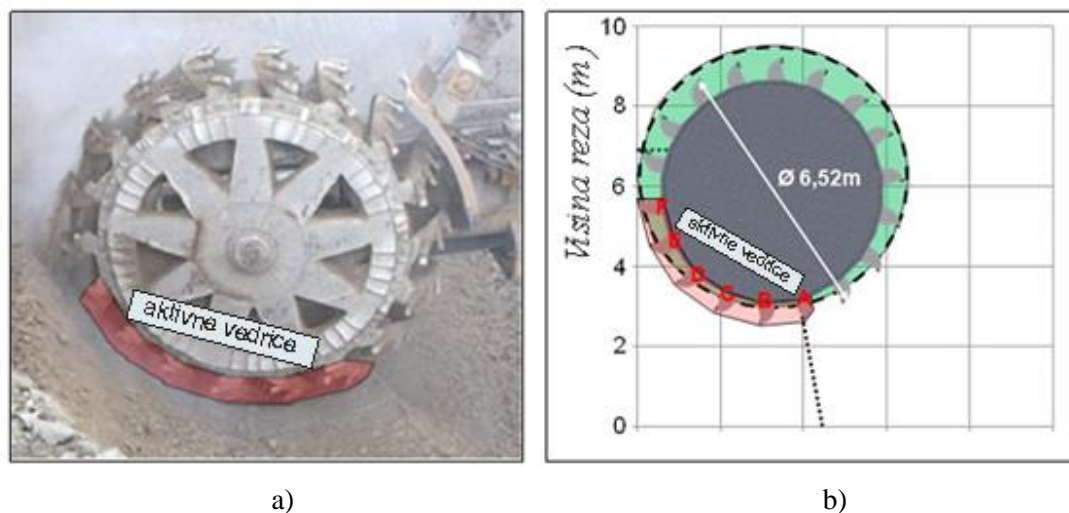


Slika 2.21. Predloženi oblik zuba trapezoidnog oblika: a) u planu; b) u boku

Optimizacija snage pogona rotora

Utvrđivanje optimalne snage pogona rotora je veoma značajno sa aspekta povećanja rezne sile, odnosno kapaciteta rotornog bagera.

Kod otkopavanja stenskog materijala rotornim bagerom ER-1250 16/1,5 kontakt sa radnom sredinom ima 6 aktivnih vedrica (Slika 2.22.).



Slika 2.22. Prikaz aktivnih vedrica u procesu kopanja: a) fotografija u radnoj sredini; b) model

Snaga rezanja (P_G) i ukupna sila rezanja (F_G) se računaju nezavisno od vedrice i oblika zuba. Snaga otkopavanja je:

$$P_G = P_M - P_H - P_R \text{ (kW) ili} \quad (2.1)$$

$$P_G = P_M - (Q_P \cdot \rho \cdot g (2/3 \cdot D_w)) - (5\% P_M), \text{ (kW)} \quad (2.2)$$

gde je: P_M - ukupna snaga motora (kW),

P_H - snaga za dizanje materijala od mesta otkopavanja do mesta istresanja (kW),

P_R - snaga utrošena da se prevaziđe trenje alata u radnoj sredini (kW),

Q_P - kapacitet bagera (m^3/s),

ρ - gustina iskopanog materijala u (t/m^3),

g - gravitacija (m/s^2),

D_w - prečnik rotora (m).

Proračunom se dobija da je snaga rezanja približno 294 kW.

Ukupna sila rezanja se definiše po obrascu:

$$F_G = P_G / V_C, \text{ (kN)}, \quad (2.3)$$

gde je: V_C brzina rezanja (m/s).

Proračunom se dobija da sila rezanja na rotoru iznosi 109 kN.

Izvršeni eksperimenti rezanja omogućavaju procenu sile rezanja za aktivne alate rezanja. U zavisnosti od položaja vedrice razlikuje se i dubina rezanja, a sila rezanja se može odrediti po formuli $y = 6,45 + 0,10 \cdot x$. Rezultati su prikazani u Tabeli 2.11.

Prethodna formula je validna samo za rad u punom bloku, pa izračunate vrednosti sile rezanja za vedrice označene kao A-3, B-3, C-3 i D-3 moraju biti smanjene do određene vrednosti, koja nije manja od 50% iz razloga što minimalna sila rezanja na rotoru mora biti približno 103,8 kN.

Tabela 2.11. Sila rezanja za aktivne zube

Vedrica	Broj zuba	Debljina reza (mm)	Napomena za rez	Sila rezanja (kN)	Sila rezanja (kN)
A	2	43	Puni blok	10,75	10,75
	3	145	Deo bloka	20,95	10,47
B	2	40	Puni blok	10,45	10,45
	3	142	Deo bloka	20,65	10,33
C	2	40	Puni blok	10,45	10,45
	3	142	Deo bloka	20,65	10,32
D	2	14	Puni blok	7,85	7,85
	3	113	Deo bloka	17,75	8,88
E	3	87	Puni blok	15,15	15,15
F	3	27	Puni blok	9,15	9,15
Ukupno				143,80	103,80

Iz dobijenih rezultata je zaključeno da su mogućnosti rada rotornog bagera ER-1250 16/1,5 sa postojećim pogonom rotora skoro maksimalne, što znači da je za povećanje kapaciteta bagera neophodno instalirati pogon rotora veće snage, a njegovo dimenzionisanje zahteva dodatna istraživanja.

Ispitivanje tehnoloških parametara (vrste reza)

Što se tiče vrste reza kao tehnološkog parametra, od koga u procesu otkopavanja stenske mase najviše zavisi kapacitet rotornog bagera, ukazano je na neophodnost daljih istraživanja koja bi opredelila optimalnu vrstu reza rotornog bagera u konkretnim uslovima radne sredine.

Drugi deo u istraživanju mogućnosti otkopavanja otkrivke sa povećanim otporom kopanju rotornim bagerom je podrazumevao povećanje specifične sile kopanja i optimizaciju parametara reza u postupku revitalizacije rotornog bagera ER-1250 16/1,5 [26]. Osnovni razlozi za revitalizaciju su bili loše pogonsko stanje rotornog bagera prouzrokovano dugogodišnjim radom u radnoj sredini sa povećanim otporom kopanju i nedovoljna specifična sila kopanja, koja proizilazi iz male snage pogona rotora (315 kW).

Cilj revitalizacije je bio da se poveća pogonska spremnost rotornog bagera i da se analizom rezultata teoretskih i eksperimentalnih istraživanja izvrši optimizacija snage pogona rotora i parametara reza rotornog bagera u funkciji smanjenja otpora kopanju, minimizacije potrošnje energije i povoljnog dinamičkog ponašanja konstrukcije bagera. To je ujedno i jedan od zadataka ove disertacije i rezultati tih istraživanja su detaljno analizirani u u poglavljima od 4. do 10.

3. TEORETSKE OSNOVE RADA ROTORNOG BAGERA

3.1. Opšte o rotornim bagerima

Rotorni bager predstavlja samohodnu mašinu kontinualnog dejstva, namenjenu za otkopavanje jalovine i korisne mineralne sirovine na površinskim kopovima (Slika 3.1.). Osnovni delovi rotornog bagera su: uređaj za kopanje (rotor), sistem za unutrašnji transport, mehanizam za kretanje i noseća konstrukcija [4], [38], [39], [40] [41], [47], [49], [52], [59].



Slika 3.1. Rotorni bager ER-1250 16/1,5

Otkopavanje materijala vrši se vedricama koje su ravnomerno raspoređene i pričvršćene na obodu rotora. Istovremeno sa obrtanjem rotora u vertikalnoj ravni i okretanjem strele rotora zajedno sa platformom u horizontalnoj ravni, svaka vedrica otkopava iz masiva odrezak koji je određen oblikom i geometrijskim parametrima.

Obrtanjem rotora i nailaskom punih vedrica u zonu istovarnog sektora, materijal se prazni iz vedrica, predaje prijemnom transporteru sa trakom na streli rotora i dalje redom, zavisno od broja transportera na bageru, poslednjem istovarnom transporteru. Kod rotornih bagera se istovremeno sa otkopavanjem vrši transport i utovar otkopanog materijala u transportna sredstva, a ređe se vrši i direktno prebacivanje materijala u otkopani prostor površinskog kopa ili skladištenje na deponiji.

Rotorni bager je danas, svakako, najrasprostranjenija mašina na površinskim kopovima lignita za otkopavanje mekih i srednje tvrdih materijala. Tokom višedecenijskog razvoja ovih mašina stvorene su konstrukcije koje mogu na zadovoljavajući način da odgovore veoma raznovrsnim rudarsko-tehničkim zahtevima otkopavanja. Ove konstrukcije bagera obezbeđuju visoke tehničko-ekonomske pokazatelje u radu, zahvaljujući, pre svega, nizu tehničko-eksploatacionih prednosti u odnosu na druge vrste bagera (visoka sigurnost u radu, relativno mala ugradnja metala 0,20-1,10 t/m³/h, mala specifična potrošnja energije 0,15-0,50 kWh/m³ i visoki koeficijent korisnog dejstva radnog organa 0,8-0,9).

Iako je korišćenje obrtnog točka sa vedricama za dizanje vode za potrebe navodnjavanja bilo poznato još u starom veku, ideja za kopanje tla točkom rodila se tek krajem prošlog veka, posle primene parne mašine na bagerima kašikarima. Posle niza raznih patenata, krajem prošlog veka u SAD i početkom ovog veka u Evropi, tek 1913. godine Švander u Francuskoj patentirao radni točak sa vedricama (rotor), koji iskopani materijal u procesu obrtanja predaje direktno transporteru sa trakom na strelji rotora. Vlasnik patenta, nemačka firma Humbolt, je 1916. godine konstruisala prvi rotorni bager na šinama, koji je naredne godine počeo sa radom na površinskom kopu Bergwitz. Masovniji početak primene ovih bagera na površinskim kopovima počinje između 1935. i 1936. godine, uključivanjem fabrike LMG u proizvodnju rotornih bagera, kao i bržim razvojem proizvodnje lignita u Nemačkoj.

Oblast primene rotornih bagera se neprestano širila, kako u pogledu čvrstoće materijala koji se njima može direktno otkopavati, tako i u pogledu prilagođavanja bagera najraznovrsnijim rudarsko-geološkim i drugim uslovima na površinskim kopovima. Već 1933. godine je izgrađen bager sa kapacitetom od 760 m³/h, visinom kopanja od 13 m, snagom motora rotora od 74 kW, ukupnom instalisanom snagom od 300 kW i čija masa je iznosila 352 tone. Prvi put je primenjen trogusenični mehanizam za kretanje 1934. godine, a devetogusenični mehanizam 1937. godine. Do 1938. godine izgrađeno je preko 50 rotornih bagera, a pedeset godina kasnije preko 800 komada. Proizvodnja rotornih bagera u SAD počinje 1943. godine.

Do 1951. godine proizvodili su se rotorni bageri sa rotorom čelijskog tipa. Tada je prvi put primenjen polučelijski tip, što im je znatno povećalo kapacitet. Od 1955. godine počinje

sve masovnije proizvodnja rotornih bagera i za dubinski i za visinski rad. Kasnije su proizvedeni i prvi bageri sa promenljivom dužinom strele. Od 1960. godine proizvode se rotorni bageri sa povećanom reznom silom i većim kapacitetima.

Počev od 1955. godine izrađuju se rotorni bageri za dubinski i visinski rad, što je omogućilo njihovu primenu na eksploataciji ležišta sa vrlo složenim uslovima zaleganja slojeva korisne mineralne sirovine i povećalo stepen koncentracije proizvodnje unutar jednog površinskog kopa smanjenjem broja transportnih horizonata. Međutim, dubina kopanja ispod nivoa stajanja je ograničena maksimalnim usponom transportera na streli bagera (oko 18°), odnosno, visinom zglobne veze strele na platformi bagera iznad planuma. Dubinski rad, bez okretanja vedrica, je tehnološki komplikovan zbog nemogućnosti otkopavanja materijala u suprotnom smeru, čime se ostvaruje neprekidan rad pri kretanju unazad. Zbog toga, rotorni bager mora da otkopava jedan dubinski blok, čija dužina zavisi od dužine strele rotora, krećući se napred, posle čega se u praznom hodu vraća unazad za dvostruku dužinu bloka, pa se ciklus naizmenično ponavlja. Za regularni kontinualni dubinski rad neophodno je okrenuti vedrice za 180° , što je naravno, uslovljeno posebnom konstrukcijom rotora.

Do 1960. godine rotorni bageri bili su predviđeni isključivo za otkopavanje materijala do srednje čvrstoće, ali izgradnjom rotornih bagera sa povećanim specifičnim silama kopanja stvorili su se uslovi za otkopavanje polučvrstih i čvrstih jalovinskih materijala i uglja.

Pojava rotornih bagera sa produžnim strelama rotora bila je svojevremeno praćena veoma bučnom reklamom i optimističkim prognozama. Na prvi pogled primamljive tehnološke mogućnosti ovih bagera obećavale su u eksploataciji osetno veće vremensko i kapacitetno iskorišćenje u odnosu na rotorne bagere sa nepromenljivim dužinama strele rotora. Međutim, zbog evidentnih nedostataka (znatno složenija konstrukcija transportera sa trakom na bagerima, opasne vibracije cele konstrukcije, naročito kod otkopavanja raznorodnih materijala, osetno povećanje mase bagera za oko 10 do 17%, itd.), rotorni bageri sa produžnim strelama nisu našli širu primenu na površinskim kopovima.

Sve češća primena na eksploataciji nagnutih slojeva zahtevala je od mašinogradnje izgradnju takvih rotornih bagera koji se mogu uspešnije prilagoditi

ležišnim prilikama, odnosno, povećanim nagibima etažnih ravni. Taj zahtev je doveo do izgradnje bagera sa uređajem za automatsko horizontiranje gornjeg okretnog dela bagera. Ovde se, međutim, ne može zanemariti činjenica, da ugradnjom ovog uređaja čitava konstrukcija bagera postaje složenija, a što je još nepovoljnije, masa bagera se povećava za 8 do 10%.

Kod rotornih bagera je najrasprostranjeniji gusenični mehanizam za kretanje, pri čemu se broj gusenica kreće od 2 do 16 zavisno od mase bagera, nosivosti tla, potrebne učestanosti transporta, rada u krivinama, itd. Gusenični uređaj za transport obezbeđuje zadovoljavajuće manevarske sposobnosti bagera, ne zahteva strogo planiranje trase, savlađuje relativno velike uspone, itd. Međutim, ovaj uređaj za transport ima i svojih nedostataka od kojih treba izdvojiti sledeće: velika masa uređaja, složenost konstrukcije, veliki gubici energije na transportu, intenzivno habanje elemenata uređaja za transport bagera, a samim tim i kratak vek trajanja, razbijanje tla ispod gusenica pri većem broju prolaza bagera istom trasom, itd.

U cilju eliminisanja pomenutih nedostataka guseničnog uređaja za transport, konstruisani su i drugi transportni uređaji: koračajući, šinsko-gusenični i koračajuće-šinski uređaj za transport. Do danas, međutim, ovi uređaji na rotornim bagerima nisu našli širu primenu.

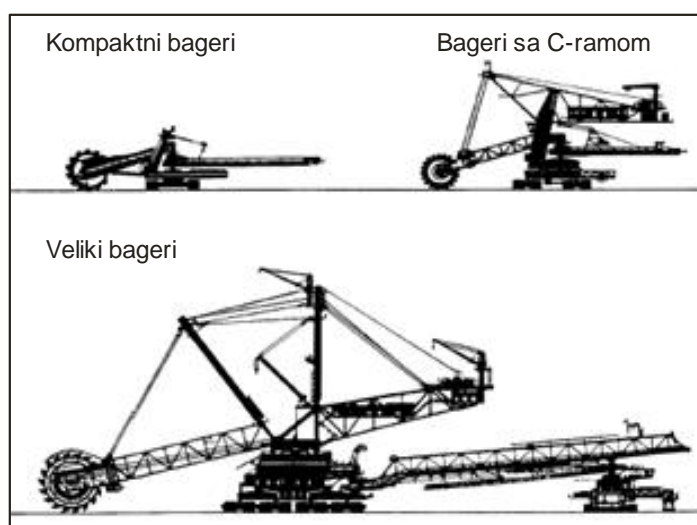
Ekspanzija kontinualnog rada osnovne mehanizacije na površinskim kopovima iziskivala je sve produktivnije rotorne bagere, pa se može slobodno reći da je vremenom rotorni bager postao sigurno najsavršenija i najrasprostranjenija mašina kontinualnog dejstva u rudarstvu.

Dijapazon primene rotornih bagera, u pogledu čvrstoće materijala koje može direktno otkopavati i u pogledu prilagođavanja bagera najraznovrsnijim rudarsko-tehničkim, hidrogeološkim i klimatskim uslovima, je veoma širok.

Rotorni bageri se mogu klasifikovati po raznim obeležjima, a obzirom da je razvoj ovih bagera bio veoma buran, u stručnoj literaturi postoji čitav niz klasifikacija, koje su u primeni. Prema nemačkoj klasifikaciji rotorni bageri se prema osnovnim konstruktivnim karakteristikama dele u klase A, B i C (Tabela 3.1. i Slika 3.2.).

Tabela 3.1. Uporedni parametri različitih tipova rotornih bagera

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



Slika 3.2. Tipovi rotornih bagera

Navedena podela nije čvrsto definisana i postoje određena preklapanja između navedenih tipova. Potrebno je naglasiti osnovne karakteristike pojedinih tipova:

- A - Kompaktni (hidraulični) rotorni bageri su sa relativno kratkom strelom u odnosu na prečnik rotora, imaju veliki kapacitet u odnosu na masu i dimenzije bagera i relativno nisko težište. Nedostaci se ogledaju u relativno manjem radnom veku konstrukcije, a u tehnološkom smislu imaju niži koeficijent bagerovanja. Tipični primeri kompaktnih rotornih bagera na našim površinskim kopovima su C 700S, SRs 400, SchRs 800. Na površinskom kopu Visonta u Mađarskoj radi najveći kompaktni rotorni bager firme SANDVIK, Tip PE 100, Model 1300/1,5*20 teoretskog kapaciteta 6700 m³/h;
- B - Bageri sa C ramom imaju povezanu gornju gradnju, centralni stub i nosač

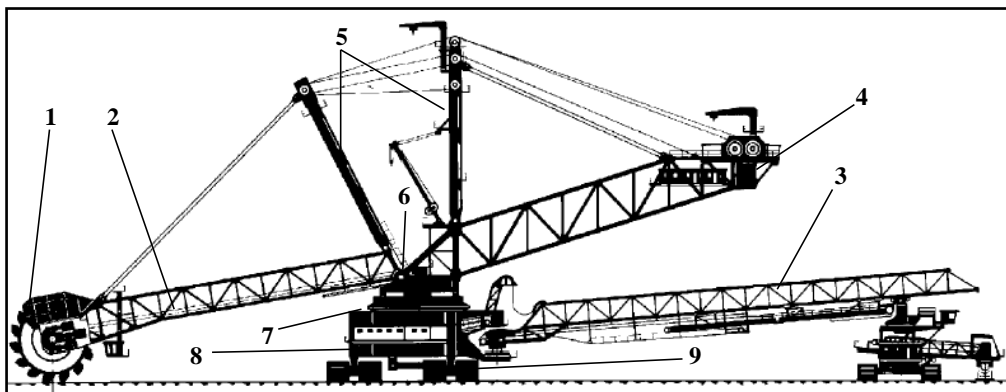
balasta u obliku slova C. Povoljan im je koeficijent bagerovanja, tehnološki su vrlo prihvatljivi, ali uz relativno visoko težište. Projektovani su sa i bez pretovarnog uređaja. Najveći broj bagera na našim površinskim kopovima, koji pripadaju ovoj klasi su: SRs 1200, SchRs 630, SRs 2000, SRs 1300 i ER-1250 16/1,5;

- C - Veliki bageri imaju karakteristične noseće stubove koturača sa užadima sa spuštenim nosačem balasta koji se praktično veže za gornju obrtnu platformu. Ova vrsta bagera ima relativno nisko težište, ali i složen transportni put otkopanog materijala. Rotorni bager SchRs 1760, koji radi na površinskom kopu Polje D, ima niz karakteristika bagera klase C.

Rastuća koncentracija proizvodnje na površinskim kopovima zahtevala je od proizvođača rudarskih mašina povećanje jediničnih kapaciteta i visina kopanja mašina, smanjenje radnih masa, bolje prilagođavanje rudarsko-geološkim, hidrogeološkim i klimatskim uslovima, povećanje pouzdanosti, poboljšanje komfora ljudstva koje opslužuje mašinu, pri istovremenom smanjenju vremena opsluživanja i dr.

Intenzivan razvoj tipova i modela rotornih bagera pripada periodu šezdesetih i sedamdesetih godina. U navedenom periodu isporučen je veliki broj bagera sa jasnim tendencijama ka optimizaciji osnovnih tehničkih karakteristika (kapacitet, visina kopanja, raspon bagera, površinski pritisak na tlo, povećanje rezne sile). Najveći rotorni bager proizveden je 1987. godine, kada je Krupp isporučio površinskom kopu Hambah, bager teoretskog kapaciteta 19200 m³/h.

Veličina, oblik i konstrukcija rotornog bagera zavise posebno od zahtevanog kapaciteta, načina utovara materijala i specifičnih uslova rada na površinskom kopu. Na oblik i konstrukciju bitno utiče dozvoljeni nagib kosina, zatim čvrstoća materijala koji se otkopava i dozvoljeni specifični pritisak na tlo. Oblik i konstrukcija moraju biti prilagođeni uslovima dobrog i lakog održavanja. Konstrukcija rotornog bagera je predstavljena na Slici 3.3.



Slika 3.3. Konstrukcija rotornog bagera

(1. Rotor sa vedricama, koji se nalazi na strelu rotora zajedno sa pogonom; 2. Strela rotora (katarka), koja se svojim krajem oslanja na okretnu platformu (gornju gradnju); 3. Istovarna strela ili istovarni most; 4. Konzola protivtega i protivteg za uravnoteženje konstrukcije rotornog bagera u odnosu na okretnu platformu i transportni mehanizam; 5. Nadgradnja rotornog bagera, koja služi kao oslonac za vešanje strele rotora, konzole protivtega, istovarne strele; 6. Okretna platforma, na kojoj se nalazi oprema rotornog bagera (uređaji, postrojenja, instalacije); 7. Oslono-okretni mehanizam sa okretnom platformom; 8. Donje postolje (donja gradnja); 9. Mehanizam za kretanje.)

3.2. Otkopavanje materijala rotornim bagerima - tehnologija rada

U vertikalnoj podeli površinskog kopa element koji odgovara visini kopanja bagera je etaža. Kada se radna ravan bagera poklapa sa transportnom ravni, onda je visina etaže ista kao i visina bloka. Kada bager radi na raznim radnim ravnama tovarići iskopani materijal na jedan transportni horizont, koristi se pojam podetaže. Ovde je etaža suma pojedinih otkopanih podetaža kod utovara na jedan transportni horizont [38], [39], [40] [41], [47], [49], [52].

Kod visinskog i dubinskog rada bagera sa jednog radnog horizonta, celu etažu treba posmatrati kao sumu posebnih elemenata, zbog tehnoloških razlika koje se javljaju pri visinskom i dubinskom radu.

Pri visinskom radu otkopavani masiv lociran je izvan ose rotora ili ispred rotora, i iznad radnog planuma bagera. Posle otkopavanja masiva za iznos napredovanja čela (bloka) za jedan ciklus, bager se primiče ka čelu. Kod regularnog dubinskog kopanja napredovanje rotornog bagera vrši se unazad, jer bager praktično otkopava radni planum. Otkopana čeonu kosina locirana je između ose rotora i donjeg stroja bagera, a ispod radnog planuma. Pokret radnih kašika ima karakter kopanja ispod sebe.

Rotorni bageri mogu raditi u frontu, bloku i boku (poluboku). Rad u frontu se

retko koristi i to pre svega kod šinskih bagera i za selektivno otkopavanje. Otkopavanje se vrši sa dvostranim (blok) ili jednostranim (bok) obrtanjem nosača rotora u odnosu na osu kretanja pri cikličnom pomeranju bagera ili bez obrtanja kod stalnog kretanja bagera pri radu u frontu.

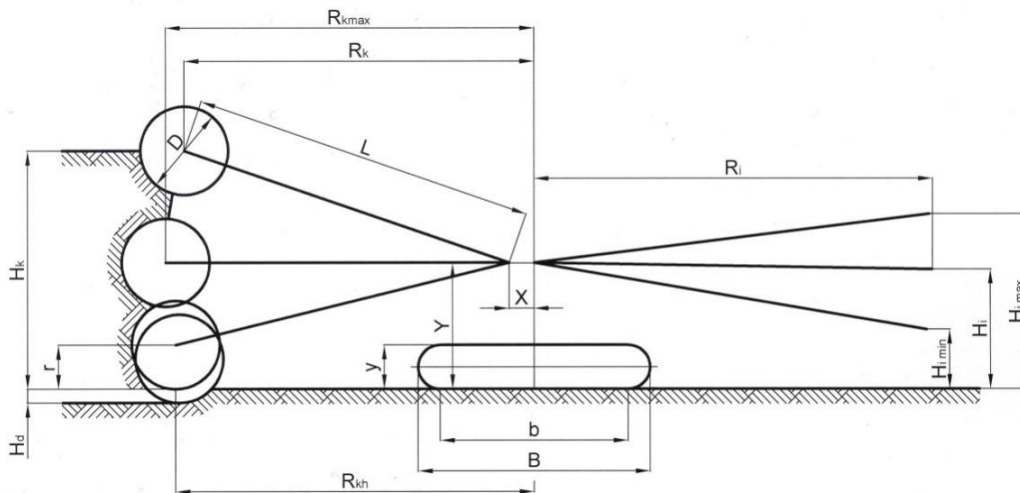
Savremeni rotorni bageri konstruisani su prvenstveno za rad u bloku. To rezultira iz sledećih osobina bagera:

- Rotornog sistema za kopanje, koji ne omogućava kopanje masiva na celoj visini etaže sa jednim prolazom bagera duž radnog fronta;
- Guseničnog mehanizma za kretanje koji ima velike otpore pri kretanju;
- Mehanizma za obrtanje gornjeg stroja koji je prilagođen za bočno pomeranje sistema za kopanje.

Kinematika radnog procesa bagera u bloku bazira se na sledećim osnovnim pokretima:

- Rotacionom radnom pokretu rotora;
- Obrtnom bočnom pomeranju strele rotora koje se postiže okretanjem gornjeg stroja oko vertikalne ose bagera;
- Vertikalnim ili horizontalnim prilaženjem rotora masivu (vertikalni ili horizontalni rez).

Radni i tehnički parametri rotornih bagera su visina kopanja (H_k), maksimalni radijus kopanja (R_k), radijus kopanja na nivou stajanja (R_{kh}), dužina strele rotora (L), radijus istresanja (R_i), maksimalna (H_{imax}) i minimalna (H_{imin}) visina istresanja i prečnik rotora (D) (Slika 3.4.). Visine podetaža rotornih bagera ispod i iznad nivoa stajanja bagera određuju se na osnovu konstruktivnih mogućnosti i ograničene su dozvoljenim uglom nagiba nosača rotora, od 27° pri visinskom i 18° pri dubinskom radu.



Slika 3.4. Osnovni radni parametri rotornog bagera

U raznim fazama radnog procesa rotornog bagera otkopava se: odrezak (element masiva otkopan sa jednom vedricom rotora), rez (deo masiva koji se sastoji od niza odrezaka otkopanih jednim pomeranjem strele rotora u stranu iz jednog položaja rotornog bagera) i pojas (deo masiva koji se otkopava nizom rezova dobijenih uzastopnim prilaženjem rotornog bagera masivu po celoj dubini bloka).

Oblik i vrste reza

Otkopavanje stenskog materijala se vrši vedricom na rotoru u vremenu kretanja vedrice po luku koji je određen radijusom kopanja i uglom okretanja bagera. Kao rezultat kružne putanje rezanja, dobija se rez u obliku srpa, a deo reza koji se zahvata jednom vedricom je odrezak.

Rez je definisan debljinom, odnosno položajem krajnje tačke zuba vedrice u dva uzastopna položaja prilaženja bagera masivu, zatim visinom i uglom okretanja bagera u horizontalnoj projekciji.

Otkopavanje se vrši sa dve tipske vrste reza i to: vertikalnim (Slike 3.5.a, b i 3.6.a) i horizontalnim rezovima (Slike 3.5.c i 3.6.b).

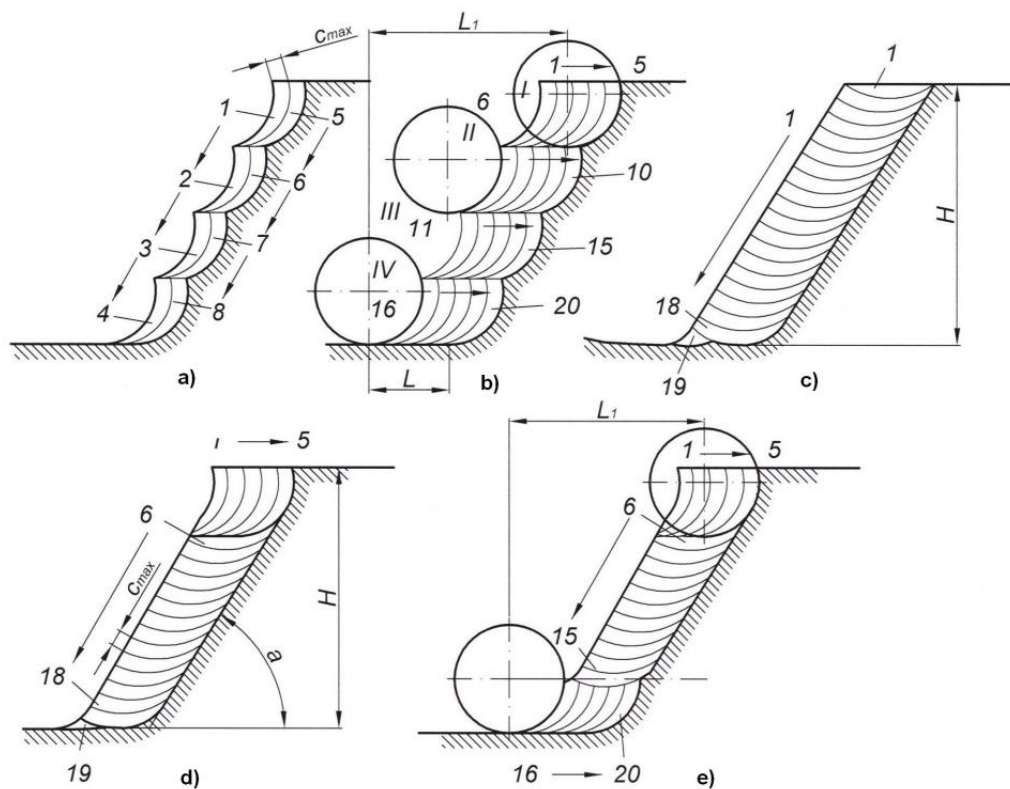
Osnova za podelu na otkopavanje vertikalnim i horizontalnim rezovima je pravac prilaženja masivu

Razlikuje se pravac prilaženja masivu rotora i pravac radnog pokreta vedrice u momentu kontakta sa materijalom, tako da u slučaju slaganja ta dva pravca nastupa

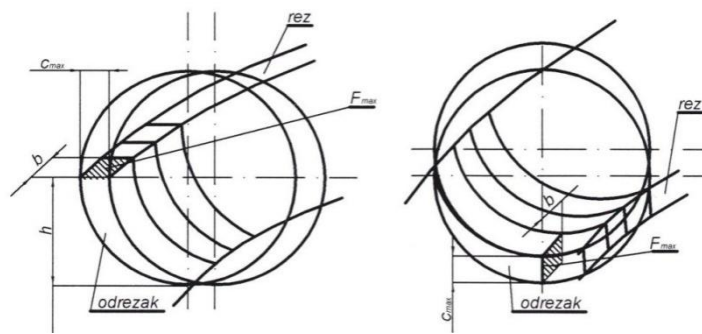
vertikalni rez (odrezak), dok kada su ova dva pravca međusobno upravni, nastupa horizontalni rez ili odrezak.

Kod horizontalnog reza, takođe, ugao koji zaklapaju pravac prilaženja rotora masivu i pravac radnog pokreta vedrice u momentu kontakta sa materijalom treba da bude $\nu = 90^\circ$. To je teško ostvariti ali je moguće ako se pravac pomeranja rotora seče sa pravcem radnog pokreta vedrice u momentu kontakta sa materijalom, baš u tački koja predstavlja momenat kontakta sa materijalom, jer u tom trenutku njihove tangente u datoj tački međusobno zauzimaju normalni položaj.

Ovo pitanje je istaknuto pre svega zbog definicije vertikalnog reza u uslovima selektivnog otkopavanja slojeva manje debljine od poluprečnika rotora. U takvim uslovima visina reza, definisana je debljinom proslojaka i direktno utiče na korak pomeranja bagera. Smanjenjem visine reza moguće je povećati i njegovu debljinu i na taj način nadoknaditi deo gubitaka kapaciteta.



Slika 3.5. Vrste reza rotornog bagera



Slika 3.6. Vertikalni (a) i horizontalni rez (b)

Međutim, sa povećanjem koraka pomeranja bagera povećava se i ugao koji zaklapa pravac radnog pokreta vedrice u kontaktu sa materijalom sa pravcem kretanja rotora (v).

Osim toga, sva ostala obeležja vertikalnog reza prema navedenoj definiciji ostaju ista, a pošto i ovaj uslov kao što se vidi iz prethodnog razmatranja nikad nije ispunjen, definicija za vertikalni i horizontalni rez se može potpunije formulisati pored pravca prilaženja rotora masivu uključenjem i debljine odreska.

Prema tome, kod vertikalnog reza pravac prilaženja rotora masivu je paralelan sa donjom ivicom pojasa koji se otkopava, a trenutna debljina odreska raste sa povećanjem ugla okretanja rotora od momenta ulaska vedrice u masiv do maksimalne vrednosti u trenutku izlaska vedrice iz masiva (na $h = R$), dok je kod horizontalnog reza pravac prilaženja rotora masivu pod uglom u odnosu na donju ivicu pojasa koji se otkopava, a trenutna debljina odreska se smanjuje sa povećanjem ugla okretanja rotora do minimalne vrednosti u trenutku izlaska vedrice iz masiva. Trenutna debljina odreska je u funkciji ugla okretanja rotora i koraka pomeranja bagera.

U slučaju kada je visina pojasa manja ili jednaka visini zuba vedrice $h \leq b$, otkopava se horizontalnim rezom i to je jedini mogući način otkopavanja proslojaka ove debljine. Ako se prihvati definicija za horizontalni i vertikalni rez u ovom slučaju se može razdvojiti samo usecanje u ovakav rez.

Postizanje kompletne debljine ili širine ovog reza može se ostvariti prilazom rotora bagera kao za vertikalni rez pri čemu se potpuna debljina reza postiže sa više manjih vertikalnih odrezaka ili prilazom rotora kao za horizontalni rez pri čemu se do kompletne visine dolazi otkopavanjem više manjih horizontalnih odrezaka.

Osnovna obeležja vertikalnog reza su: mogućnost postizanje veće visine kopanja, povoljniji uslovi za automatsku regulaciju procesa otkopavanja, minimalni dinamički udari na rotor, manji otpor materijala na kopanje, manja potrošnja energije za dizanje materijala do visine istresanja materijala iz vedrice, odsustvo grebena u planumu. Nedostaci su maksimalni broj pomeranja u toku jednog tehnološkog ciklusa, veći specifični pritisak pri radu u odnosu na horizontalne rezove, nepovoljniji odnos čistog kopanja prema pomoćnim operacijama u toku jednog tehnološkog ciklusa.

Kod horizontalnog reza smanjen je broj pomoćnih operacija i specifični pritisak, veća je potrošnja energije za dizanje materijala do visine istresanja iz vedrice, teža je realizacija automatskog upravljanja, povećani su gubici, odnosno razblaženje na kontaktu sa drugim materijalima i veći je obim pomoćnih radova na planumu kretanja bagera.

Da bi se primenili horizontalni rezovi i ostvarila ista visina etaže, neophodno je prvi pojas otkopati vertikalnim rezovima, jer to horizontalnim rezovima praktično nije moguće zbog ograničenog gornjeg položaja rotora.

Takođe i najniži pojas treba otkopati vertikalnim rezovima radi uklanjanja grebena koji ostaju na niveleti kretanja bagera čime se eliminišu pomoćni radovi planiranja etažne ravni.

Ostatak po visini etaže otkopava se u tom slučaju horizontalnim rezovima i to je praktično najprihvatljivija varijanta primene horizontalnih rezova, dakle u kombinaciji sa vertikalnim rezovima (Slika 3.5.d, e).

Posledica primene samo horizontalnih rezova je manja visina etaže i veći obim pomoćnih radova na planiranju što zahteva angažovanje dodatne opreme za pomoćne radove.

Primena kombinovanog otkopavanja horizontalnim i vertikalnim rezovima sa sobom nosi negativnosti i jednog i drugog načina. To su teška i komplikovana regulacija automatskog upravljanja i veći ugao nagiba čeonice da bi se pojas otkopao horizontalnim rezovima bez pomeranja bagera unazad za svaki rez.

Pošto je granični ugao nagiba čeone kosine definisan iz uslova stabilnosti kosine za određenu visinu etaže, koji se verifikuje u toku rada, primena horizontalnih rezova predstavlja ograničavajući faktor, ako je manja vrednost.

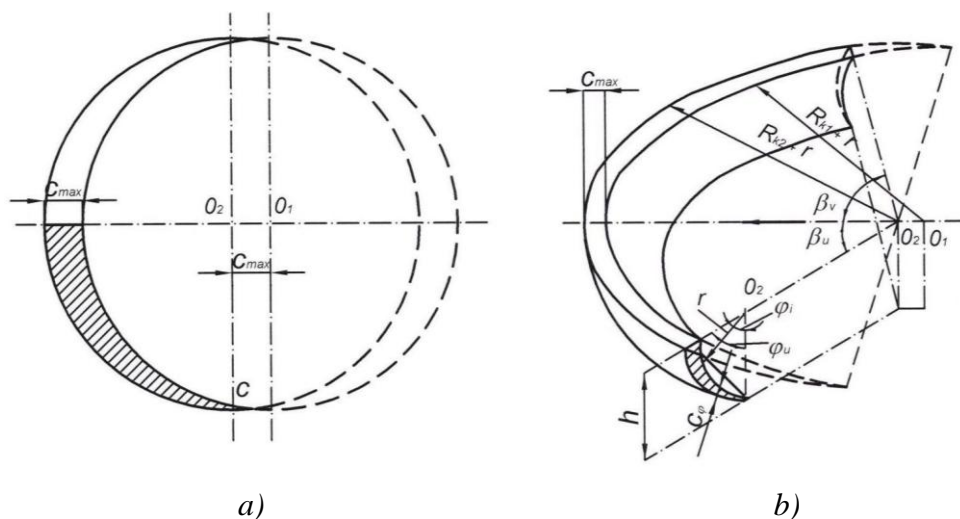
Horizontalni rezovi se mogu primeniti i u tom slučaju ali su prisutni nedostaci koji se odražavaju kroz promenu pojasa posle malog broja rezova i povećan broj rezova smanjene zapremine, što povećava utrošak vremena za istu zapreminu materijala, odnosno za otkopavanje pojasa.

Pored manje visine etaže, dužina bloka je u intervalu $L_b = (0,5 - 0,7)D$, što znači da se povećava odnos pomoćnih operacija u odnosu na zapreminu bloka.

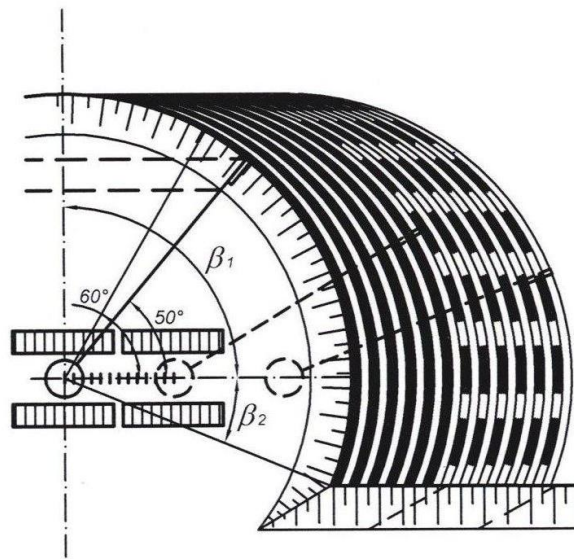
Na izbor rezova kod tehnologije rada rotornog bagera najveći uticaj ima debljina sloja koji se otkopava, nagib radne kosine i otpor kopanju.

Kopanje vertikalnim odrescima vrši se na taj način da se osovina rotora pomera u horizontalnoj ravni iz tačke O_1 u tačku O_2 (Slika 3.7.) za debljinu reza c_{max} . Okretanjem rotora u vertikalnoj i strele rotora u horizontalnoj ravni (za uglove β_u i β_v) vrši se otkopavanje u rezu visine h .

Nejednake dužine rezova otežavaju automatizaciju i programiranje, zbog čega se širina bloka smanjuje za 20 do 25%.



Slika 3.7. Parametri vertikalnog odreska i reza rotornog bagera: a) vertikalni presek odreska; b) prostorni izgled i dimenzije reza rotornog bagera



Sl. 3.8. Bagerski blok u planu sa maksimalnim iskorišćenjem radnih dimenzija bagera

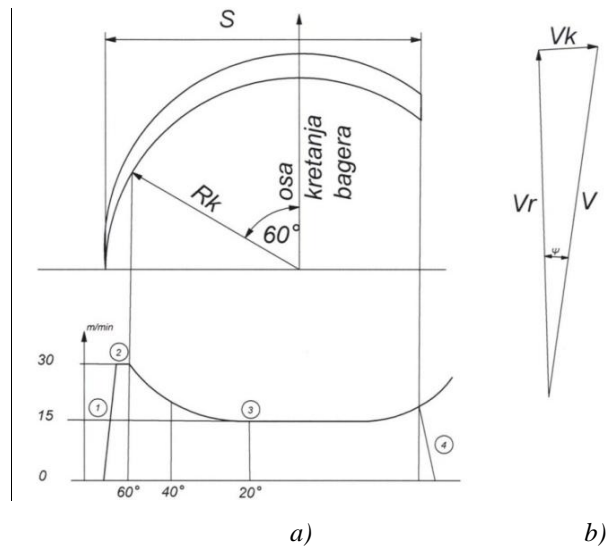
Šema kopanja rotornim bagerom je sa konstantnim radijusima kopanja R_{k1} i R_{k2} , a debljina (c) i širina (b) odreska su promenljive po celoj širini bloka. Maksimalna debljina odreska (c_{max}) i minimalna širina (b_{min}) su u pravcu kretanja bagera (po osovini bloka).

Za svaki naredni rez bager se pomera za debljinu odreska c_{max} iz tačke O_1 u tačku O_2 . Na taj način se kod kopanja višerednim vertikalnim odrescima dobijaju srpoliki rezovi, odnosno nizovi odrezaka u planu (Slika 3.8.) jednake dužine.

Povećanjem brzine okretanja strele rotora u planu, smanjenje debljine svakog odreska se nadoknađuje povećanjem njegove širine, čime se približno održava konstantan poprečni presek svakog odreska ($F = bc = const$), pa time i potpuno punjenje vedrica.

U kopanju učestvuju dva zuba svake vedrice: prednji i jedan od bočnih, zavisno od smera okretanja strele rotora.

Brzina okretanja strele rotora reguliše se do ugla $\beta = 60^\circ$ (Slika 3.9.), a zatim ostaje konstantna [$\cos 60^\circ = 0,5$, pa je $v_{k(60)} = 2v_{k(o)}$]. Ako je ugao okretanja veći od 60° , dolazi do smanjenja punjenja vedrica (jer je širina odreska $b = 2b_{min}$, u daljem okretanju konstantna, a debljina odreska c se i dalje smanjuje) zbog nemogućnosti daljeg povećanja brzine okretanja strele rotora. To povlači i smanjenje kapaciteta bagera.



Slika 3.9. Promene brzine okretanja strele rotora u bloku (a) i slaganje brzine okretanja strele i rotora (b)

Brzine okretanja strele rotora (v_k) i rotora (v_r) daju rezultatnu brzinu kopanja (v), koja sa brzinom okretanja rotora zatvara tzv. kinematički ugao nagiba trajektorije rezanja (ψ) (Slika 3.9. b). Ugao nagiba bočnih stranica vedrica (Slika 3.10.) uvek je nešto veći od ovog ugla (ψ), da bi se izbeglo njihovo vučenje i trenje po bočnoj površini rezanja, čime se sprečava povećanje otpora kopanju ($\psi_{max} \approx 10 \div 12^\circ$).

Parametri rotora računaju se po formulama:

- broj obrtaja rotora:

$$n_o = \frac{n}{z}, \text{min}^{-1} \quad (3.1)$$

- obodna brzina rotora:

$$v_r = \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot n}{z} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{z} \omega_r, \text{m/min} \quad (3.2)$$

- lučni razmak između vedrica (ugao između vedrica u radijanima):

$$rv = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{z} \quad (3.3)$$

$$v = \frac{2\pi}{z} \quad (3.4)$$

$$\text{za } z = 10; v = 0,628$$

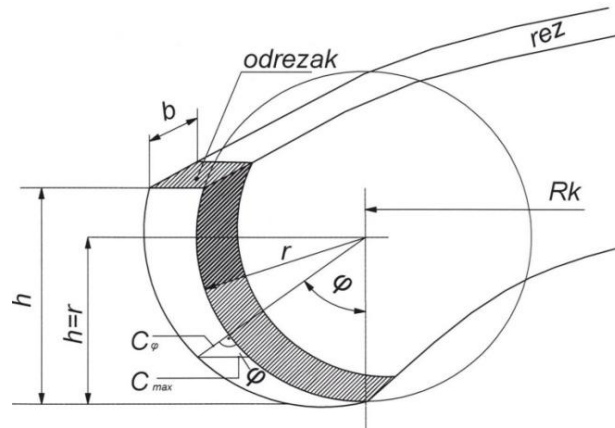
$$\text{za } z = 8; v = 0,785$$

- broj vedrica u kontaktu sa otkopom:

$$Z_{kont} = \frac{r \cdot \varphi_u}{r \cdot v} = \frac{\varphi_u}{v} = \frac{\varphi_u \cdot Z}{2\pi} \quad (3.5)$$

$$\text{za } \varphi_u > \frac{\pi}{2}; \sin\varphi = f - 1$$

$$\text{za } \varphi_u < \frac{\pi}{2}; \cos\varphi = 1 - f$$



Slika 3.10. Parametri odreska

Parametri jednog odreska (Slika 3.10.) se računaju po sledećim formulama:

$$n \cdot k_{pu} \cdot E_r = h \cdot c_{max} \cdot v_k \cdot k_r = F \cdot h \cdot n \cdot k_r \quad (3.6)$$

$$k_{pu} \cdot E_r = F \cdot h \cdot k_r \quad (3.7)$$

$$F = c_{max} \cdot b, m^2 \quad (3.8)$$

$$c_{max} = \alpha b, m \quad (3.9)$$

$$\alpha_{opt} = \frac{\varphi_u}{1 - \cos\varphi_u} = \frac{\varphi_u}{2\sin^2 \frac{\varphi_u}{2}} \quad (3.10)$$

$$c_{max} = \sqrt{\frac{\alpha}{f}} \cdot \sqrt{\frac{E_r k_{pu}}{r k_r}}, m \quad (3.11)$$

$$v_k = \frac{E_r \cdot k_{pu} \cdot n}{f \cdot k_r \cdot c_{max} \cdot r}, m/min \quad (3.12)$$

$$b = \frac{v_k}{n} = \frac{E_r \cdot k_{pu}}{f \cdot k_r \cdot c_{max} r}, m \quad (3.13)$$

gde je: E_r - računska zapremina vedrice (m^3),

n - broj istresanja u minuti,

b - širina odreska (m),

c_{max} - debljina odreska u osi kretanja i u visini odreska $h = r$ (m),

$f = h/r$ - odnos visine odreska i poluprečnika rotora,

$\alpha = c_{max}/b$ - odnos debljine i širine odreska,

φ_u - ugao odreska u radijanima,

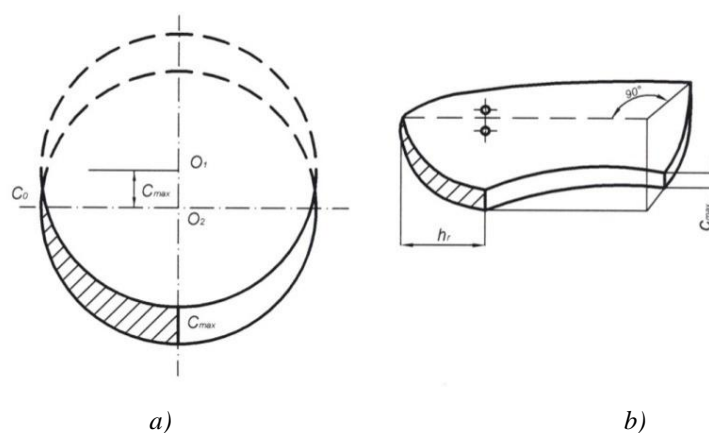
F - površina poprečnog preseka odreska na visini $h = r$ (m^2),

v_k - brzina okretanja katarke (m/min).

Osim prethodnih faktora i povećanje koeficijenta rastresitosti izaziva smanjenje debljine i širine odreska, kao i brzine okretanja strele rotora (za istu visinu reza - odreska); sa smanjenjem visine odreska, srazmerno se povećavaju debljina i širina odreska, kao i brzina okretanja strele rotora. Samo se tako održava kapacitet bagera, inače bi došlo do njegovog smanjenja zbog smanjenog punjenja vedrica.

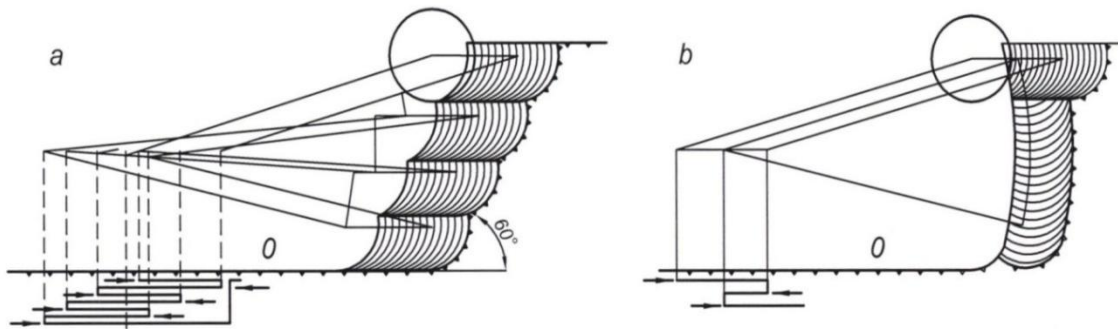
Debljina odreska c_{max} progresivno raste sa opadanjem visine odreska (h). Međutim, debljina odreska je ograničena širinom bočne stranice vedrice ($c_{max} < h_E$) posle čega dolazi do smanjenja kapaciteta ako se i dalje nastavlja smanjivanje visine reza (odreska). To znači da je visina reza (odreska), kod koje je $c_{max} = h_E$, donja limitirajuća visina ispod koje se ne ide u normalnim okolnostima. Sa porastom koeficijenta rastresitosti smanjuje se i donja limitirajuća visina reza (odreska).

Kopanje horizontalnim odrescima vrši se na taj način što se osovina rotora pomeri u vertikalnoj ravni iz tačke u O_1 u O_2 (Slika 3.11.) za debljinu odreska c_{max} . Za razliku od vertikalnih odrezaka, ovde je debljina odreska najveća (c_{max}) na početku kopanja (na ulazu vedrice u odrezak), a najmanja ($c = 0$) na kraju (na izlazu vedrice iz odreska).



Slika 3.11. Parametri horizontalnog odreska rotornog bagera: a) vertikalni presek odreska; b) prostorni izgled i dimenzije reza

Kod kopanja horizontalnim odrescima nema podele etaže na rezove, odnosno pojaseve, jer se cela etaža kopa horizontalnim rezovima. Izgled rezova (reda odrezaka) u planu je isti kao i kod vertikalnih odrezaka (Slika 3.8.). Međutim, velika je razlika u broju i dužini pomeranja bagera (Slika 3.12.), što najbolje ilustruje razliku u vremenu utrošenom na pomoćne operacije.



Sl. 3.12. Broj i dužine pomeranja bagera kod kopanja vertikalnim višerednim (a) i kombinovanim (b) odrescima

Zapremina horizontalnog srpolikog reza (niza odrezaka) kopanog rotornim bagerom (Slika 3.11.b i 3.13.) sa visinom (h_r) i širinom bloka (B) računa se po formuli:

$$V_r = c \cdot h_r \cdot B, m^3 \quad (3.14)$$

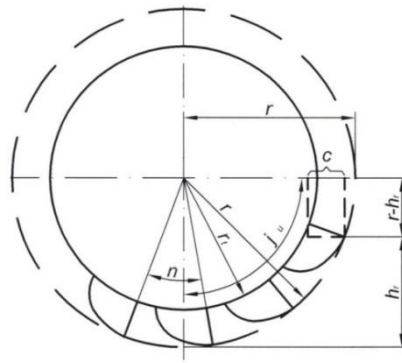
Debljina odreska (reza) c se sa okretanjem bagera desno ili levo od ose kretanja smanjuje, da bi se za ugao okretanja $\beta_{u(g)} = 90^\circ$ dobila debljina $c = 0$. Između debljine odreska (reza) c i visine h_r postoji sledeći odnos (Slika 3.13.):

$$c = \sqrt{r^2 - (r - h_r)^2} - \sqrt{r_t^2 - (r - h_r)^2}, m \quad (3.15)$$

gdje je: r - poluprečnik rotora po zubima vedrica (m),

r_t - poluprečnik rotora bez vedrica (m).

Za zavisnost u prethodnoj formuli postoji uslov da je $h_r < r > h_E$ (h_E - širina bočne stranice zuba kao i kod vertikalnog reza), što znači da je i debljina odreska ograničena ($c_{max} \leq h_E$), kao i kod kopanja vertikalnim odrescima.



Slika 3.13. Dimenzije rotora i horizontalnog odreska

Širina bloka je zbir unutrašnje (B_u) i spoljašnje (B_v) širine (Slika 3.14.):

$$B = B_u + B_v, m \quad (3.16)$$

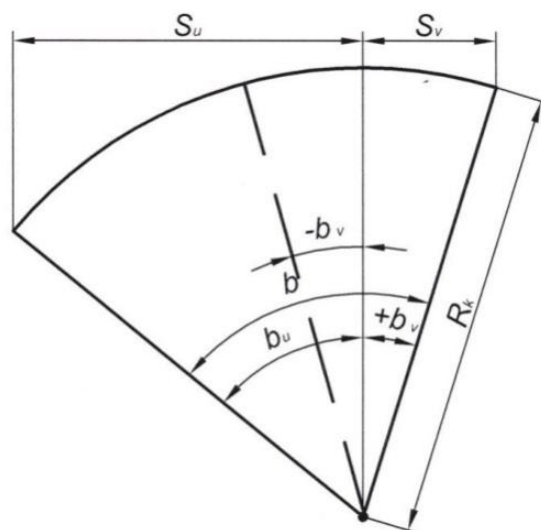
$$B_u = R_k \cdot \sin\beta_u, m \quad (3.17)$$

$$B_v = R_k \cdot \sin\beta_v, m \quad (3.18)$$

$$B = R_k(\sin\beta_u + \sin\beta_v), m \quad (3.19)$$

Sada proizilazi da je zapremina horizontalnog srpolikog reza:

$$V_r = \left[\sqrt{r^2 - (r - h_r)^2} - \sqrt{r_t^2 - (r - h_r)^2} \right] h_r \cdot R_k (\sin\beta_u + \sin\beta_v), m^3 \quad (3.20)$$



Slika 3.14. Šema za proračun zapremine reza u bloku

Kapacitet bagera u horizontalnom rezu (redu odrezaka):

$$Q_r = \frac{V_r}{t_o} 60, \quad m^3/h \quad (3.21)$$

gde je: t_o - vreme okretanja bagera u rezu (pojasu), min:

$$t_o = \frac{l_o}{v_k}, \quad min \quad (3.22)$$

$$l_o = \frac{\pi(\beta_{u(g)} + \beta_{v(g)})}{180} R_k; \quad (3.23)$$

gde je: l_o - dužina luka okretanja u bloku (m), (Slika 3.14.),

R_k - dužina strele rotora (m),

v_k - brzina okretanja strele rotora (m/min).

Sada je kapacitet bagera u horizontalnom rezu:

$$Q_r = \frac{60 \cdot c \cdot h_r \cdot B \cdot v_k}{l_o}, m^3/h \quad (3.24)$$

ili u obliku:

$$\begin{aligned} Q_r &= \frac{60 \cdot 180 \cdot c \cdot h_r \cdot R_k (\sin\beta_u + \sin\beta_v) v_k}{\pi(\beta_u + \beta_v) R_k} = \\ &= \frac{10800c \cdot h_r \cdot v_k (\sin\beta_u + \sin\beta_v)}{\pi(\beta_u + \beta_v)}, \quad m^3/h \end{aligned} \quad (3.25)$$

Poprečni presek odreska zavisi od trenutne debljine i širine odreska (Slike 3.10. i 3.15.), računate po uglu rotacije rotora:

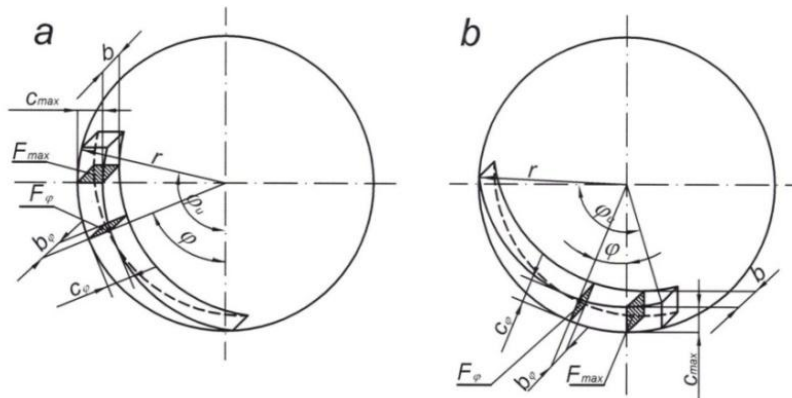
$$F_\varphi = c_\varphi \cdot b_\varphi \quad (3.26)$$

Trenutna debljina vertikalnog odreska (Slika 3.15.a) računa se po formuli:

$$c_\varphi = c_{max} \cdot \sin\varphi \quad (3.27)$$

Trenutna debljina horizontalnog odreska (Slika 3.15.b) računa se po formuli:

$$c_\varphi = c_{max} \cdot \cos\varphi \quad (3.28)$$



Slika 3.15. Promene poprečnog preseka vertikalnog (a) i horizontalnog odreska rotornog bagera (b)

Stvarne dimenzije odreska se razlikuju od teoretskih zbog vibracija rotora.

Trenutna širina odreska je takođe zavisno promenjiva od ugla okretanja rotora i maksimalne širine na izlazu iz vertikalnog, odnosno na ulazu u horizontalni odrezak po formuli:

$$b_{\varphi} = \frac{b(R_k + r \cdot \sin\varphi)}{R_k + r} \quad (3.29)$$

Visina reza (odreska) zavisi i od poluprečnika rotora i punog ugla kopanja φ_u :

$$h = (1 - \cos\varphi_u)r \quad (3.30)$$

Sada se formula za proračun trenutnog poprečnog preseka odreska može napisati u obliku:

- za vertikalni odrezak (Slika 3.15.a):

$$F_{\varphi} = c_{max} \cdot b \frac{R_k + r \cdot \sin\varphi}{R_k + r} \sin\varphi \quad (3.31)$$

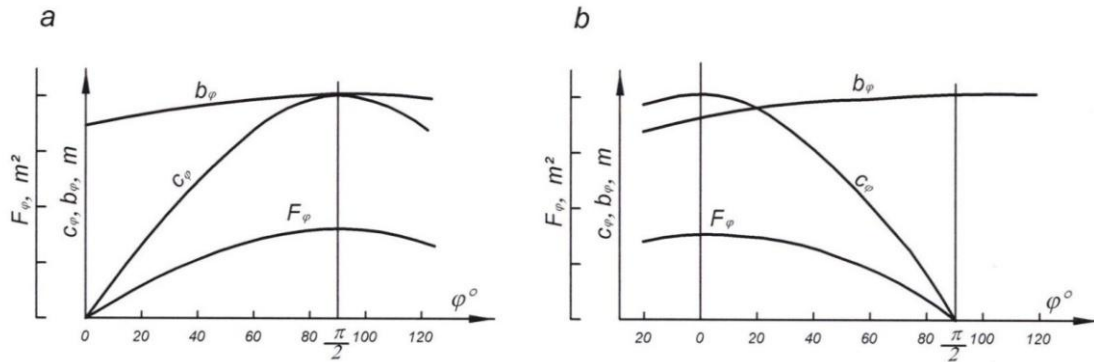
- za horizontalni odrezak (Slika 3.15.b):

$$F_{\varphi} = c_{max} \cdot b \frac{R_k + r \cdot \sin\varphi}{R_k + r} \cos\varphi \quad (3.32)$$

Trenutni maksimalni poprečni presek vertikalnog odreska je kod $\varphi = \pi/2$, odnosno na visini $h = r$.

Ugao maksimalnog poprečnog preseka horizontalnog odreska je promenljiv i zavisi od odnosa R_k/r . Normalnim se smatra da je maksimalni poprečni presek horizontalnog odreska kod $\varphi = 0^\circ$.

Promene dimenzija odreska c , b i F u funkciji ugla predstavljene su na Slici 3.16.



Slika 3.16. Promene debljine, širine i poprečnog preseka odreska: a) vertikalni odrezak;
b) horizontalni odrezak

U svakom trenutku u kopaњу učestvuje nekoliko vedrica sa različitim poprečnim presecima odrezaka, jer prva vedrica izlazi iz odreska, druga je negde na sredini odreska, treća ulazi u odrezak, itd. Broj vedrica, koje su u jednom trenutku u kontaktu sa stenom (u odresku), zavisi od ukupnog broja vedrica na rotoru, prečnika rotora i visine sloja (reza) kopaња. Ukupni trenutni poprečni presek svih odrezaka $F_{\Sigma\varphi}$, je zbir trenutnih pojedinačnih poprečnih preseka i predstavlja isprekidanu periodičnu funkciju ugla φ (Slika 3.17.).

Tačka prekida nastaje u momentu ulaska i izlaska vedrice iz odreska (stene). Skokovita promena funkcije nastaje za vertikalni odrezak u momentu izlaska, a za horizontalni u momentu ulaska u odrezak (stenu).

Srednji poprečni presek jednog odreska je:

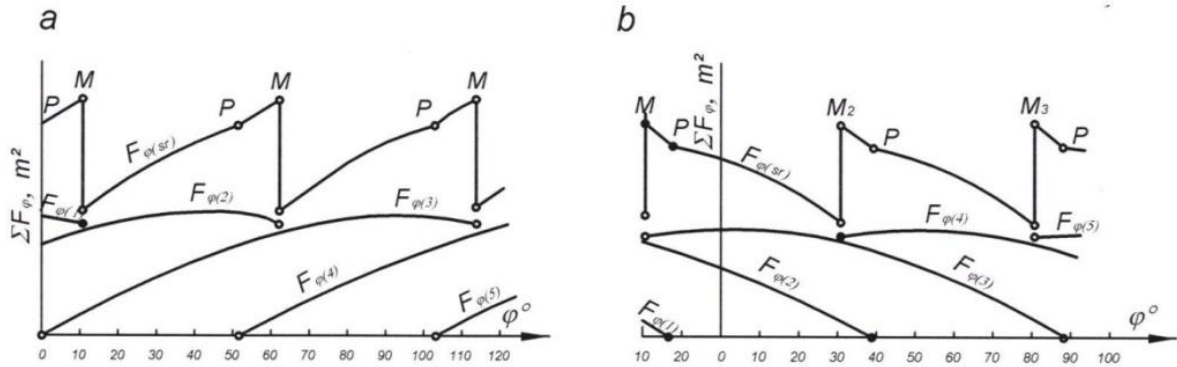
$$F_{sr} = \frac{1}{\varphi_u} \int_0^{\varphi_u} F_\varphi d\varphi \quad (3.33)$$

$$F_{sr} = \frac{C_{max} \cdot b}{\varphi_u (R_k + r)} \left\{ \frac{R_k}{r} h + \frac{r}{2} \left[\varphi_u - \frac{\sin(2\varphi_u)}{2} \right] \right\} \quad (3.34)$$

$$F_{sr} = \frac{C_{max} \cdot b \cdot h}{\varphi_u \cdot r} \quad (3.35)$$

Srednja ukupna površina poprečnog preseka odrezaka za jedan okretaj rotora iznosi:

$$F_{\Sigma(sr)} = \frac{z \cdot \varphi_u}{2\pi} F_{sr} = \frac{\varphi_u}{\nu} F_{sr} \quad (3.36)$$



Slika 3.17. Funkcija promena ukupnog trenutnog poprečnog preseka svih odrezaka:

a) vertikalni odrezak; b) horizontalni odrezak

Uvrštavajući prethodno izvedenu zavisnost za F_{sr} , dobijamo:

$$F_{\Sigma(sr)} = \frac{C_{max} \cdot b \cdot h}{\nu \cdot r} k_w \quad (3.37)$$

gde je: k_w - koeficijent uticaja promene ugla na širinu odreska,

$$k_w = \frac{R_g}{R_k + r} + \frac{r^2}{2(R_k + r)} \left(\frac{\varphi_u}{h} - \frac{\sin(2\varphi_u)}{2h} \right) \quad (3.38)$$

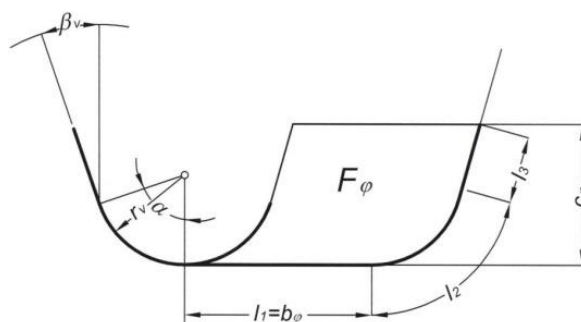
Ako se izvrši zamena: $\frac{h}{\nu r} k_w = k_e$, dobija se izraz:

$$F_{\Sigma(sr)} = c_{max} \cdot b \cdot k_e = F \cdot k_e \quad (3.39)$$

gde je: k_e - koeficijent srednje ukupne površine poprečnog preseka odrezaka u funkciji maksimalne površine jednog odreska.

Aktivna dužina rezanja vedricama je potrebna zbog proračuna potrebne sile i snage kopanja, baš kao i trenutni poprečni preseki odrezaka.

Ivice sečiva vedrice rotornog bagera (Slika 3.18.) su u obliku luka, u kojem se izdvaja pravolinijski deo dna vedrice (l_1), prelazni (krivi) deo bočnih ivica sa radijusima krivine $r_v(l_2)$ i pravi deo bočnih ivica pod uglom $\beta_v(\beta_v > \psi)$ u odnosu na normalu (l_3).



Slika 3.18. Oblik ivice sečiva vedrice rotornog bagera

Dimenzije na Slici 3.18. su:

- l_1 - pravolinijski deo dna vedrice odgovara trenutnoj širini reza;
- l_2 - krivi deo bočne stranice vedrice uslovljen oblikom sečiva vedrice;
- l_3 - pravi deo bočne stranice vedrice, pod uglom nagiba (β_v) većim od ugla trajektorije kopanja (ψ).

Iz toga proizilazi:

$$l_\varphi = l_{1(\varphi)} + l_{2(\varphi)} + l_{3(\varphi)} \quad (3.40)$$

gde su:

$$l_{1(\varphi)} = \frac{b(R_k + r \cdot \sin\varphi)}{R_k + r}, \quad (3.41)$$

$$l_{2(\varphi)} = r_v \cdot \arccos \frac{r_v - c_{max} \cdot \sin\varphi}{r_v}, \quad (3.42)$$

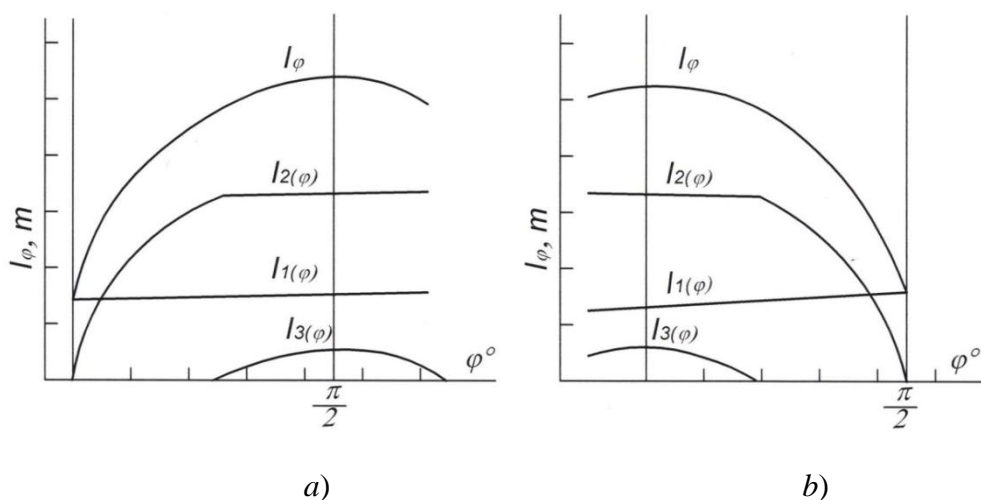
za $0 \leq \varphi \leq \varphi_k$

$$\varphi_k = \arcsin \frac{c_k}{c_{max}} \quad (3.43)$$

$$c_k = r_v(1 - \sin\beta_v) \quad (3.44)$$

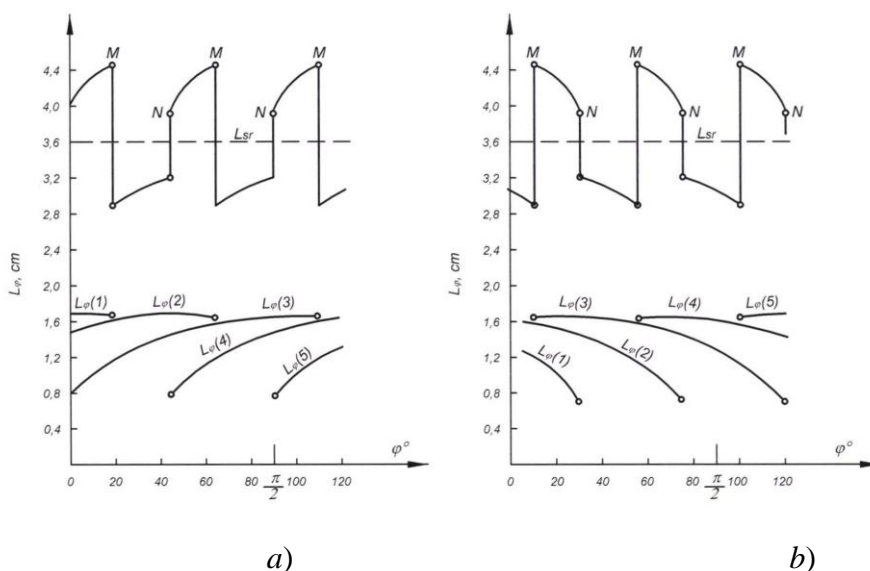
$$l_{3(\varphi)} = \frac{c_{max} \cdot \sin\varphi - c_k}{\cos\beta_v}, \text{ za } \varphi > \varphi_k \quad (3.45)$$

Primer promena ovih funkcija prikazan je na Slici 3.19.



Slika 3.19. Promena aktivnih dužina sečiva vedrice za vertikalni (a) i horizontalni (b) odrezak

Ukupna aktivna dužina rezanja u datom trenutku (L_{φ}) predstavlja zbir funkcija (l_{φ}) koje su periodične funkcije rotacije rotora; zavisi od promena funkcija (l_{φ}), ugla rezanja (φ_u) i ugla razmeštaja vedrica po obodu rotora (ν). Primer ovih promena prikazan je na Slici 3.20.



Slika 3.20. Srednja i trenutna aktivna dužina rezanja u funkciji ugla za vertikalni (a) i horizontalni (b) odrezak

Isprekidanost funkcija nastaje u tačkama M i N, koje predstavljaju momenat ulaska i izlaska vedrice iz stenskog materijala.

Srednja aktivna dužina rezanja jedne vedrice u okviru ugla φ_u iznosi:

$$l_{sr} = \frac{1}{\varphi_u} \int_0^{\varphi_u} l_\varphi d\varphi \quad (3.46)$$

$$l_{sr} = \frac{1}{\varphi_u} \left\{ \int_0^{\varphi_u} b \frac{R_k + r \cdot \sin\varphi}{R_k + r} d\varphi \int_0^{\varphi_k} r_v \arccos \frac{r_v - c_{max} \cdot \sin\varphi}{r_v} d\varphi + \int_0^{\varphi_u} \frac{c_{max} \cdot \sin\varphi - c_k}{\cos\beta_v} d\varphi \right\} \quad (3.47)$$

Srednja ukupna dužina rezanja za jedan okretaj rotora iznosi:

$$L_{sr} = \frac{z \cdot \varphi_u}{2} l_{sr} = \frac{\varphi_u}{v} l_{sr} \quad (3.48)$$

Metode određivanja aktivne dužine rezanja vedrica mogu biti:

- metoda pravougaonog oblika odreska, koja ne uzima u obzir uticaje zakrivljenosti ivica sečiva vedrica,
- analitičko-grafička metoda i
- pojednostavljena metoda funkcije izgleda vedrice.

Metoda pravougaonog poprečnog preseka odreska može se primenjivati samo kod vedrica sa malim zakrivljenjima sečiva, a počiva na pretpostavci o upravnosti dna i bočnih stranica vedrice, tj.:

$$l = l_1 + l_2 \quad (3.49)$$

Deo l_1 odgovara trenutnoj debljini odreska promenljivoj u zavisnosti od ugla φ :

$$l_{1(\varphi)} = c_{max} \cdot \sin\varphi \quad (3.50)$$

Deo l_2 odgovara širini odreska i usvojen je kao konstantan, tj. nezavisan od ugla φ :

$$l_2 = b = const \quad (3.51)$$

$$l_\varphi = c_{max} \cdot \sin\varphi + b \quad (3.52)$$

$$l_{sr} = \frac{1}{\varphi_u} \int_0^{\varphi_u} (c_{max} \cdot \sin\varphi + b) d\varphi \quad (3.53)$$

Srednja ukupna dužina rezanja:

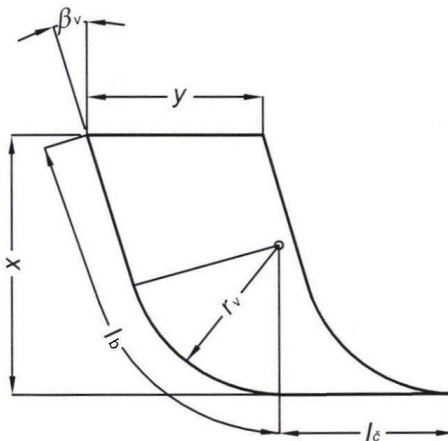
$$L_{sr} = \frac{1}{v} [c_{max} (1 - \cos\varphi_u) + b\varphi_u] \quad (3.54)$$

ili

$$L_{sr} = \frac{1}{v} \left[\frac{c_{max} \cdot h}{r} + b \cdot \varphi_u \right] \quad (3.55)$$

Analitičko-grafička metoda počiva na izvesnim pojednostavljenjima, prikazanim na Slici 3.21., i to:

- l_{ϵ} - čeonu aktivni deo rezne ivice vedrice;
- l_b - bočni aktivni deo rezne ivice vedrice;
- l - ukupna aktivna dužina rezanja vedricom;
- r_v, β_v - kao i kod Slike 3.18.;
- x - trenutna debljina odreska;
- y - trenutna širina odreska.



Slika 3.21. Oznake delova rezne ivice vedrice rotornog bagera

Aktivna dužina rezanja vedricom je zbir čeonu i bočne dužine. Čeonu deo vedrice (l_{ϵ}) je paralelan osi rotora.

Trenutna aktivna dužina čeone sekuće ivice vedrice je:

$$l_{\check{c}(\varphi)} = b \frac{R_k + r \cdot \sin\varphi}{R_k + r} \quad (3.56)$$

Srednja aktivna dužina čeone sekuće ivice jedne vedrice za ugao rotacije rotora (φ_u) je:

$$l_{\check{c}(sr)} = \frac{1}{\varphi_u} \int_0^{\varphi_u} l_{\check{c}(\varphi)} d\varphi \quad (3.57)$$

Srednja ukupna aktivna dužina čeonih sekućih ivica je:

$$L_{\check{c}(sr)} = \frac{1}{v} \int_0^{\varphi_u} l_{\check{c}(\varphi)} d\varphi \quad (3.58)$$

Posle transformacija i sređivanja dobijamo:

$$L_{\check{c}(sr)} = b \left\{ \frac{\varphi_u}{v} \left[1 - \frac{r}{R_k + r} \left(1 - \frac{1 \cos\varphi}{\varphi_u} \right) \right] \right\} \quad (3.59)$$

Ako se označi sa:

$$k_{\check{c}} = \frac{\varphi_u}{v} \left[1 - \frac{r}{R_k + r} \left(1 - \frac{1 \cos\varphi}{\varphi_u} \right) \right] \quad (3.60)$$

onda se dobija:

$$L_{\check{c}(sr)} = b \cdot k_{\check{c}} \quad (3.61)$$

Srednja ukupna aktivna dužina čeonih sekućih ivica je proporcionalna maksimalnoj širini odreska. Koefficient proporcionalnosti ($k_{\check{c}}$) je funkcija visine kopanja i odnosa radijusa rotora sa radijusom kopanja. Na ($k_{\check{c}}$) najviše utiče ugao kopanja (φ_u), tj. visina reza (odreska).

Uticao promene radijusa kopanja u granicama, ustanovljenim za dati tip bagera, bio bi neznatan. To znači da je proračun koefficienta ($k_{\check{c}}$) moguć primenom konstantnog radijusa kopanja, što odgovara srednjoj vrednosti za dati tip bagera.

Bočna rezna ivica vedrice pravi luk radijusa r_v i pravolinijski deo koji od vertikale odstupa za ugao β_v .

Trenutna aktivna dužina bočne ivice je:

$$l_{b(\varphi)} = r_v \cdot \arccos \frac{r_v - c_{max} \cdot \sin \varphi}{r_v}, \text{ za } \varphi < \varphi_k \quad (3.62)$$

$$l_{b(\varphi)} = r_v \left(\frac{\pi}{2} - \beta \right) + \frac{c_{max} \cdot \sin \varphi - c_k}{\cos \beta_v}, \text{ za } \varphi > \varphi_k \quad (3.63)$$

$$\varphi_k = \arcsin \frac{c_k}{c_{max}} \quad (3.64)$$

$$c_k = r_v (1 - \sin \beta_v) \quad (3.65)$$

Srednja ukupna aktivna dužina bočne ivice vedrice je:

$$L_{b(sr)} = \frac{1}{v} \int_0^{\varphi_u} l_{b(\varphi)} d\varphi \quad (3.66)$$

Tako određena funkcija za oblast $\varphi < \varphi_k$ rešava se tabelarno metodom Simpsona u oblasti $0 < \varphi < 40^\circ$ i metodom trapeza za ugao $\varphi > 40^\circ$. Zato se veličina $l_{b(\varphi)}$ može predstaviti kao funkciju jedne promenljive:

$$X = c_{max} \cdot \varphi \quad (3.67)$$

$$l_{b(x)} = r_v \cdot \arccos \frac{r_v - X}{r_v}, \text{ za } X \leq X_k \quad (3.68)$$

$$l_{b(x)} = r_v \left(\frac{\pi}{2} - \beta_v \right) + \frac{X - r_v (1 - \sin \beta_v)}{\cos \beta_v}, \text{ za } X \geq X_k \quad (3.69)$$

$$\text{gde je: } X_k = r_v (1 - \sin \beta_v) \quad (3.70)$$

Pojednostavljena metoda funkcije izgleda odreska vedricom se često primenjuje u praksi. Krivolinijski oblik funkcije trenutne dužine bočne ivice vedrice zamenjen je pravolinijskim. Primena ove metode je ograničena za proračun približnih vrednosti. Širina odreska postaje konstantna. Za usvojeno pojednostavljenje oblika reza, srednja ukupna dužina rezne ivice vedrice iznosi:

$$L_{sr} = \frac{1}{v} \left[\varphi_u \cdot b + \frac{1}{3\pi} (9 \cdot \varphi_u - 4) (c_{max} + 0,7 \cdot r_v) \right] \quad (3.71)$$

ili u obliku:

$$L_{sr} = \frac{z}{2\pi} [\varphi_u \cdot b + (0,995 \cdot \varphi_u - 0,425) (c_{max} + 0,7 \cdot r_v)] \quad (3.72)$$

Oblast primene ove metode ograničena je debljinom odreska i visinom kopanja (reza) kroz zavisnosti:

$$0,7 \leq \frac{c_{max}}{r_v} \leq 2,5$$

$$\frac{1}{3}D \leq h \leq \frac{2}{3}D$$

$$\frac{14}{36}\pi \leq \varphi_u \leq \frac{22}{36}\pi$$

$$70^\circ \leq \varphi_u \leq 110$$

Zavisnost srednje ukupne aktivne dužine rezne ivice vedrica od tehničkog kapaciteta može se odrediti usvajanjem definicije oblika odreska i visine kopanja (reza). Usvojimo uobičajeni oblik odreska definisan odnosom debljine i širine $c_{max}/b = 1,5$ i visine kopanja (reza) $h = 0,5 \cdot D$, tj. $\varphi_u = \pi/2$.

Površina odreska je funkcija tehničkog kapaciteta:

$$F = c_{max} \cdot b = 1,5 \cdot b^2 = \frac{Q_{th}}{30 \cdot D \cdot n} \quad (3.73)$$

odakle je:

$$b = \sqrt{\frac{Q_{th}}{1,5 \cdot 30 \cdot D \cdot n}} = \frac{1}{6,7} \sqrt{\frac{Q_{th}}{D \cdot n}} \quad (3.74)$$

Uvrštavanjem ovako izračunate širine b i c_{max} (u zavisnosti od Q_{th}) dobija se da je srednja ukupna dužina rezne ivice vedrice:

$$L_{sr} = 7,56 \cdot z \left(\sqrt{\frac{Q_{th}}{Dn}} + 1,59 \cdot r_v \right), (m) \quad (3.75)$$

3.3. Otpor materijala na kopanje

Otkopavanje stenskog materijala rotornim bagerom se vrši vedricama koje su ravnomerno raspoređene i pričvršćene na rotoru. Otkopavanje se vrši istovremenim okretanjem rotora u vertikalnoj ravni i strele rotora sa platformom u horizontalnoj ravni. (Slika 3.22.). Obrtanjem rotora i nailaskom punih vedrica u zonu istovara, materijal se

iz vedrica prazni na sistem unutrašnjeg transporta pomoću istovarnog levka ili dozera sa sopstvenim pogonom.



Slika 3.22. Rotor sa strelom rotora


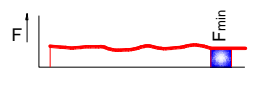

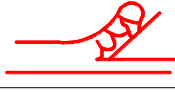
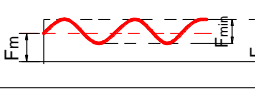
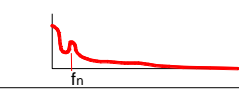
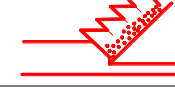
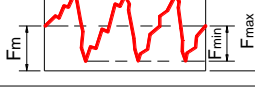
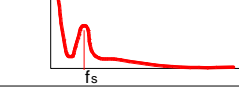

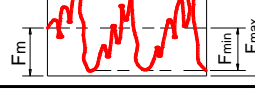
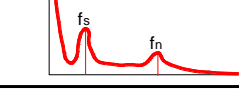
Suštinska razlika između otkopavanja materijala i čistog kopanja ogleda se u tome što se kod rotornih bagera pored razaranja masiva vrši zahvatanje i podizanje materijala do visine njegovog pražnjenja u predelu istovarnog sektora rotora.

Rezni deo radnih elemenata mašina za kopanje u podužnom preseku ima oblik klina. Na samom početku procesa rezanja dolazi do sabijanja materijala ispred reznog elementa. Kada dođe do uravnoteženja sile pritiska prednje ivice reznog elementa sa maksimalnim otporom materijala na smicanje u ravni klizanja nastupa smicanje ili otkidanje većih ili manjih komada materijala i počinje proces ponovnog sabijanja [2], [3], [4], [15], [16], [17] [18], [19], [20], [21], [22], [27], [28], [29], [31], [35], [53] [54], [58], [62], [64], [70], [71] .

Rastresiti materijal bez kohezije ne pruža bitan otpor reznim elementima za dobijanje i materijal preko njih klizi u vedricu bagera (Slika 3.23.). Plastični materijal, koji ima malu koheziju, pruža mali otpor i u vidu neprekidne struške klizi u vedricu. Suvi vezani materijal sa većom kohezijom pri procesu dobijanja lomi se u komade i pruža veći otpor kopanju. Čvrste stene (velika kohezija i čvrstoća na pritisak) zahtevaju znatne sile kopanja, jer se moraju u komadima lomiti iz masiva.

Sila smicanja neprekidno osciluje oko neke srednje vrednosti, pri čemu laka tla daju takozvanu kvazistatičku promenu, a teška tla daju izrazito dinamičku promenu sile rezanja.

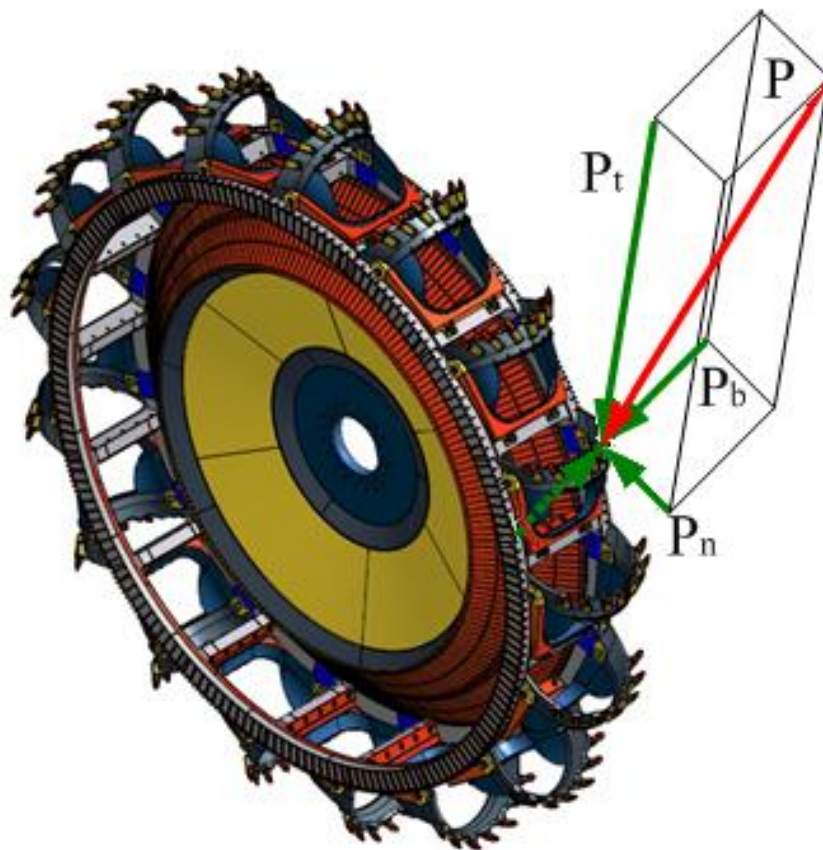
Spektralne gustine glavnih i sekundarnih frekvenci odlamanja materijala iz masiva date su od trenutka odlamanja celog zahvaćenog bloka. Glavni i sekundarni lom označava da se između većih blokova javljaju manji, jer to nije klasično sečenje, već odlamanje deo po deo. Pored frekfence lomljenja postoji sopstvena frekfenca bagera. Mora se voditi računa da sopstvene oscilacije bagera ne budu u blizinu frekfence lomljenja materijala, jer može doći do rezonance sa neželjenim posledicama.

Tok kidanja (loma) materijala	Rezna sila	Spektralna gustina
1 		
2 		
3 		
4 		
1-razvučen lom 2-lom (kidanje) u pregibu 3-lom (kidanje) u ravni slojevitosti 4-lom (kidanje) bloka	F-sila rezanja F _m -srednja vrednost sile F _{max} -maksimalna vrednost sile F _{min} -minimalna vrednost sile	Sr-spektralna gustina f-frekvencija f _n -frekvencija glavnog loma f _s -frekvencija sekundarnog loma

Slika 3.23. Oblici kidanja (loma) i kretanje rezne sile za različite materijale

Ukupni otpor materijala na kopanje

Konstrukcija bagera mora da savlada ukupan otpor materijala koji se kopa. Danas je kod svih proizvođača rotornih bagera opšte prihvaćen princip da se, kod dimezionisanja snage pogona rotora i kružnog kretanja gornje gradnje, ukupni otpor materijala na kopanje razlaže na tri komponente (Slika 3.24.): tangentnu (P_t), bočnu (P_b) i normalnu (P_n).



Slika 3.24. Sile koje deluju na vedricu pri otkopavanju materijala (P – rezultanta sile kopanja, P_t – tangenta sila kopanja, P_b – bočna sila kopanja, P_n – normalna sila kopanja)

Tangentna komponenta - P_t deluje u ravni radnog elementa, ima smer suprotan njegovom obrtanju i pravac tangente na trajektoriju rezanja, a savlađuje se snagom motora za pogon radnog elementa.

Bočna komponenta - P_b deluje u ravni kružnog kretanja radnog elementa, ima smer suprotan okretanju strele radnog elementa i pravac tangente na trajektoriju okretanja, a savlađuje se snagom pogona za kružno kretanje gornje gradnje bagera.

Normalna komponenta - P_n deluje u ravni radnog elementa u okviru ugla kopanja, ima pravac normale na trajektoriju obrtanja radnog elementa, a savlađuje se snagom pogona za transport bagera (pri radu bagera sa vertikalnim rezovima) ili težinom strele radnog točka kod rotornog bagera (pri radu bagera sa horizontalnim rezovima).

Tangentna komponenta otpora na kopanje

Obodna sila na rotoru savlađuje sledeće otpore:

- P_{rez} – otpor na rezanje (odvaljivanje) materijala iz masiva, uključujući otpor trenja reznih elemenata u čelu radnog bloka;
- P_{pod} – otpor na podizanje materijala u vedricama do visine pražnjenja istih u okviru istovarnog sektora;
- 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.

U procesu rada rotornog bagera, a zbog uticaja brojnih i raznovrsnih činilaca, vrednosti pojedinačnih otpora podložne su stalnim promenama. Tako na primer:

- Otpor na rezanje materijala u direktnoj je zavisnosti od fizičko-mehaničkih karakteristika materijala koje se pak sa svoje strane mogu menjati kako po dužini tako i po visini otkopnog bloka (što je materijal tvrdi to je ovaj otpor veći i obrnuto);
- Otpor na podizanje materijala do visine pražnjenja vedrica direktno je zavisn od nasipne mase materijala koji se otkopava: veći je za materijale većih nasipnih masa, manji je pri radu bagera vertikalnim rezovima, a raste sa porastom visine pojaseva i konstruktivne visine istovarnog sektora;
- Otpor na punjenje vedrica materijalom direktno zavisi od režima rada i vrste materijala koji se otkopava;
- Otpor trenja direktno zavisi od vrednosti koeficijenta punjenja vedrica materijalom, kao i od konstrukcije same vedrice;
- Otpor inercije zavisi od dimenzija rotora i njegove brzine obrtanja, itd.

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

$$P_t = P_{rez} + P_{pod} + P_{punj} + P_{tr} + P_{kin} \quad (3.76)$$

Vrednost komponenta P_{punj} , P_{tr} , P_{kin} su male u odnosu na P_{rez} i približno iznose:

$$P_{punj} + P_{tr} + P_{kin} = (0,02-0,15) P_{rez} \quad (3.77)$$

pri čemu veća vrednost odgovara mekšim materijalima.

Pri obradi rezultata istraživanja, specifični otpor materijala na kopanje (K_L ili K_F) određuje se na taj način što se od obodne sile na rotoru oduzme samo sila koja je potrebna za dizanje materijala do visine pražnjenja vedrica i deljenjem razlike sa površinom poprečnih preseka odrezaka ili dužinom reznih ivica svih vedrica koje su istovremeno u kontaktu sa materijalom. Shodno ovome, specifični otpor materijala na kopanje obuhvata ne samo utrošak energije na odvajanje materijala iz masiva (rezanje) već i na savlađivanje otpora na punjenje vedrica materijalom otpora trenja između materijala u vedrici i kružne skliznice i otpora na ubrzavanje materijala do brzine obrtanja rotora. Prema tome izraz za obodnu silu može se pisati u obliku:

$$P_t = P_k + P_{pod} \quad (3.78)$$

pri čemu je:

$$P_k = P_{rez} + P_{punj} + P_{tr} + P_{kin} \quad (3.79)$$

gde je: P_k - sila kopanja.

Ovakav način određivanja obodne sile na rotoru ($P_t = P_k + P_{pod}$) koriste danas svi veliki proizvođači rotornih bagera u svetu kao što su: Rusija, Nemačka, Češka republika, itd.

Sila kopanja za bagere se određuje po obrascu:

$$P_k = K_f \sum_{i=1}^{i=m} F_i = K_l \sum_{i=1}^{i=m} L_i \quad (3.80)$$

odnosno, njena srednja vrednost iznosi:

$$P_{ksr} = K_f F_{sr} m = K_l L_{sr} m \quad (3.81)$$

gde je: K_f - specifični otpor materijala na kopanje (N/cm^2),

F_i - zbir površina poprečnih preseka odrezaka svih vedrica koje se istovremeno nalaze u procesu rezanja (m^2),

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

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

F_{sr} - srednja (po luku kopanja u ravni rotora) vrednost površine poprečnog preseka odreska (cm^2),

L_{sr} - srednja (po luku kopanja) vrednost 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.

Sila potrebna za podizanje materijala do visine pražnjenja vedrica se može definisati izrazom:

$$P_{pod} = \frac{Q_t \cdot \gamma \cdot g \cdot h_d}{3600 \cdot V} \quad (3.82)$$

Odnosno, snaga potrebna za podizanje materijala je:

$$N_{pod} = \frac{Q_t \cdot \gamma \cdot g \cdot h_d}{3600} \quad (3.83)$$

gde je: Q_t - teoretski kapacitet bagera (rm^3/h),

γ - nasipna masa materijala (t/m^3),

g - ubrzanje zemljine teže (m/s^2),

V - obodna brzina rotora (m/s),

h_d - visina dizanja materijala u vedricama do mesta pražnjenja istih (m).

Budući da je snaga motora na rotoru definisana izrazom:

$$N_m = \frac{N_k + N_{pod}}{\eta} \quad (3.84)$$

potrebna snaga motora za kopanje iznosi:

$$P_k = \frac{N_k}{V} \quad (3.85)$$

$$N_k = N_m \eta - N_{pod} \quad (3.86)$$

gde je: N_m - snaga motora za pogon rotora (kW),

N_k - snaga potrebna za kopanje materijala (kW),

N_{pod} - snaga za podizanje materijala do visine pražnjenja vedrica (kW),

η - koeficijent korisnog dejstva pogona rotora.

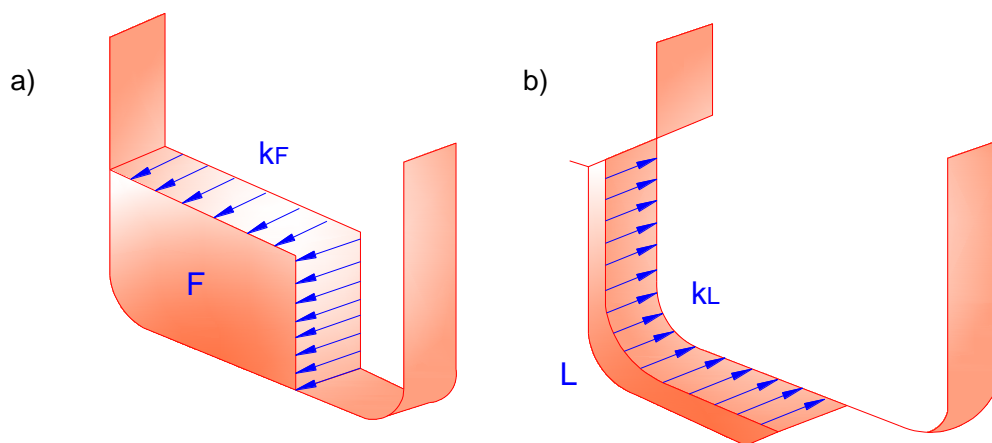
Specifični otpor materijala na kopanje

Ukupan otpor na kopanje nije prikladna veličina za definisanje suštine samog procesa kopanja rotornim bagerima, zato što se istovremeno u kontaktu sa materijalom nalazi različit broj vedrica. Shodno tome, svrsishodnije je da se ukupan otpor na kopanje svede na neku uporednu vrednost, odnosno da se izrazi u specifičnom obliku (Slika 3.25.).

Danas su u upotrebi uglavnom dva načina za izražavanje specifičnog otpora na kopanje:

- odnos sile kopanja i zbirne površine poprečnih preseka odrezaka svih vedrica koje se istovremeno nalaze u kontaktu sa materijalom - k_F (N/cm²);
- odnos sile kopanja i zbirne dužine reznih elemenata svih vedrica koje su istovremeno u kontaktu sa materijalom, tj. u procesu rezanja - k_L (N/cm).

Oba pokazatelja specifičnog otpora na kopanje su dovoljno pouzdani za praktičnu primenu. U Nemačkoj i Češkoj Republici veću primenu je dobio pokazatelj k_L . Ovo se može objasniti činjenicom što su prvi rotorni bageri koristili za otkopavanje mekih materijala, bagerske vedrice su bile bez zuba, pa je specifični otpor na kopanje malo zavisio od površine poprečnog preseka odreska. Međutim, sve šira primena rotornih bagera na otkopavanju čvrstih materijala i uglja, a s tim u vezi i ugradnja vedrica sa zubima, čini da je k_F reprezentativni pokazatelj specifičnog otpora materijala na kopanje tj. da znatno bolje odražava samu fizičku suštinu procesa kopanja. Upravo zbog toga u Rusiji je isključivo u upotrebi pokazatelj k_F .



Slika 3.25. Šematski prikaz određivanja specifičnog otpora na kopanje:

a) u odnosu na površinu poprečnih preseka odrezaka

b) u odnosu na dužinu rezne ivice u kontaktu sa materijalom

Zbog određenih anomalija kao što je, na primer, da porastom površine poprečnog preseka odreska pokazatelj k_L raste, a pokazatelj k_F opada, u primeni je i treći pokazatelj k_{FL} , a koji predstavlja:

- odnos tangentne komponente sile kopanja i kvadratnog korena iz proizvoda zbirne površine poprečnih preseka odrezaka i zbirne dužine reznih ivica koje su u kontaktu sa materijalom k_{FL} (N/cm).

Specifični otpor materijala na kopanje po površini poprečnog preseka odreska

Specifični otpor materijala na kopanje po površini poprečnog preseka odreska k_F definisan je odnosom sile kopanja i srednje zbirne površine poprečnih preseka odrezaka svih vedrica koje se istovremeno nalaze u kontaktu sa materijalom, odnosno u procesu rezanja.

Dakle, ovaj pokazatelj je definisan izrazom:

$$K_F = \frac{P_k}{\sum_{i=1}^{i=m} F_i} \quad (3.87)$$

Kako je obodna sila na rotoru definisana izrazom:

$$P_t = P_k + P_{pod} \quad (3.88)$$

i da se sila kopanja može odrediti po obrascu:

$$P_k = \frac{N_k}{V} \quad (3.89)$$

pri čemu je snaga potrebna za kopanje:

$$N_k = N_m \eta - N_{pod} \quad (3.90)$$

Sledi da se specifični otpor materijala na kopanje dobije na taj način što se od obodne sile oduzme sila potrebna za podizanje materijala u vedricama do visine pražnjenja i razlika podeli sa zbirnom površinom poprečnih preseka svih odrezaka koji se istovremeno isecaju iz materijala.

Specifični otpor materijala na kopanje po dužini reznih ivica vedrica

Specifični otpor materijala na kopanje po dužini reznih ivica k_L predstavlja odnos sile kopanja i srednje zbirne dužine reznih ivica svih vedrica koje se istovremeno nalaze u kontaktu sa materijalom. Prema tome ovaj pokazatelj definisan je izrazom:

$$K_L = \frac{P_k}{\sum_{i=0}^{i=m} L_i} \quad (3.91)$$

I kod pokazatelja k_L tangenta komponenta otpora na kopanje određuje se na način koji je objašnjen. Dužina reznih ivica svih vedrica koje se istovremeno nalaze u kontaktu sa materijalom određuje se na način koji sledi u daljem tekstu.

3.4. Kapacitet rotornog bagera

Kapacitet kontinualnih sistema sa rotornim bagerima najviše zavisi od prvog i osnovnog elementa sistema - rotornog bagera. Kapacitet rotornog bagera predstavlja efekat rada izražen u m^3 (ili t), otkopane mase u jedinici vremena i izražava se kao: teoretski kapacitet, tehnički kapacitet, eksploatacioni kapacitet i efektivni kapacitet [36], [38], [39], [40], [48], [52].

Teoretski kapacitet dobija se na osnovu konstruktivnih i kinematskih karakteristika bagera.

Tehnički kapacitet, pored konstruktivnih karakteristika bagera, obuhvata faktore uticaja radne sredine (otpor kopanju, raspucalost, plastičnost, lepljivost, parametre za stabilnost kosina) i tehnologije rada bagera u bloku, odnosno, učešće čistog vremena otkopavanja u ukupnom proizvodnom vremenu za otkopavanje bloka.

Eksploatacioni kapacitet u suštini predstavlja tehnički kapacitet korigovan učešćem zastoja, koji se javljaju u toku planiranog radnog vremena i ukupnog vremena rada. Izražava se za određeni vremenski period eksploatacije. Pored planiranih zastoja sistema i zastoja zbog manevarskih i pomoćnih operacija kod proračuna eksploatacionog kapaciteta uključeni su i neplanirani zastoji.

Efektivni kapacitet dobija se na kraju kalendarskog perioda po tačnom utvrđivanju efektivnog radnog vremena i ukupno izmerenih otkopanih količina otkrivke ili uglja.

Prema tome, kapacitet rotornog bagera zavisi od sledećih grupa uticajnih faktora:

- Konstruktivni i kinematski parametri kopanja i transporta, prečnik rotora i dužina strele, zapremina, broj i konstrukcija vedrica, brzine rotacije, okretanja, spuštanja i podizanja radnog organa, vreme reverzije okretanja strele, tip i brzina mehanizma za transport bagera, dinamičke karakteristike, čvrstoća, dugovečnost i sigurnost osnovnih delova;
- Fizičko-mehaničke osobine stenskog materijala, u prvom redu njegov specifični otpor kopanju, lomljivost, raspucalost u masivu, plastičnost, lepljivost, vlažnost i dr.;
- Stepem podudarnosti tehnoloških elemenata otkopa (širine bloka, visine i ugla kosine etaže) sa parametrima bagera;
- Sistem eksploatacije i organizacija rada na površinskom kopu (elementi sistema eksploatacije, broj i vreme radnih smena u toku godine, sistem eksploatacije, dužina fronta, vrsta i organizacija transporta i dr.).

Između nabrojanih uticajnih faktora, samo su konstruktivni i kinematski faktori za određeni model bagera konstantni. Ostali uticajni faktori su promenljivi i zavise od uslova eksploatacije.

Teoretski kapacitet rotornog bagera računa se kao proizvod računске zapremine jedne vedrice (E) i broja istresanja na minut (n):

$$Q_t = 60 \cdot E \cdot n, \text{ (rm}^3/\text{h)} \quad (3.92)$$

Pošto se vedrice pune rastresenim materijalom, to se i teoretski kapacitet prikazuje u m^3/h rastresenog stenskog materijala. Teoretski kapacitet pokazuje konstruktivne i energetske mogućnosti rotornog bagera i ograničen je zapreminom vedrica na rotoru, snagom pogona ili propusnom moći transportera. Teoretski kapacitet rotornog bagera može se računati i preko zapremina rezova po formuli:

$$Q_t = 60 \cdot c \cdot v \cdot h, \text{ (rm}^3/\text{h)}, \quad (3.93)$$

gde je: c - debljina reza (m),

v - brzina okretanja strele rotora (m/min),

h - visina reza (m).

Tehnički kapacitet rotornog bagera je njegov maksimalno mogući kapacitet u određenom otkopu i steni. U tehničkom kapacitetu su uključena svojstva stene i organizacija procesa otkopavanja otkopa, a računa se po formuli:

$$Q_{th} = Q_t \cdot k_p \cdot k_o / k_r, \text{ (čm}^3/\text{h)}, \quad (3.94)$$

gde je: k_p - koeficijent punjenja vedrica,

k_r - koeficijent rastresitosti stene,

k_o - koeficijent otkopa (produktivnosti).

Koeficijent otkopa ili koeficijent produktivnosti uzima u obzir uticaj svih manevarskih operacija u otkopavanju bloka: približavanje bagera otkopu, spuštanje rotora i odmicanje bagera, prelaz na obradu sledećeg bloka (u sledeći ciklus otkopavanja), tj. približavanje bagera bloku i podizanje rotora. Pored toga, ovim koeficijentom se uzimaju u obzir i gubici kapaciteta od ubrzanja i usporenja okretanja strele u početku i na kraju rezova reverziranja, gubici usled srpastog oblika rezova, van oblasti regulacije i gubici zbog smanjenja visine krajnjih rezova prema otkopanom prostoru.

Manevarski pokreti rotornog bagera koji znatno utiču na kapacitet bagera zavise od geometrije radilišta i konstruktivnih parametara bagera. Manevarski pokreti mogu biti u vertikalnim ravnima i obuhvataju dizanje i spuštanje rotora, produžavanje strele rotora i kretanje bagera i bočni koji obuhvataju neproduktivne pokrete strele oko vertikalne ose bagera uglavnom zbog promene reza koji se otkopava i otkopavanja

rezova prema otkopanom prostoru.

Dokazano je da osnovni uticaj na kapacitet imaju manevarski pokreti u vertikalnim ravnima. Uticaj bočnih manevarskih pokreta je zanemarljiv, posebno ako je vešt rukovaoc bagera. Veća dubina napredovanja čela, porast širine bloka, i povećanje ugla nagiba čeonke kosine smanjuju manevarske pokrete za vreme rada i povećavaju kapacitet bagera.

Povećanje visine etaže dovodi do porasta manevarskih pokreta i pada kapaciteta bagera. Najmanje manevara vrši se kod etaže koja se sastoji iz jednog pojasa, ali su sa aspekta tehnologije rada povoljnije visoke etaže.

Tehnički kapacitet se može izraziti i kao odnos zapremine bloka i proizvodnog radnog vremena za otkopavanje bloka:

$$Q_{th} = \frac{V}{T_b}, \text{ (čm}^3/\text{h)} \quad (3.95)$$

gde je: V - zapremina bloka,

T_b - vreme otkopavanje bloka.

Zapremina bloka se izražava kao proizvod širine visine i dužine bloka:

$$V = B \cdot H \cdot L_b, \text{ (m}^3\text{)} \quad (3.96)$$

Osnovna proizvodna operacija rada rotornog bagera je otkopavanje ili rezanje i izvodi se na geometrijskom i tehnološkom delu bloka koji se zove rez, kružnim kretanjem strele sa rotorom na širini bloka. Zapremina reza iznosi:

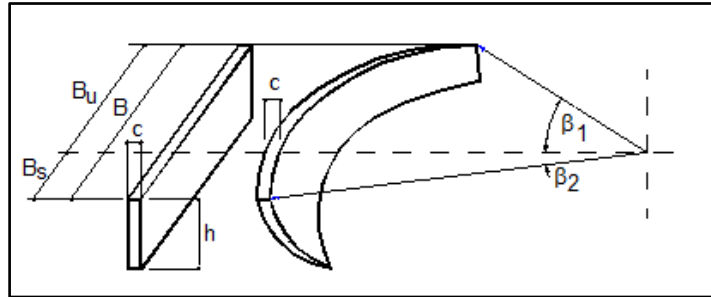
$$V = B \cdot h \cdot c \text{ (m}^3\text{)} \quad (3.97)$$

gde je: B - širina bloka,

h - visina reza,

c - debljina reza.

Geometrijski elementi za proračun zapremine su prikazani na Slici 3.26.



Slika 3.26. Geometrijski elementi za proračun zapremine reza

Oznake na slici predstavljaju:

- B - Širina bloka,
- B_s - Spoljašnja širina bloka,
- B_u - Unutrašnja širina bloka,
- H - Visina pojasa (reza),
- c - Debljina reza,
- β₁ - Ugao okretanja na stranu ka masivu,
- β₂ - Ugao okretanja na stranu ka otkopanom prostoru.

Širina bloka (B) sastoji se od delova bloka, u odnosu na osu kretanja bagera:

- prema masivu: $B_u = R_k \sin \beta_1$ i
- prema otkopanom prostoru: $B_s = R_k \sin \beta_2$, pa je:

$$B = B_u + B_s = R_k \sin \beta_1 + R_k \sin \beta_2 = R_k (\sin \beta_1 + \sin \beta_2) \quad (3.98)$$

Vreme otkopavanja bloka (T_b) se može izraziti na sledeći način:

$$T_b = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n t_{r_{ij}} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n t_{pr_{ij}} + \sum_{i=1}^N t_{p_i} + t_b \quad (3.99)$$

gde su: N - broj pojaseva na visini bloka, $N = H / (0,5 \div 0,7) D$,

n - broj rezova na dužini bloka, $n = L_b / d$,

i - broj pojasa,

j - broj reza,

t_r - vreme otkopavanja reza,

t_{pr} - vreme promene reza,

t_p - vreme promene pojasa,

t_b - vreme promene bloka.

Eksploatacioni kapacitet rotornog bagera, pored nabrojanih faktora koji utiču na tehnički kapacitet, odražava još i uticaj organizacije rada bagera, transporta i održavanja u određenom vremenskom periodu, a računa se po formuli:

$$Q_e = Q_{th} \cdot K_v \cdot T, \quad (3.100)$$

gde je: T - posmatrano vreme (h),

K_v - koeficijent iskorišćenja vremena, računa se po formuli:

$$K_v = (T - t_{pz} - t_{nz}) / T, \quad (3.101)$$

t_{pz} - vreme planiranih zastoja (neradno vreme, mesečni planski preventivni pregledi i opravke, godišnji, srednji i veliki remont, rekonstrukcije),

t_{nz} - vreme neplaniranih zastoja.

Korišćenjem statističkih podataka i moderne računarske tehnike, eksploatacioni kapacitet (Q_{es}) rotornog bagera u bilo kom razmatranom kalendarskom periodu vremena (smena, nedelja, mesec ili godina) (T_k) računa se iz izraza:

$$Q_{es} = Q_{th} \cdot T_k \cdot K_t \cdot K_{th} \cdot K_o \quad (3.102)$$

gde je: K_t - koeficijent tehnološkog iskorišćenja vremena rada bagera dat

$$\text{formulom: } K_t = t_v / (t_v + t_p), \quad (3.103)$$

t_v - ukupno vreme rada bagera,

t_p - ukupno vreme pomoćnih tehnoloških operacija koje obuhvata manevrisanje u bočnoj i vertikalnim ravnima, pomeranje transporter, obilaženje transporter na kraju fronta, itd.,

K_{th} - koeficijent tehničkog iskorišćenja vremena u razmatranom periodu kalendarskog vremena T_k : $K_{th} = T_k / (T_k + T_o + T_r)$ (3.104)

T_o - vreme tehničkog opsluživanja bagera,

T_r - vreme remonta bagera,

K_o - koeficijent organizacionog iskorišćenja vremena: $K_o = (T_k - t_o) / T_k$, (3.105)

t_o - ukupno vreme zastoja iz organizacionih razloga.

Savesnim prikupljanjem podataka o navedenim vremenima i njihovom obradom dobijaju se objektivne vrednosti ostvarenih kapaciteta, a mogu se relativno precizno predvideti pokazatelji pouzdanosti bagera i njegov kapacitet.

4. MODELIRANJE PROCESA OTKOPAVANJA I PRORAČUN ELEMENATA REZA I ODRESKA

U Centru za površinsku eksploataciju iz Beograda, formiran je Simulacioni model rada rotornog bagera koji omogućava analizu većeg broj ulaznih parametara u relativno kratkom vremenskom intervalu [38], [39], [40], [57].

Kod formiranja modela simulacije rada rotornog bagera korišćeni su podaci iz modela radne sredine (poglavlje 2.2. – Dosadašnja iskustva istraživanja predmetne problematike u konkretnim uslovima radne sredine na primeru Površinskog kopa Gacko). Primenjena je digitalna simulacija i to diskretno-vremenski sistem simulacije. Ovakav simulacioni pristup najviše odgovara pošto se određene interakcije delova sistema dešavaju u diskretnim vremenskim intervalima.

Sam razvoj modela ili sistema simulacije izvršen je analitičkom pripremom na osnovu kompletne dekompozicije procesa rada bagera u vremenu pogonske spremnosti.

Pošto određivanje tehnoloških parametara rada rotornog bagera i proračun kapaciteta u suštini predstavljaju kompleks usklađenja tehničko-tehnoloških karakteristika bagera sa parametrima radne sredine, model simulacije rada rotornog bagera pruža mogućnost za analizu većeg broja mogućih kombinacija uz uključivanje niza parametara koji svojom interakcijom imaju znatan uticaj na krajnje rezultate.

Zbog toga simulacija predstavlja analizu stvarnog stanja i otvara mogućnost za veliki broj eksperimenata na modelu u cilju dobijanja informacija o ponašanju sistema u različitim tehnološkim uslovima.

Potrebno je naglasiti da proces simulacije sam po sebi apriori ne daje optimalno rešenje primene rotornog bagera, ali uz pomoć metode iteracije, na osnovu više uzastopnih prolaza uz modifikaciju ulaznih parametara može se dovesti do optimalnog rešenja. Konkretno to se odnosi i na promenu tehnoloških parametara (broj pojaseva, debljina reza, brzina okretanja strele rotora, širina bloka, itd.), u okviru ograničenja na bazi fizičko-mehaničkih karakteristika do postizanja maksimalnog kapaciteta sistema u odnosu na sve prethodno dobijene rezultate analize.

Radi se zapravo o variranju parametara ili grupa parametara u procesu simulacije sa nastojanjem da se odrede one veličine koje daju maksimalne krajnje rezultate. Prema

tome, model simulacije po svojoj prirodi simulira uticaj radne sredine preko promena tehnoloških parametara i njihovo uzajamno dejstvo.

Osnovni elementi za model simulacije rada rotornog bagera su rotorni bager sa kinematsko konstruktivnim karakteristikama i determinisana radna sredina sa fizičko-mehaničkim karakteristikama.

Kinematsko-konstruktivne karakteristike bagera koje su neophodne u proceduri analize su:

- | | |
|---|-----------------------------|
| - Visina kopanja | H_k ; |
| - Dužina strele rotora | L_k ; |
| - Visina rotora do reduktora | h_r ; |
| - Prečnik rotora | D ; |
| - Zapremina vedrice | V ; |
| - Broj istresanja | n_i ; |
| - Visina bočne ivice zuba vedrice | c_B ; |
| - Osnovne brzine horizontalnog kretanja strele sa rotorom | $v_{k1}-v_{kn}$; |
| - Maksimalna brzina horizontalnog kretanja strele sa rotorom | $v_{k\max}$; |
| - Brzina vertikalnog kretanja strele sa rotorom | v_k ; |
| - Brzina kretanja bagera | V_k ; |
| - Debljina strele rotora od ose do donje ivice | h_k ; |
| - Visina vešanja strele sa rotorom u vertikalnoj osi bagera | H_o ; |
| - Horizontalno rastojanje vešanja strele od ose bagera | X ; |
| - Dužina uređaja za kretanje od ose bagera prema čeonj kosini | F ; |
| - Uglovi slobodnog rezanja | $\alpha_{s1}-\alpha_{s2}$; |
| - Parametri za proveru snage motora. | |

Polazna pretpostavka je da se reznom silom bagera mogu savladati otpori kopanju materijala koji se javlja na okonturenom prostoru površinskog kopa, podešavanjem geometrijskih parametara reza.

U modelu simulacije rada rotornog bagera tehnološki proces na otkopavanju sastoji se od osnovnih i pomoćnih operacija tako da se kao tehnološki zaokružena celina za proračun tehničkog kapaciteta izdvaja blok, gde je zaokružen ciklus svih radnih i pomoćnih operacija bagera.

Osnovna operacija je rezanje materijala, odnosno otkopavanje, dok su pomoćne operacije manevarski pokreti bagera u pripremi za otkopavanje, tako da je ukupno vreme rada bagera pored vremena za otkopavanje opterećeno i vremenom za pomoćne operacije.

Modelirane pomoćne operacije obuhvataju:

- Pomeranje bagera za sledeći rez;
- Manevar bagera za sledeći niži pojas;
- Manevar bagera za sledeći blok.

Obuhvatanjem svih vremena u kojima se odvijaju radne i pomoćne operacije na otkopavanju bloka dolazi se do ukupnog vremena za otkopavanje bloka prema formuli (3.97).

Ako se posmatra dominirajuća šema rada rotornog bagera u bloku, kontinualnost dejstva pri otkopavanju je uslovna. Bager periodično ponavlja određene operacije i manevre. Proces kopanja počinje od gornjeg pojasa koji se po dužini bloka zahvata sa više rezova dok se ne postigne maksimalna dužina bloka. Bageri ne mogu da održe stalnu debljinu reza pa se punjenje vedrica obezbeđuje povećanjem širine odreska koja počinje odmah po izlasku strele rotora iz ose kretanja bagera. Ovaj manevar je automatski regulisan obično do otklona od 60° , a zatim ostaje sa konstantnom brzinom do kraja okretanja.

Sledi manevar spuštanja rotora za visinu pojasa na sledeći niži pojas, pa se cela operacija ponavlja sekvencijalno do potpunog otkopavanja bloka na svim pojasevima, odnosno po visini etaže. Tada počinje ponavljanje celog ciklusa. Ovo pokazuje da je proces otkopavanja u bloku cikličan proces. Prisutan je sve vreme kontinuitet pogona sistema, ali nije kontinuitet toka materijala.

U ciklusu otkopavanja postoje operacije koje su determinisane veličine i operacije sa vremenima koja su slučajne veličine.

Determinisane veličine su vreme otkopavanja reza (t_r) i broj pojaseva (N).

Slučajne veličine su broj rezova na dužini bloka, vreme promene reza, vreme promene pojasa i vreme promene bloka.

Vremena svih manevarskih i pomoćnih operacija su slučajne veličine.

Najkraće vreme ovih operacija se može definisati na osnovu kinematskih karakteristika bagera: brzine kretanja bagera, brzine horizontalnog i vertikalnog kretanja strele rotora. Takođe, na osnovu konstruktivnih karakteristika može se definisati maksimalna debljina reza, sa kojom se otkopava najmanji broj rezova na dužini bloka.

Odavde proizilaze ograničenja na osnovu kinematsko-konstruktivnih karakteristika prema kojima se dobijaju minimalne vrednosti za vremena pomoćnih operacija u idealnim uslovima rada.

U realnim uslovima rada rotornog bagera snimanjem pomoćnih operacija, broja i debljine rezova, mogu se utvrditi ograničenja pojavljivanja maksimalnih vrednosti slučajnih veličina tako da se definiše interval pojavljivanja ispitivanih vrednosti i to:

- d (d_{\max} - d_{\min}),
- n (L_b / d_{\max} - L_b / d_{\min}),
- t_{pr} ($t_{pr \min}$ - $t_{pr \max}$),
- t_p ($t_p \min$ - $t_p \max$),
- t_b ($t_b \min$ - $t_b \max$).

Statističkom analizom dobija se raspodela pojavljivanja navedenih vrednosti na konstatovanim intervalima između minimalnih kinematsko-konstruktivnih i maksimalnih, praktično utvrđenih vrednosti tako da je moguće preuzeti realno stanje sistema za model simulacije kao empirijske raspodele. Pomoću generatora slučajnih brojeva sa empirijskih raspodela izraženih preko kumulante, dobijaju se potrebne vrednosti za sve navedene slučajne veličine u toku simulacije. Procedura utvrđivanja tehnoloških parametara rada bagera sprovodi se za sve definisane karakteristične slučajeve za radnu sredinu.

Formiranje baze pravila tehnoloških parametara rada bagera na osnovu karakterističnih slučajeva ima i alternativnu mogućnost. Posle interpolacije kao što je navedeno, nosioci informacija o radnoj sredini su miniblokovski nizovi podataka o strukturnim i fizičko-mehaničkim karakteristikama. Za svaki od miniblokovski nizovi moguće je, primenom modela simulacije, izvršiti ispitivanje mogućih tehnoloških parametara rada rotornog bagera i usvojiti za bazu pravila one kojima se postiže najveći kapacitet proizvodnje. Posle toga i tehnološki parametri rada bagera povezani su sa težištima miniblokovski nizovi i identifikuju se na celoj površini minibloka prilikom nailaska bagera.

Ova procedura je potpuno logična i jasna i predstavlja osnovnu ideju za kompleksnu analizu rada bagera u realnom prostoru i vremenu i sagledavanje dinamičkog karaktera proizvodnje. Međutim u kontekstu analize rada rotornog bagera, primenom modela simulacije pojedinačno po miniblokovima, postavlja se pitanje racionalnosti obrade, prvo zbog velikog broja miniblokova i drugo zbog potrebe da se izvrši analiza više mogućih kombinacija tehnoloških parametara pojedinačno po svakom bloku.

Zbog toga su za ispitivanje tehnoloških parametara rada bagera izdvojeni karakteristični slučajevi koji predstavljaju radnu sredinu realnog prostora površinskog kopa. Kod većeg raspona oscilacija strukturnih i fizičko-mehaničkih karakteristika, broj karakterističnih slučajeva je veći. Obrnuto, kod manjeg raspona u kome se javljaju vrednosti debljine i vertikalnog položaja proslojaka i fizičko-mehaničkih karakteristika, izdvaja se i manji broj karakterističnih slučajeva koji se detaljno analiziraju. Broj karakterističnih slučajeva zavisi od veličine intervala podele raspona pojavljivanja parametara radne sredine i istovremeno od veličine ovog intervala zavisi i stepen poklapanja karakterističnih slučajeva sa konkretnim uslovima radne sredine u minibloku. Kada se u konkretnim uslovima pojavi razlika između usvojenih i realnih vrednosti, onda se karakterističan slučaj radne sredine sa usvojenim tehnološkim parametrima, svodi na konkretne uslove radne sredine. Pošto izdvojeni karakterističan slučaj tada predstavlja osnovu od koje se polazi, prvo se koriguju (ili usklađuju) visine pojaseva, pa zatim debljine rezova u skladu sa prisutnim otporom kopanja. Razlike debljina pojaseva koje nastaju su veoma male, tako da praktično nemaju uticaja na definisani nagib kosine etaže i po pravilu on ostaje isti.

Primena karakterističnih slučajeva ne odstupa od osnovne ideje, ali celu analizu svodi na racionalniju dužinu obrade. Pojedinačna analiza tehnoloških parametara rada bagera za svaki miniblok ili preciznije, za svaki blok rotornog bagera, predstavlja stalnu alternativnu mogućnost kod direktnog modeliranja. Direktno se može primeniti i za automatizovano formiranje i dopunjavanje baze pravila kod direktnog upravljanja proizvodnjom rotornog bagera istim ovim modelom, koji tada dobija normativni karakter.

Proračun kapaciteta rotornog bagera u modelu simulacije je izvršen prema metodologiji koja je prikazana u sledećem tekstu.

Granični ugao regulacije:

$$\cos \xi_{rl} = \frac{E \cdot n}{h_i \cdot c \cdot k_r \cdot v_{b \max}} \quad (4.1)$$

gde je: E - zapremina vedrice (m^3),

n - broj istresanja vedrica rotora u minuti (min^{-1}),

h_i - visina pojasa (m),

c - debljina odreska (m),

$v_{b \max}$ - maksimalna brzina okretanja strele rotora (m/min).

Osnovna brzina okretanja strele rotora:

$$v_{bol} = \frac{E \cdot n}{h_i \cdot c \cdot k_r} \quad (4.2)$$

Srednje brzina okretanja strele rotora:

$$v_{bst} = \frac{\beta_1 + \beta_2}{57.3 \cdot (\sin \xi_{rl} + \sin \beta_2) + \beta_1 - \xi_{rl}} \cdot \frac{v_{bol}}{v_{b \max}} \quad (4.3)$$

gde je: β_1 - ugao okretanja strele rotora prema unutrašnjoj bočnoj kosini ($^\circ$),

β_2 - ugao okretanja strele rotora spoljašnjoj bočnoj kosini ($^\circ$),

ξ_{ri} - ugao regulacije u pojasu ($^\circ$),

Srednje vreme okretanja strele rotora:

$$t_{st} = \frac{\pi \cdot (L + e + r) \cdot (\beta_1 + \beta_2)}{180^\circ \cdot v_{bst}} \quad (4.4)$$

gde je: L - dužina strele rotora (m),

e - horizontalno rastojanje tačke vešanja strele rotora od vertikalne ose okretanja bagera (m),

r - poluprečnik rotora (m).

Vreme promene reza u bloku:

$$t_r = \frac{C_{\max}}{v_t} \quad (4.5)$$

gde je: c_{\max} - maksimalna debljina reza (m),

v_t - brzina transporta bagera (m/min).

Broj rezova u pojasu se određuje shodno zavisnosti:

$$n_r = \frac{L_{b\min}}{c} \quad (4.6)$$

gde je $L_{b\min}$ dužina otkopavanja bloka za jedan tehnološki ciklus, koja se dobija na osnovu ograničenja dok strela ne udari u drugi donji pojas i iznosi:

$$L_{b\min} = r + \left(r - \frac{d+t}{\cos \alpha_g} \right) \cdot \text{ctg} \alpha_g - h_l \cdot \text{ctg} \beta_c \quad (4.7)$$

Vreme promene pojasa:

$$t_e = \frac{L_b - c_{\max} + \frac{h_i}{\text{tg} \beta_c}}{V_t} \quad (4.8)$$

gde je: L_b - dužina otkopavanja bloka za jedan tehnološki ciklus (m).

Vreme promene bloka definisano je izrazom:

$$t_{pb} = \frac{(H - h_i) \cdot \text{tg} \beta_c}{v_t} \quad (4.9)$$

Vreme otkopavanja bloka:

$$T_b = \left\{ \sum [(t_{si} + t_u + t_r) \cdot n_r + t_{ei}] \right\} + t_{pb} \quad (4.10)$$

Zapremina bloka:

$$V = H \cdot B \cdot L_b \quad (4.11)$$

Tehnički kapacitet rotornog bagera, za definisane tehnološke parametre, iznosi:

$$Q_{th} = \frac{V}{T_b} \cdot k_o \quad (4.12)$$

gde je: k_o - korekcionni koeficijent koji uzima u obzir uslove otkopavanja materijala, a iznosi 0,97.

Prosečni tehnički kapacitet – Q_{thpr} manji je od tehničkog kapaciteta dobijenog na bazi tehnološke šeme otkopavanja bloka zbog čisto tehnološke nemogućnosti da se

neprekidno radi u regularnom bloku tj. zbog gubitka u kapacitetu kod usecanja bagera na kraju etaže u novi blok. Shodno tome prosečni tehnički kapacitet bagera iznosi:

$$Q_{thpr} = Q_{th} \cdot k_g \quad (4.13)$$

gde je: k_g - koeficijent gubitka u kapacitetu zbog usecanja bagera u novi blok sveden na kapacitet bagera u regularnom bloku:

$$k_g = \frac{(L_e - l) \cdot k_{kl}}{L} \quad (4.14)$$

L_e - dužina etaže (m),

l - dužina zone u kojoj se vrši usecanje u novi blok (m),

k_{kl} - korekcionni koeficijent tehničkog kapaciteta bagera.

$$Q_e = Q_{thpr} \cdot k_g \cdot T \quad (4.15)$$

4.1. Rezultati proračuna kapaciteta rotornog bagera ER-1250 16/1,5

Na osnovu prikazanog modela formiran je softver za proračun kapaciteta rotornog bagera, koji se generalno sastoji od tri dela – forme i to:

1. Forma za unos tehničkih parametara rotornog bagera (Slika 4.1.);
2. Forma za unos tehnoloških parametara rada rotornog bagera (Slika 4.2.);
3. Forma sa izlaznim podacima (Slika 4.3.)

Karakteristike rotornog bagera	
Tip rotornog bagera	ER-1250 17/15
Teoretski kapacitet (m ³ /h)	1600
Zapremina vedrice (m ³)	0.375
Broj praznjenja vedrica (1/min)	76.5
Maksimalna debljina reza (m)	0.1
Brzina okreta nosaca rotora (m/min)	12
Brzina kretanja bagera (m/min)	6.25
Brzina dizanja strele rotora (m/min)	3
Duzina nosaca rotora (m)	21.3
Horizontalno rastojanje tacke vesanja nosaca rotora i ose rotornog bagera (m)	1.2
Visina tacke vesanja strele rotora (m)	8.5
Poluprecnik rotora (m)	3.26
Broj vedrica (kom)	9
Maksimalni ugao nagiba strele rotora u odnosu na horizontalu - navise (st)	23
Maksimalni ugao nagiba strele rotora u odnosu na horizontalu - nanize (st)	19
Poluprecnik krivine vedrice (m)	0.25
Snaga motora rotora (kW)	400
Koeficijent iskoriscenja snage	0.8
Duzina od ose bagera do najsturenije tacke gusenica (m)	8
Rastojanje od ose nosaca rotora do najnize tacke nosaca rotora uvecano za sigurnosno ratojanje (m)	2.2
Ugao slobodnog rezanja (st)	38
Klirrens reduktora (st)	2.5

Slika 4.1. Forma za unos tehničkih parametara rotornog bagera

Prametri rada rotornog bagera

Visina etaže (m)	15
Ugao okretanja prema masivu u najvišem pojaseu (st)	90
Ugao okretanja prema otlopanom prostoru u najnižem pojaseu (st)	22
Ugao nagiba bočne kosine (st)	70
Ugao nagiba ceone kosine (st)	70
Dužina fronta radova (m)	800
Dužina usecanja u novi blok (m)	150
Broj pojaseva	5

FOJAS	Visina (m)	Zapreminska težina (N/m ³)	Koeficijent rasprostora	Opor kopanju (N/cm ²)
FOJAS 1	3,25	18	1,3	1000
FOJAS 2	3,25	18	1,3	1000
FOJAS 3	3,25	18	1,3	1000
FOJAS 4	3,25	18	1,3	1000
FOJAS 5	2	18	1,3	1000

UNESI SACUVAJ PRORACUN

UKUPNA VISINA ETAŽE (m) 15

Slika 4.2. Forma za unos tehnoloških parametara rotornog bagera

Proracun

Broj pojaseva	Visina pojasa (m)	Radius kopanja (m)	Ugao prema masivu (st)	Ugao prema otlopanom prostoru (st)	Unutrasnja sirina bloka (m)	Spoljasnja sirina bloka (m)	Debljina reza (m)	Broj rezova u pojaseu	Ukupna snaga (kW)	Opor kopanju (N/cm ²)	Vreme rada u jednom rezu (min)	Vreme promene reza (min)
1	3,25	24,74	90,00	11,47	24,74	4,92	0,10	36	238,3	1000	3,65	0,02
2	3,25	25,51	67,44	13,84	23,56	6,10	0,10	36	238,3	1000	3,02	0,00
3	3,25	25,76	60,30	16,42	22,37	7,28	0,10	36	238,3	1000	2,87	0,02
4	3,25	25,51	56,17	19,38	21,19	8,47	0,10	36	238,3	1000	2,80	0,02
5	2,00	25,76	50,97	22,00	20,01	9,65	0,10	36	79,68	1000	2,73	0,02

Dužina bloka (m)	Visina etaže (m)	Sirina bloka (m)	Zapremina bloka (cm ³)	Vreme prom. bloka (min)	Vreme rada u bloku (min)	Kapacitet u bloku (cm ³ /h)	Kapacitet u frontu (cm ³ /h)
3,63	15,00	29,66	1615,00	3,92	555,23	174,52	141,80

SACUVAJ KRAJ

Slika 4.3. Forma sa izlaznim podacima

Proračun primenom modela je izvršen za rad za 9 karakterističnih slučajeva za maksimalne radne parametre rotornog bagera, pri radu sa horizontalnim i vertikalnim rezovima za sledeće uslove:

- Visina etaže: $H = 15$ m;
- Vertikalna podela na pojaseve pri kombinovanom radu sa vertikalnim i horizontalnim rezovima koja se primenjuje na Površinskom kopu Gacko:
 1. pojas: 3,25 m – vertikalni rezovi,
 2. pojas: 9 m – horizontalni rezovi,
 3. pojas: 2,75 m – vertikalni rezovi;
- Vertikalna podela na pojaseve pri radu sa vertikalnim rezovima:
 - 1., 2., 3. i 4. pojas: 3,25 m – vertikalni rezovi,
 5. pojas: 2 m – vertikalni rezovi;
- Dubina bloka: 3,25 m;
- Obodna brzina horizontalnog kretanja rotora: 12, 18 i 24 m/min;
- Debljina reza: 0,10, 0,15 i 0,20 m.

Rezultati proračuna dati su u Tabelama 4.1. – 4.18.

Tabela 4.1. Rezultati proračuna pri otkopavanju horizontalnim rezovima debljine 0,10 m i brzinom okretanja strele rotora od 12 m/min

Broj pojasa	Visina pojasa (m)	Radijus kopanja (m)	Ugao okretanja prema masivu (°)	Ugao okretanja prema otkopanom prostoru (°)	Unutrašnja širina bloka (m)	Spoljašnja širina bloka (m)	Debljina reza (m)	Broj rezova u pojasu	Ukupno potrebna snaga (kW)	Snaga za rezanje (kW)	Snaga za dizanje (kW)	Vreme rada u jednom rezu (min)	Vreme promena reza (min)	Raspoloživa sila za kopanje (N/cm)
1	3,25	24,74	90,00	12,06	24,74	5,17	0,10	36	238,30	232,55	5,75	3,67	0,02	1356,25
2	9,00	24,10	77,81	15,29	23,56	6,35	0,10	90	301,07	293,83	7,24	3,26	0,00	1069,34
3	2,75	25,71	52,09	22,00	20,28	9,63	0,10	36	158,64	154,25	4,39	2,77	0,02	2051,83
Dužina bloka (m)	Visina etaže (m)	Širina bloka (m)	Zapremina bloka (čm ³)	Vreme promene bloka (min)	Vreme otkopavanja bloka (min)	Vreme čistog rada (min)	Vreme neradnih pokreta (min)	Kapacitet u bloku (čm ³ /h)	Kapacitet u usecanju u novi blok (čm ³ /h)					
3,63	15	29,91	1628,80	3,92	533,85	525,64	8,21	183,06	148,74					

Tabela 4.2. Rezultati proračuna pri otkopavanju horizontalnim rezovima debljine 0,15 m i brzinom okretanja strele rotora od 12 m/min

Broj pojasa	Visina pojasa (m)	Radijus kopanja (m)	Ugao okretanja prema masivu (°)	Ugao okretanja prema otkopanom prostoru (°)	Unutrašnja širina bloka (m)	Spoljašnja širina bloka (m)	Debljina reza (m)	Broj rezova u pojasu	Ukupno potrebna snaga (kW)	Snaga za rezanje (kW)	Snaga za dizanje (kW)	Vreme rada u jednom rezu (min)	Vreme promena reza (min)	Raspoloživa sila za kopanje (N/cm)
1	3,25	24,74	90,00	12,06	24,74	5,17	0,15	24,00	266,69	258,06	8,62	3,67	0,02	1213,28
2	9,00	24,10	77,81	15,29	23,56	6,35	0,15	60,00	333,95	323,17	10,78	3,26	0,00	963,51
3	2,75	25,71	52,09	22,00	20,28	9,63	0,15	24,00	188,14	181,55	6,59	2,77	0,02	1733,58
Dužina bloka (m)	Visina etaže (m)	Širina bloka (m)	Zapremina bloka (čm ³)	Vreme promene bloka (min)	Vreme otkopavanja bloka (min)	Vreme čistog rada (min)	Vreme neradnih pokreta (min)	Kapacitet u bloku (čm ³ /h)	Kapacitet u usecanju u novi blok (čm ³ /h)					
3,63	15	29,91	1628,80	3,92	358,63	350,43	8,21	272,5	221,41					

Tabela 4.3. Rezultati proračuna pri otkopavanju horizontalnim rezovima debljine 0,20 m i brzinom okretanja strele rotora od 12 m/min

Broj pojasa	Visina pojasa (m)	Radijus kopanja (m)	Ugao okretanja prema masivu (°)	Ugao okretanja prema otkopanom prostoru (°)	Unutrašnja širina bloka (m)	Spoljašnja širina bloka (m)	Debljina reza (m)	Broj rezova u pojasu	Ukupno potrebna snaga (kW)	Snaga za rezanje (kW)	Snaga za dizanje (kW)	Vreme rada u jednom rezu (min)	Vreme promena reza (min)	Raspoloživa sila za kopanje (N/cm)
1	3,25	24,74	90,00	12,06	24,74	5,17	0,20	18	295,07	283,57	11,50	3,67	0,03	1096,02
2	9,00	24,10	77,81	15,29	23,56	6,35	0,20	45	366,27	352,01	14,26	3,26	0,00	876,66
3	2,75	25,71	52,09	22,00	20,28	9,63	0,20	18	217,64	208,85	8,79	2,77	0,03	1498,54
Dužina bloka (m)	Visina etaže (m)	Širina bloka (m)	Zapremina bloka (čm ³)	Vreme promene bloka (min)	Vreme otkopavanja bloka (min)	Vreme čistog rada (min)	Vreme neradnih pokreta (min)	Kapacitet u bloku (čm ³ /h)	Kapacitet u usecanju u novi blok (čm ³ /h)					
3,63	15	29,91	1628,80	3,92	271,02	262,82	8,20	360,59	292,98					

Tabela 4.4. Rezultati proračuna pri otkopavanju horizontalnim rezovima debljine 0,10 m i brzinom okretanja strele rotora od 18 m/min

Broj pojasa	Visina pojasa (m)	Radijus kovanja (m)	Ugao okretanja prema masivu (°)	Ugao okretanja prema otkopanom prostoru (°)	Unutrašnja širina bloka (m)	Spoljašnja širina bloka (m)	Debljina reza (m)	Broj rezova u pojasu	Ukupno potrebna snaga (kW)	Snaga za rezanje (kW)	Snaga za dizanje (kW)	Vreme rada u jednom rezu (min)	Vreme promena reza (min)	Raspoloživa sila za kovanje (N/cm)
1	3,25	24,74	90,00	12,06	24,74	5,17	0,10	36	241,18	232,55	8,62	2,45	0,02	1346,36
2	9,00	24,10	77,81	15,29	23,56	6,35	0,10	90	30,70	293,83	10,87	2,18	0,00	1059,48
3	2,75	25,71	52,09	22,00	20,28	9,63	0,10	36	160,83	154,25	6,59	1,85	0,02	2040,44
Dužina bloka (m)	Visina etaže (m)	Širina bloka (m)	Zapremina bloka (čm ³)	Vreme promene bloka (min)	Vreme otkopavanja bloka (min)	Vreme čistog rada (min)	Vreme neradnih pokreta (min)	Kapacitet u bloku (čm ³ /h)	Kapacitet u usecanju u novi blok (čm ³ /h)					
3,63	15	29,91	1628,80	3,92	358,64	350,43	8,21	272,49	221,40					

Tabela 4.5. Rezultati proračuna pri otkopavanju horizontalnim rezovima debljine 0,15 m i brzinom okretanja strele rotora od 18 m/min

Broj pojasa	Visina pojasa (m)	Radijus kovanja (m)	Ugao okretanja prema masivu (°)	Ugao okretanja prema otkopanom prostoru (°)	Unutrašnja širina bloka (m)	Spoljašnja širina bloka (m)	Debljina reza (m)	Broj rezova u pojasu	Ukupno potrebna snaga (kW)	Snaga za rezanje (kW)	Snaga za dizanje (kW)	Vreme rada u jednom rezu (min)	Vreme promena reza (min)	Raspoloživa sila za kovanje (N/cm)
1	3,25	24,74	90,00	12,06	24,74	5,17	0,15	24	271,00	258,06	12,94	2,45	0,02	1199,91
2	9,00	24,10	77,81	15,29	23,56	6,35	0,15	60	339,34	323,17	16,17	2,18	0,00	950,16
3	2,75	25,71	52,09	22,00	20,28	9,63	0,15	24	191,43	181,55	9,88	1,85	0,02	1719,07
Dužina bloka (m)	Visina etaže (m)	Širina bloka (m)	Zapremina bloka (čm ³)	Vreme promene bloka (min)	Vreme otkopavanja bloka (min)	Vreme čistog rada (min)	Vreme neradnih pokreta (min)	Kapacitet u bloku (čm ³ /h)	Kapacitet u usecanju u novi blok (čm ³ /h)					
3,63	15	29,91	1628,80	3,92	241,82	233,62	8,21	404,13	328,35					

Tabela 4.6. Rezultati proračuna pri otkopavanju horizontalnim rezovima debljine 0,20 m i brzinom okretanja strele rotora od 18 m/min

Broj pojasa	Visina pojasa (m)	Radijus kovanja (m)	Ugao okretanja prema masivu (°)	Ugao okretanja prema otkopanom prostoru (°)	Unutrašnja širina bloka (m)	Spoljašnja širina bloka (m)	Debljina reza (m)	Broj rezova u pojasu	Ukupno potrebna snaga (kW)	Snaga za rezanje (kW)	Snaga za dizanje (kW)	Vreme rada u jednom rezu (min)	Vreme promena reza (min)	Raspoloživa sila za kovanje (N/cm)
1	3,25	24,74	90,00	12,06	24,74	5,17	0,20	18	300,82	283,57	17,25	20,45	0,03	1079,80
2	9,00	24,10	77,81	15,29	23,56	6,35	0,20	45	373,40	352,01	21,40	2,18	0,00	860,44
3	2,75	25,71	52,09	22,00	20,28	9,63	0,20	18	222,03	208,85	13,18	1,85	0,03	1481,72
Dužina bloka (m)	Visina etaže (m)	Širina bloka (m)	Zapremina bloka (čm ³)	Vreme promene bloka (min)	Vreme otkopavanja bloka (min)	Vreme čistog rada (min)	Vreme neradnih pokreta (min)	Kapacitet u bloku (čm ³ /h)	Kapacitet u usecanju u novi blok (čm ³ /h)					
3,63	15	29,91	1628,80	3,92	183,41	175,21	8,20	532,83	432,93					

Tabela 4.7. Rezultati proračuna pri otkopavanju horizontalnim rezovima debljine 0,10 m i brzinom okretanja strele rotora od 24 m/min

Broj pojasa	Visina pojasa (m)	Radijus kopanja (m)	Ugao okretanja prema masivu (°)	Ugao okretanja prema otkopanom prostoru (°)	Unutrašnja širina bloka (m)	Spoljašnja širina bloka (m)	Debljina reza (m)	Broj rezova u pojasu	Ukupno potrebna snaga (kW)	Snaga za rezanje (kW)	Snaga za dizanje (kW)	Vreme rada u jednom rezu (min)	Vreme promena reza (min)	Raspoloživa sila za kopanje (N/cm)
1	3,25	24,74	90,00	12,06	24,74	5,17	0,10	36	244,05	232,55	11,50	1,84	0,02	1336,47
2	9,00	24,10	77,81	15,29	23,56	6,35	0,10	90	308,32	293,83	14,49	1,63	0,00	1049,62
3	2,75	25,71	52,09	22,00	20,28	9,63	0,10	36	163,03	154,25	8,79	1,39	0,02	2029,05
Dužina bloka (m)	Visina etaže (m)	Širina bloka (m)	Zapremina bloka (čm ³)	Vreme promene bloka (min)	Vreme otkopavanja bloka (min)	Vreme čistog rada (min)	Vreme neradnih pokreta (min)	Kapacitet u bloku (čm ³ /h)	Kapacitet u usecanju u novi blok (čm ³ /h)					
3,63	15	29,91	1628,80	3,92	271,03	262,82	8,21	360,57	292,97					

Tabela 4.8. Rezultati proračuna pri otkopavanju horizontalnim rezovima debljine 0,15 m i brzinom okretanja strele rotora od 24 m/min

Broj pojasa	Visina pojasa (m)	Radijus kopanja (m)	Ugao okretanja prema masivu (°)	Ugao okretanja prema otkopanom prostoru (°)	Unutrašnja širina bloka (m)	Spoljašnja širina bloka (m)	Debljina reza (m)	Broj rezova u pojasu	Ukupno potrebna snaga (kW)	Snaga za rezanje (kW)	Snaga za dizanje (kW)	Vreme rada u jednom rezu (min)	Vreme promena reza (min)	Raspoloživa sila za kopanje (N/cm)
1	3,25	24,74	90,00	12,06	24,74	5,17	0,15	24	275,31	258,06	17,25	1,84	0,02	1186,54
2	9,00	24,10	77,81	15,29	23,56	6,35	0,15	60	344,73	323,17	21,56	1,63	0,00	936,82
3	2,75	25,71	52,09	22,00	20,28	9,63	0,15	24	194,73	181,55	13,18	1,39	0,02	1704,55
Dužina bloka (m)	Visina etaže (m)	Širina bloka (m)	Zapremina bloka (čm ³)	Vreme promene bloka (min)	Vreme otkopavanja bloka (min)	Vreme čistog rada (min)	Vreme neradnih pokreta (min)	Kapacitet u bloku (čm ³ /h)	Kapacitet u usecanju u novi blok (čm ³ /h)					
3,63	15	29,91	1628,80	3,92	183,42	175,21	8,21	532,81	432,91					

Tabela 4.9. Rezultati proračuna pri otkopavanju horizontalnim rezovima debljine 0,20 m i brzinom okretanja strele rotora od 24 m/min

Broj pojasa	Visina pojasa (m)	Radijus kopanja (m)	Ugao okretanja prema masivu (°)	Ugao okretanja prema otkopanom prostoru (°)	Unutrašnja širina bloka (m)	Spoljašnja širina bloka (m)	Debljina reza (m)	Broj rezova u pojasu	Ukupno potrebna snaga (kW)	Snaga za rezanje (kW)	Snaga za dizanje (kW)	Vreme rada u jednom rezu (min)	Vreme promena reza (min)	Raspoloživa sila za kopanje (N/cm)
1	3,25	24,74	90,00	12,06	24,74	5,17	0,20	18	306,57	283,57	23,00	1,84	0,03	1063,58
2	9,00	24,10	77,81	15,29	23,56	6,35	0,20	45	380,53	352,01	28,53	1,63	0,00	844,24
3	2,75	25,71	52,09	22,00	20,28	9,63	0,20	18	226,42	208,85	17,57	1,39	0,03	1464,89
Dužina bloka (m)	Visina etaže (m)	Širina bloka (m)	Zapremina bloka (čm ³)	Vreme promene bloka (min)	Vreme otkopavanja bloka (min)	Vreme čistog rada (min)	Vreme neradnih pokreta (min)	Kapacitet u bloku (čm ³ /h)	Kapacitet u usecanju u novi blok (čm ³ /h)					
3,63	15	29,91	1628,80	3,92	139,61	131,41	8,20	700,01	568,76					

Tabela 4.10. Rezultati proračuna pri otkopavanju vertikalnim rezovima debljine 0,10 m i brzinom okretanja strele rotora od 12 m/min

Broj pojasa	Visina pojasa (m)	Radijus kopanja (m)	Ugao okretanja prema masivu (°)	Ugao okretanja prema otkopanom prostoru (°)	Unutrašnja širina bloka (m)	Spoljašnja širina bloka (m)	Debljina reza (m)	Broj rezova u pojasu	Ukupno potrebna snaga (kW)	Snaga za rezanje (kW)	Snaga za dizanje (kW)	Vreme rada u jednom rezu (min)	Vreme promena reza (min)	Raspoloživa sila za kopanje (N/cm)
1	3,25	24,74	90,00	11,47	24,74	4,92	0,10	36	238,30	232,55	5,75	3,65	0,02	1356,25
2	3,25	25,51	67,44	13,84	23,56	6,10	0,10	36	238,30	232,55	5,75	3,02	0,00	1356,25
3	3,25	25,76	60,30	16,42	22,37	7,28	0,10	36	238,30	232,55	5,75	2,87	0,02	1356,25
4	3,25	25,51	56,17	19,38	21,19	8,47	0,10	36	238,30	232,55	5,75	2,80	0,02	1356,25
5	2,00	25,76	50,97	22,00	20,01	9,65	0,10	36	79,68	76,97	2,71	2,73	0,02	2129,44
Dužina bloka	Visina etaže	Širina bloka	Zapremina bloka	Vreme promene bloka	Vreme otkopavanja bloka	Vreme čistog rada	Vreme neradnih pokreta	Kapacitet u bloku	Kapacitet u usecanju u novi blok					
(m)	(m)	(m)	(čm ³)	(min)	(min)	(min)	(min)	(čm ³ /h)	(čm ³ /h)					
3,63	15	29,66	1615,00	3,92	555,23	542,82	12,41	174,52	141,80					

Tabela 4.11. Rezultati proračuna pri otkopavanju vertikalnim rezovima debljine 0,15 m i brzinom okretanja strele rotora od 12 m/min

Broj pojasa	Visina pojasa (m)	Radijus kopanja (m)	Ugao okretanja prema masivu (°)	Ugao okretanja prema otkopanom prostoru (°)	Unutrašnja širina bloka (m)	Spoljašnja širina bloka (m)	Debljina reza (m)	Broj rezova u pojasu	Ukupno potrebna snaga (kW)	Snaga za rezanje (kW)	Snaga za dizanje (kW)	Vreme rada u jednom rezu (min)	Vreme promena reza (min)	Raspoloživa sila za kopanje (N/cm)
1	3,25	24,74	90,00	11,47	24,74	4,92	0,15	24	266,69	258,06	8,62	3,65	0,02	1213,28
2	3,25	25,51	67,44	13,84	23,56	6,10	0,15	24	266,69	258,06	8,62	3,02	0,00	1213,28
3	3,25	25,76	60,30	16,42	22,37	7,28	0,15	24	266,69	258,06	8,62	2,87	0,02	1213,28
4	3,25	25,51	56,17	19,38	21,19	8,47	0,15	24	266,69	258,06	8,62	2,80	0,02	1213,28
5	2,00	25,76	50,97	22,00	20,01	9,65	0,15	24	103,99	99,92	4,07	2,73	0,02	1969,96
Dužina bloka	Visina etaže	Širina bloka	Zapremina bloka	Vreme promene bloka	Vreme otkopavanja bloka	Vreme čistog rada	Vreme neradnih pokreta	Kapacitet u bloku	Kapacitet u usecanju u novi blok					
(m)	(m)	(m)	(čm ³)	(min)	(min)	(min)	(min)	(čm ³ /h)	(čm ³ /h)					
3,63	15	29,66	1615,00	3,92	374,27	361,88	12,39	258,91	210,36					

Tabela 4.12. Rezultati proračuna pri otkopavanju vertikalnim rezovima debljine 0,20 m i brzinom okretanja strele rotora od 12 m/min

Broj pojasa	Visina pojasa (m)	Radijus kopanja (m)	Ugao okretanja prema masivu (°)	Ugao okretanja prema otkopanom prostoru (°)	Unutrašnja širina bloka (m)	Spoljašnja širina bloka (m)	Debljina reza (m)	Broj rezova u pojasu	Ukupno potrebna snaga (kW)	Snaga za rezanje (kW)	Snaga za dizanje (kW)	Vreme rada u jednom rezu (min)	Vreme promena reza (min)	Raspoloživa sila za kopanje (N/cm)
1	3,25	24,74	90,00	11,47	24,74	4,92	0,20	18	295,07	283,57	11,50	3,65	0,03	1096,02
2	3,25	25,51	67,44	13,84	23,56	6,10	0,20	18	295,07	283,57	11,50	3,02	0,00	1096,02
3	3,25	25,76	60,30	16,42	22,37	7,28	0,20	18	295,07	283,57	11,50	2,87	0,03	1096,02
4	3,25	25,51	56,17	19,38	21,19	8,47	0,20	18	295,07	283,57	11,50	2,80	0,03	1096,02
5	2,00	25,76	50,97	22,00	20,01	9,65	0,20	18	128,30	122,87	5,43	2,73	0,03	1768,96
Dužina bloka	Visina etaže	Širina bloka	Zapremina bloka	Vreme promene bloka	Vreme otkopavanja bloka	Vreme čistog rada	Vreme neradnih pokreta	Kapacitet u bloku	Kapacitet u usecanju u novi blok					
(m)	(m)	(m)	(čm ³)	(min)	(min)	(min)	(min)	(čm ³ /h)	(čm ³ /h)					
3,63	15	29,66	1615,00	3,92	283,77	271,41	12,36	341,47	277,44					

Tabela 4.13. Rezultati proračuna pri otkopavanju vertikalnim rezovima debljine 0,10 m i brzinom okretanja strele rotora od 18 m/min

Broj pojasa	Visina pojasa (m)	Radijus kopanja (m)	Ugao okretanja prema masivu (°)	Ugao okretanja prema otkopanom prostoru (°)	Unutrašnja širina bloka (m)	Spoljašnja širina bloka (m)	Debljina reza (m)	Broj rezova u pojasu	Ukupno potrebna snaga (kW)	Snaga za rezanje (kW)	Snaga za dizanje (kW)	Vreme rada u jednom rezu (min)	Vreme promena reza (min)	Raspoloživa sila za kopanje (N/cm)
1	3,25	24,74	90,00	11,47	24,74	4,92	0,10	36	241,18	232,55	8,62	2,43	0,02	1346,37
2	3,25	25,51	67,44	13,84	23,56	6,10	0,10	36	241,18	232,55	8,62	2,01	0,00	1346,37
3	3,25	25,76	60,30	16,42	22,37	7,28	0,10	36	241,18	232,55	8,62	1,92	0,02	1346,37
4	3,25	25,51	56,17	19,38	21,19	8,47	0,10	36	241,18	232,55	8,62	1,87	0,02	1346,37
5	2,00	25,76	50,97	22,00	20,01	9,65	0,10	36	81,04	76,97	4,07	1,82	0,02	2415,34
Dužina bloka	Visina etaže	Širina bloka	Zapremina bloka	Vreme promene bloka	Vreme otkopavanja bloka	Vreme čistog rada	Vreme neradnih pokreta	Kapacitet u bloku	Kapacitet u usecanju u novi blok					
(m)	(m)	(m)	(čm ³)	(min)	(min)	(min)	(min)	(čm ³ /h)	(čm ³ /h)					
3,63	15	29,66	1615,00	3,92	374,29	361,88	12,41	258,89	210,35					

Tabela 4.14. Rezultati proračuna pri otkopavanju vertikalnim rezovima debljine 0,15 m i brzinom okretanja strele rotora od 18 m/min

Broj pojasa	Visina pojasa (m)	Radijus kopanja (m)	Ugao okretanja prema masivu (°)	Ugao okretanja prema otkopanom prostoru (°)	Unutrašnja širina bloka (m)	Spoljašnja širina bloka (m)	Debljina reza (m)	Broj rezova u pojasu	Ukupno potrebna snaga (kW)	Snaga za rezanje (kW)	Snaga za dizanje (kW)	Vreme rada u jednom rezu (min)	Vreme promena reza (min)	Raspoloživa sila za kopanje (N/cm)
1	3,25	24,74	90,00	11,47	24,74	4,92	0,15	24	271	258,06	12,94	2,43	0,02	1199,91
2	3,25	25,51	67,44	13,84	23,56	6,10	0,15	24	271	258,06	12,94	2,01	0,00	1199,91
3	3,25	25,76	60,30	16,42	22,37	7,28	0,15	24	271	258,06	12,94	1,92	0,02	1199,91
4	3,25	25,51	56,17	19,38	21,19	8,47	0,15	24	271	258,06	12,94	1,87	0,02	1199,91
5	2,00	25,76	50,97	22,00	20,01	9,65	0,15	24	106,02	99,92	6,10	1,82	0,02	2153,67
Dužina bloka	Visina etaže	Širina bloka	Zapremina bloka	Vreme promene bloka	Vreme otkopavanja bloka	Vreme čistog rada	Vreme neradnih pokreta	Kapacitet u bloku	Kapacitet u usecanju u novi blok					
(m)	(m)	(m)	(čm ³)	(min)	(min)	(min)	(min)	(čm ³ /h)	(čm ³ /h)					
3,63	15	29,66	1615,00	3,92	253,64	241,25	12,39	382,04	310,40					

Tabela 4.15. Rezultati proračuna pri otkopavanju vertikalnim rezovima debljine 0,20 m i brzinom okretanja strele rotora od 18 m/min

Broj pojasa	Visina pojasa (m)	Radijus kopanja (m)	Ugao okretanja prema masivu (°)	Ugao okretanja prema otkopanom prostoru (°)	Unutrašnja širina bloka (m)	Spoljašnja širina bloka (m)	Debljina reza (m)	Broj rezova u pojasu	Ukupno potrebna snaga (kW)	Snaga za rezanje (kW)	Snaga za dizanje (kW)	Vreme rada u jednom rezu (min)	Vreme promena reza (min)	Raspoloživa sila za kopanje (N/cm)
1	3,25	24,74	90,00	11,47	24,74	4,92	0,20	18	300,82	283,57	17,25	2,43	0,03	1079,81
2	3,25	25,51	67,44	13,84	23,56	6,10	0,20	18	300,82	283,57	17,25	2,01	0,00	1079,81
3	3,25	25,76	60,30	16,42	22,37	7,28	0,20	18	300,82	283,57	17,25	1,92	0,03	1079,81
4	3,25	25,51	56,17	19,38	21,19	8,47	0,20	18	300,82	283,57	17,25	1,87	0,03	1079,81
5	2,00	25,76	50,97	22,00	20,01	9,65	0,20	18	131,01	122,87	8,14	1,82	0,03	1951,30
Dužina bloka	Visina etaže	Širina bloka	Zapremina bloka	Vreme promene bloka	Vreme otkopavanja bloka	Vreme čistog rada	Vreme neradnih pokreta	Kapacitet u bloku	Kapacitet u usecanju u novi blok					
(m)	(m)	(m)	(čm ³)	(min)	(min)	(min)	(min)	(čm ³ /h)	(čm ³ /h)					
3,63	15	29,66	1615,00	3,92	193,30	180,94	12,36	501,28	407,29					

Tabela 4.16. Rezultati proračuna pri otkopavanju vertikalnim rezovima debljine 0,10 m i brzinom okretanja strele rotora od 24 m/min

Broj pojasa	Visina pojasa (m)	Radijus kopanja (m)	Ugao okretanja prema masivu (°)	Ugao okretanja prema otkopanom prostoru (°)	Unutrašnja širina bloka (m)	Spoljašnja širina bloka (m)	Debljina reza (m)	Broj rezova u pojasu	Ukupno potrebna snaga (kW)	Snaga za rezanje (kW)	Snaga za dizanje (kW)	Vreme rada u jednom rezu (min)	Vreme promena reza (min)	Raspoloživa sila za kopanje (N/cm)
1	3,25	24,74	90,00	11,47	24,74	4,92	0,10	36	244,05	232,55	11,50	1,83	0,02	1336,47
2	3,25	25,51	67,44	13,84	23,56	6,10	0,10	36	244,05	232,55	11,50	1,51	0,00	1336,47
3	3,25	25,76	60,30	16,42	22,37	7,28	0,10	36	244,05	232,55	11,50	1,44	0,02	1336,47
4	3,25	25,51	56,17	19,38	21,19	8,47	0,10	36	244,05	232,55	11,50	1,40	0,02	1336,47
5	2,00	25,76	50,97	22,00	20,01	9,65	0,10	36	82,39	76,97	5,43	1,37	0,02	2752,32
Dužina bloka (m)	Visina etaže (m)	Širina bloka (m)	Zapremina bloka (čm ³)	Vreme promene bloka (min)	Vreme otkopavanja bloka (min)	Vreme čistog rada (min)	Vreme neradnih pokreta (min)	Kapacitet u bloku (čm ³ /h)	Kapacitet u usecanju u novi blok (čm ³ /h)					
3,63	15	29,66	1615,00	3,92	283,82	271,41	12,41	341,41	277,40					

Tabela 4.17. Rezultati proračuna pri otkopavanju vertikalnim rezovima debljine 0,15 m i brzinom okretanja strele rotora od 24 m/min

Broj pojasa	Visina pojasa (m)	Radijus kopanja (m)	Ugao okretanja prema masivu (°)	Ugao okretanja prema otkopanom prostoru (°)	Unutrašnja širina bloka (m)	Spoljašnja širina bloka (m)	Debljina reza (m)	Broj rezova u pojasu	Ukupno potrebna snaga (kW)	Snaga za rezanje (kW)	Snaga za dizanje (kW)	Vreme rada u jednom rezu (min)	Vreme promena reza (min)	Raspoloživa sila za kopanje (N/cm)
1	3,25	24,74	90,00	11,47	24,74	4,92	0,15	24	275,31	258,06	17,25	1,83	0,02	1186,54
2	3,25	25,51	67,44	13,84	23,56	6,10	0,15	24	275,31	258,06	17,25	1,51	0,00	1186,54
3	3,25	25,76	60,30	16,42	22,37	7,28	0,15	24	275,31	258,06	17,25	1,44	0,02	1186,54
4	3,25	25,51	56,17	19,38	21,19	8,47	0,15	24	275,31	258,06	17,25	1,40	0,02	1186,54
5	2,00	25,76	50,97	22,00	20,01	9,65	0,15	24	108,06	99,92	8,14	1,37	0,02	2337,38
Dužina bloka (m)	Visina etaže (m)	Širina bloka (m)	Zapremina bloka (čm ³)	Vreme promene bloka (min)	Vreme otkopavanja bloka (min)	Vreme čistog rada (min)	Vreme neradnih pokreta (min)	Kapacitet u bloku (čm ³ /h)	Kapacitet u usecanju u novi blok (čm ³ /h)					
3,63	15	29,66	1615,00	3,92	193,33	180,94	12,39	501,22	407,24					

Tabela 4.18. Rezultati proračuna pri otkopavanju vertikalnim rezovima debljine 0,20 m i brzinom okretanja strele rotora od 24 m/min

Broj pojasa	Visina pojasa (m)	Radius kopanja (m)	Ugao okretanja prema masivu (°)	Ugao okretanja prema otkopanom prostoru (°)	Unutrašnja širina bloka (m)	Spoljašnja širina bloka (m)	Debljina reza (m)	Broj rezova u pojasu	Ukupno potrebna snaga (kW)	Snaga za rezanje (kW)	Snaga za dizanje (kW)	Vreme rada u jednom rezu (min)	Vreme promena reza (min)	Raspoloživa sila za kopanje (N/cm)
1	3,25	24,74	90,00	11,47	24,74	4,92	0,20	18	306,57	283,57	23,00	1,83	0,03	1063,58
2	3,25	25,51	67,44	13,84	23,56	6,10	0,20	18	306,57	283,57	23,00	1,51	0,00	1063,58
3	3,25	25,76	60,30	16,42	22,37	7,28	0,20	18	306,57	283,57	23,00	1,44	0,03	1063,58
4	3,25	25,51	56,17	19,38	21,19	8,47	0,20	18	306,57	283,57	23,00	1,40	0,03	1063,58
5	2,00	25,76	50,97	22,00	20,01	9,65	0,20	18	133,73	122,87	10,85	1,37	0,03	2133,63
Dužina bloka (m)	Visina etaže (m)	Širina bloka (m)	Zapremina bloka (čm ³)	Vreme promene bloka (min)	Vreme otkopavanja bloka (min)	Vreme čistog rada (min)	Vreme neradnih pokreta (min)	Kapacitet u bloku (čm ³ /h)	Kapacitet u usecanju u novi blok (čm ³ /h)					
3,63	15	29,66	1615,00	3,92	148,07	135,70	12,36	654,43	531,72					

Pregledni i uporedni rezultati proračuna prikazani su u Tabelama 4.19. - 4.21. i na Slikama 4.4. – 4.6.

Tabela 4.19. Rezultati proračunatih vrednosti pri radu sa horizontalnim rezovima

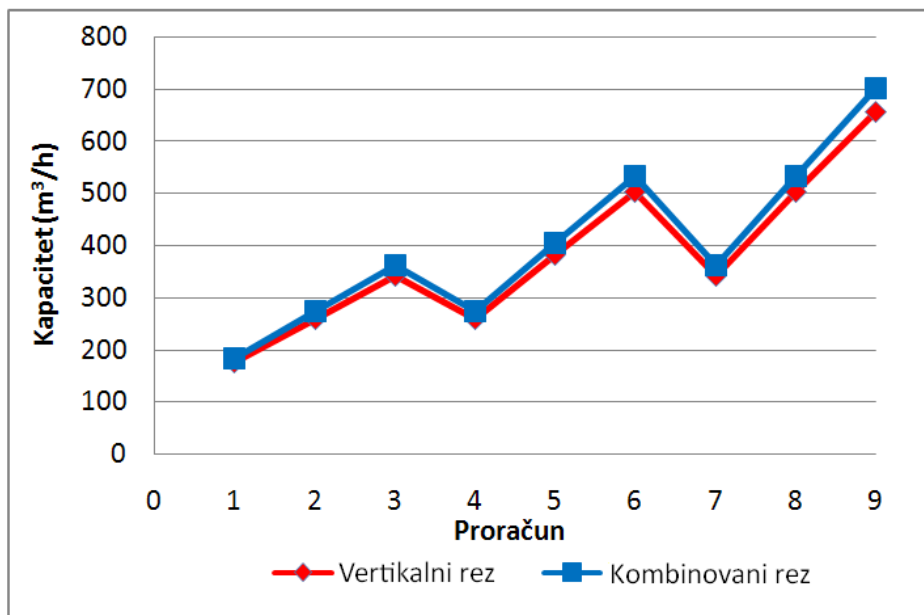
Broj poračuna	Brzina okretanja strele rotora (m/min)	Debljina reza (m)	Raspoloživa sila kopanja (N/cm)	Kapacitet (čm ³ /h)
1	12	0,10	1069	183,06
2	12	0,15	964	272,50
3	12	0,20	877	360,59
4	18	0,10	1059	272,49
5	18	0,15	950	404,13
6	18	0,20	860	532,83
7	24	0,10	1050	360,57
8	24	0,15	937	532,81
9	24	0,20	844	700,01

Tabela 4.20. Rezultati proračunatih vrednosti pri radu sa vertikalnim rezovima

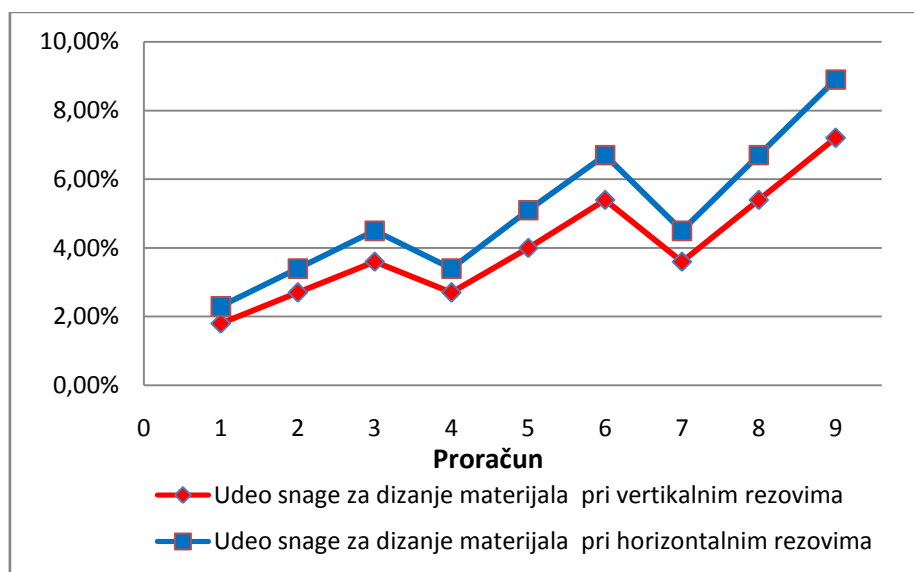
Broj poračuna	Brzina okretanja strele rotora (m/min)	Debljina reza (m)	Raspoloživa sila kopanja (N/cm)	Kapacitet u bloku (čm ³ /h)
1	12	0,10	1356	174,52
2	12	0,15	1213	258,91
3	12	0,20	1096	341,47
4	18	0,10	1346	258,89
5	18	0,15	1200	382,04
6	18	0,20	1080	501,28
7	24	0,10	1336	341,41
8	24	0,15	1187	501,22
9	24	0,20	1064	654,43

Tabela 4.21. Uporedni rezultati proračunatih vrednosti

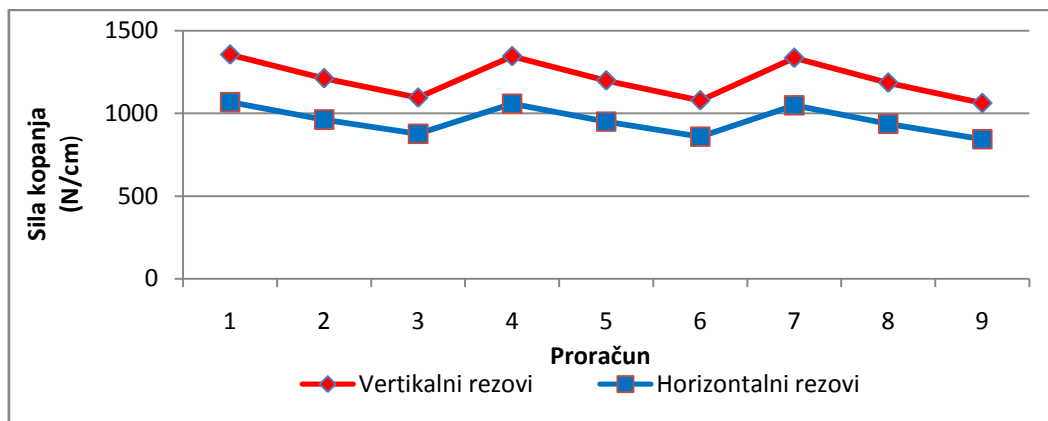
Broj poračuna	Raspoloživa sila kopanja – horizontalni rezovi (N/cm)	Raspoloživa sila kopanja – vertikalni rezovi (N/cm)	Udeo snage za dizanje materijala pri horizontalnim rezovima (%)	Udeo snage za dizanje materijala pri vertikalnim rezovima (%)
1	1069	1356	2,3	1,8
2	964	1213	3,4	2,7
3	877	1096	4,5	3,6
4	1059	1346	3,4	2,7
5	950	1200	5,1	4,0
6	860	1080	6,7	5,4
7	1050	1336	4,5	3,6
8	937	1187	6,7	5,4
9	844	1064	8,9	7,2



Slika 4.4. Kapacitet rotornog bagera u bloku pri radu sa kombinovanim(horizontalnim i vertikalnim) i vertikalnim rezovima



Slika 4.5. Uporedni dijagram potrebne snage za dizanje materijala pri radu sa horizontalnim i vertikalnim rezovima



Slika 4.6. Uporedni dijagram raspoložive sile kovanja pri radu sa horizontalnim i vertikalnim rezovima

Iz prikazanih rezultata simulacije rada i formula za proračun kapaciteta (poglavlje 3. - Teoretske osnove rada rotornog bagera), dobijaju se kapaciteti rada rotornog bagera u horizontalnom i vertikalnom rezu u automatskom režimu rada bagera (i bez pomoćnih operacija), odnosno u uslovima rada bagera kakvi su planirani za eksperimentalna merenja:

Rez	Debljina reza (m)	Brzina strele rotora (m/min)	Kapacitet (čm ³ /h)
Hor.	0,10	12,00	233,30
Ver.	0,10	12,00	234,16
Hor.	0,15	12,00	349,95
Ver.	0,15	12,00	351,24
Hor.	0,20	12,00	466,60
Ver.	0,20	12,00	468,32
Hor.	0,10	18,00	347,17
Ver.	0,10	18,00	352,66
Hor.	0,15	18,00	520,75
Ver.	0,15	18,00	529,00
Hor.	0,20	18,00	694,34
Ver.	0,20	18,00	705,33
Hor.	0,10	24,00	466,60
Ver.	0,10	24,00	470,22
Hor.	0,15	24,00	699,89
Ver.	0,15	24,00	705,33
Hor.	0,20	24,00	933,19
Ver.	0,20	24,00	940,44

5. MODELIRANJE STRUKTURE RADNOG ORGANA I STATIČKI I DINAMIČKI PRORAČUN

Uticaj različitih vrsta reza (horizontalni/vertikalni), kao i različitih parametara odreska kod otkopavanja materijala sa povećanom čvrstoćom na dinamičko ponašanje bagera kao i na naponsko stanje celokupne konstrukcije bagera, ispitan je numeričkim putem, primenom metode konačnih elemenata na primeru rotornog bagera ER-1250 16/1,5 [11], [14], [25], [26], [32], [37], [50], [54].

5.1. Metoda konačnih elemenata, osnovne postavke

Nezaobilazan korak u ispitivanju konstrukcija predstavlja numerička analiza, odnosno *metoda konačnih elemenata*. Model, kojim se idealizuje kontinualna (neprekidna) struktura, podelom (diskretizacijom) na male elemente pravilnog geometrijskog oblika koji se nazivaju *konačni elementi*, opisuje ponašanje dela strukture preko zajedničke tačke susednih elemenata (čvorna tačka), sa osobinom da je pomeranje svih susednih elemenata u njoj isto.

Modeliranje predstavlja kompleksan proces preslikavanja fizičkog modela u računarski, primenom idealizacije. Fizički model, sa svojom geometrijom i graničnim uslovima (oslonci i opterećenja), pretpostavljena vrsta i raspored pomeranja, deformacije i napona po modelu, čine polaznu osnovu procesa modeliranja. Modeliranje se ostvaruje kroz izbor tipa, broja, veličine konačnih elemenata za diskretizaciju, stepene slobode čvorova i granične uslove, kao i uvođenje idealizacija i uprošćenja.

Razlikuju se statički i dinamički proračuni nosećih struktura.

Modeliranje je izvršeno konačnim elementima grede i ploče.

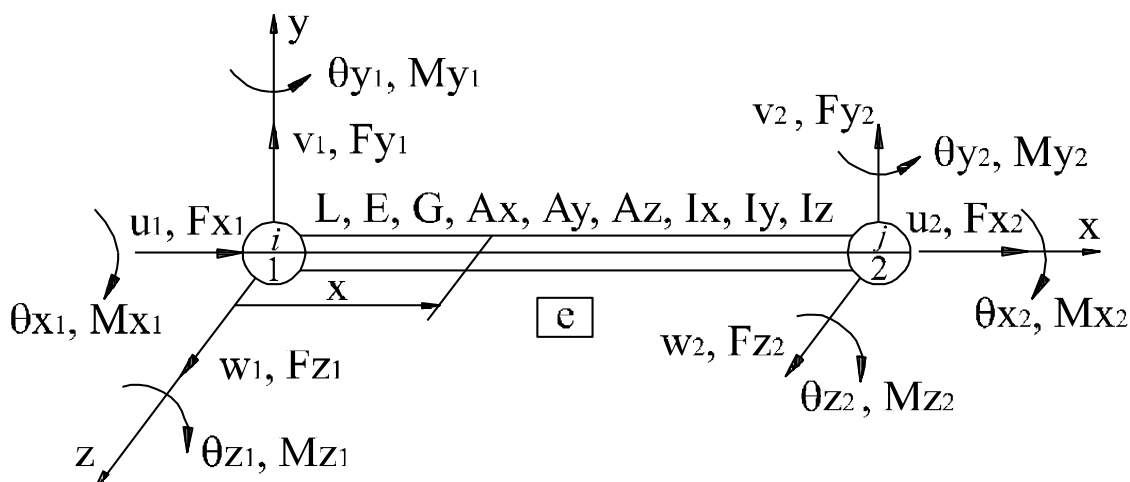
5.1.1. Konačni element grede - ukupno naprezanje, matrica krutosti, opterećenja i masa

Konačni element grede definisan je lokalnim koordinatnim sistemom (xyz), geometrijskim karakteristikama poprečnog preseka za glavne ose (A_x , A_y , A_z , I_x , I_y i I_z), dužinom (L) i materijalom (E i ν (G)). Podužna osa x definisana je sa početkom u prvoj i smerom ka drugoj tački, dok se poprečne glavne ose y i z zbog moguće proizvoljne

rotacije oko x ose definišu dopunskim uglom ili tačkom. Naprezanje i krutost grede se sastoji iz sledećih potpuno nezavisnih naprezanja:

- podužno (aksijalno) naprezanje štapa,
- uvijanje (torzija) štapa,
- savijanje grede u x-y ravni i
- savijanje grede u y-z ravni.

Podužno naprezanje i uvijanje zahtevaju po jedan stepen slobode (x translacija i rotacija), dok oba savijanja zahtevaju po dva stepena slobode (translacija y/z i rotacija z/y) krajnjih čvorova elementa. Tako se dobija svih šest stepena slobode čvorne tačke, odnosno 12 stepeni slobode elementa koji ima dve čvorne tačke. Tačke unutar elementa imaju samo pomeranja, a nemaju rotacije. Oznake i pozitivni smerovi veličina grede prikazane su na Slici 5.1.



Slika 5.1. Oznake i pozitivni smerovi veličina grede

Matrica krutosti elementa grede u prostoru reda 12*12 glasi:

$$[k]_e = \begin{bmatrix} [k_{11}] & [k_{12}] \\ [k_{21}] & [k_{22}] \end{bmatrix}, [k_{12}] = [k_{21}]^T \quad (5.1)$$

Članovi i podmatrice krutosti sa stepenima slobode glase:

$$\begin{aligned}
a &= EA/L, t = GI_x/L, \\
b_y &= 12EI_z/L^3(1+\phi), c_y = 6EI_z/L^2(1+\phi), \\
d_y &= (4+\phi)EI_z/L(1+\phi), e_y = (2-\phi)EI_z/L(1+\phi), \\
b_z &= 12EI_y/L^3(1+\phi), c_z = 6EI_y/L^2(1+\phi), \\
d_z &= (4+\phi)EI_y/L(1+\phi), e_z = (2-\phi)EI_y/L(1+\phi)
\end{aligned} \tag{5.2}$$

$$\begin{aligned}
[k_{11}] &= & [k_{12}] &= [k_{21}]^T = & [k_{22}] &= \\
\begin{matrix} u_1 & v_1 & w_1 & \theta_{x1} & \theta_{y1} & \theta_{z1} \\ \left[\begin{array}{cccccc} a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_y & 0 & 0 & 0 & c_y \\ 0 & 0 & b_z & 0 & -c_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c_z & 0 & e_z & 0 \\ 0 & c_y & 0 & 0 & 0 & e_y \end{array} \right] \end{matrix} & \begin{matrix} u_2 & v_2 & w_2 & \theta_{x2} & \theta_{y2} & \theta_{z2} \\ \left[\begin{array}{cccccc} -a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -b_y & 0 & 0 & 0 & c_y \\ 0 & 0 & -b_z & 0 & -c_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_z & 0 & e_z & 0 \\ 0 & -c_y & 0 & 0 & 0 & e_y \end{array} \right] \end{matrix} & \begin{matrix} u_2 & v_2 & w_2 & \theta_{x2} & \theta_{y2} & \theta_{z2} \\ \left[\begin{array}{cccccc} a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_y & 0 & 0 & 0 & -c_y \\ 0 & 0 & b_z & 0 & c_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_z & 0 & d_z & 0 \\ 0 & -c_y & 0 & 0 & 0 & d_y \end{array} \right] \end{matrix} & \begin{matrix} u_2 \\ v_2 \\ w_2 \\ \theta_{x2} \\ \theta_{y2} \\ \theta_{z2} \end{matrix}
\end{aligned}$$

Opterećenje elementa grede glasi:

$$\{F\}_e = \left\{ F_{x1} F_{y1} F_{z1} M_{x1} M_{y1} M_{z1} F_{x2} F_{y2} F_{z2} M_{x2} M_{y2} M_{z2} \right\}^T \tag{5.3}$$

Matrica masa bez momenata inercije nosivosti glasi:

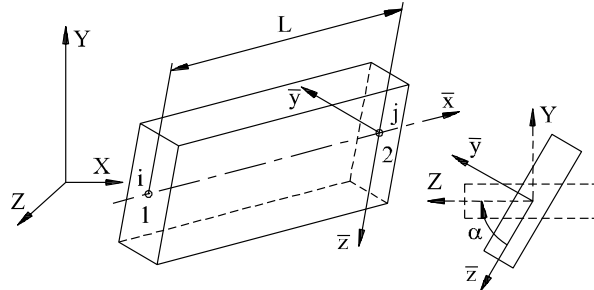
$$[m]_e = \text{dijag} \frac{m}{2} \left\{ \begin{matrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{matrix} \right\}_3 \left\{ \begin{matrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{matrix} \right\}_3^T = \text{dijag} \frac{\rho AL}{2} \left\{ 111000111000 \right\}_{12}^T \tag{5.4}$$

Pošto je matrica krutosti grede u prostoru reda 12*12 onda i matrica transformacije veličina iz lokalnog u globalni sistem mora biti istog reda (12*12). Ona ima kvazidijagonalni oblik sa identičnim podmatricama reda 3*3 za potrebe obe čvorne tačke i tri stepena slobode translacije i rotacije odvojeno. Lokalni sistem grede je već definisan. Podužna osa grede je ujedno i lokalna x osa sa početkom u prvoj čvornoj tački i smerom ka drugoj tački. Problem transformacije predstavlja činjenica da se glavne poprečne ose (y i z) lociraju rotacijom oko lokalne x ose u zavisnosti od vrste poprečnog preseka. Ukupna matrica transformacije glasi:

$$[T]_{12}^2 = \begin{bmatrix} [T] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [T] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [T] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [T] \end{bmatrix}, [T]_B^3 = \begin{bmatrix} l_{ox} & m_{ox} & n_{ox} \\ l_{oy} & m_{oy} & n_{oy} \\ l_{oz} & m_{oz} & n_{oz} \end{bmatrix}, [0]_B^3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{matrix} l_{ox} = (X_j - X_i)/L, m_{ox} = (Y_j - Y_i)/L \\ n_{ox} = (Z_j - Z_i)/L \\ L = [(X_j - X_i)^2 + (Y_j - Y_i)^2 + (Z_j - Z_i)^2]^{1/2} \end{matrix} \tag{5.5}$$

Članovi podmatrice transformacije predstavljaju kosinuse pravaca lokalnih x, y i z osa u odnosu na globalne ose. Transformacija se dobija iz dva koraka (Slika 5.2.). Prvo se postavljaju lokalne poprečne ose \bar{y} i \bar{z} tako da \bar{z} osa bude paralelna sa globalnom XZ ravni. Ukoliko se glavne ose preseka ne poklapaju sa ovako definisanim lokalnim osama imamo drugi korak koji predstavlja rotaciju osa \bar{y} i \bar{z} u lokalne y i z ose za ugao

α . Ugao rotacije se može definisati direktno zadavanjem ugla ili da se on preračuna na osnovu definisanja dopunske tačke koja se obično locira u lokalnu xy ravan i da pri tome ne leži na lokalnoj x osi.



Slika 5.2. Matrica transformacije

Transformacija glasi:

$$\begin{aligned}
 [T]_3^3 &= [T_1]_3^3 [T_2]_3^3, \quad \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = [T]_3^3 \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix}, \quad c = \cos \alpha, \quad s = \sin \alpha \\
 &\quad d = (l_{0x}^2 + m_{0x}^2)^{1/2} \\
 \begin{Bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ \bar{z} \end{Bmatrix} &= [T_1]_3^3 \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix}, \quad \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = [T_2]_3^3 \begin{Bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ \bar{z} \end{Bmatrix}, \quad [T_2]_3^3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c & s \\ 0 & -s & c \end{bmatrix} \\
 [T_1]_3^3 &= \begin{bmatrix} l_{0x} & m_{0x} & n_{0x} \\ -l_{0x}m_{0x}/d & (l_{0x}^2 + m_{0x}^2)/d & -m_{0x}n_{0x}/d \\ -m_{0x}/d & 0 & l_{0x}/d \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{5.6}$$

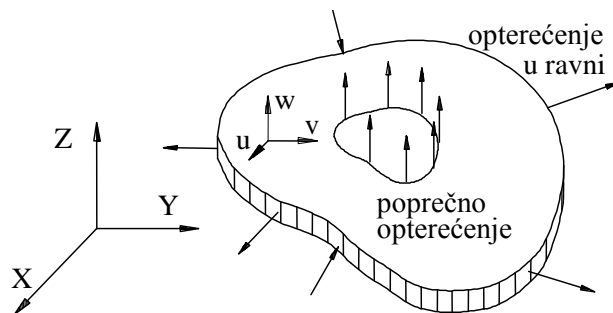
Matrica krutosti i vektor opterećenja konačnog elementa grede u globalnom koordinatnom sistemu glase:

$$\begin{aligned}
 [\bar{k}]_e &= [T]^T [k]_e [T], [12 * 12] = [12 * 12] * [12 * 12] * [12 * 12] \\
 [F_{XYZ}]_e &= [T]^T [F_{xyz}]_e, [12 * 1] = [12 * 12] * [12 * 1].
 \end{aligned} \tag{5.7}$$

5.1.2. Konačni element ploče

Vrste naprezanja elementa ploče (Slika 5.3.) su:

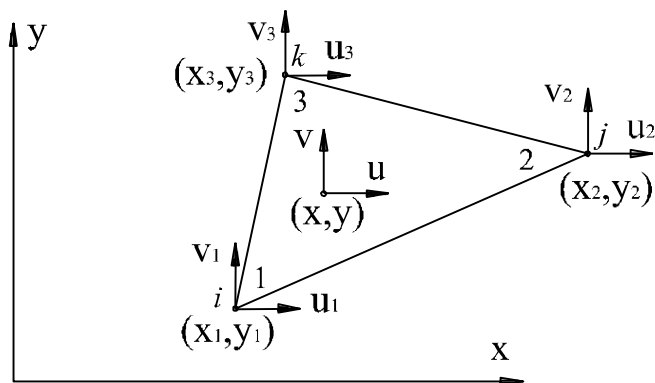
- naprezanje u ravni ploče - membransko naprezanje i
- naprezanje upravno na ravan ploče - savijanje ploče.



Slika 5.3. Naprezanja ploče

Naprezanje u ravni ploče ima dva stepena slobode translacije i dve sile u ravni i tri komponente deformacije i napona. Savijanje ploče ima stepen slobode translacije i sile u pravcu normale ploče i dva stepena slobode rotacije i momenta savijanja oko osa koje leže u ravni ploče i tri komponente deformacije i napona. U linearnoj teoriji tanke ploče, naprezanje u ravni ploče nije u sprezi sa naprezanjem upravno na ravan ploče. Ako se ploča koristi za analizu trodimenzionalnih struktura onda će zbog transformacije lokalnih veličina u globalnu doći do povezivanja (sabiranja) obe vrste naprezanja ploče.

Trougaoni membranski element prikazan je na Slici. 5.4. u svom lokalnom koordinatnom sistemu i stepenima slobode.



Slika 5.4. Trougaoni membranski element

Stepeni slobode pomeranja tačke unutar elementa su pretpostavljene linearnom funkcijom (polinomom) koordinata tačke:

$$\{f\} = \{u(x, y) : v(x, y)\}^T = \{a_1 + a_2x + a_3y : a_4 + a_5x + a_6y\}^T \quad (5.8)$$

Vektori deformacije, napona, pomeranja i sila i koordinate tačke unutar elementa i matrice diferencijalnih operatora, veza i elastičnosti materijala ovog problema glase:

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \partial u / \partial x \\ \partial v / \partial x \\ \partial v / \partial x + \partial u / \partial y \end{Bmatrix} = [L]\{f\} = [L][N]\{\delta\}_e = [B]\{\delta\}_e,$$

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [D]\{\varepsilon\} = [D][B]\{\delta\}_e, \quad [L] = \begin{bmatrix} \partial / \partial x & 0 \\ 0 & \partial / \partial y \\ \partial / \partial y & \partial / \partial x \end{bmatrix}, \quad (5.9)$$

$$\{\delta\}_e = \{u_1 \quad v_1 \quad u_2 \quad v_2 \quad u_3 \quad v_3\}_e^T,$$

$$\{F\}_e = \{F_{x1} \quad F_{y1} \quad F_{x2} \quad F_{y2} \quad F_{x3} \quad F_{y3}\}_e^T,$$

$$[N] = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 \end{bmatrix}, \quad N_i = \frac{1}{2A}(a_i + b_i x + c_i y),$$

$$[B] = [[B_1][B_2][B_3]], \quad [B_i] = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} b_i & 0 \\ 0 & c_i \\ c_i & b_i \end{bmatrix}, \quad A = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix}$$

$$a_i = x_j y_k - x_k y_j, \quad b_i = y_j - y_k, \quad c_i = x_k - x_j \quad \text{za} \\ i = 1, 2, 3 \quad j = 2, 3, 1 \quad k = 3, 1, 2 \quad \text{respektivno,}$$

$$\text{ortotropan materijal: } [D] = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & 0 \\ d_{21} & d_{22} & 0 \\ 0 & 0 & d_{33} \end{bmatrix},$$

$$\text{ravno stanje napona: } d_{11} = d_{22} = \frac{E}{1-\nu^2}, \quad d_{12} = d_{21} = \nu d_{11}, \quad d_{33} = \frac{E}{2(1+\nu)} = G$$

Pošto su članovi matrice [B] konstantni sledi da su i komponente deformacije u elementu konstantne. Zbog toga se ovaj trougaoni element naziva trougao sa konstantnim deformacijama (*CST-Constant Strain Triangle*).

Matrica krutosti trougla konstantne debljine t glasi:

$$[k]_e = \int_V [B]^T [D] [B] dV = t \int_A [B]^T [D] [B] dA = tA [B]^T [D] [B]. \quad (5.10)$$

Red matrice krutosti je: $[6*3]*[3*3]*[3*6]=[6*6]$. Matrica krutosti svakog, pa i ovog elementa, se može dekomponovati na blokove po broju čvornih tačaka. Red svakog bloka, koji je kvadratni, iznosi broj stepeni slobode čvora i u ovom slučaju iznosi $[2*2]$. Dekomponovana matrica krutosti glasi:

$$[k]_e = \begin{bmatrix} [k_{11}]_e & [k_{12}]_e & [k_{13}]_e \\ [k_{21}]_e & [k_{22}]_e & [k_{23}]_e \\ [k_{31}]_e & [k_{32}]_e & [k_{33}]_e \end{bmatrix}, \quad [k_{ij}]_e = [k_{ji}]_e^T \text{ za } i \neq j, \\ i, j = 1, 2, 3 \quad (5.11)$$

Dobijanje svakog bloka dekomponovane matrice krutosti je omogućeno na osnovu pravila matričnog računa u vidu:

$$[k_{ij}]_e = tA[B_i]^T[D][B_j] = \frac{t}{4A} \begin{bmatrix} b_i d_{11} b_j + c_i d_{33} c_j & b_i d_{12} c_j + c_i d_{33} b_j \\ c_i d_{21} b_j + b_i d_{33} c_j & c_i d_{22} c_j + b_i d_{33} b_j \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

Vektor koncentrisanih masa elementa glasi:

$$\{m\}_e = \frac{m}{3} \{1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1\}^T \text{ gde je } m = \rho A t - \text{ masa elementa.}$$

Podela ploče preko odnosa kraće strane i debljine glasi:

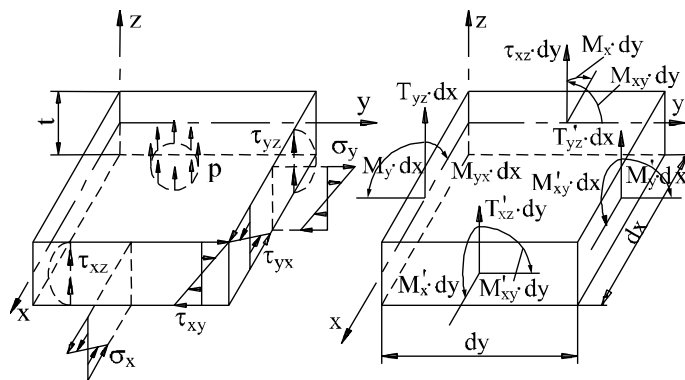
- $b/t < 5(8)$ - veoma debela ploča,
- $b/t = 5(8) \div 8(10)$ - debela ploča,
- $b/t = 8(10) \div 100$ - tanka ploča i
- $b/t > 100$ - veoma tanka ploča (ljuska).

Pretpostavke klasične teorije tanke ploče i ljuske su:

- deformacije su male,
- srednja ravan ploče ostaje nedeformisana u ravni i
- deformacije poprečnog smicanja su nula.

Druga pretpostavka razdvaja membransko naprezanje ploče od naprezanja upravno na ravan ploče. Treća pretpostavka ne važi kod debelih ploča, odnosno mora se uzeti u obzir rad poprečnih sila po debljini ploče.

Naponi indukovani u elementu ploče opterećene savijanjem (poprečna sila i momenti savijanja) su prikazani na Slici 5.5. kao i sile i momenti u diferencijalno malom elementu.



Slika 5.5. Naponi i sile i momenti u savijenoj ploči

Priraštaji sila i momenata glase:

$$\begin{aligned}
 M'_x &= M_x + \frac{\partial M_x}{\partial x} dx, & M'_y &= M_y + \frac{\partial M_y}{\partial y} dy, \\
 M'_{xy} &= M_{xy} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} dx, & M'_{yx} &= M_{yx} + \frac{\partial M_{yx}}{\partial y} dy, \\
 T'_{xz} &= T_{xz} + \frac{\partial T_{xz}}{\partial x} dx, & T'_{yz} &= T_{yz} + \frac{\partial T_{yz}}{\partial y} dy.
 \end{aligned} \tag{5.13}$$

Sile i momenti u preseku definisani preko napona po jedinici dužine preseka su:

$$M_x = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x z dz, \quad M_y = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_y z dz, \quad M_{xy} = M_{yx} = \int_{-t/2}^{t/2} \tau_{xy} z dz, \quad T_{xz} = \int_{-t/2}^{t/2} \tau_{xz} dz, \quad T_{yz} = \int_{-t/2}^{t/2} \tau_{yz} dz. \tag{5.13}$$

Na osnovu pretpostavki teorije tanke ploče imamo deformacije $\varepsilon_z=0$, $\gamma_{xz}=0$ i $\gamma_{yz}=0$ i pomeranja $w=w(x,y)$, $u=-z \cdot \theta_y = -z \cdot \partial w / \partial x$ i $v=-z \cdot \theta_x = -z \cdot \partial w / \partial y$. Nepoznate deformacije glase:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = -z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = -z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = -2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}. \tag{5.14}$$

Prethodne jednačine zavise isključivo od poprečnog pomeranja w koje je u funkciji koordinata tačke x i y . Potrebno je definisati relacije momenti-pomeranja. Za ovo je potrebno znati da je tanka ploča u ravnom stanju napona kod koga je poprečni napon σ_z zanemarljiv u odnosu na σ_x i σ_y . Relacija napon-deformacija za ravno stanje napona glasi:

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1-\nu)^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu)/2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}. \tag{5.15}$$

Zamenom jednačina deformacije u relacije napon-deformacija i tih relacija u jednačine momenta u preseku dobija se:

$$\begin{aligned} M_x &= -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) , \\ M_y &= -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) , \\ M_{xy} = M_{yx} &= -(1-\nu)D \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} = -\frac{Gt^3}{6} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} , \end{aligned} \quad (5.16)$$

gde je: $D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$ - krutost ploče na savijanje.

Krutost ploče na savijanje je analogna krutosti grede na savijanje (EI), odnosno ako je $\nu=0$ dobija se i za D sledeće:

$$D = EI = E \frac{bt^3}{12} , \text{ odnosno za } b = 1 \text{ imamo } D = E \frac{t^3}{12} . \quad (5.17)$$

Sada se mogu izračunati i poprečne sile u preseku kao:

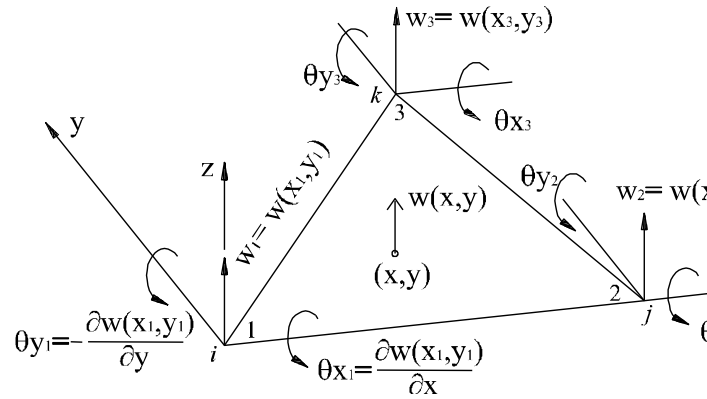
$$T_{xz} = -D \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) , \quad T_{yz} = -D \cdot \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) . \quad (5.18)$$

Veliki broj konačnih elemenata savijanja ploče je razvijen i prikazan u literaturi. Osnovni problem predstavlja usvajanje interpolacionog modela pomeranja $w(x,y)$, jer on najviše utiče na tačnost rada. Nema univerzalnog modela interpolacije koji pokriva širok spektar primene, već je za svaku grupu problema potrebno iznaći najpovoljniji model.

Najprostiji elementi su trougao i četvorougao.

Ponovo treba napomenuti da prikazana teorija važi samo za tanku ploču i ljusku. Ako je ploča debela, potrebno je uzeti u obzir uticaj smičućih poprečnih sila na deformaciju klizanja.

Trougaoni element se vrlo često koristi kod problema savijanja ploča. Kao najjednostavniji element je trougao sa 9 stepeni slobode, po tri u svakoj tački (poprečno pomeranje i rotacije oko osa koje leže u ravni ploče – w, θ_x i θ_y) (Slika 5.6.).



Slika 5.6. Stepeni slobode trougaone ploče pri savijanju

Sledeći standardnu proceduru očito je da se polje pomeranja može aproksimirati sa 9 međusobno nezavisnih funkcija, odnosno polinom interpolacije trećeg reda sa 9 članova. U daljem tekstu koristi se nekomformni element T-9 ($w(x,y)=a_1+a_2x+a_3y+a_4x^2+a_5xy+a_6y^2+a_7x^3+a_8(x^2y+xy^2)+a_9y^3$). Rotacije tačke glase: $\theta_x=\partial w/\partial y$ i $\theta_y=-\partial w/\partial x$ (znak minus zato što ova rotacija proizvodi negativno pomeranje). Pomeranje tačke unutar elementa može se napisati u sledećem obliku:

$$\{f(x, y)\} = \begin{Bmatrix} w(x, y) \\ \theta_x(x, y) \\ \theta_y(x, y) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} w(x, y) \\ \partial w(x, y)/\partial y \\ -\partial w(x, y)/\partial x \end{Bmatrix} = [n] \cdot \{a\} \quad (5.19)$$

gde je:

$$[n] = \begin{bmatrix} 1 & x & y & x^2 & xy & y^2 & x^3 & (x^2y+xy^2) & y^3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & x & 2y & 0 & (x^2+2xy) & 3y^2 \\ 0 & -1 & 0 & -2x & -y & 0 & -3x^2 & -(2xy+y^2) & 0 \end{bmatrix}, \quad (5.20)$$

$$\{a\} = \{a_1 \quad a_2 \quad a_3 \quad a_4 \quad a_5 \quad a_6 \quad a_7 \quad a_8 \quad a_9\}^T.$$

Matricu diferencijalnih operatora možemo izvesti na osnovu definisanog vektora deformacije i pomeranja tačke:

$$\{\epsilon\} = \begin{Bmatrix} -z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ -z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ -2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} = [L] \cdot \{f\} = -z \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial x} & -\frac{\partial}{\partial y} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w \\ \frac{\partial w}{\partial y} \\ -\frac{\partial w}{\partial x} \end{Bmatrix}. \quad (5.21)$$

Vrednosti stepena slobode (pomeranja) tačaka trougla sa svojim koordinatama u lokalnom sistemu glase:

$$\{\delta\}_e = \begin{Bmatrix} w_1 \\ \theta_{x1} \\ \theta_{y1} \\ w_2 \\ \theta_{x2} \\ \theta_{y2} \\ w_3 \\ \theta_{x3} \\ \theta_{y3} \end{Bmatrix}_e = \begin{Bmatrix} w(x_1=0, y_1=0) \\ \partial w(x_1=0, y_1=0) / \partial y \\ -\partial w(x_1=0, y_1=0) / \partial x \\ w(x_2, y_2=0) \\ \partial w(x_2, y_2=0) / \partial y \\ -\partial w(x_2, y_2=0) / \partial x \\ w(x_3, y_3) \\ \partial w(x_3, y_3) / \partial y \\ -\partial w(x_3, y_3) / \partial x \end{Bmatrix}_e = [N]\{a\}, \quad (5.22)$$

$$[N] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & x_2 & 0 & x_2^2 & 0 & 0 & x_2^3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & x_2 & 0 & 0 & x_2^2 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -2x_2 & 0 & 0 & 3x_2^2 & 0 & 0 \\ 1 & x_3 & y_3 & x_3^2 & x_3 y_3 & y_3^2 & x_3^3 & (x_3^2 y_3 + x_3 y_3^2) & y_3^3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & x_3 & 2y_3 & 0 & (x_3^2 + 2x_3 y_3) & 3y_3^2 \\ 0 & -1 & 0 & -2x_3 & -y_3 & 0 & -3x_3^2 & -(2x_3 y_3 + y_3^2) & 0 \end{bmatrix}. \quad (5.23)$$

Matrica izvoda putem proizvoda sledećih matrica je:

$$[B] = [L] \cdot [n] = -z \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 6x & 2y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 2x & 6y \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 4(x+y) & 0 \end{bmatrix}. \quad (5.24)$$

Sada matrice veza glase:

$$[B] = [B] \cdot [N]^{-1}, \quad [N] = [n][N]^{-1}. \quad (5.25)$$

Na kraju matrica krutosti elementa u lokalnu glasi:

$$[k]_e = \int_V [B]^T [D] \cdot [B] dV = ([N]^{-1})^T \left\{ \int_A dA \left(\int_{-t/2}^{t/2} [B]^T [D] \cdot [B] dz \right) \right\} [N]^{-1}. \quad (5.26)$$

Pošto matrica veza [N] ne zavisi od podintegralnih veličina (zavisi samo od koordinata tačaka) daje se rešavanje samo integrala po površini i debljini elementa:

$$\int_A dA \int_{-t/2}^{t/2} [\underline{B}]^T [D] [\underline{B}] \cdot dz = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \int_A dx \cdot dy \cdot$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1-\nu) \\ 0 & 0 & 0 & 4\nu & 0 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 12x & 0 & 12\nu x & 36x^2 \\ 0 & 0 & 0 & 4 \cdot (\nu x + y) & 4(1-\nu) \cdot (x + y) & 4 \cdot (x + \nu y) & 12x \cdot (\nu x + y) & (12 - 8\nu) \cdot (x + y)^2 - 8xy(1-\nu) \\ 0 & 0 & 0 & 12\nu & 0 & 12y & 36\nu xy & 12y(x + \nu y) & 36y^2 \end{bmatrix} \quad (5.27)$$

Rešavanjem pojedinih površinskih integrala dobija se površina elementa i njegove statičke i aksijalne inercione momentne površine. Vrednosti ovih integrala u usvojenom lokalnom koordinatnom sistemu glase:

$$\int_A dx dy = A = x_2 y_3 / 2 \quad , \quad \int_A x dx dy = x_2 y_3 (x_2 + x_3) / 6 \quad ,$$

$$\int_A y dx dy = x_2 y_3^2 / 6 \quad , \quad \int_A x^2 dx dy = x_2 y_3 (x_2^2 + x_2 x_3 + x_3^2) / 12 \quad , \quad (5.28)$$

$$\int_A xy dx dy = x_2 y_3^3 / 12 \quad , \quad \int_A y^2 dx dy = x_2 y_3^3 / 12 \quad .$$

Dalji postupak dobijanja matrice krutosti nije prikazan. Ona je reda 9*9 odnosno sa podmatricama reda 3*3 (tačke).

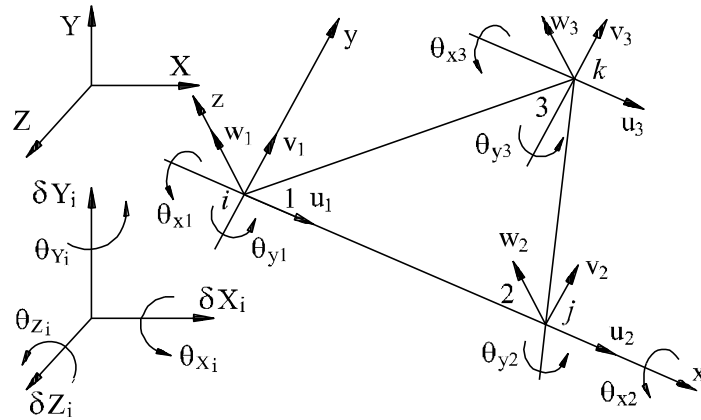
Vektor opterećenja elementa glasi:

$$\{F\}_e = \{F_{z1} \quad M_{x1} \quad M_{y1} \quad F_{z2} \quad M_{x2} \quad M_{y2} \quad F_{z3} \quad M_{x3} \quad M_{y3}\}^T \quad . \quad (5.29)$$

U linearnoj oblasti sa malim deformacijama membransko i savojno naprezanje su razdvojeni. Čvorna tačka pri membranskom naprezanju ima dva stepena slobode translacije u ravni ploče (u,v), dok pri savojnom naprezanju ima jednu translaciju poprečno na ploču (w) i dve rotacije oko osa koje su u ravni ploče (θ_x i θ_y). Šesti stepen slobode (rotacija oko ose upravne na ploču (θ_z)) ne postoji za ovaj element. Čvor ovog elementa ima pet stepeni slobode u lokalnom sistemu.

Pošto se sve veličine konačnog elementa transformišu iz lokalnog u globalni sistem, lokalni stepeni slobode čvora se pri tome premeštaju po globalnim zavisno od

položaja elementa u prostoru. Takođe, pri tome se u jednom čvoru susreću i sabiraju oba naprezanja. Na Slici 5.7. prikazan je element.



Slika 5.7. Element naprezanja

Jednačine ravnoteže za oba naprezanja posebno glase:

$$\begin{bmatrix} [k_{11}]_m & [k_{12}]_m & [k_{13}]_m \\ [k_{21}]_m & [k_{22}]_m & [k_{23}]_m \\ [k_{31}]_m & [k_{32}]_m & [k_{33}]_m \end{bmatrix}_m \begin{Bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \end{Bmatrix}_e = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix}_e, [k_{ij}]_m \text{ je reda } 2 \times 2,$$

$$\{\delta_i\} = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \end{Bmatrix}, \{F_i\} = \begin{Bmatrix} F_{xi} \\ F_{yi} \end{Bmatrix}, \quad i, j = 1, 2, 3,$$

$$\begin{bmatrix} [k_{11}]_s & [k_{12}]_s & [k_{13}]_s \\ [k_{21}]_s & [k_{22}]_s & [k_{23}]_s \\ [k_{31}]_s & [k_{32}]_s & [k_{33}]_s \end{bmatrix}_s \begin{Bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \end{Bmatrix}_e = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix}_e, [k_{ij}]_s \text{ je reda } 3 \times 3, \quad (5.30)$$

$$\{\delta_i\} = \begin{Bmatrix} w_i \\ \theta_{xi} \\ \theta_{yi} \end{Bmatrix}, \{F_i\} = \begin{Bmatrix} F_{zi} \\ M_{xi} \\ M_{yi} \end{Bmatrix}, \quad i, j = 1, 2, 3.$$

Jednačina ravnoteže za element sa oba naprezanja glasi:

$$\begin{bmatrix} [k_{11}] & [k_{12}] & [k_{13}] \\ [k_{21}] & [k_{22}] & [k_{23}] \\ [k_{31}] & [k_{32}] & [k_{33}] \end{bmatrix}_e \begin{Bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \end{Bmatrix}_e = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix}_e, [k_{ij}], \text{ red } 6 \times 6, i, j = 1, 2, 3$$

$$[k_{ij}] = \begin{bmatrix} \vdots & 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 \\ & [k_{ij}]_m & 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 \\ \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots & \vdots & \dots \\ 0 & 0 & \vdots & & & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & \vdots & [k_{ij}]_s & & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & \vdots & & & \vdots & 0 \\ \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots & \vdots & \dots \\ 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 \end{bmatrix}, \{\delta_i\} = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \\ \theta_{xi} \\ \theta_{yi} \\ 0 \end{Bmatrix}, \{F_i\} = \begin{Bmatrix} F_{xi} \\ F_{yi} \\ F_{zi} \\ M_{xi} \\ M_{yi} \\ 0 \end{Bmatrix}. \quad (5.31)$$

Matrica krutosti, vektor opterećenja i pomeranja u globalnom sistemu glase:

$$\begin{aligned}
[\bar{k}]_e &= [T]^T [k]_e [T], \quad \{\bar{\delta}\}_e = [T]^T \{\delta\}_e, \quad \{\bar{F}\}_e = [T]^T \{F\}_e, \\
[T] &= \begin{bmatrix} [T] & [0] & [0] \\ [0] & [T] & [0] \\ [0] & [0] & [T] \end{bmatrix}, \quad [\bar{T}] = \begin{bmatrix} [\bar{T}] & [0] \\ [0] & [\bar{T}] \end{bmatrix}, \quad [\bar{T}] = \begin{bmatrix} l_{ox} & m_{ox} & n_{ox} \\ l_{oy} & m_{oy} & n_{oy} \\ l_{oz} & m_{oz} & n_{oz} \end{bmatrix}, \quad (5.32)
\end{aligned}$$

gde su l, m i n kosinusi pravaca x, y i z ose. Matrica transformacije mora biti kvadratna reda (broj tačaka elementa * broj globalnih stepeni slobode čvorne tačke). Matrice [0] dopunjavaju matricu transformacije.

5.2. Proračun nosećih struktura

Osnovna statička jednačina u matičnom obliku i globalnom koordinatnom sistemu glasi:

$$[K]\{\delta\} = \{F\}, \quad (5.33)$$

gde je : $[K] = \sum_{e=1}^m [\bar{k}_{rs}]_e$ - globalna matrica krutosti,

$\{\delta\} = \left\{ \{\delta_1\}^T \{\delta_2\}^T \dots \{\delta_s\}^T \dots \{\delta_n\}^T \right\}^T$ - globalni vektor pomeranja,

$\{F\} = \left\{ \{F_1\}^T \{F_2\}^T \dots \{F_s\}^T \dots \{F_n\}^T \right\}^T$ - globalni vektor opterećenja,

$\{\delta_s\}, \{F_s\}$ - globalni vektor pomeranja i opterećenja čvora s,

$[\bar{k}_{rs}]_e = [T]^T [k_{rs}]_e [T]$ - matrica krutosti KE-a u globalnom sistemu,

[T] - matrica transformacija lokalnog u globalni sistem,

$[k_{rs}]_e = (\int_V [B]^T [D] [B] dV)_e$ - matrica krutosti KE-a lok.sistemu,

$[D]$ - matrica elastičnosti materijala - problema,

$[B] = [L][N]$ - matrica veza deformacije i pomeranja,

$[L]$ - matrica diferencijalnih operatora problema,

$[N]$ - funkcije oblika konačnog elementa,

$\{\sigma\} = [D](\{\varepsilon\}_e - \{\varepsilon_0\}_e) = [D]([B]\{\delta\}_e - \{\varepsilon_0\}_e)$ - vektor napona konačnog elementa,

$\{\varepsilon\}_e = [B]\{\delta\}_e$ - vektor deformacije konačnog elementa,

$\{\varepsilon_0\}_e$ - inicijalna deformacija elementa (npr. temperatura),

$\{\delta\}_e$ - vektor pomeranja konačnog elementa,

čvor $r, s = 1, 2, 3, \dots, n$, n - ukupan broj čvornih tačaka modela,

element $e = 1, 2, 3, \dots, m$, m - ukupan broj konačnih elemenata,

e - konačni element.

Globalni vektor pomeranja čvorne tačke s se sastoji iz najviše tri translacije i tri rotacije (zavisi od vrste problema) koje ujedno predstavljaju stepene slobode kretanja tačke:

$$\{\delta_s\} = \{\delta_x \delta_y \delta_z \theta_x \theta_y \theta_z\}_s^T. \quad (5.34)$$

Globalni vektor opterećenja čvorne tačke s (koncentrisano opterećenje) se sastoji najviše iz tri sile i tri momenta. Globalno koncentrisano opterećenje čvora se može generisati od spoljašnjeg globalnog koncentrisanog opterećenja čvora (c) i lokalnog opterećenja elementa (temperatura - t , površinsko - A i zapreminsko - V opterećenje) transformisanog u globalno koncentrisano opterećenje kao:

$$\begin{aligned} \{F_s\} &= \{F\}_c + [T]^T \{F\}_e, \\ \{F\}_e &= \sum_{e=1}^m (\{F\}_t + \{F\}_A + \{F\}_V)_e = \\ &= \sum_{e=1}^m ((\int_V [B]^T [D] \{\varepsilon_0\} dV)_e + (\int_A [N]^T \{p_A\} dA)_e + (\int_V [N]^T \{p_V\} dV)_e). \end{aligned} \quad (5.35)$$

Globalne veličine se dobijaju tako što se one lociraju i dodaju na globalni sistem jednačina ravnoteže, odnosno stepene slobode. Ako veličina nije definisana direktno u globalnom sistemu onda se ona transformiše iz lokalnog u globalni sistem. Na ovaj način se *uslovno* raznorodne veličine sabiraju, odnosno veličina se formira za globalni sistem.

Metode za rešavanje statičke matrične jednačine ravnoteže podeljene su u dve grupe i to: direktne i iterativne. U direktne spadaju metode Gauss-ove eliminacije i dekompozicije Choleski, dok u iterativne metode, koje se manje primenjuju spadaju Gauss-Seidel-ova metoda i gradijentna metoda.

U dinamičkom proračunu sve veličine su još u funkciji vremena. Pošto je statički proračun specijalni slučaj dinamičkog (vreme $t = 0$) globalna matrica krutosti ostaje ista, odnosno formira se na isti način. Na konačni element pri dinamičkoj analizi pored statičkih deluju još i dinamičke sile (inercijalne i prigušujuće sile).

Pomeranje i brzina bilo koje tačke elementa sada glasi:

$$\left\{ \begin{matrix} u(x, y, z, t) \\ v(x, y, z, t) \\ w(x, y, z, t) \end{matrix} \right\} = [N(x, y, z)] \{ \delta(t) \}_e, \quad \left\{ \dot{f} \right\} = [N] \{ \dot{\delta} \}_e \quad (5.36)$$

Ne izvodeći detaljno definišu se sledeće veličine :

$$[M] = \sum_{e=1}^m [\overline{m}_{rs}]_e + [M]_c - \text{globalna matrica masa,}$$

$[M]_c$ - matrica spoljašnjih (dodatnih) koncentrisanih masa,

$$[\overline{m}_{rs}]_e = \left(\int_V [N_r]^T \rho [N_s] dV \right)_e - \text{matrica masa konačnog elementa,}$$

ρ - gustina, odnosno masa jedinice zapremine konačnog elementa,

$$[B] = \sum_{e=1}^m [b_{rs}]_e = \sum_{e=1}^m \left(\int_V [N_r]^T \beta [N_s] dV \right)_e - \text{globalno prigušenje,}$$

β - koeficijent proporcionalnosti,

$\{ \ddot{\delta}(t) \}, \{ \dot{\delta}(t) \}, \{ \delta(t) \}$ - globalni vektor ubrzanja, brzine i pomeranja u funkciji vremena,

$[K]$ - globalna matrica krutosti,

$\{F(t)\} = \{F(t)\}_c + \{F(t)\}_e$ - prinudni globalni vektor sila,

$\{F(t)\}_c$ - prinudni globalni vektor koncentrisanog opterećenja,

$\{F(t)\}_e$ - prinudni globalni vektor opterećenja konačnih elemenata.

Dinamička jednačina kretanja strukture može biti izvedena primenom Lagrange-ove jednačine ili Hamilton-ovog principa. Lagrange-ova dinamička jednačina glasi:

$$\frac{d}{dt} \left\{ \frac{\partial L}{\partial \dot{\delta}} \right\} - \left\{ \frac{\partial L}{\partial \delta} \right\} + \left\{ \frac{\partial R}{\partial \dot{\delta}} \right\} = \{0\}, \text{ gde je } L = E_k - E_p. \quad (5.37)$$

Diferenciranjem izvedenih veličina dobija se osnovna dinamička jednačina prinudnih prigušenih oscilacija u matričnom obliku i globalnom sistemu:

$$[M]\{\ddot{\delta}(t)\} + [B]\{\dot{\delta}(t)\} + [K]\{\delta(t)\} = \{F(t)\}. \quad (5.38)$$

Matrica masa konačnog elementa i celog modela može biti definisana kao puna matrica sa inercialnim članovima i kao dijagonalna sa koncentrisanim masama. Metoda koncentrisanih masa se više koristi (iako je netačnija) zbog mnogo lakšeg rešavanja dinamičke matrice. Po ovoj metodi se u svaki čvor konačnog elementa ravnomerno koncentriše masa elementa (m_e) podeljena sa brojem čvorova (n) elementa, odnosno:

$$[m]_e = \text{dijag} \left\{ \frac{m_e}{n} \right\}. \quad (5.39)$$

Dinamički model noseće strukture se svodi na konačan broj stepeni slobode. Slobodne neprigušene oscilacije u matričnom obliku glase:

$$[M]\{\ddot{\delta}(t)\} + [K]\{\delta(t)\} = \{0\} \quad (5.40)$$

Ova jednačina pomnožena sa leve strane sa inverznom matricom masa može se napisati u direktnom ili inverznom obliku:

$$\{\ddot{\delta}(t)\} + [H]\{\delta(t)\} = \{0\}, \quad [H]^{-1}\{\ddot{\delta}(t)\} + \{\delta(t)\} = \{0\} \quad (5.41)$$

Matrica $[H]=[M]^{-1}[K]$ se naziva dinamička matrica sistema. Pretpostavljanjem rešenja vektora pomeranja u harmoničnom obliku $\{\delta(t)\} = \{\delta_0\}e^{i\omega t}$ dinamička jednačina postaje $(-\omega^2[I]+[H])\{\delta_0\} = \{0\}$. Determinanta ove jednačine mora biti jednaka nuli. Ona daje sopstvene vrednosti $\{\Omega_0^2\} = \text{dijag}\{\omega_{01}^2, \omega_{02}^2, \dots, \omega_{0r}^2, \dots, \omega_{0n}^2\}$ na osnovu kojih se određuje $[\{\mu\}_1^{ns} \{\mu\}_2^{ns} \dots \{\mu\}_r^{ns} \dots \{\mu\}_n^{ns}]$ - matrica sopstvenih vektora za n sopstvenih vrednosti sa ns stepeni slobode. Sopstvene vrednosti dinamičke matrice sistema predstavljaju sopstvene frekvence sistema (modela). Određivanje slobodnih frekvenci svih stepena slobode sistema nema tehničkog smisla (bitne su uglavnom prvih deset) i zahteva ogromno vreme rada kompjutera. Kompjuterski programi imaju mogućnost određivanja malog broja sopstvenih frekvenci. Na osnovu sopstvenih frekvenci sledi određivanje glavnih oblika oscilovanja koji treba da budu opisani glavnim normalnim q (normirane po masama) koordinatama.

Metode za rešavanje dinamičke jednačine podeljene su na transformacione (Jacobi) i iterativne (Power metoda, iteracija polinomima, iteracija podprostora - Rayleigh-Ritz, metoda traženja determinante).

Glavni oblici oscilovanja imaju oblike deformacija modela pod *zamišljenim* opterećenjem. Najlošije ponašanje konstrukcije se iskazuje prvim oblikom oscilovanja pa redom dalje. Konstrukcija ima dobro dinamičko ponašanje ukoliko je prva frekvencija velika i ukoliko je razmak između frekvenci veliki. To je moguće ostvariti ukoliko je konstrukcija izvedena sa maksimalnom krutošću i minimalnom masom. Sopstvena frekvencija je proporcionalna $\sqrt{k/m}$.

5.3. Analiza razvijenih programa

Programi koji primenjuju metodu konačnih elemenata prema nameni se mogu podeliti na programe opšte i specifične namene. Dalja podela se odnosi na vrstu analize i problema koju program rešava. Osnovni nedostaci analiziranih programa su ograničavajući faktori primene.

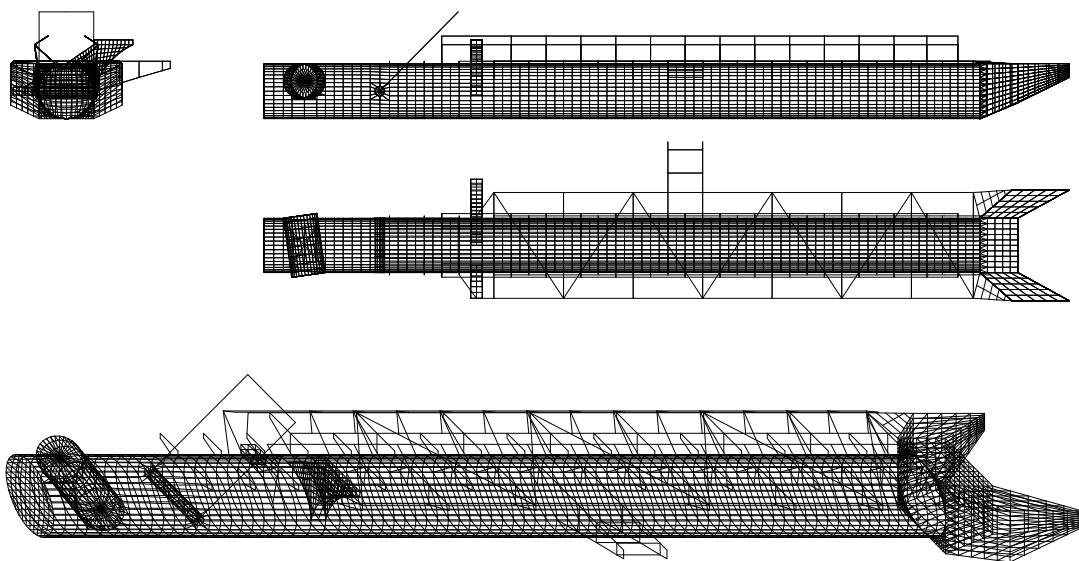
Analizu razvijenih programa možemo podeliti u dva pravca. Prvi pravac predstavlja analiza izvornih programa prisutnim u knjigama, dok drugi analizu instalisanih programa. Lista nekih instalisanih programa glasi: ADINA, ANSYS, ASKA, BERSAFE, DYNAL, IMAGES, MARC, MSC pal-cal, NASTRAN, NISEE, NONSAP, SAP IV-V-80-81-86-90, STRESS, STRUDL, SUPERSAP i dr.

Razvijeni programi proračuna omogućavaju statički, dinamički i termički proračun linijskih, površinskih i zapreminskih problema. Komuniciranje između programa je omogućeno preko skupova podataka (datoteka). Svi skupovi podataka (datoteke) se nakon rada programa brišu osim ulaznih i izlaznih.

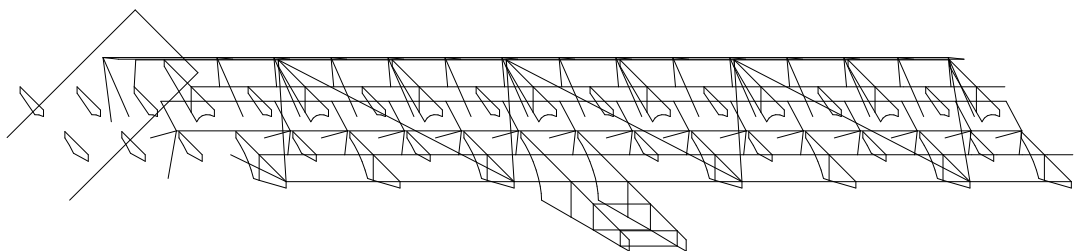
5.4. Model radnog organa rotornog bagera ER-1250 16/1,5 metodom konačnih elemenata

Strelna rotornog bagera ER-1250 16/1,5 (Slika 3.22.) je cevaste konstrukcije ukupne dužine 18,5 metara.

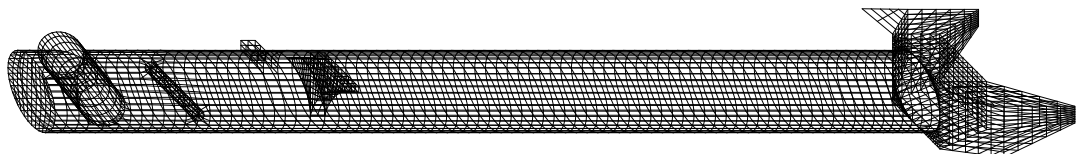
Model strele uređen je metodom konačnih elemenata [11], [25], [26], [37]. Ukupno je definisano 5.245 čvornih tačaka, 703 linijska konačna elementa i 5.161 površinski konačni element. Model strele prikazan je na Slici 5.8.



a) Geometrija mreže konačnih elementa modela strele rotora



b) Linijski konačni elementi

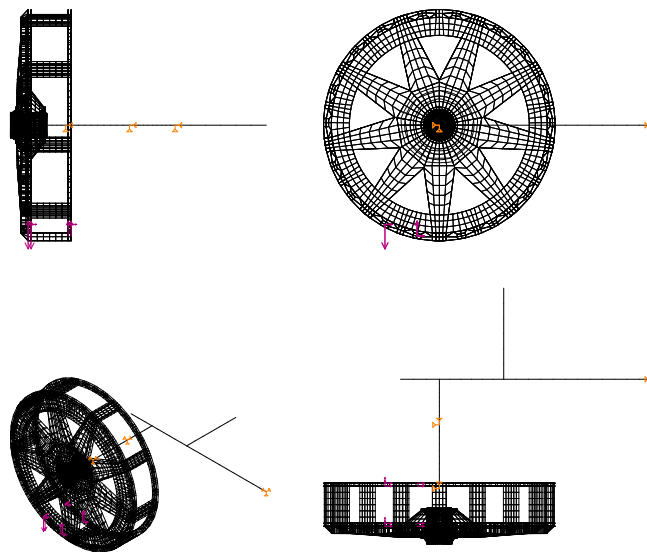


c) Površinski konačni elementi

Slika 5.8. Model strele rotora

Rotor bagera ER-1250 16/1,5 prečnika je 6,5 metara i na njemu je postavljeno 9 vedrica i 9 predrezača. Rotor je bezčelijskog tipa sa paocima (Slika 3.4).

Model rotora urađen je metodom konačnih elemenata. Ukupno je definisano 6.736 čvornih tačaka, 93 linijska konačna elemenat i 5.058 površinskih konačnih elementa. Model rotora je prikazan na Slici 5.9.

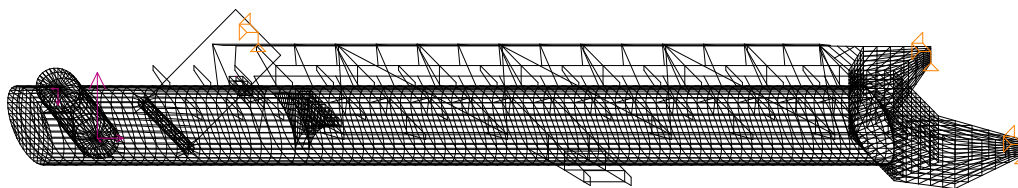


Slika 5.9. Model rotora

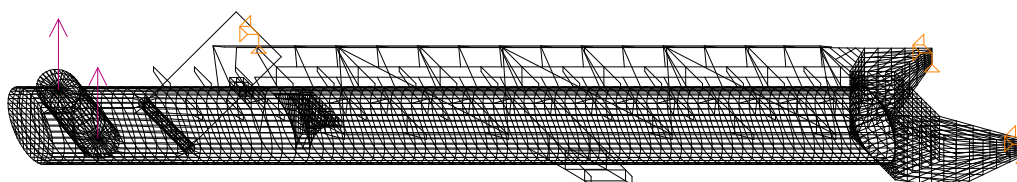
5.5. Statički i dinamički proračun radnog organa rotornog bagera ER-1250 16/1,5 metodom konačnih elemenata

Na Slikama 5.10. – 5.13. prikazan je model proračuna i rezultati proračuna strele rotora metodom konačnih elemenata. Proračun je izveden za dva slučaja opterećenja:

- pri punom iskorišćenju snage elektromotora (najnepovoljniji slučaj) odnosno pri isključenju sigurnosne spojnice i dodato težinsko vertikalno opterećenje (materijal u traci i sekundarne težine) i
- statički proračun od inercijalnog opterećenja (1g) mase rotora i pogonske grupe.

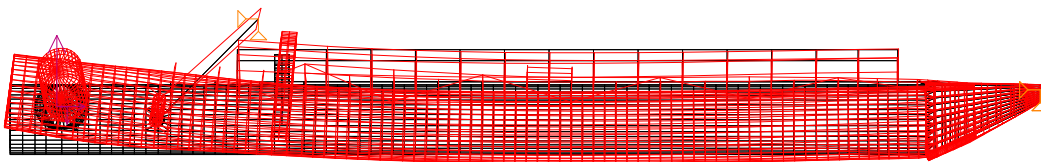


a) prvi slučaj opterećenja

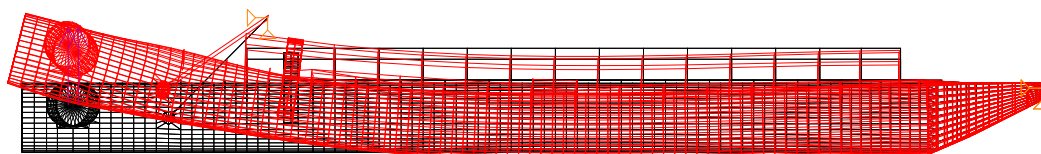


b) drugi slučaj opterećenja

Slika 5.10. Računski modeli strele rotora

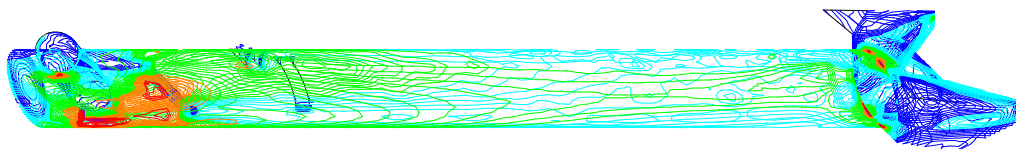


a) Prvi slučaj opterećenja – maksimalna deformacija iznosi 5,5 mm

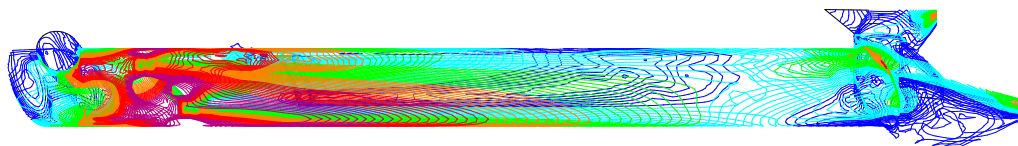


b) Drugi slučaj opterećenja - maksimalna deformacija iznosi 10,8 mm

Slika 5.11. Deformacija strele rotora



a) Prvi slučaj opterećenja - puno iskorišćenje snage i dodato težinsko vertikalno;



b) Drugi slučaj opterećenja - inercijalno opterećenje (1g) od mase rotora i pogonske grupe

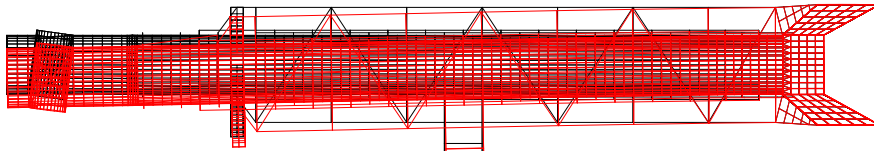
3.33E+01	...	4.00E+01
2.67E+01	...	3.33E+01
2.00E+01	...	2.67E+01
1.33E+01	...	2.00E+01
6.67E+00	...	1.33E+01
0.00E+00	...	6.67E+00

Slika 5.12. Ekvivalentni naponi (MPa)

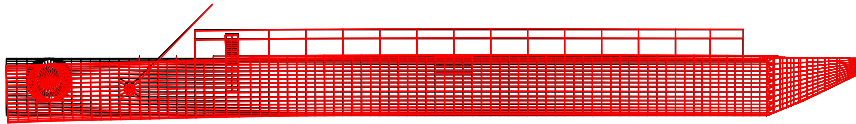
Analiza ponašanja strele rotora za prvi slučaj opterećenja (maksimalno opterećenje u radu) pokazuje da je povoljno.

Analiza ponašanja strele rotora za drugi slučaj opterećenja (inercijalno u iznosu od 1g), takođe, pokazuje da je povoljno.

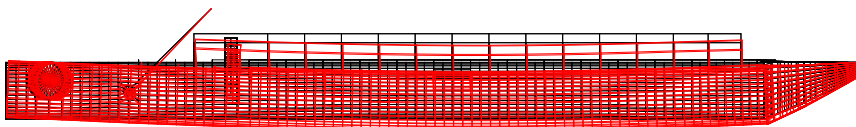
Sledi dinamički proračun sopstvenih frekvenci i vibracija strele rotora.



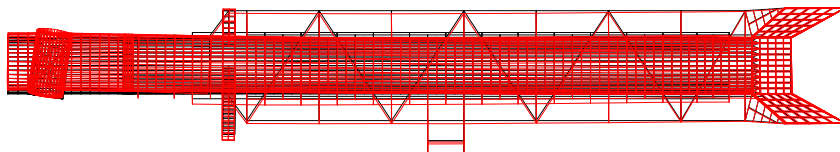
a) Prvi sopstveni oblik oscilovanja – $f_{o1} = 4,7 \text{ Hz}$ (282 o/min)



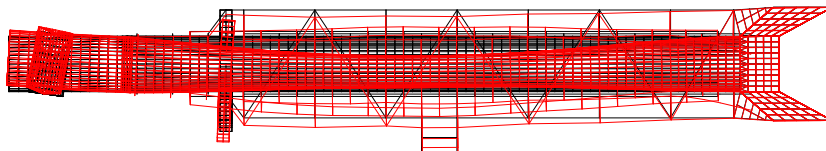
a) Drugi sopstveni oblik oscilovanja – $f_{o2} = 5 \text{ Hz}$ (300 o/min)



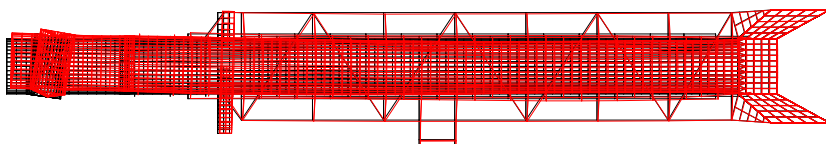
b) Treći sopstveni oblik oscilovanja – $f_{o3} = 6,6 \text{ Hz}$ (396 o/min)



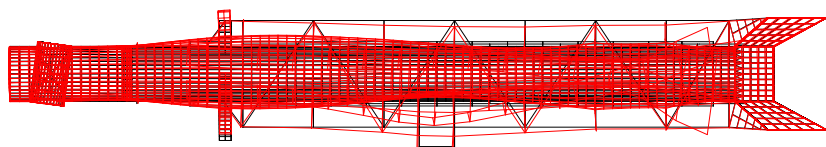
c) Četvrti sopstveni oblik oscilovanja – $f_{o4} = 7,9 \text{ Hz}$ (474 o/min)



d) Peti sopstveni oblik oscilovanja – $f_{o5} = 11 \text{ Hz}$ (660 o/min)



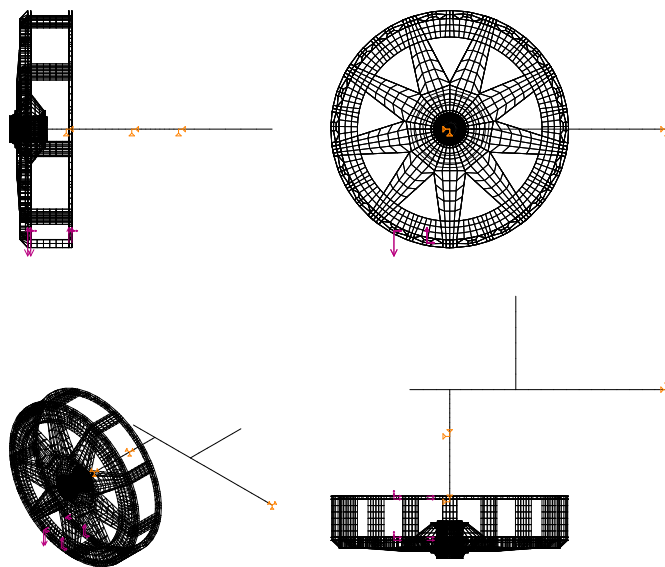
e) Šesti sopstveni oblik oscilovanja – $f_{o6} = 17 \text{ Hz}$ (1020 o/min)



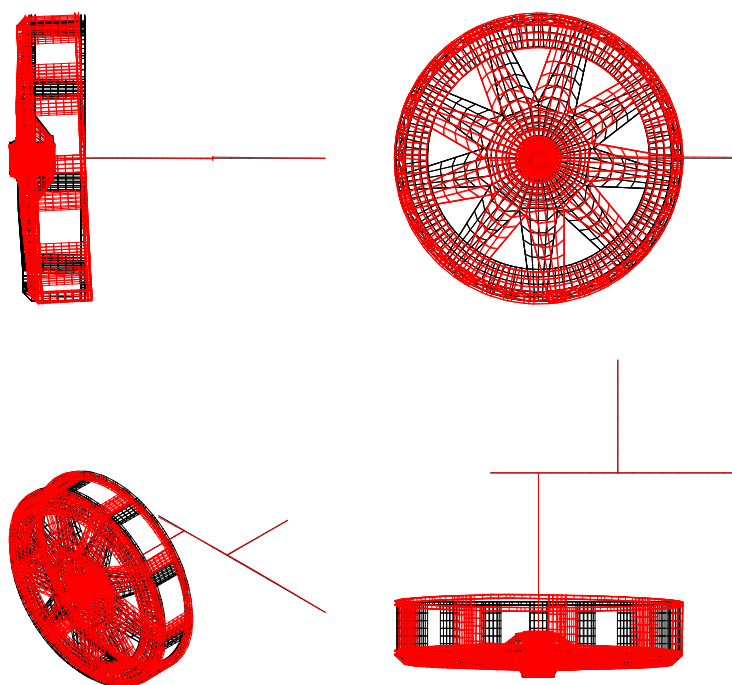
f) Sedmi sopstveni oblik oscilovanja – $f_{o7} = 22 \text{ Hz}$ (1320 o/min)

Slika 5.13. Prvih sedam sopstvenih oblika oscilovanja strele rotora

Na Slikama 5.14. – 5.19. prikazan je model proračuna i rezultati proračuna rotora metodom konačnih elemenata. Proračun je izveden za dva slučaja opterećenja (položaj vedrice i predrezača u odnosu na paokke) pri punom iskorišćenju snage elektromotora (najnepovoljniji slučaj) odnosno pri isključenju sigurnosne spojnice.

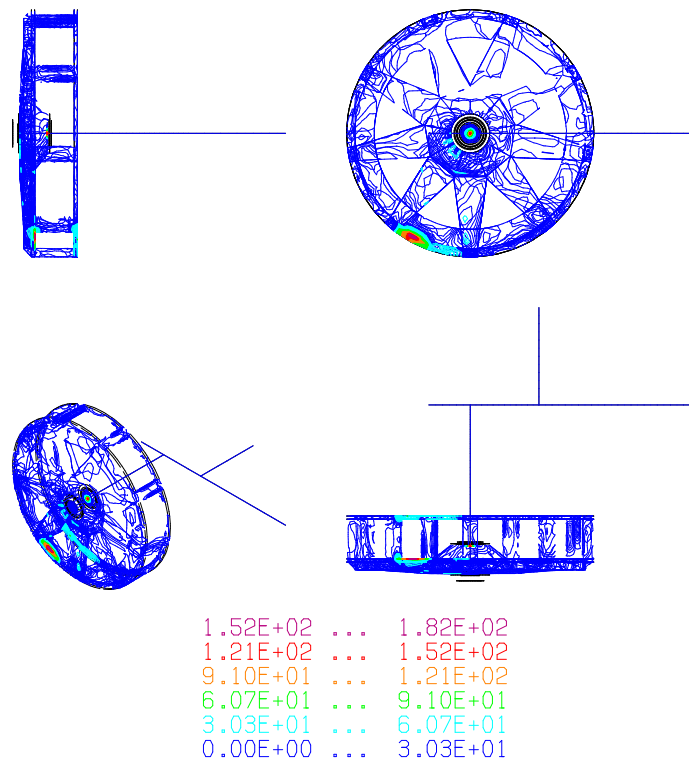


Slika 5.14. Računski model rotora za prvi slučaj opterećenja



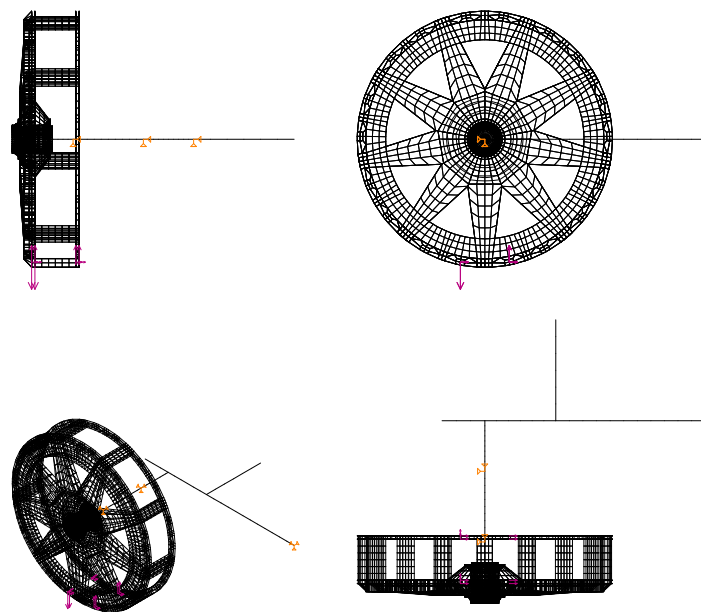
Slika 5.15. Deformacija rotora za prvi slučaj opterećenja

Maksimalna deformacija za prvi slučaj opterećenja iznosi 82 mm.

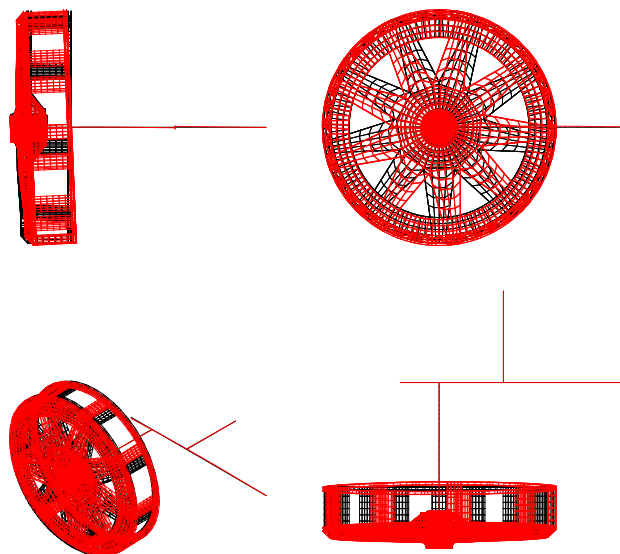


Slika 5.16. Ekvivalentni naponi rotora za prvi slučaj opterećenja (MPa)

Analiza za prvi slučaj opterećenja pokazuje da je ponašanje rotora povoljno, budući da su maksimalni naponi i deformacije pri maksimalnom opterećenju znatno ispod dozvoljenih granica, odnosno maksimalni napon je oko 180 MPa.

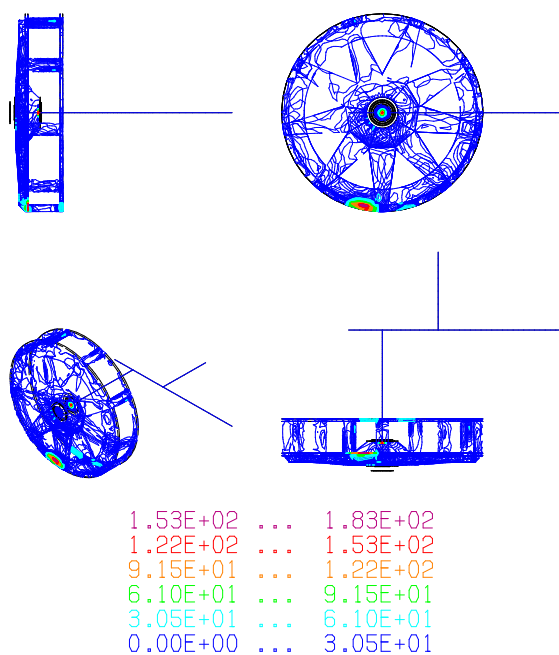


Slika 5.17. Računski model rotora za drugi slučaj opterećenja



Slika 5.18. Deformacija rotora za drugi slučaj opterećenja

Maksimalna deformacija za drugi slučaj opterećenja je 94 mm.



Slika 5.19. Ekvivalentni naponi rotora za drugi slučaj opterećenja (MPa)

Analiza za drugi slučaj opterećenja pokazuje da je ponašanje rotora povoljno, budući da su maksimalni naponi i deformacije pri maksimalnom opterećenju znatno ispod dozvoljenih granica, odnosno maksimalni napon je oko 183 MPa.

Analizom rezultata statičkog i dinamičkog proračuna radnog organa (strele i rotor) može se konstatovati da radni organ ima ponašanje koje je tehnički prihvatljivo.

6. METODOLOGIJA OPTIMIZACIJE PARAMETARA REZA ROTORNIH BAGERA

Optimizacijom parametara reza rotornih bagera vrši se izbor najbolje varijante iz mogućih ili povoljnih varijanti u kontekstu usvojenih kriterijuma. Takva najbolja varijanta se naziva optimalno rešenje optimizacionog zadatka i predstavlja kompromis između želja (kriterijuma) i mogućnosti (ograničenja) i najčešće predstavlja najbolje rešenje određenog matematički definisanog problema [1], [45], [46], [51].

6.1. Definisane zadatka optimizacije

Zadatak optimizacije je da se izvrši izbor parametara reza pri otkopavanju materijala sa povećanom čvrstoćom u funkciji efektivnosti i efikasnosti rada rotornih bagera. Obzirom da se otkopavanje materijala vrši sa dve tipske vrste reza (vertikalni i horizontalni), optimizacija podrazumeva izbor, pre svega vrste reza, a potom i parametara izabrane vrste reza u funkciji povećanja ukupne efektivnosti i efikasnosti rada bagera pri otkopavanju materijala sa povećanom čvrstoćom.

6.2. Izbor metodologije optimizacije parametara reza rotornih bagera

Iz zadatka optimizacije parametara reza očigledno je da se optimalno rešenje problema mora tražiti između više alternativa sa suprostavljenim ili delimično suprostavljenim kriterijumima koji imaju veći broj različitih atributa i neuporedive jedinice mere, itd. U ovakvim slučajevima optimizaciono rešenje se traži izborom najbolje alternative iz skupa datih, odnosno definisanih alternativa metodama višekriterijumske optimizacije. Kod metoda višekriterijumske optimizacije, suštinski drugačijih u odnosu na metode kojima se rešavaju problemi jednokriterijumske optimizacije, svi faktori koji utiču na odluku, odnosno svi ishodi koje bi imalo eventualno rešenje, posmatraju se kao kriterijumi čije vrednosti treba da budu optimalne. Dakle, treba naći rešenje koje je najbolje po svim razmatranim kriterijumima istovremeno uz uvažavanje činjenice da su oni međusobno, delimično ili potpuno konfliktni i po svojoj prirodi veoma raznorodni. Za nalaženje optimalnog rešenja ovakvih problema razvijen je veliki broj metoda i tehnika višekriterijumske analize (odlučivanja, optimizacije) i svima je zajedničko:

- Prisustvo više kriterijuma (funkcija cilja, funkcija kriterijuma) za odlučivanje;

- Postojanje više alternativa (rešenja) za izbor;
- Neuporedivost jedinica mere kriterijuma;
- Izbor rešenja.

Za optimizaciju parametara reza rotornih bagera korišćena je višekriterijumska metoda sa višeatributivnom ocenom, odnosno *bodovanje* referentnih indikatora.

Metod višekriterijumskog odlučivanja je posebno efektivan u sledećim situacijama:

- Kada se donosi odluka o izboru između dva ili više mogućih, alternativnih rešenja;
- Kada se odluka odnosno izbor mora sprovesti na osnovu celovite analize problema, uzimajući u obzir dva ili više kriterijuma;
- Kada se želi ravnoteža očiglednih suprotnosti između ekonomskih i drugih interesa radi zadovoljenja dugoročnih ciljeva;
- Kada se teži najboljem kompromisnom rešenju.

Rešavanje modela višekriterijumskog odlučivanja najčešće se sprovodi kroz sledeće četiri faze:

- Identifikacija problema;
- Definisanje problema;
- Analiza mogućih alternativa ostvarenja cilja i definisanje rezultata;
- Izbor optimalne alternative rešenja problema.

Identifikacija problema odnosi se na prikupljanje i klasifikaciju podataka, zatim obradu podataka i na kraju interpretaciju prikupljenih i obrađenih podataka koji će pomoći pravilnoj identifikaciji problema. Prvi korak u fazi identifikacije je selekcija podataka i informacija koje donosilac odluke nalazi iz različitih izvora. Glavni cilj selekcije je izdvajanje podataka i informacija koje su bitnije od ostalih za dati problem. Suština ove faze je prikupiti i obraditi podatke tako da se omogući formiranje modela odlučivanja.

Druga faza, definisanje problema, je svakako najvažnija faza procesa odlučivanja, jer od toga kako će se definisati problem zavisi i mogućnost njegovog rešavanja. Definisanje problema je izuzetno kompleksna aktivnost i kao takva može se raščlaniti na sledeće skupove aktivnosti:

- Identifikacija komponenti problema - proces uočavanja pojedinačnih komponenti problema, analiza njihovog sadržaja i analiza njihovih veza;
- Analiza povezanosti problema sa drugim problemima;
- Definisanje ciljeva koje treba ostvariti rešavanjem problema - ključni korak druge faze, ali i celine procesa odlučivanja, jer se isti donosilac odluke, u neizmenjenim uslovima, može različito ponašati u zavisnosti od postavljenog cilja;
- Definisanje mogućih načina ostvarenja postavljenih ciljeva - korak u kom je potrebno identifikovati moguće alternative ostvarenja cilja.

U trećoj fazi procesa odlučivanja vrši se analiza mogućih alternativa ostvarenja cilja, odnosno merenje efekata koji se mogu ostvariti ukoliko se te alternative realizuju. Procenat preciznosti definisanja i merenja efekata alternativa zavisi od stanja neizvesnosti u kojem se donosilac odluke nalazi. U ovoj fazi je potrebno svaku alternativu pojedinačno analizirati, odnosno izračunati rezultate u slučaju realizacije date alternative. Problem je potrebno posmatrati i šire, sa stanovišta uslova i ograničenja pod kojima se rezultati mogu postići. Stoga, u analizu treba uključiti i moguća stanja prirode koja određuju ograničenja, koja moraju da zadovolje dobijeni rezultati. Stanja prirode definišu se kao slučajni događaji, na koje donosilac odluke ne može da utiče. Ako se stanja prirode obeleže sa S_j , tada za posmatranu alternativu A_i donosilac odluke mora definisati rezultate koje treba postići posmatrano u odnosu na svako od mogućih stanja S_j koja je identifikovao. Stanja prirode mogu biti različita, tehnička, ekonomska i tako dalje, a sve u zavisnosti od problema koji se rešava. Rezultat treće faze je skup stanja prirode $S = S_j$ i skup efekata E . Ukoliko ima m alternativa i n mogućih stanja prirode, onda skup efekata E je matrica sa $m \cdot n$ elemenata.

$$E = (e_{ij}), i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n, \quad (6.1)$$

gde je: e_{ij} - efekti alternative u zavisnosti od nastupanja mogućih stanja S_j .

U zavisnosti od stepena neizvesnosti u kom se nalazi donosilac odluke, efekti alternativa e_{ij} mogu biti precizno definisani ili procenjeni.

Poslednja faza procesa odlučivanja podrazumeva izbor najbolje alternative rešenja problema odlučivanja. Izbor je jednostavan kada neka alternativa dominira nad drugima. To će biti ona alternativa čiji su efekti bolji u odnosu na efekte drugih alternativa. Međutim, takve situacije su retke i obično je neophodno dobijeni skup efekata vrednovati prema određenim kriterijumima. Kriterijum izbora optimalne alternative definiše donosilac odluke u skladu sa njegovim subjektivnim stavom. Kod modela višekriterijumskog odlučivanja uvek postoji dva ili više kriterijuma za izbor alternative.

U literaturi se mogu naći dva osnovna pristupa višestrukome odlučivanju - višeciljno odlučivanje i višekriterijumsko odlučivanje. Kod višeciljnog odlučivanja potrebno je selektovati jednu alternativu koja će maksimizirati vrednost funkcije cilja, dok se kod višekriterijumskog odlučivanja bira jedna alternativa uzimajući u obzir više kriterijuma.

Sve metode višekriterijumskog odlučivanja karakterišu sledeći zajednički elementi:

- Alternative - predstavljaju različite izbore akcija koje su na raspolaganju donosiocu odluke. Skup alternativa je ograničen skup, u opsegu od nekoliko do nekoliko stotina;
- Višestruki atributi - Atributi se drugačije nazivaju ciljevi ili kriterijumi odlučivanja. Atributi predstavljaju različite dimenzije sa kojih se posmatraju alternative. Kriterijumi mogu imati i svoje podkriterijume, koji se dalje mogu granati na nove kriterijume. Najčešće, metode višekriterijumskog odlučivanja pretpostavljaju samo jedan nivo kriterijuma, odnosno odsustvo hijerarhije, mada postoje i metode koje podrazumevaju hijerarhijsku strukturu kriterijuma (AHP metoda);
- Konfliktne kriterijumi - pošto su kriterijumi različite dimenzije istih alternativa, čest je slučaj da su oni u međusobnom konfliktu;
- Neuporedive jedinice - različiti kriterijumi imaju različite jedinice mere, pa su

međusobno neuporedivi. Koristeći metode višekriterijumskog odlučivanja, problem neuporedivih jedinica može biti rešen;

- Težine odluka - većina metoda višekriterijumskog odlučivanja zahteva da se kriterijumima dodele težine, prema njihovoj važnosti;
- Matrica odlučivanja - Problem višekriterijumskog odlučivanja najčešće se prikazuje u matričnom obliku, definisanjem matrice odlučivanja, kao u Tabeli 6.1. Redovi tabele sadrže detaljan opis ishoda alternativa A_i , po svim relevantnim karakteristikama C_j .

Tabela 6.1. Matrica odlučivanja

Alternative	Kriterijumi				
	C_1	C_2	C_3	...	C_n
	(w_1)	(w_2)	(w_3)		(w_n)
A_1	a_{11}	a_{12}	a_{13}	...	a_{1n}
A_2	a_{21}	a_{22}	a_{23}	...	a_{2n}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
A_m	a_{m1}	a_{m2}	a_{m3}	...	a_{mn}

Element matrice a_{ij} predstavlja osobine alternative A_i ($i = 1, 2, \dots, m$) kada je ona ocenjena prema kriterijumu odlučivanja C_j ($j = 1, 2, \dots, n$). U procesu odlučivanja donosilac odluke određuje težine relativnih osobina kriterijuma odlučivanja w_j ($j = 1, 2, \dots, n$).

Matematički osnov algoritma metoda višekriterijumske analize može se opisati kao izbor jedne iz konačnog niza m alternativa A_i ($i = 1, 2, \dots, m$) na osnovu n kriterijuma X_j ($j = 1, 2, \dots, n$). Svaka od alternativa predstavlja vektor $A_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{in})$, gde je x_{ij} vrednost j -tog atributa za i -tu alternativu. Da bi se model višekriterijumskog odlučivanja matematički formulisao, neophodne su informacije o svim alternativnim realizacijama procesa za koji se odluka donosi, kao i o ciljevima koje donosilac odluke želi da ostvari. Takođe, potrebno je utvrditi na koji način svaka od alternativa doprinosi ostvarenju postavljenog cilja. U zavisnosti od donosioca odluke, rešenje modela ne mora biti jedinstveno.

7. TERENSKA ISPITIVANJA RADA ROTORNOG BAGERA ER-1250 16/1,5

Terenska ispitivanja vrste i parametara reza izvršena su na rotornom bageru ER-1250 16/1,5 koji radi Površinskom kopu Gacko (Slika 7.1.). Ispitivanja su izvršena u veoma čvrstom materijalu sa otporom na kopanje od preko 1000 N/cm.



Slika 7.1. Rad rotornog bagera ER-1250 16/1,5 u bloku

Istraživanje se sastojalo u određivanju kapaciteta i merenju angažovane struje za pogon rotora, preko koje je izračunavana angažovana snaga za kopanje, specifični otpor materijala na kopanje i specifična potrošnja energije.

Tehnološki, u toku rada, ispitivanja kapaciteta su izvršena u zavisnosti od debljine reza (10, 15, 20 i 25 cm) i brzine okretanja strele rotora (12, 18 i 24 m/min).

Otkopavanje za iste parametre reza vršeno je prvo horizontalnim, a zatim i vertikalnim rezom, u bloku širine 25 m i visine 3,25 m.

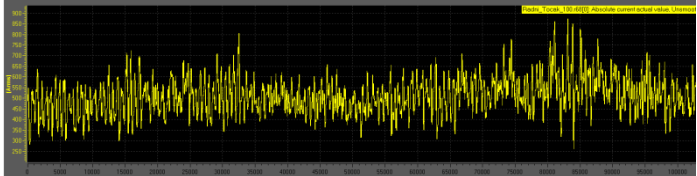
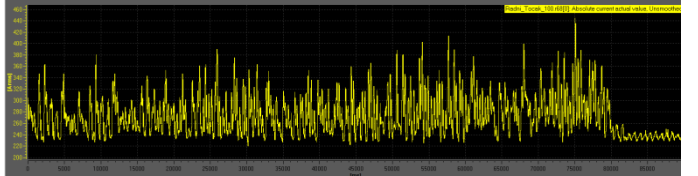
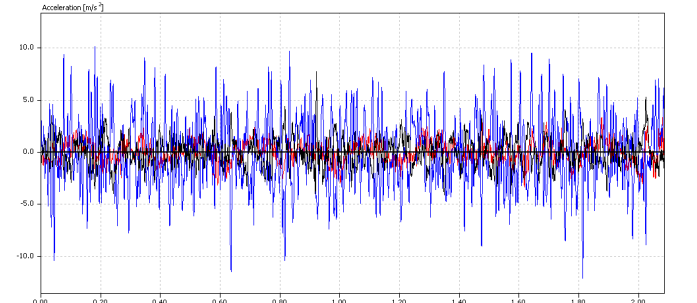
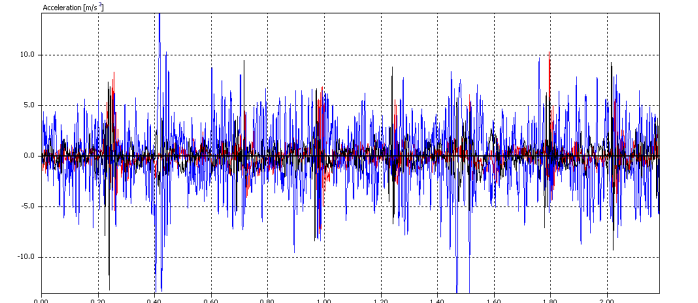
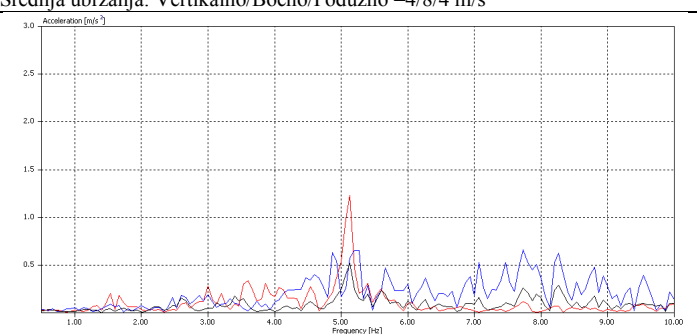
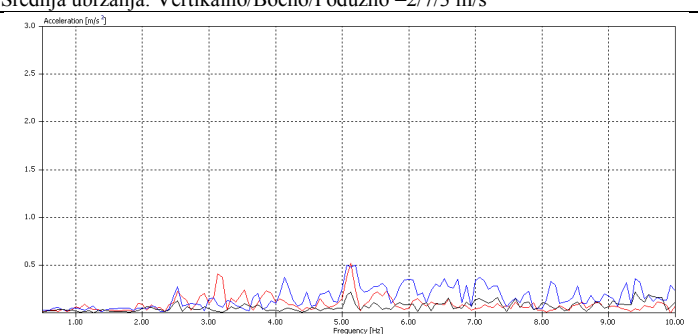
Istovremeno sa merenjem angažovane struje, vršeno je i merenje dinamičkog ponašanja bagera, merenjem ubrzanja na karakterističnim tačkama (momentna poluga reduktora), kao i merenje napona. Merenje ubrzanja vršeno je senzorom trokomponentnog ubrzanja VIBRO, Mikroelektronika Beograd - Analog device USA.

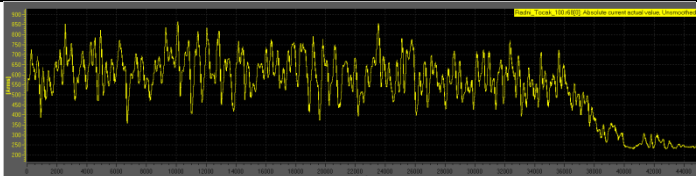
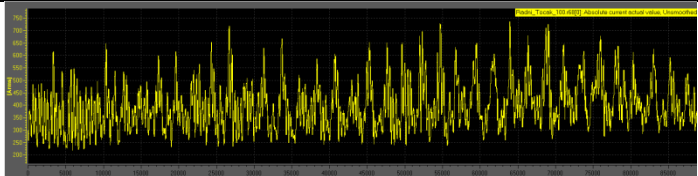
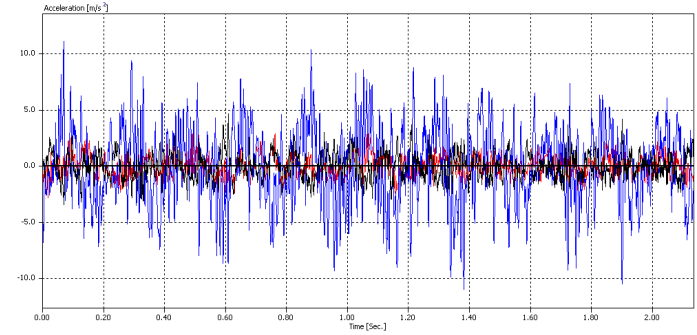
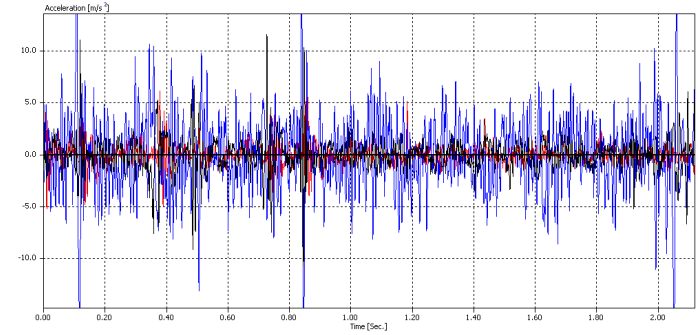
Pri radu sa horizontalnim rezovima maksimalna debljina odreska bila je 20 cm, jer je nakon ove vrednosti dolazilo do preopterećenja pogona rotora i kružnog kretanja. Sa vertikalnim rezovima otkopavanje je vršeno i sa 25 cm. Rezultati merenja su prikazani u Tabelama 7.1. - 7.3.

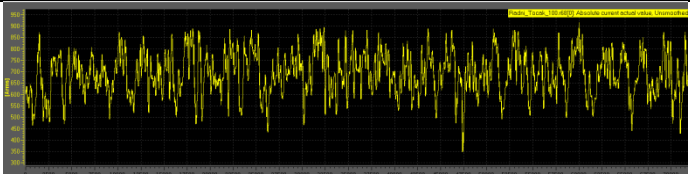

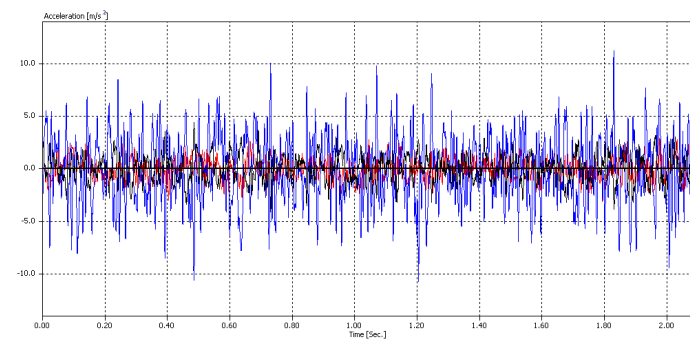
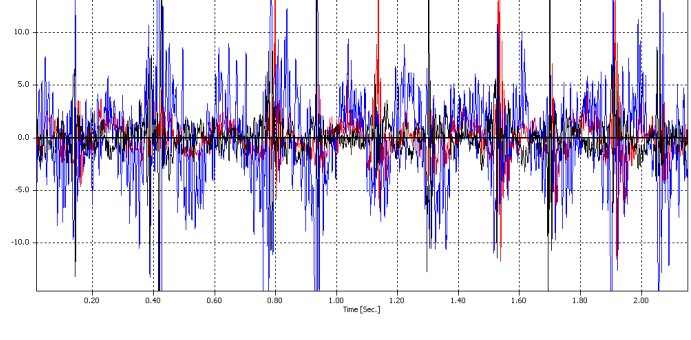
Tabela 7.1. Rezultati merenja angažovane struje za pogon rotora i otpora na kopanje

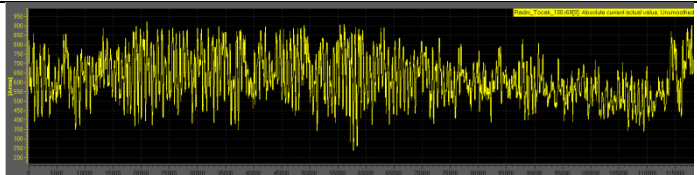
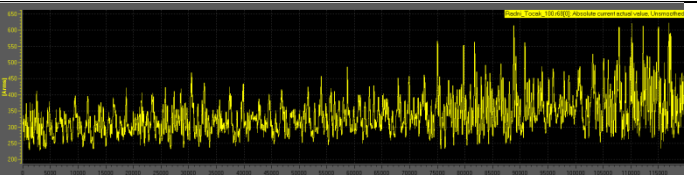
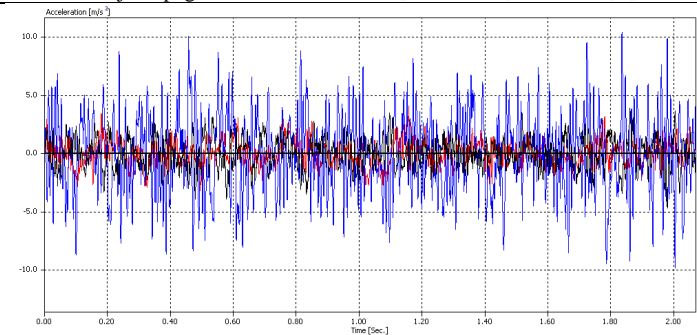
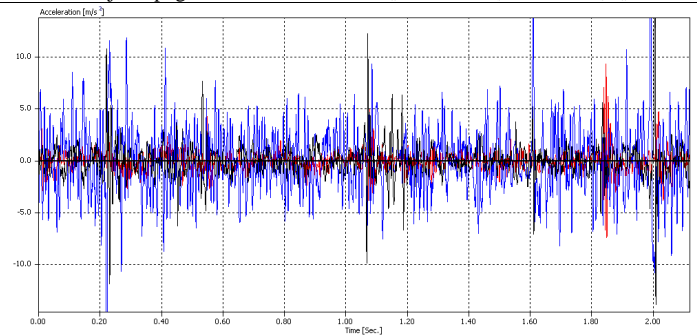
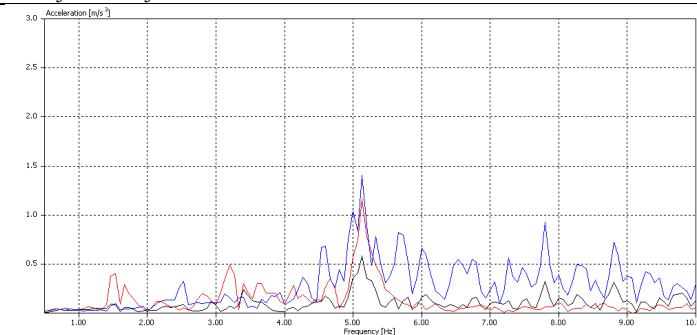
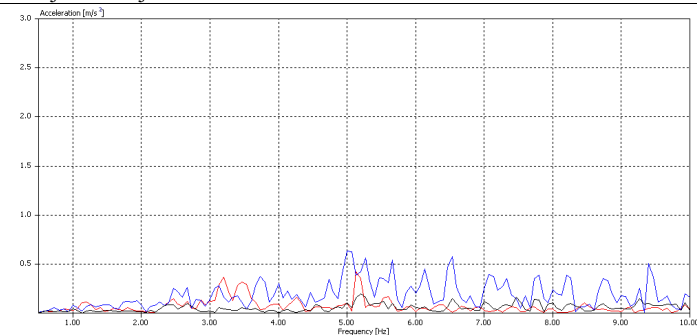
Vrsta reza	Debljina reza (m)	Brzina okretanja strele rotora (m/min)	Angažovana struja za pogon rotora (A)				Specifična potrošnja energije (kW/m ³)	Otpor na kopanje (N/cm)
			I _{max}	I _{min}	I _{sr}	I _{sr max}		
H O R I Z O N T A L N I	0,10	12	619,11	413,88	516,50	567,80	1,18	852
	0,10	18	702,95	488,43	595,69	649,32	0,90	711
	0,10	24	783,29	587,22	685,26	734,28	0,76	633
	0,15	12	777,88	373,18	575,53	676,71	0,94	883
	0,15	18	809,42	565,44	687,43	748,43	0,69	741
	0,15	24	817,44	596,26	706,85	762,15	0,53	602
	0,20	12	783,14	416,06	599,40	691,37	0,72	795
	0,20	18	811,54	629,47	720,50	766,02	0,53	682
	0,20	24	834,50	673,65	754,08	794,29	0,41	576
V E R T I K A L N I	0,10	12	425,26	310,42	368,34	396,80	0,81	587
	0,10	18	472,90	315,13	394,02	433,46	0,60	475
	0,10	24	478,32	326,57	402,45	440,38	0,46	379
	0,15	12	425,52	310,42	367,97	396,75	0,55	517
	0,15	18	520,71	314,94	417,83	469,27	0,43	464
	0,15	24	546,99	365,19	456,09	501,54	0,35	397
	0,20	12	550,00	329,22	439,61	494,80	0,51	571
	0,20	18	558,67	367,96	463,32	510,99	0,35	456
	0,20	24	698,53	472,66	585,60	642,07	0,33	471

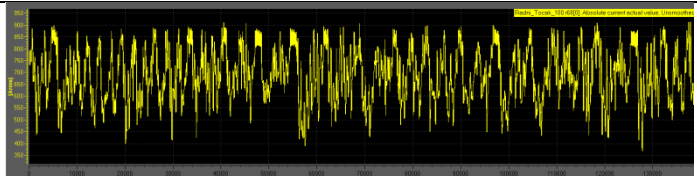
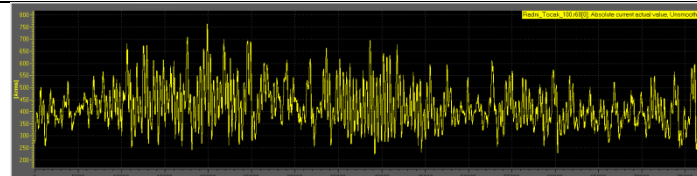
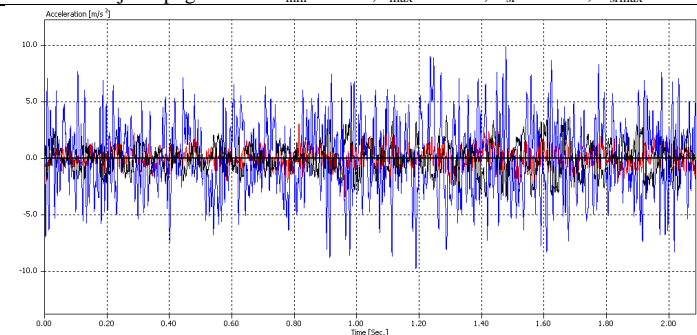
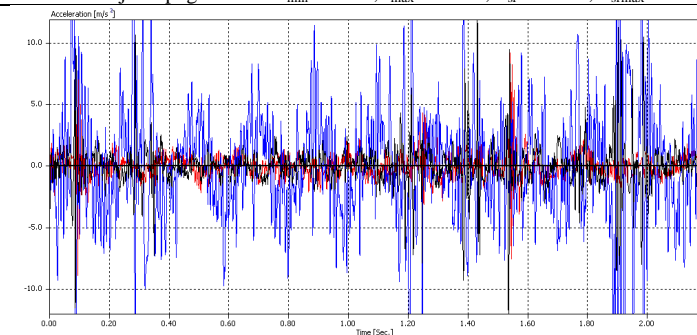
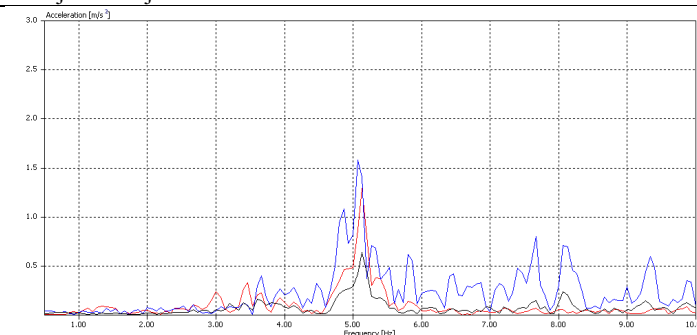
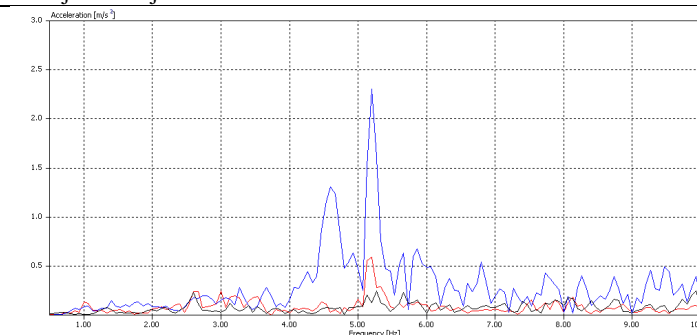
Tabela 7.2. Uporedni prikaz rezultata izvršenih merenja

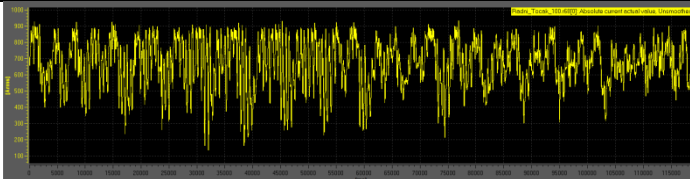
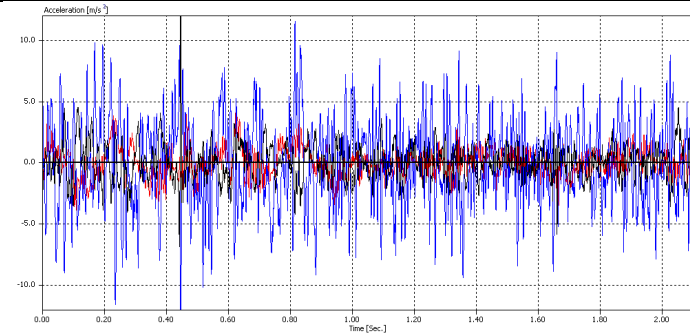
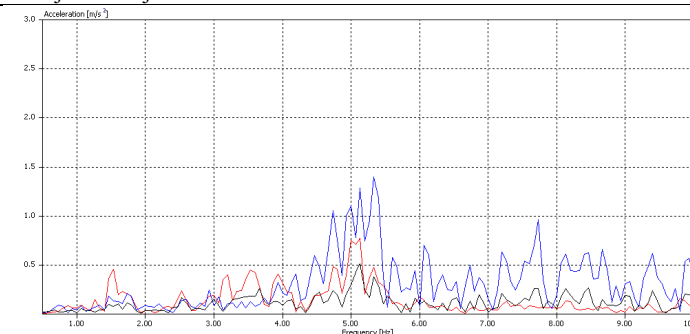
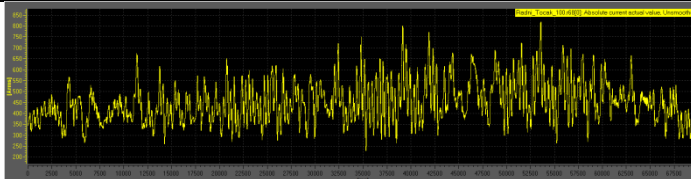
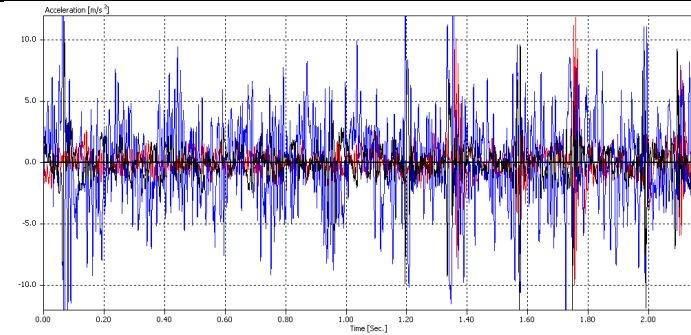
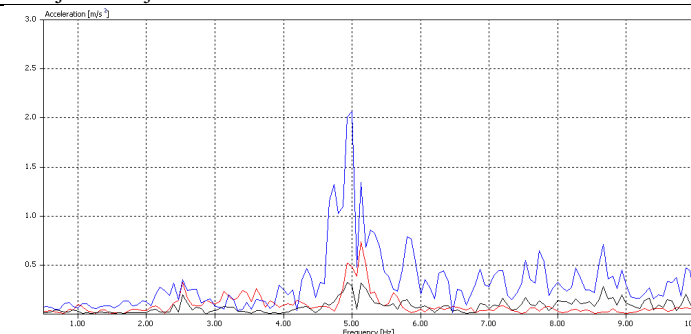
M. br.	H (m)	c (m)	Vb (m/min)	Horizontalni rez	Vertikalni rez
1	3,25	0,10	12	 <p>Izmerena struja za pogon rotora $I_{min}=414$ A; $I_{max}= 620$ A; $I_{sr}=516$ A; $I_{srmax}=568$ A</p>	 <p>Izmerena struja za pogon rotora $I_{min}=293$ A; $I_{max}= 423$ A; $I_{sr}=358$ A; $I_{srmax}=391$ A</p>
				 <p>Srednja ubrzanja: Vertikalno/Bočno/Podužno =4/8/4 m/s²</p>	 <p>Srednja ubrzanja: Vertikalno/Bočno/Podužno =2/7/3 m/s²</p>
					
Kapacitet: 234 m ³ /h.				Amplitude ubrzanja na 5,1 Hz = V/B/P = 1,2/0,7/0,5 m/s ²	Amplitude ubrzanja na 5,1 Hz = V/B/P = 0,5/0,5/0,5 m/s ²
<p>Komentari:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Angažovana snaga pri radu sa horizontalnim rezom bila je veća za oko 45 %, a specifična potrošnja energije je veća za oko 0,4 kW/m³. - Dinamika rada pokazuje da je kod horizontalnog reza ubrzanje veće u svim pravcima i nepovoljno utiče na strukturu bagera. - Pobuda izazvana horizontalnim rezom je izraženija i nepovoljnija od pobude izazvane vertikalnim rezom. 					

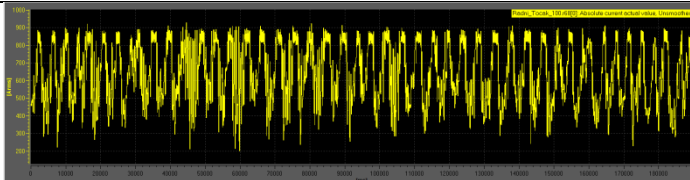
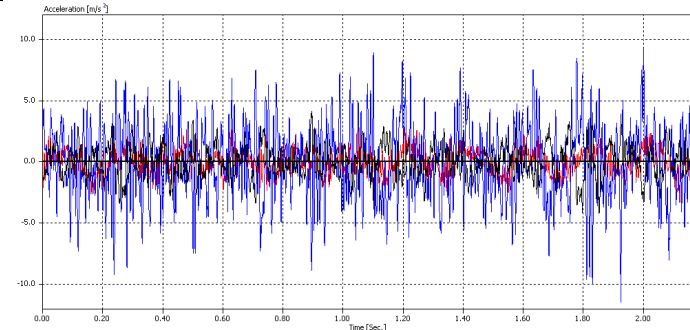
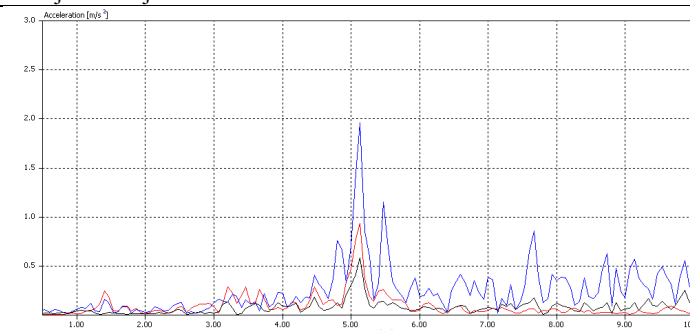
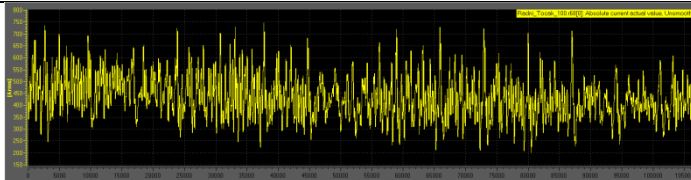
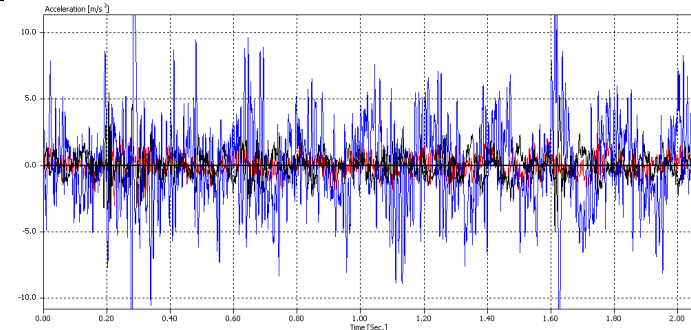
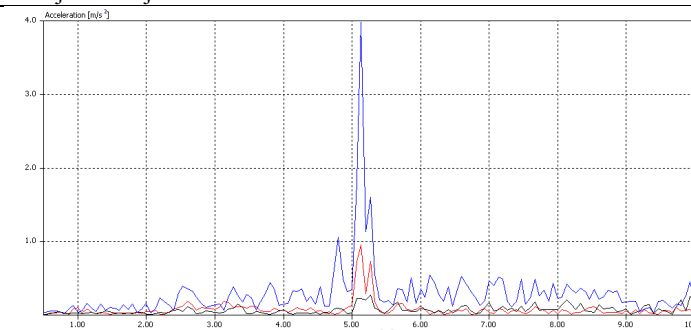
M. br.	H (m)	c (m)	Vb (m/min)	Horizontalni rez	Vertikalni rez
2	3.25	0,10	18		
				Izmerena struja za pogon rotora $I_{min}=488$ A; $I_{max}=703$ A; $I_{sr}=596$ A; $I_{srmax}=649$ A	Izmerena struja za pogon rotora $I_{min}=315$ A; $I_{max}=473$ A; $I_{sr}=394$ A; $I_{srmax}=433$ A
					
				Srednja ubrzanja: Vertikalno/Bočno/Podužno = 3/9/3 m/s^2	Srednja ubrzanja: Vertikalno/Bočno/Podužno = 5/7/5 m/s^2
Kapacitet: 351 m^3/h			Amplitude ubrzanja na 5,1 Hz = $V/B/P = 1,1/3/0,8$ m/s^2	Amplitude ubrzanja na 5,1 Hz = $V/B/P = 1,2/0,8/0,7$ m/s^2	
Komentari: - Angažovana snaga pri radu sa horizontalnim rezom bila je veća za oko 50 %, a specifična potrošnja energije je veća za oko 0,3 kW/m^3 . - Dinamika rada pokazuje da je kod horizontalnog reza ubrzanje veće i nepovoljno utiče na strukturu bagera. - Pobuda izazvana horizontalnim rezom je izraženija i nepovoljnija od pobude izazvane vertikalnim rezom.					

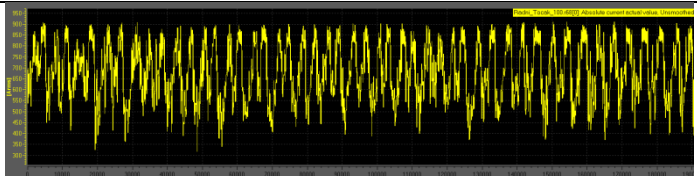
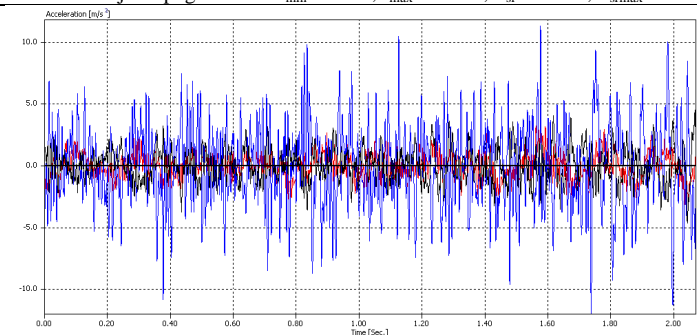
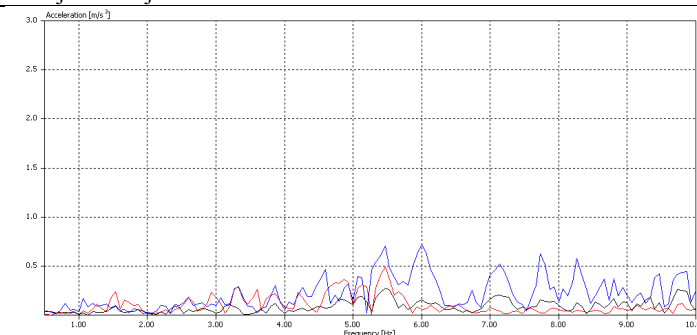
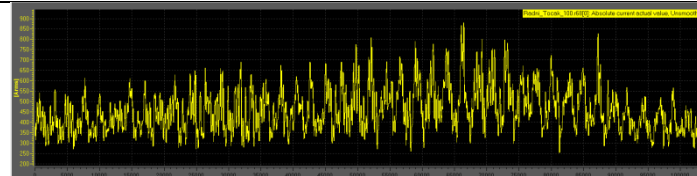
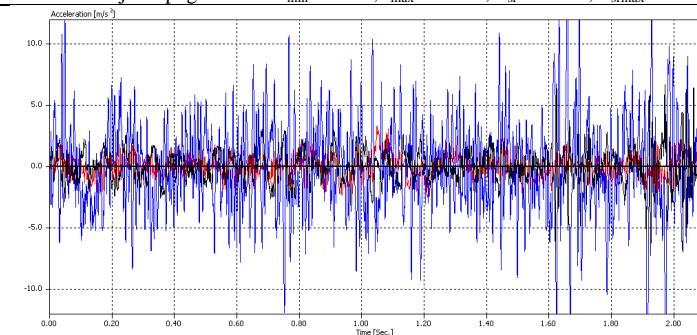
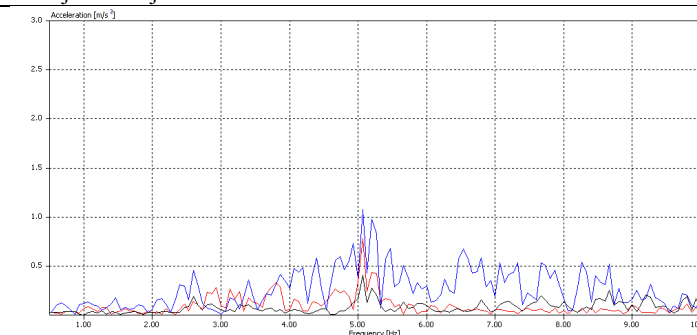
M. br.	H (m)	c (m)	Vb (m/min)	Horizontalni rez	Vertikalni rez
3	3,25	0,10	24		
				Izmerena struja za pogon rotora $I_{min}=587$ A; $I_{max}=783$ A; $I_{sr}=685$ A; $I_{srmax}=734$ A	Izmerena struja za pogon rotora $I_{min}=326$ A; $I_{max}=478$ A; $I_{sr}=402$ A; $I_{srmax}=440$ A
					
				Srednja ubrzanja: Vertikalno/Bočno/Podužno =3/7/3 m/s ²	Srednja ubrzanja: Vertikalno/Bočno/Podužno =4/7/3 m/s ²
Kapacitet: 468 m ³ /h				Amplitude ubrzanja na 5,1 Hz = V/B/P = 0,8/1,5/0,6 m/s ²	Amplitude ubrzanja na 5,1 Hz = V/B/P = 1,1/2,3/0,6 m/s ²
Komentari: - Angažovana snaga pri radu sa horizontalnim rezom bila je veća za oko 60 %, specifična potrošnja energije je veća za oko 0,3 kW/m ³ . - Dinamika rada pokazuje da je kod horizontalnog reza ubrzanje veće i nepovoljno utiče na strukturu bagera. - Pobuda izazvana horizontalnim rezom je izraženija i nepovoljnija od pobude izazvane vertikalnim rezom. Sa slike se vidi pojačan uticaj vertikalnog reza u bočnom pravcu.					

M. br.	H (m)	c (m)	Vb (m/min)	Horizontalni rez	Vertikalni rez
4	3,25	0,15	12	 <p>Izmerena struja za pogon rotora $I_{min}=373$ A; $I_{max}= 778$ A; $I_{sr} =576$ A; $I_{srmax}=677$ A</p>	 <p>Izmerena struja za pogon rotora $I_{min}=310$ A; $I_{max}= 425$ A; $I_{sr} =368$ A; $I_{srmax}=397$ A</p>
				 <p>Srednja ubrzanja: Vertikalno/Bočno/Podužno =4/8/4 m/s²</p>	 <p>Srednja ubrzanja: Vertikalno/Bočno/Podužno =3/6/2 m/s²</p>
					
Kapacitet: 351 m ³ /h				Amplitude ubrzanja na 5,1 Hz = V/B/P = 1,2/1,4/0,6 m/s ²	Amplitude ubrzanja na 5,1 Hz = V/B/P = 0,7/0,4/0,2 m/s ²
<p>Komentari:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Angažovana snaga pri radu sa horizontalnim rezom bila je veća za oko 70 %. specifična potrošnja energije je veća za oko 0,4 kW/m³ . - Dinamika rada pokazuje da je kod horizontalnog reza ubrzanje veće i nepovoljno utiče na strukturu bagera. - Pobuda izazvana horizontalnim rezom je izraženija i nepovoljnija od pobude izazvane vertikalnim rezom u bočnom pravcu. 					

M. br.	H (m)	c (m)	Vb (m/min)	Horizontalni rez	Vertikalni rez
5	3,25	0,15	18		
				Izmerena struja za pogon rotora $I_{min}=565$ A; $I_{max}=809$ A; $I_{sr}=687$ A; $I_{srmax}=748$ A	Izmerena struja za pogon rotora $I_{min}=473$ A; $I_{max}=520$ A; $I_{sr}=394$ A; $I_{srmax}=433$ A
					
				Srednja ubrzanja: Vertikalno/Bočno/Podužno = 4/8/4 m/s ²	Srednja ubrzanja: Vertikalno/Bočno/Podužno = 3/8/3 m/s ²
					
Kapacitet: 526,50 m ³ /h				Amplitude ubrzanja na 5,1 Hz = V/B/P = 1,4/1,6/0,6 m/s ²	Amplitude ubrzanja na 5,1 Hz = V/B/P = 0,6/2,3/0,3 m/s ²
<p>Komentari:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Angažovana snaga pri radu sa horizontalnim rezom bila je veća za oko 60 %, specifična potrošnja energije je veća za oko 0,25 kW/m³. - Dinamika rada pokazuje da je kod horizontalnog i vertikalnog reza ubrzanje slično. - Pobuda izazvana horizontalnim rezom je izraženija i nepovoljnija od pobude izazvane vertikalnim rezom. Sa slike se vidi pojačan uticaj vertikalnog reza samo u bočnom pravcu. 					

M. br.	H (m)	c (m)	Vb (m/min)	Horizontalni rez	Vertikalni rez
6	3,25	0,15	24	 <p>Izmerena struja za pogon rotora $I_{min}=596$ A; $I_{max}=817$ A; $I_{sr}=707$ A; $I_{srmax}=762$ A</p>  <p>Srednja ubrzanja: Vertikalno/Bočno/Podužno = 3/8/3 m/s²</p>  <p>Amplitude ubrzanja na 5,1 Hz = V/B/P = 0,8/1,3/0,5 m/s²</p>	 <p>Izmerena struja za pogon rotora $I_{min}=365$ A; $I_{max}=547$ A; $I_{sr}=456$ A; $I_{srmax}=502$ A</p>  <p>Srednja ubrzanja: Vertikalno/Bočno/Podužno = 3/7/2 m/s²</p>  <p>Amplitude ubrzanja na 5,1 Hz = V/B/P = 0,7/2/0,3 m/s²</p>
Kapacitet 526,50 m ³ /h				<p>Komentari:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Angažovana snaga pri radu sa horizontalnim rezom bila je veća za oko 50 %, specifična potrošnja energije je veća za oko 0,20 kW/m³. - Dinamika rada pokazuje da je kod horizontalnog reza ubrzanje veće i nepovoljno utiče na strukturu bagera. - Pobuda izazvana horizontalnim rezom je izraženija i nepovoljnija od pobude izazvane vertikalnim rezom. Sa slike se vidi pojačan uticaj vertikalnog reza u bočnom pravcu. 	

M. br.	H (m)	c (m)	Vb (m/min)	Horizontalni rez	Vertikalni rez
7	3,25	0,20	12	 <p>Izmerena struja za pogon rotora $I_{min}=416$ A; $I_{max}=783$ A; $I_{sr}=599$ A; $I_{srmax}=691$ A</p>  <p>Srednja ubrzanja: Vertikalno/Bočno/Podužno = 4/8/4 m/s²</p> 	 <p>Izmerena struja za pogon rotora $I_{min}=329$ A; $I_{max}=550$ A; $I_{sr}=440$ A; $I_{srmax}=495$ A</p>  <p>Srednja ubrzanja: Vertikalno/Bočno/Podužno = 2/6/2 m/s²</p> 
Kapacitet: 468 m ³ /h				Amplitude ubrzanja na 5,1 Hz = V/B/P = 0,9/2/0,9 m/s ²	Amplitude ubrzanja na 5,1 Hz = V/B/P = 1/4/0,2 m/s ²
<p>Komentari:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Angažovana snaga pri radu sa horizontalnim rezom bila je veća za oko 40 %, specifična potrošnja energije je veća za oko 0,2 kW/m³. - Dinamika rada pokazuje da je kod horizontalnog reza ubrzanje veće i nepovoljno utiče na strukturu bagera. - Pobuda izazvana horizontalnim rezom je izraženija i nepovoljnija od pobude izazvane vertikalnim rezom. Sa slike se vidi pojačan uticaj vertikalnog reza u bočnom pravcu. 					

M. br.	H (m)	c (m)	Vb (m/min)	Horizontalni rez	Vertikalni rez
8	3,25	0,20	18	 <p>Izmerena struja za pogon rotora $I_{min}=629$ A; $I_{max}=811$ A; $I_{sr}=720$ A; $I_{srmax}=766$ A</p>  <p>Srednja ubrzanja: Vertikalno/Bočno/Podužno = 4/8/4 m/s²</p>  <p>Amplitude ubrzanja na 5,2 Hz = $V/B/P = 0,6/0,7/0,3$ m/s²</p>	 <p>Izmerena struja za pogon rotora $I_{min}=368$ A; $I_{max}=559$ A; $I_{sr}=463$ A; $I_{srmax}=511$ A</p>  <p>Srednja ubrzanja: Vertikalno/Bočno/Podužno = 3/7/3 m/s²</p>  <p>Amplitude ubrzanja na 5,1 Hz = $V/B/P = 0,8/1/0,4$ m/s²</p>
Kapacitet: 702 m ³ /h				Komentari:	
<p>- Angažovana snaga pri radu sa horizontalnim rezom bila je veća za oko 50 %, specifična potrošnja energije je veća za oko 0,15 kW/m³.</p> <p>- Dinamika rada pokazuje da je kod horizontalnog reza ubrzanje veće i nepovoljno utiče na strukturu bagera.</p> <p>- Pobuda izazvana horizontalnim rezom je izraženija i nepovoljnija od pobude izazvane vertikalnim rezom. Sa slike se vidi pojačan uticaj vertikalnog reza u bočnom pravcu.</p>					

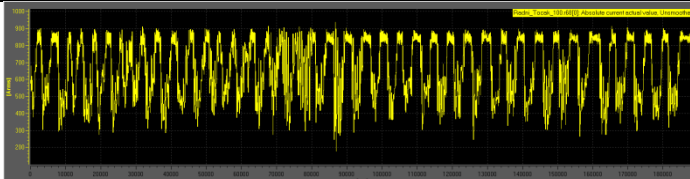
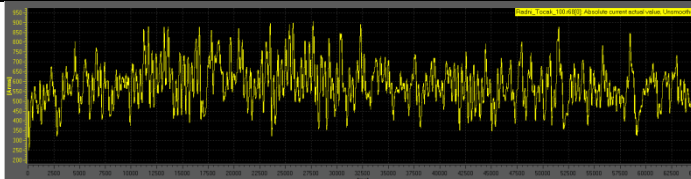
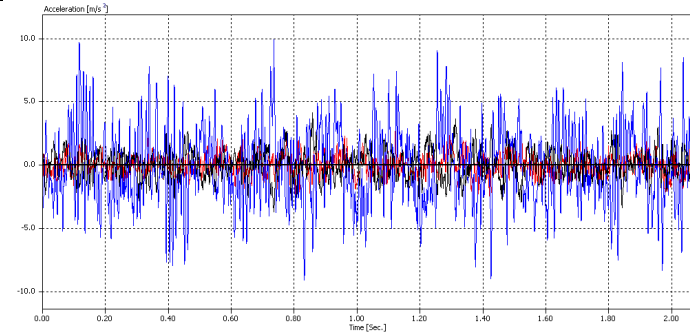
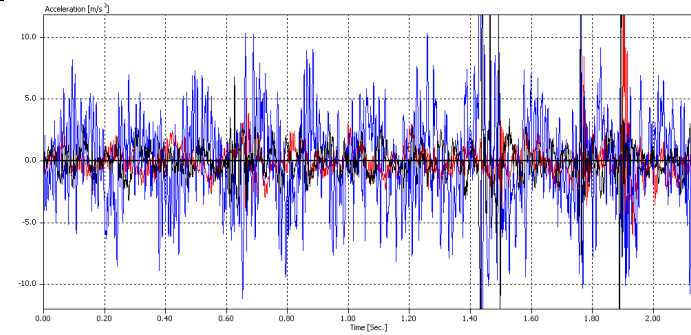
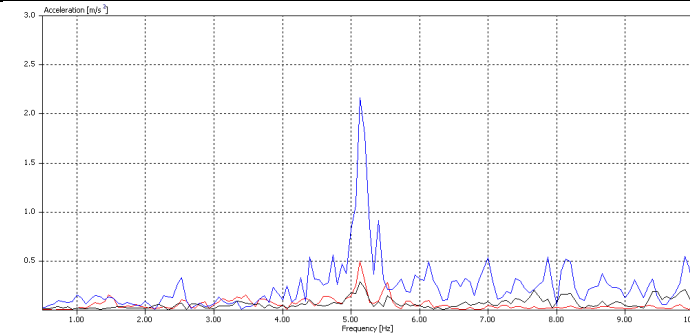
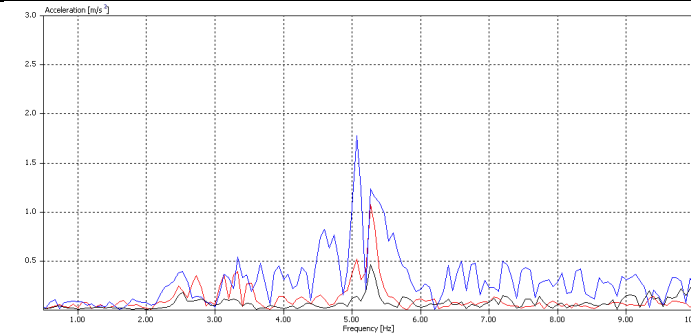
M. br.	H (m)	c (m)	Vb (m/min)	Horizontalni rez	Vertikalni rez
9	3,25	0,20	24		
				Izmerena struja za pogon rotora $I_{min}=674$ A; $I_{max}= 834$ A; $I_{sr} =754$ A; $I_{srmax}=794$ A	Izmerena struja za pogon rotora $I_{min}=473$ A; $I_{max}= 699$ A; $I_{sr} =586$ A; $I_{srmax}=642$ A
					
				Srednja ubrzanja: Vertikalno/Bočno/Podužno =4/8/4 m/s ²	Srednja ubrzanja: Vertikalno/Bočno/Podužno =2/7/3 m/s ²
Kapacitet: 936 m ³ /h					
Amplitude ubrzanja na 5,1 Hz = V/B/P = 0,5/2,2/0,3 m/s ²				Amplitude ubrzanja na 5,1 Hz = V/B/P = 1,1/1,8/0,5 m/s ²	
<p>Komentari:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Angažovana snaga pri radu sa horizontalnim rezom bila je veća za oko 25 %, specifična potrošnja energije je veća za oko 0,10 kW/m³ . - Dinamika rada pokazuje da je kod horizontalnog reza ubrzanje veće i nepovoljno utiče na strukturu bagera. - Pobuda izazvana horizontalnim rezom je izraženija i nepovoljnija od pobude izazvane vertikalnim rezom. 					

Tabela 7.3. Rezultati merenja za vertikalni rez debljine 0,25 m i brzinu okretanja strele rotora od 24 m/min

M. br.	H (m)	c (m)	Vb (m/min)	Vertikalni rez - levo	Vertikalni rez - desno
				Izmerena struja za pogon rotora $I_{min}=574$ A; $I_{max}=793$ A; $I_{sr}=638$ A; $I_{srmax}=738$ A	Izmerena struja za pogon rotora $I_{min}=512$ A; $I_{max}=783$ A; $I_{sr}=647$ A; $I_{srmax}=715$ A
	3,25	0,25	8		
				Srednja ubrzanja: Vertikalno/Bočno/Podužno =3/9/3 m/s ²	Srednja ubrzanja: Vertikalno/Bočno/Podužno =3/7/3m/s ²
				Kapacitet: 1170 m ³ /h Amplitude ubrzanja na 5,1 Hz = V/B/P = 1,3/1,8/0,7 m/s ²	Kapacitet: 1170 m ³ /h Amplitude ubrzanja na 5,1 Hz = V/B/P = 1,5/2,7/0,5 m/s ²
Komentari: - Angažovana snaga pri radu sa vertikalnim rezom u desno bile je veće za oko 3 %. - Dinamika rada pokazuje da je ubrzanje bilo u sličnim vrednostima. - Pobuda izazvana pri radu u desnu stranu bila je izraženija.					

8. ANALIZA PONAŠANJA ROTORNOG BAGERA ER-1250 16/1,5 PRI OTKOPAVANJU MATERIJALA SA POVEĆANOM ČVRSTOĆOM

Analiza ponašanja rotornog bagera ER-1250 16/1,5 pri radu u tvrdim materijalima izvršena je odvojeno za rad sa horizontalnim i vertikalnim rezovima pri radu sa parametrima odreska koji su bili istovetni za obe vrste reza. Merenja su izvršena za različite parametre reza i odreska (debljina i širina) i to: za debljinu reza 0,10, 0,15 i 0,20 m, širine odrezka 16, 24 i 30 cm, odnosno za brzinu okretanja strele rotora od 12, 18 i 24 m/min.

Tokom istraživanja vršena su merenja angažovane struje za pogon rotora. Istovremeno merena je dinamika rada rotornog bagera merenjem ubrzanja na momentnoj poluzi reduktora rotora. Kontrolno je vršeno i merenje napona na konstrukciji strele rotora.

Izvršena je analiza sledećih parametara za različite vrste rezova i parametre odreska, i to:

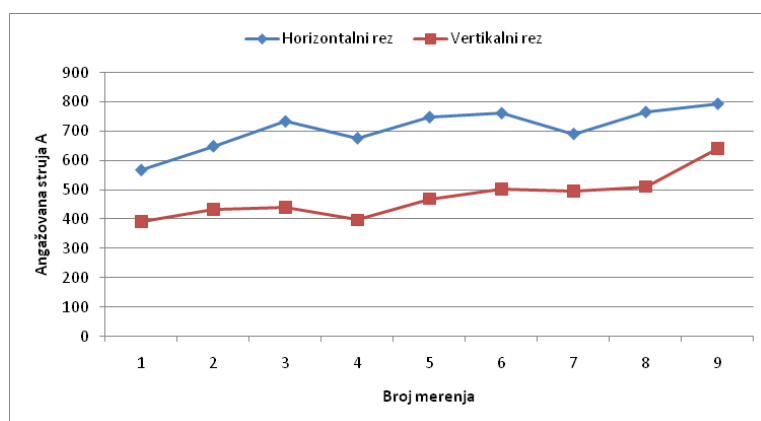
- analiza angažovane struje za pogon rotora (snage koja proizilazi iz angažovane struje),
- analiza specifične potrošnje energije za različite vrste rezova i različite odnose debljine i širine odrezaka,
- analiza specifične sile kopanja i otpora materijala na kopanje i
- analiza dinamičkog ponašanja bagera pri radu sa različitim vrstama rezova.

Angažovana struja za pogon rotora

Sprovedena istraživanja pokazuju sledeće rezultate:

- Angažovana struja, pa samim tim i snaga pri otkopavanju materijala horizontalnim rezovima je veća u proseku za oko 50% u odnosu na dobijene vrednosti pri merenju sa vertikalnim rezovima. Prosečna vrednost angažovane struje (srednja maksimalna vrednost) pri radu sa horizontalnim rezovima bila je 710 A, dok je pri radu sa vertikalnim rezovima ova vrednost bila 475 A;

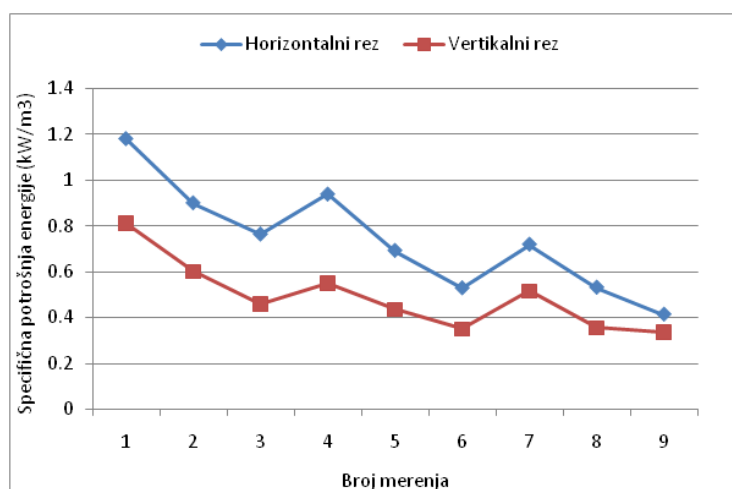
- Sa horizontalnim rezovima pri debljini odreska od 20 cm i brzini okretanja strele rotora od 24 m/min dobijene su maksimalne vrednosti snage pri čemu su pogoni rotora i kružnog kretanja bili pred preopterećenjem;
- Sa vertikalnim rezovima bilo je moguće otkopavanje i sa debljinom reza od 0,25 m. Razlog ovome je što rotorni bager pri radu sa vertikalnim rezovima raspolaže većom reznom silom, a samim tim i mogućnošću da za isti otpor materijala kopanju može ostvariti veći kapacitet.



Slika 8.1. Angažovana struja za pogon rotora za različite tipove rezova i parametre odreska

Odnos debljine i širine odreska i potrošnja energije

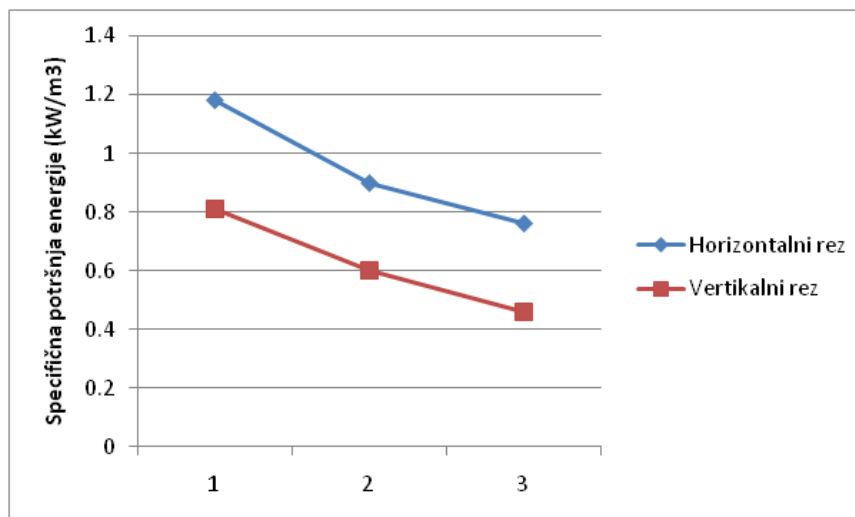
Potrošnja energije je izračunata u funkciji angažovane snage i ostvarenog kapaciteta. Specifična potrošnja energije pri radu sa vertikalnim rezovima je u proseku manja (Slika 8.2.).



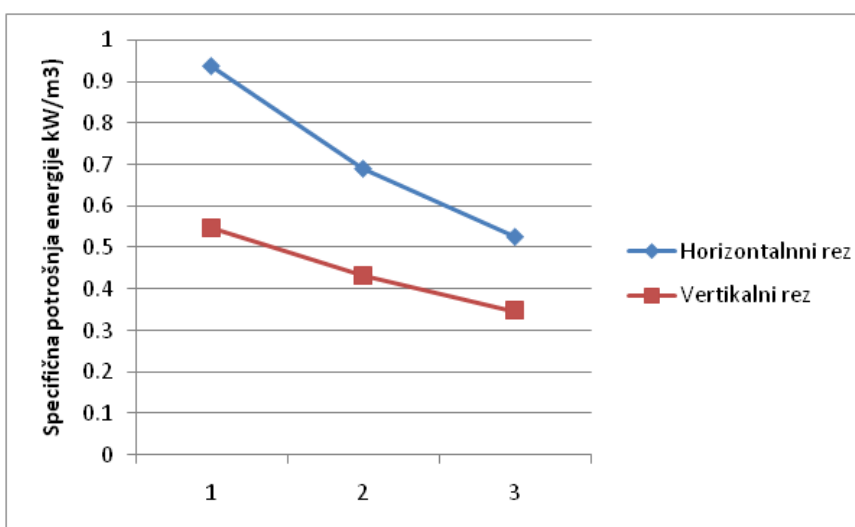
Slika 8.2. Specifična potrošnja energije za različite tipove rezova i parametre odreska

Merenja angažovane struje (snage) pokazala su da je za iste uslove rada (parametri odreska - odnos debljine i širine odreska) specifična potrošnja energije kod primene horizontalnog reza veća za oko 50% u odnosu na vertikalni rez.

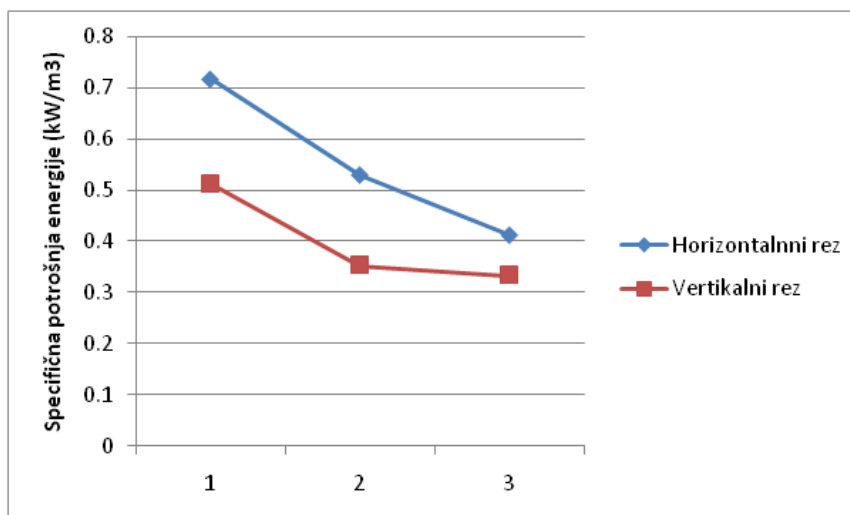
Na Slikama 8.3. – 8.8., prikazana je promena specifične potrošnje energije za različite debljine i širine odrezaka, odnosno debljine 10 cm, 15 cm i 20 cm i širine odrezaka – 16 cm, 24 cm i 30 cm.



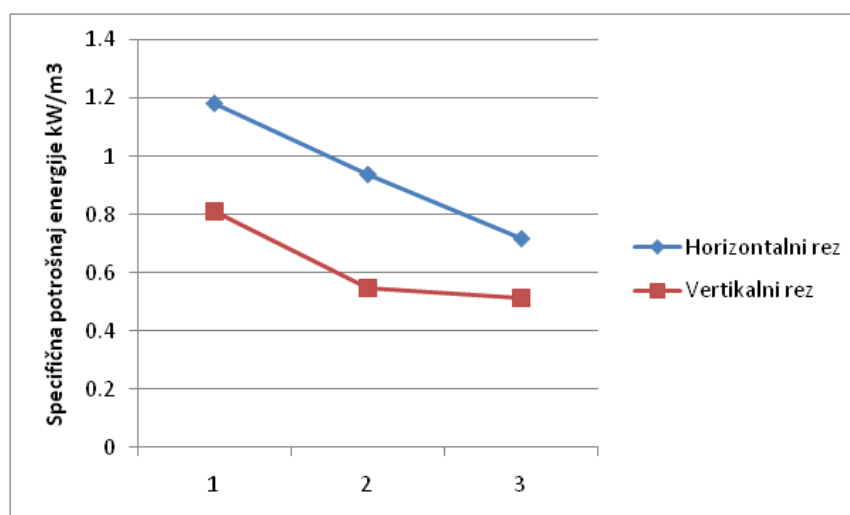
Slika 8.3. Specifična potrošnja energije za debljinu reza 10 cm i širine odrezaka 16 cm (1), 24 cm (2) i 30 cm (3)



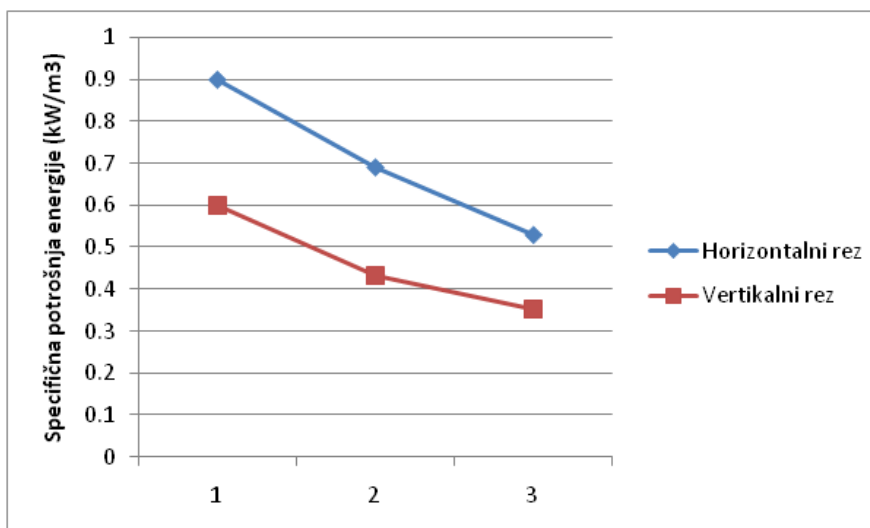
Slika 8.4. Specifična potrošnja energije za debljinu reza 15 cm i širine odrezaka 16 cm (1), 24 cm (2) i 30 cm (3)



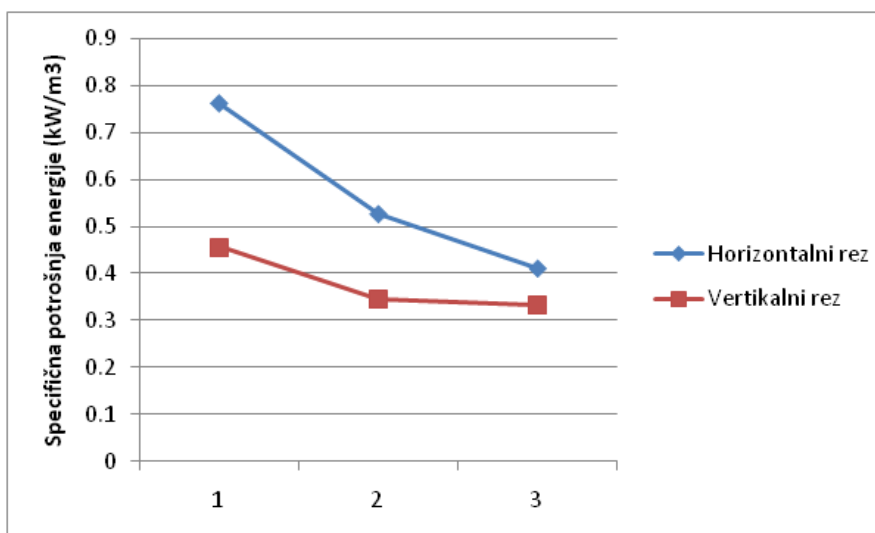
Slika 8.5. Specifična potrošnja energije za debljinu reza 20 cm i širine odrezaka 16 cm (1), 24 cm (2) i 30 cm (3)



Slika 8.6. Specifična potrošnja energije za širinu odreska 16 cm i debljinu reza 10 cm (1), 15 cm (2) i 20 cm (3)



Slika 8.7. Specifična potrošnja energije za širinu odreska 24 cm i debljinu reza 10 cm (1), 15 cm (2) i 20 cm (3)

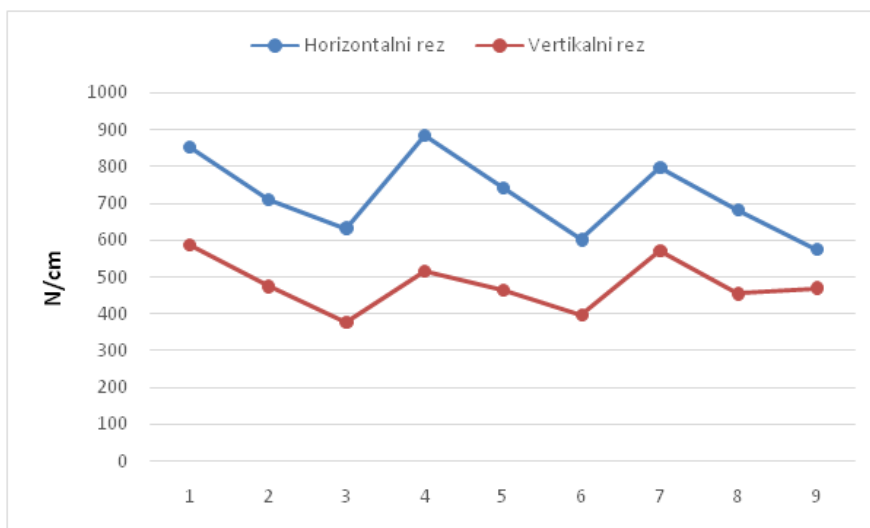


Slika 8.8. Specifična potrošnja energije za širinu odreska 30 cm i debljinu reza 10 cm (1), 15 cm (2) i 20 cm (3)

Generalno sa povećanjem debljine i širine odreska i njihovim odnosom se smanjuje specifična potrošnja energije, s tim da je kod primene vertikalnog reza ona manja.

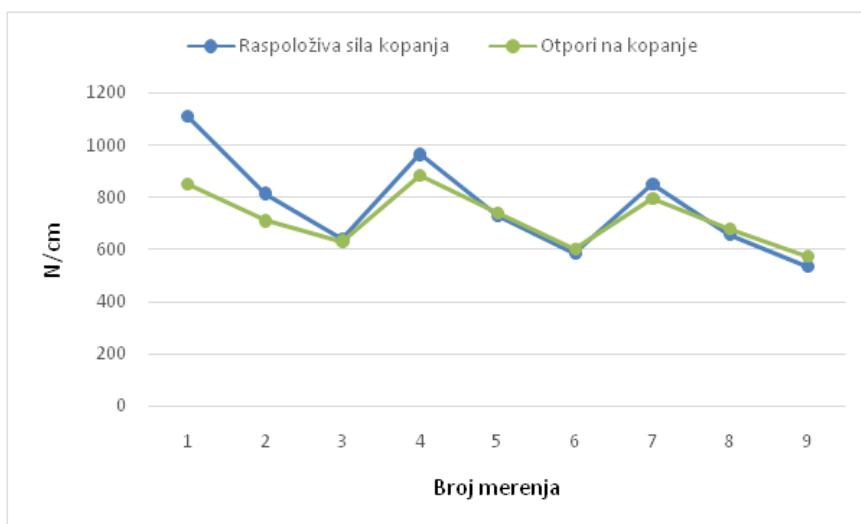
Odnos raspoložive sile kopanja i izmerenih otpora na kopanje

Raspoloživa sila kopanja se menja u funkciji parametara odreska i snage potrebne za kopanje i podizanje materijala do visine pražnjenja. Na Slici 8.9. prikazan je izmereni otpor materijala na kopanje pri otkopavanju horizontalnim i vertikalnim rezom.

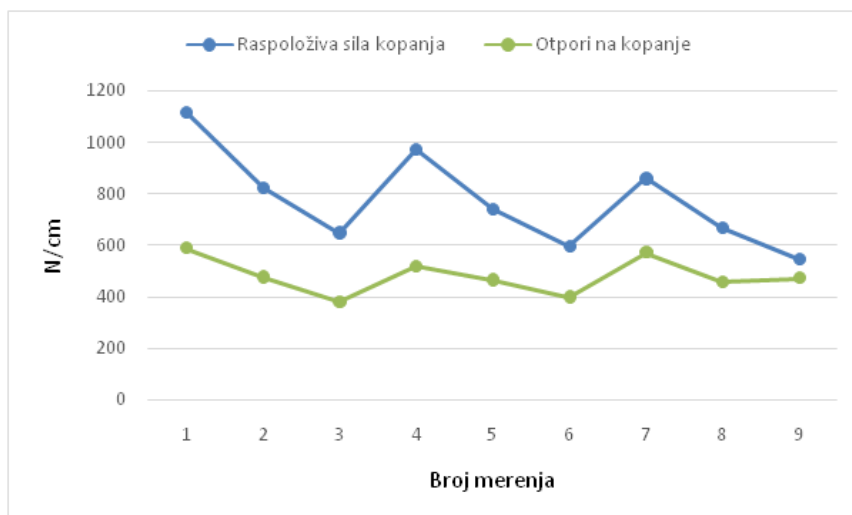


Slika 8.9. Uporedni prikaz izmerenih otpora na kopanje pri otkopavanju horizontalnim i vertikalnim rezom

Na Slikama 8.10. i 8.11. prikazan je odnos raspoložive sile kopanja i izmerenog otpora na kopanje za vertikalni i horizontalni rez. Sa Slike 8.10. se može videti da su kod horizontalnog reza, sa brzinom kružnog kretanja od 24 m/min i debljinom reza od 20 cm, otpori veći od raspoložive sile kopanja, što je rezultiralo preterećenjima motora za pogon rotora i kružnog kretanja.



Slika 8.10. Odnos raspoložive sile kopanja i izmerenih otpora na kopanje kod otkopavanja sa horizontalnim rezom



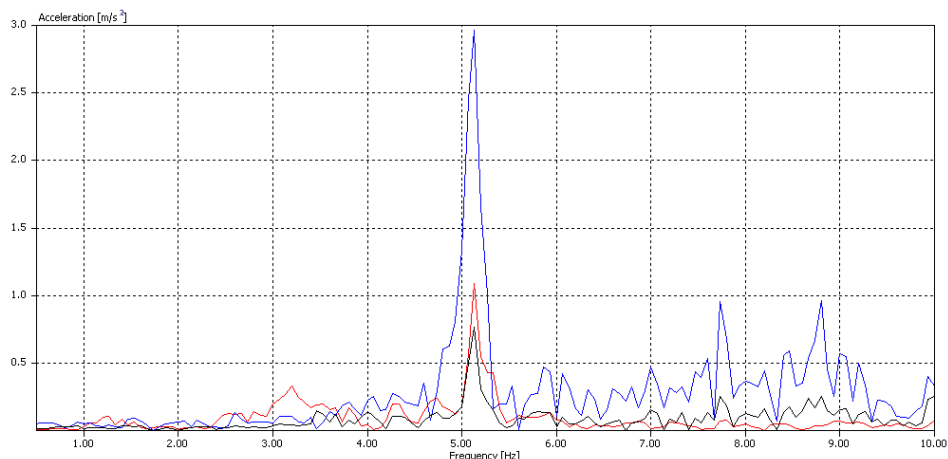
Slika 8.11. Odnos raspoložive sile kopanja i izmerenih otpora na kopanje kod otkopavanja sa vertikalnim rezom

Merenja su pokazala da je veći otpor na kopanje kod primene horizontalnih rezova. Prosečne dobijene vrednosti kod rada sa horizontalnim rezovima (720 N/cm) su veće za oko 50% u poređenju sa prosečnim vrednostima dobijenim pri radu sa vertikalnim rezovima (480 N/cm).

Dinamičko ponašanje bagera

Analiza dinamičkog ponašanja bagera pokazala je da je za iste uslove rada (kapacitete i parametre odreska) dinamičko ponašanje kod primene vertikalnog reza daleko povoljnije. Tokom merenja registrovana su veća ubrzanja kod horizontalnog reza i to u svim pravcima kako u vremenskom tako i frekventnom domenu.

Zajedničko za obe vrste reza je da su vrednosti ubrzanja izuzetno visoke što ukazuje na nepovoljan dinamički rad bagera. Vrednosti ubrzanja kreću se i do 10 m/s^2 što se može smatrati ekstremno visokim vrednostima ubrzanja, što za posledicu ima velika oštećenja čelične konstrukcije bagera. Registrovane sopstvene frekvence pri merenju saglasne su vrednostima sopstvenih frekvenci dobijenih metodom konačnih elemenata u proračunu. Najizraženija sopstvena frekvencija je 5,1 Hz. Na Slici 8.12. prikazana su karakteristična ubrzanja u frekventnom domenu.



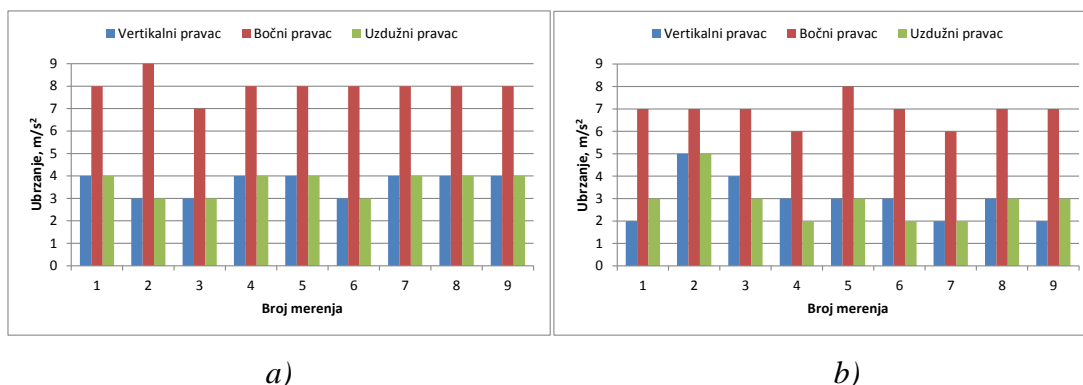
Slika 8.12. Karakteristična ubrzanja u frekventnom domenu i ubrzanja na 5,1 Hz

Prosečne srednje vrednosti ubrzanja pri radu sa horizontalnim i vertikalnim rezovima u vremenskom i frekventnom domenu prikazane su u Tabeli 8.1., a izmerene srednje vrednosti na Slikama 8.13. i 8.14.

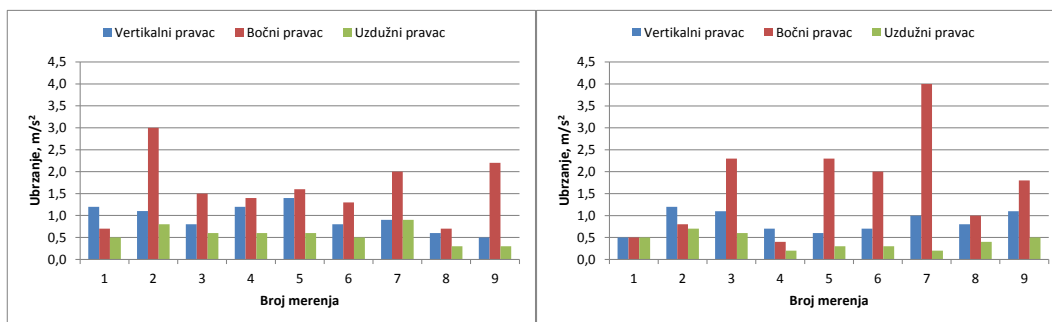
Tabela 8.1. Prosečne srednje vrednosti ubrzanja u radu sa horizontalnim i vertikalnim rezovima

Ubrzanje	Vremenski domen			Frekventni domen		
	Vertikalno	Bočno	Podužno	Vertikalno	Bočno	Podužno
Horizontalni	3,7	8,0	3,7	0,95	1,6	5,6
Vertikalni	3,0	6,9	2,9	0,85	1,4	0,41

Na Slici 8.13. su dati uporedni dijagrami srednjih vrednosti ubrzanja u vremenskom i frekventnom domenu, i to odvojeno za horizontalni (a) i vertikalni rez (b).



Slika 8.13. Uporedni prikaz ubrzanja u vremenskom domenu za horizontalni rez (a) i vertikalni rez (b)



a)

b)

Slika 8.14. Uporedni prikaz ubrzanja u frekventnom domenu za horizontalni rez (a) i vertikalni rez (b)

Kod pojedinih merenja sa vertikalnim rezom pojavljuju se veća ubrzanja samo u bočnom pravcu. Razlog ovome su verovatno samo loše projektovani rezni elementi koji materijal otkopavaju bočnom stranom zuba (Slika 8.15.).



Slika 8.15. Prikaz loše geometrije zuba na bageru ER-1250 16/1,5

Rezultati svih merenja su pokazali da otkopavanje materijala sa vertikalnim rezovima ima prednosti u odnosu otkopavanje sa horizontalnim rezovima.

9. OPTIMIZACIJA PARAMETARA REZA ROTORNOG BAGERA ER-1250 16/1,5

Analiza ponašanja rotornog bagera ER-1250 16/1,5 pri radu u tvrdim materijalima izvršena je odvojeno za rad sa horizontalnim i vertikalnim rezovima pri radu sa parametrima odreska koji su bili istovetni za obe vrste reza. Merenja su izvršena za različite parametre odrezka i to za debljinu reza 0,10, 0,15 i 0,20 m i za brzinu okretanja strele rotora od 12, 18 i 24 m/min.. Rezultati merenja prikazani su u Tabeli 9.1., a sama analiza je detaljno prikazana u poglavlju 8.

Tabela 9.1. Rezultati merenja pri radu rotornog bagera ER-1250 16/1,5 u tvrdim materijalima

H (m)	c (m)	Vb (m/min)	Q (m ³ /h)	Jačina struje (A)	
				Horizontalni rez	Vertikalni rez
3,25	0,1	12	234	567,8	390,8
3,25	0,1	18	351	649,32	433,46
3,25	0,1	24	468	734,28	440,38
3,25	0,15	12	351	676,71	396,75
3,25	0,15	18	526,5	748,43	469,27
3,25	0,15	24	702	762,15	501,54
3,25	0,2	12	468	691,37	494,80
3,25	0,2	18	702	766,02	510,99
3,25	0,2	24	936	794,29	642,07

Obzirom da se otkopavanje materijala vrši sa dve tipske vrste reza (vertikalni i horizontalni), optimizacija podrazumeva izbor, pre svega vrste reza, a potom i parametara izabrane vrste reza u funkciji povećanja ukupne efektivnosti i efikasnosti rada bagera pri otkopavanju materijala sa povećanom čvrstoćom. Izmerene vrednosti kapaciteta bagera, kao *veoma važnog* kriterijuma za izbor optimalnog rešenja, su u saglasnosti sa rezultatima dobijenih simulacijom rada rotornog bagera (poglavlje 4).

Iz pomenute analize u poglavlju 8, nedvosmisleno je da su svi mereni parametri vertikalnog reza značajno veće efektivnosti i efikasnosti u odnosu na parametre horizontalnog reza, pre svega, kada se ima u vidu potrošnja električne energije (Tabela 9.1.). Kada je reč o izboru vrste reza, optimum rešenja je vertikalni rez.

Sledeći zadatak optimizacije parametara reza je izbor optimuma rešenja za parametre vertikalnog reza pri čemu su analizirane sledeće varijante:

- Varijanta 1 (V1): debljina reza 0,10 m i brzina okretanja strele rotora $V_b = 12$ m/min;
- Varijanta 2 (V2): debljina reza 0,10 m i brzina okretanja strele rotora $V_b = 18$ m/min;
- Varijanta 3 (V3): debljina reza 0,10 m i brzina okretanja strele rotora $V_b = 24$ m/min;
- Varijanta 4 (V4): debljina reza 0,15 m i brzina okretanja strele rotora $V_b = 12$ m/min;
- Varijanta 5 (V5): debljina reza 0,15 m i brzina okretanja strele rotora $V_b = 18$ m/min;
- Varijanta 6 (V6): debljina reza 0,15 m i brzina okretanja strele rotora $V_b = 24$ m/min;
- Varijanta 7 (V7): debljina reza 0,20 m i brzina okretanja strele rotora $V_b = 12$ m/min;
- Varijanta 8 (V8): debljina reza 0,20 m i brzina okretanja strele rotora $V_b = 18$ m/min;
- Varijanta 9 (V9): debljina reza 0,20 m i brzina okretanja strele rotora $V_b = 24$ m/min.

Za sve varijante definisana je lista kriterijuma:

- Angažovana električna energija za pogon rotora;
- Specifična potrošnja energije;
- Otpor materijala na kopanje;
- Dinamičko ponašanje bagera;
- Tehnički kapacitet bagera.

Za određivanje težine (značaja) kriterijuma definisana je sledeća petostepena skala:

Važnost	Težina (w_i)
Veoma važan	5
Donekle važan	4
Srednje važan	3
Donekle nevažan	2
Veoma nevažan	1

Značaj pojedinih kriterijuma prikazan je u Tabeli 9.2.

Tabela 9.2. Kriterijumi odlučivanja, važnost i težina kriterijuma

Kriterijum	Važnost	Težina
Angažovana električna energija za pogon rotora	Donekle važan	4
Specifična potrošnja energije	Veoma važan	5
Otpor materijala na kopanje	Donekle važan	4
Dinamičko ponašanje bagera	Veoma važan	5
Tehnički kapacitet bagera	Veoma važan	5

Svaka alternativa odluke se procenjuje sa aspekta zadovoljenja svakog kriterijuma. Za izbor moguće varijante odabrani su sledeći nivoi satisfakcije:

Nivo satisfakcije	Mera (r_{ij})
Izuzetno visoka	9
Veoma visoka	8
Visoka	7
Skoro visoka	6
Srednja	5
Skoro niska	4
Niska	3
Veoma niska	2
Izuzetno niska	1

Mere za donošenje alternativnih odluka se dobijaju tako što se za svakom paru varijante i kriterijuma dodeljuje mera za satisfakciju, odnosno mera za odlučivanje. Pošto postoji četiri kriterijuma i devet alternativa za odlučivanje ($5 \cdot 9 = 45$), dobija se 45 mera za alternativne odluke koje su date u Tabeli 9.3.

Tabela 9.3. Mere za donošenje alternativnih odluka

Kriterijum	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9
Angažovana električna energija za pogon rotora	5	5	5	6	6	5	5	5	4
Specifična potrošnja energije	2	3	5	4	5	8	5	8	9
Otpor materijala na kopanje	4	5	6	5	5	4	4	5	5
Dinamičko ponašanje bagera	8	3	4	7	7	6	7	8	8
Tehnički kapacitet bagera	3	4	6	4	7	8	6	8	9

Vrednosti svake alternative dobijaju se tako što se težina dodeljena kriterijumu pomnoži sa merom alternativne odluke. Dobijene vrednosti za svaku alternativnu odluku prikazane su u Tabeli 9.4. Zbir ocena (Ukupna ocena), za svaku varijantu predstavlja ukupnu vrednost alternative na bazi koje se bira optimum rešenja (najveća ukupna ocena) i donosi odluka.

Tabela 9.4. Vrednosti alternativa za odlučivanje

Kriterijum	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9
Angažovana električna energija za pogon rotora	20	20	20	24	24	20	20	20	16
Specifična potrošnja energije	10	15	25	20	25	40	25	40	45
Otpor materijala na kopanje	16	20	24	20	20	16	16	20	20
Dinamičko ponašanje bagera	40	15	20	35	35	30	35	40	40
Tehnički kapacitet bagera	15	20	30	20	35	40	30	40	45
Ukupna ocena	101	90	119	119	139	146	126	160	166

Rangiranje

Prema utvrđenoj metodologiji izvršeno je rangiranje varijanti parametara vertikalnog reza pri radu rotornog bagera ER-1250 16/1,5 u tvrdim materijalima, Tabela 9.5. Kako se iz tabele vidi, optimalno rešenje dobijeno višekriterijumskom optimizacijom je Varijanta 9, odnosno maksimalna efektivnost i efikasnost pri radu analiziranog rotornog bagera postiže se pri radu sa vertikalnim rezom debljine 0,20 m i brzinom okretanja strele rotora od 24 m/min.

Tabela 9.5. Rangiranje varijanti parametara vertikalnog reza

Rang	Varijanta	Ocena
I	Varijanta 9 (V9): debljina reza 0,20 m i brzina okretanja strele rotora od 24 m/min	166
II	Varijanta 8 (V8): debljina reza 0,20 m i brzina okretanja strele rotora od 18 m/min	160
III	Varijanta 6 (V6): debljina reza 0,15 m i brzina okretanja strele rotora od 24 m/min	146
IV	Varijanta 5 (V5): debljina reza 0,15 m i brzina okretanja strele rotora od 18 m/min	139
V	Varijanta 7 (V7): debljina reza 0,20 m i brzina okretanja strele rotora od 12 m/min	126
VI-VII	Varijanta 4 (V4): debljina reza 0,15 m i brzina okretanja strele rotora od 12 m/min	119
VI-VII	Varijanta 3 (V3): debljina reza 0,10 m i brzina okretanja strele rotora od 24 m/min	119
VIII	Varijanta 1 (V1): debljina reza 0,10 m i brzina okretanja strele rotora od 12 m/min	101
IX	Varijanta 2 (V2): debljina reza 0,10 m i brzina okretanja strele rotora od 24 m/min	90

10. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Rotorni bager je najrasprostranjenija mašina na površinskim kopovima velikih kapaciteta i namenjen je za otkopavanje mekih i srednje tvrdih materijala. Problem se javlja kod otkopavanja materijala sa povećanom čvrstoćom, odnosno povećanim otporom na kopanje, što dovodi do drastičnog smanjenja kapaciteta rotornog bagera, veće potrošnje električne energije, habanja zuba, pucanja vedrica i nepovoljnog dinamičkog ponašanja konstrukcije bagera koje može da prouzrokuje brojna oštećenja u prvom redu na rotoru i streli rotora, a zatim i na celoj konstrukciji bagera. Kada se desi ovakav slučaj, što je primer na površinskim kopovima u Gacku i Beočinu, onda preostaju samo dve mogućnosti. Prva je prodaja rotornog bagera kao polovne opreme i izbor neke druge tehnologije otkopavanja materijala sa povećanom čvrstoćom, a druga je da se pristupi određenim istraživanjima u cilju poboljšanja performansi rotornog bagera.

Sva istraživanja rada rotornog bagera uvek idu u pravcu poboljšanja performansi bagera, sa ciljem povećanja njegove produktivnosti, produženju radnog veka i smanjenja troškova održavanja i eksploatacije. Dosadašnja istraživanja su pokazala da se izvesna poboljšanja u radu rotornog bagera na otkopavanju materijala sa povećanom čvrstoćom mogu postići optimizacijom određenih konstruktivnih i tehnoloških parametara, čiji je osnovni cilj praktično povećanje raspoložive rezne sile uz što veću zaštitu bagera od nepovoljnih dinamičkih udara tokom rada.

Konstruktivni parametri čijom optimizacijom se može postići povećanje rezne sile bagera su: snaga pogona rotora, oblik vedrica, oblik, dimenzije i raspored zuba bagera i ugao rezanja.

Tehnološki parametri čijom se optimizacijom može uticati na povećanje rezne sile kod otkopavanja materijala sa povećanom čvrstoćom, a samim tim i na povećanje produktivnosti bagera, produženju radnog veka i smanjenja troškova održavanja i eksploatacije, su vrsta i parametri reza.

Obzirom da još uvek ne postoji opšte prihvaćena metodologija određivanja uticaja vrste i parametara reza rotornog bagera u funkciji otpora na kopanje, kao i njihovom uticaju na konstrukciju bagera, u ovoj doktorskoj disertaciji je definisana metodologija

istraživanja navedenog problema, koja se može koristiti pri izboru i optimalnom korišćenju rotornih bagera na površinskim kopovima u uslovima radne sredine sa povećanim otporom kopanju.

Istraživanja su realizovana na teorijskom i eksperimentalnom nivou sa ciljem da se izvrši optimizacija parametara reza i odreska rotornog bagera u funkciji otpora na kopanje, potrošnje energije i dinamičkog ponašanja bagera pri otkopavanju materijala sa povećanom čvrstoćom.

Na teorijskom nivou su obuhvaćeni iskustveni podaci i dosadašnja istraživanja, pri čemu su korišćeni modeli simulacije, koji su zasnovani na usklađivanju kinematsko-konstruktivnih karakteristika rotornog bagera sa karakteristikama radne sredine i koji omogućavaju analizu ponašanja bagera korišćenjem većeg broja ulaznih parametara u kratkom periodu obrade.

Terenska ispitivanja izvršena su na rotornom bageru ER-1250 16/1,5, koji radi na Površinskom kopu Gacko u veoma čvrstom materijalu sa otporom na kopanje od preko 1000 N/cm. Površinski kop Gacko je izabran kao karakterističan primer, ne samo po tome što se u otkrivci uglja pojavljuju veoma čvrsti materijali, nego i po tehnologiji otkopavanja. Naime, rotorni bageri od početka primene u Gatačkom ugljenom basenu rade na otkopavanju otkrivke kombinovanim rezovima, pri čemu je samo u prvom, gornjem pojasu otkopavanje vršeno vertikalnim rezovima, a ostali pojasevi su otkopavani horizontalnim rezovima (Slika 2.2.). Rezultat toga su upravo bili mala rezna sila, veće habanje i utrošak zuba, često pucanje vedrica, pucanje rotora i strele rotora i slično. Ovi problemi su se direktno odražavali na mali kapacitet rotornog bagera, nisku pouzdanost i velike troškove održavanja.

Terenska istraživanja su se sastojala u merenju angažovane struje za pogon rotora, preko koje je su izračunati: specifična potrošnja energije, angažovana snaga za kopanje, specifični otpor materijala na kopanje, rezna sila i kapacitet bagera. Takođe je vršeno merenje ubrzanja i napona na karakterističnim tačkama (poluge reduktora) u svrhu praćenja dinamičkog ponašanja bagera u uslovima otkopavanja materijala sa povećanom čvrstoćom.

Sva merenja su vršena ponaosob za horizontalni i vertikalni rez debljine 10, 15, 20 i 25 cm i brzine okretanja strele rotora od 12, 18 i 24 m/min (širine reza 16, 24 i 30 cm).

Analiza dobijenih rezultata je nedvosmisleno pokazala sledeće:

- Raspoloživa rezna sila za savladavanje otpora na kopanje je znatno veća kod vertikalnog, nego kod horizontalnog reza;
- Angažovana struja (i snaga) pri radu sa horizontalnim rezovima je znatno veća u odnosu na vertikalne rezove;
- Kapacitet rotornog bagera prilikom korišćenja vertikalnih rezova je veći, jer se sa vertikalnim rezovima mogao otkopavati materijal i sa debljinom odreska 25 cm, dok je za horizontalne rezove limit bio 20 cm (pri brzini okretanja strele rotora od 24 m/min), pri čemu je dolazilo do preopterećenja motora za pogon rotora i kružnog kretanja;
- Specifična potrošnja energije pri radu sa vertikalnim rezom je znatno manja, nego kod horizontalnog reza;
- Raspoloživa snaga za rezanje pri radu sa vertikalnim rezom je veća nego kod horizontalnog reza zbog manjeg utroška snage za dizanje materijala;
- Dinamičko ponašanje konstrukcije je znatno nepovoljnije kod horizontalnog, nego kod vertikalnog reza, što nepovoljno utiče na strukturu bagera;
- Pobuda izazvana horizontalnim rezom je izraženija i nepovoljnija od pobude izazvane vertikalnim rezom;
- Optimalni parametri vertikalnog reza za otkopavanje materijala sa povećanim otporom na kopanje u uslovima Površinskog kopa Gacko su: debljina reza 0,20 m i brzina okretanja strele rotora 24 m/min.

Iz svega napred navedenog nedvosmisleno se može zaključiti da rad rotornim bagerom sa vertikalnim rezovima ima višestruke prednosti u odnosu na rad sa horizontalnim rezovima i predstavlja optimalno rešenje za otkopavanje materijala sa povećanom čvrstoćom i kao takav se može i treba primeniti na Površinskom kopu Gacko.

Samim tim je dokazano da se metodološki postupak korišćen u ovoj disertaciji, može primeniti za definisanje optimalne vrste i parametara reza rotornog bagera i na drugim površinskim kopovima, gde postoji problem otkopavanja materijala sa povećanom čvrstoćom.

11. PRAVCI DALJEG ISTRAŽIVANJA

U toku istraživanja vezanih za optimizaciju parametara reza rotornog bagera pri otkopavanju materijala sa povećanom čvrstoćom, koja su bila predmet ove disertacije, uočen je niz problema čije bi rešavanje vodilo u pravcu poboljšanja performansi bagera sa krajnjim ciljem daljeg povećanja produktivnosti, produženju radnog veka bagera i smanjenju troškova održavanja i eksploatacije.

Problematika vezana za uočene probleme konstruktivne prirode, u prvom redu nedostatke reznih elemenata, nije bila predmet ove disertacije, ali se ukazala potreba da se problemi prepoznaju i otvore na način koji treba da bude preporuka i polazna osnova za dalja istraživanja poboljšanja performansi rotornog bagera ER-1250 16/1,5.

Glavni problem koji se pojavio u toku istraživanja za potrebe ove disertacije se ogleda u tome da se kod pojedinih merenja opisanih u poglavljima 7 i 8, pojavljuju veća ubrzanja u bočnom pravcu kretanja strele rotora. Uočeno je da rezni elementi (zubi), materijal otkopavaju bočnom stranom, što dovodi do prekomernog habanja zuba (Slika 8.15.) i pucanja vedrica. Zbog toga se nameće zaključak, da su rezni elementi na rotoru loše projektovani, što ukazuje na potrebu kompleksnih istraživanja:

- optimalnog oblika i geometrije zuba,
- optimalnog ugla rezanja,
- optimalnog rasporeda i broja zuba na vedricama i
- optimalnog rasporeda, oblika i geometrije vedrica.

Prilikom predloženih istraživanja bilo bi poželjno da se definiše adekvatan metodološki postupak optimizacije navedenih parametara zuba i vedrica na rotoru, koji bi se mogao koristiti i za različite tipove rotornih bagera i otkopavanje materijala sa povećanom čvrstoćom u drugim uslovima radne sredine.

12. LITERATURA

- [1] Anderson R. D., Sweeney D. J., Williams T. A. (2003), *Management Science-Quantitative Approaches to Decision Making*, Thomson, South-Western, Mason, Ohio
- [2] Atanacković H. (1979), *Merenje otpora kopanju na otkrivci Kosovskih površinskih otkopa i određivanje specifične rezne sile*, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu
- [3] Atanacković H., Mitrović S., Rizvanoli F., Aksentijević V., Raičević L. (1995), *Studija istraživanja otpora kopanju na otkrivci i određivanje specifične rezne sile rotornih bagera za Kosovski ugljeni basen*, INKOS, Priština
- [4] Beljakov J. I., Vladimirov V. M. (1984), *Rabočie organi rotornih ekskavatorov*, Izdatelstvo Mašinstroenie, Moskva
- [5] Bieniawski Z. T. (1989), *Engineering rock mass classifications*, University Park Pennsylvania
- [6] Bošković S. (1999), *Kombinovana tehnologija selektivnog otkopavanja na primjeru Površinskog kopa Gračanica – Gacko*, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
- [7] Bošković S. (2009), *Priprema podloga za izbor optimalne opreme i definisanje tehnologije eksploatacije na površinskim kopovima*, VIII Međunarodna konferencija Nemetali 2009, Banja Vrujci
- [8] Bošković S., Bijelić V. (2005), *Osvrt na konceptijska rešenja otkopavanja otkrivke i uglja do kraja vijeka eksploatacije na PK „Gračanica“ R i TE Gacko*, časopis Energetičar, Br. 1/2005, Banja Luka
- [9] Bošković S., Vuković B., Krstić V. (2001), *Primjena modela simulacije pri izboru optimalnih tehnoloških rešenja selektivnog otkopavanja na primjeru površinskog kopa Gračanica - Gacko*, Savetovanje Računarski integrisane tehnologije u industriji minerala, Prijedor
- [10] Bošković S., Vuković B., Krstić V. (2005), *Selection of Optimal Solution for Selective Mining at Coal Openpits*, 6th European coal conference, Beograd

- [11]Bošković S., Jovančić P., Ignjatović D., Rakićević D., Maneski T. (2015), *Vibration as deciding parameter during revitalization process for replacing the bucket wheel drive*, Journal of Vibroengineering, Volume 17, ISSUE 1., 2015, ISSN 1392-8716
- [12]Bošković S., Kostić S., Cvetković M., Marković Z. (2000), *Rezultati geoelektričnih istraživanja u cilju litološkog raščlanjivanja otkrivke na polju "B" površinskog kopa "Gračanica" Gacko*, IMES, Arandelovac
- [13]Bošković S., Vuković B., Lasica N. (2001), *Ripovanje čvrstih stijena otkrivke na PK "Gračanica" Gacko*, Drugo međunarodno savetovanje o površinskoj eksploataciji uglja, Ugalj '01, Beograd
- [14]Bošnjak S. (1995), *Dinamika rotornih bagera sa radialnim iskopom u uslovima stohastičke pobude izazvane otporom kopanju*, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Beograd
- [15]Cvetković M., Majstorović J., Savić D., Bošković S. (2002), *Otpor rezanju u funkciji fizičko-mehaničkih svojstava radne sredine*, Međunarodna konferencija o površinskoj eksploataciji, OMC' 02, Arandelovac
- [16]Dombrovski N. G. (1972), *Mnogokovšovie ekskavatori*, Mašinstroenie, Moskva
- [17]Drebenstedt C., Paessler S. (2006), *Output calculation model of Bucket Wheel Excavator, supported by virtual reality with regard to the slewing velocity at the turning points*, ISCSM Aachen
- [18]Drebenstedt C., Vorona M., Gassner W. (2012), *Elaboration of the report for the optimization process for the mining materials with increased digging resistance by bucket wheel excavator at the opencast mine Gacko (BiH)*, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Freiberg
- [19]Geoing Group (2012), *Elaborat o klasifikaciji, kategorizaciji i proračunu rezervi uglja u gatačkom ugljenom basenu sa stanjem 30.06.2012. godine (oznaka EI.O.13)*, Beograd
- [20]Geoinženjering Sarajevo (1989), *Izveštaj o rezultatima laboratorijskih ispitivanja petrografskih svojstava, sile rezanja i fizičko-mehaničkih osobina stijenskih masa litostratigrafskog člana ⁸N područja PK "Gračanica" Gacko*, Sarajevo

- [21]Himmel W. (1963), *Der spezifische Grabwiderstand in Abhängigkeit von der Spanflache und der Spanform bel verschiedenen Bodenarten*, Freiburger Forschungshefte, Freiberg
- [22]Ignjatović D. (1993), *Izbor metode za određivanje otpora na kopanje rotornim bagerima u uslovima površinskih kopova lignita Kolubare*, Magistarski rad, Rudarsko-geološki fakultet Beograd
- [23]Ignjatović D., Maneski T., Ivković S. I dr. (2003), *Studija – Optimizacija konstrukcije vedrica bagera u cilju povećanja kapaciteta*, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
- [24]Ignjatović D., Maneski T., Jovančić P. (2004), *Studija – Produžetak radnog veka osnovne opreme na površinskim kopovima uglja EPS-a, I faza Rotorni bageri*, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
- [25]Ignjatović D., Petrović B., Jovančić P., Bošković S. (2014), *Impact of the Bucket Wheel Support at Technical Parameters of the Block and Bucket Wheel Excavator Capacity*, Aachen, Germany, Proceedings of the 12 th International Symposium Continius Surface Mining, Springer ISBN 978-3-319-12300-4 DOI 10.1007/978-3-319-12301-1
- [26]Ignjatović D., Maneski T., Jovančić P., Tanasijević M. (2013), *Elaborat analize naponskog stanja rekonstruisane strele radnog točka bagera ER 1250*, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
- [27]Institut za rudarska istraživanja Tuzla (1980), *Elaborat o terensko-laboratorijskim ispitivanjima karakteristika naslaga otkrivke potrebnih za dokazivanje garantovanog tehničkog kapaciteta rotornog bagera tip ER 1250-17/1,5 I kompleksa I BTO sistema*, Tuzla
- [28]Institut za rudarska istraživanja Tuzla (1983), *Elaborat o terenskim ispitivanjima uticajnih parametara na režim rada bagera SchRS 315/1,5-12,5 u uslovima kopanja rezanjem sloja uglja na Površinskom kopu „Gračanica” Gacko*, Tuzla
- [29]Institut za rudarska istraživanja Tuzla (1986), *Studija o utvrđivanju specifičnog otpora rezanju materijala zastupljenih u povlatnoj seriji, istočnom i centralnom polju Površinskog kopa „Gacko”*, Tuzla

- [30]Ivković S., Ignjatović D., Jovančić P. i Tanasijević M. (2008), *Projektovanje održavanja opreme površinskih kopova uglja*, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
- [31]Jakovljević I. (2007), *Određivanje optimalnih parametara odreska rotornih bagera u funkciji otpora na kopanje*, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
- [32]Jovančić P. (2003), *Razvoj metodologije utvrđivanja ponašanja konstrukcije rotornog točka*, *Magistarski rad*, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
- [33]Jovančić P., Ignjatović D., Maneski T. (2006), *Prilog dijagnostici dinamičkog ponašanja pogona radnog točka rotornog bagera*, Zbornik radova MAREN, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
- [34]Jovović S., Bošković S., Savić D., Marković Z. (2001), *Primena geofizičkih istraživanja pri rešavanju geološke problematike otkrivanja otkrivke glavnog ugljenog sloja na PK "Gračanica" Gacko*, Drugo međunarodno savetovanje o površinskoj eksploataciji uglja, Ugalj '01, Beograd
- [35]Kressner M., Drebenstedt C. (2006), *Cutting resistance and cutting tool desing on Bucket Wheel Excavators*, Aachen
- [36]Kun J. (1981), *Površinska eksploatacija lignita*, Rudarski institut, Beograd
- [37]Maneski T. (1998), *Kompjutersko modeliranje i proračun struktura KOMPIS*, Monografija, Mašinski fakultet, Beograd
- [38]Lazić A. (1994), *Selektivno otkopavanje rotornim bagerima na površinskim kopovima uglja*, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
- [39]Lazić A. (2006), *Projektovanje površinskih kopova sa modeliranjem sistema eksploatacije*, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
- [40]Lazić A., Klačar R., Bošković S. (2004), *Selektivno otkopavanje uglja na površinskim kopovima*, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
- [41]Makar M. (1990), *Teorija bagerovanje rotornim bagerima*, Rudarski institut, Beograd
- [42]Man Takraf (1999), *Tehnička dokumentacija, Tagebau "Gračanica" Gacko*
- [43]Melnikov N. V. (1977), *Voprosi vibora proizvodstvenoj mošnosti rotornih ekskavatorov*, НЕДРА, Moskva

- [44] Obradović R., Najdanović N. (1999), *Mehanika tla u inženjerskoj praksi*, Rudarski Institut, Beograd
- [45] Opricović S. (1992), *Optimizacija sistema*, Građevinski fakultet, Beograd
- [46] Pavličić D. (2007), *Teorija odlučivanja*, Ekonomski fakultet, Beograd
- [47] Pavlović V. (1992), *Tehnologija površinskog otkopavanja*, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
- [48] Pavlović V. (1998), *Sistemi površinske eksploatacije*, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
- [49] Pavlović V., Ignjatović D. (2012), *Selektivna površinska eksploatacije uglja kontinualnim sistemima*, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
- [50] Pavlović V., Ignjatović D., Jovančić P., Bošković S. (2013), *Cutting parameters optimization for difficult excavating conditions with bucket wheel excavators on Gracanica opencast mine in Gacko*, Proceedings of the 22 nd Conference Dresden, Germany 2013 Springer ISBN 978-3-319-02677-0
- [51] Petrić J. (1989), *Operaciona istraživanja*, Naučna knjiga, Beograd
- [52] Popović N. (1984), *Naučne osnove projektovanja površinskih kopova*, NIŠRO Oslobođenje, Sarajevo
- [53] Pratz K. H. (1985), *Kraftmessung an schneidenvon schaufelradbaggeren*, Karlsruhe
- [54] Radojević J. (1979), *Optimizacija brzina i uglova rezanja rotornim bagerima u odnosu na utrošenu energiju i instalisanu snagu mašine*, Doktorska disertacija, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
- [55] Razz V. (1999), *Assesment of the Digging Force and optimum selection of the Nechanical and Operational parameters of Bucket Wheel Excavarors for mining of Overburden Coal and partings*, Braunkohle
- [56] Rževskij B. B. (1985), *Otkritie gornie raboti, Kompleksnaja mehanizacija*, НЕДРА, Moskva
- [57] Stepanović S., Šubaranović T. (2007), *Uticao razblaženja na donji toplotni efekat uglja na Površinskom kopu Gračanica – Gacko*, VIII Međunarodna konferencija o površinskoj eksploataciji, Banja Vrujci

- [58] Stepanović S., Šubaranović T., Jakovljević I., Majstorović J. (2009), *Tehnološki sistem otkopavanja otkrivke sa povećanim karakteristikama otpornosti na površinskom kopu Bogutovo Selo – Ugljevik*, VIII Međunarodna konferencija Nemetali, Banja Vrujci
- [59] Stojanović D. (1975), *Analiza tehnoloških i proizvodnih mogućnosti bagera glodara SRs-1200-24/4+VR*, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
- [60] Stojanović D., Ignjatović D., Ivković S. (1992), *Uticaj geometrije vedrica i istrošenosti reznih elemenata na efikasnost rada rotornog bagera*, Zbornik radova međunarodne konferencije Unapređenje tehnike i tehnologije površinske eksploatacije uglja, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
- [61] Stojanović D., Ignjatović D., Ivković S. (1996), *Uticaj habanja zuba na efikasnost rada rotornih bagera*, časopis Tribologija, volume 18
- [62] Szepietowski W. (1991), *Klasyfikacja urabialosci skal nadkladowich Wielonaczyniowymi koparkami kolowymi*, Gornictwo odkrywkowe XXXIII, I
- [63] Tehnička dokumentacija O&K
- [64] Tehnička dokumentacija MAN TAKRAF
- [65] Tehnička dokumentacija KRUPP
- [66] Tehnička dokumentacija ZP Rudnik i TE Gacko
- [67] Vetrov J. A. (1965), *Rasčeti sil rezanja i kopanja grunтов*, Izdatelstvo kievskogo universiteta, Moskva
- [68] Vujić S. (2012), *Automatizacija i upravljanje procesima u rudarstvu*, Akademija inženjerskih nauka i Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
- [69] Vujić S. (1985), *Matematičko modeliranje ležišta mineralnih sirovina*, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
- [70] Vuković B., Bošković S. (2001), *Mogućnosti otkopavanja litološkog člana 8N na PK "Gračanica" Gacko*, Drugo međunarodno savetovanje o površinskoj eksploataciji uglja, Ugalj '01, Beograd

- [71] Vuković B., Bošković S. (2003), *Uticaj radne sredine na raspoloživost BTO sistema na Površinskom kopu "Gračanica"*, Savetovanje Informatika, menadžment, ekologija i standardi, IMES '03, Aranđelovac
- [72] Wojkiewitch H. (1963), *Der spezifische Grabwiderstand in Abhängigkeit von der Spanfläche und der Spanform bei verschiedenen Bodenarten*
- [73] Wojkiewitch H. (1974), *Wpływ rodzaju skrawania na wybór jednostkowych oporów urabiania*, Wrocław

13. BIOGRAFIJA AUTORA

Mr Saša Bošković, dipl. ing. rud. je rođen 05.10.1963. godine u Gacku, gde je završio osnovnu i srednju školu.

Školske 1982/83 godine upisao je Rudarski odsek, Rudarsko-geološkog fakulteta u Beogradu, gde je 1988. godine stekao zvanje diplomiranog inženjera rudarstva.

Stručni ispit iz oblasti rudarstva položio je 1990. godine.

Magistarski rad pod nazivom *Kombinovana tehnologija selektivnog otkopavanja na primjeru površinskog kopa „Gračanica“ Gacko*, odbranio je 14.07.1999. godine na Rudarsko-geološkom fakultetu u Beogradu, mentor Prof. Dr Vladimir Pavlović.

Nakon diplomiranja se zaposlio u preduzeću ZDP Rudnik i TE Gacko. U rudniku Gacko obavljao je poslove smenskog inženjera, rukovodioca RJ Rudnik, tehničkog rukovodioca tehničke pripreme, tehničkog rukovodioca službe pripreme rudarskih radova i rukovodioca sektora tehnološke pripreme.

U toku dosadašnje karijere učestvovao je u izradi i realizaciji više projekata i studija, a na domaćim i međunarodnim skupovima, kao i u časopisima objavio je preko četrdeset naučno-stručnih radova.

Koautor je monografija pod nazivom *Selektivno otkopavanje uglja na površinskim kopovima* sa Prof. Dr Andrijom Lazićem i Mr Radovanom Klačarom i *Srpsko rudarstvo i geologija u drugoj polovini XX veka* (grupa autora).

Živi i radi u Gacku.

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани-а Саша Бошковић

број уписа Р 233

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

ОПТИМИЗАЦИЈА ПАРАМЕТАРА РЕЗА РОТОРНОГ БАГЕРА ПРИ

ОТКОПАВАЊУ МАТЕРИЈАЛА СА ПОВЕЋАНОМ ЧВРСТОЋОМ

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима 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.

Потпис докторанда

У Београду, 09.05.2016.



Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Саша Бошковић

Број уписа Р 233

Студијски програм Рударско инжењерство

Наслов рада Оптимизација параметара реза роторног багера при
откопавању материјала са повећаном чврстоћом

Ментор Проф. Др Драган Игњатовић

Потписани Саша Бошковић


изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

У Београду, 09.05.2016.

Потпис докторанда



Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

ОПТИМИЗАЦИЈА ПАРАМЕТАРА РЕЗА РОТОРНОГ БАГЕРА ПРИ
ОТКОПАВАЊУ МАТЕРИЈАЛА СА ПОВЕЋАНОМ ЧВРСТОЋОМ

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду 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 – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, _____ 09.05.2016. _____

