

UNIVERZITET U BEOGRADU
RUDARSKO - GEOLOŠKI FAKULTET

Branko M. Petrović

**OPTIMIZACIJA DUŽINE STRELE
ROTORNIH BAGERA U FUNKCIJI
STABILNOSTI KOSINA I EFEKTIVNOSTI
RADA NA POVRŠINSKIM KOPOVIMA
LIGNITA SRBIJE**

doktorska disertacija

Beograd, 2016.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MINING AND GEOLOGY

Branko M. Petrović

**BUCKET WHEEL EXCAVATORS BOOM
LENGTH OPTIMIZATION IN FUNCTION
OF SLOPES STABILITY AND
EFFECTIVENESS OF OPERATION ON
THE SERBIAN LIGNITE OPEN CAST
MINES**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2016

Mentor:

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

Članovi komisije:

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

dr Nebojša Gojković, redovni profesor,
Mehanika stena,
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

dr Predrag Jovančić, vanredni profesor,
Mehanizacija u rudarstvu i energetici,
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

dr Tomislav Šubaranović, docent,
Površinska eksploatacija ležišta mineralnih sirovina,
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

dr Radoje Pantović, redovni profesor,
Rudarstvo i geologija,
Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru

Datum odbrane:

OPTIMIZACIJA DUŽINE STRELE ROTORNIH BAGERA U FUNKCIJI STABILNOSTI KOSINA I EFEKTIVNOSTI RADA NA POVRŠINSKIM KOPOVIMA LIGNITA SRBIJE

Rezime

Rotorni bageri su mašine koje se u današnje vreme najviše primenjuju u procesu masovne eksploatacije uglja zahvaljujući, pre svega, nizu tehničko-eksploatacionih prednosti u odnosu na druge vrste bagera. Raznovrsni rudarsko-tehnički zahtevi otkopavanja doprineli su razvoju nekoliko tipova ovih mašina, tako da svaki od njih ima svoje prednosti i nedostatke u odnosu na drugi tip.

Predmet istraživanja u disertaciji odnosi se na izbor optimalne konstrukcije strele bagera i njene usaglašenosti sa uslovima radne sredine koji će vladati na površinskim kopovima lignita Srbije, imajući u vidu složene uslove eksploatacije (velika dubina sinklinalnog zaleganja uglja, neophodnost selektivnog rada, prisutnost nepovoljnih materijala sa stanovišta stabilnosti kosina i dr.).

Polazeći od činjenice da još uvek ne postoji opšte prihvaćena metodologija određivanja optimalne dužine strele rotornog bagera, kao i njenog uticaja na konstrukciju bagera, u disertaciji je definisana celokupna metodologija istraživanja navedenog problema uz analizu i sistematizovanje dosadašnjih saznanja i rezultata istraživanja u ovoj oblasti.

Pri izradi doktorske disertacije korišćene su metode modeliranja strele bagera, modeliranja radne sredine i modeliranja rada mehanizacije uz primenu realnih podataka sa površinskih kopova *R.B. KOLUBARA* i terenskih merenja dinamičkog ponašanja bagera u radu.

Implementacija ovako koncipirane metodologije optimizacije dužine strele rotornih bagera u funkciji stabilnosti kosina, pri otkopavanju lignita Srbije, omogućila bi znatno pouzdanija rešenja, kako same konstrukcije bagera tako i geometrije kopa, tj. njegovih zahtevanih visina i uglova nagiba, uz bolje ekonomske i ekološke učinke.

Ključne reči: *površinski kop, parametri bloka, kapacitet, rotorni bager, strela bagera, geomehanika, stabilnost kosina, ekonomija,*

Naučna oblast: *Rudarsko inženjerstvo*

Uža naučna oblast: *Mehanika stena*

UDK: 621.879:624.131.537(043.3)
 624.04:621.879.44(043.3)

BUCKET WHEEL EXCAVATORS BOOM LENGTH OPTIMIZATION IN FUNCTION OF SLOPES STABILITY AND EFFECTIVENESS OF OPERATION ON THE SERBIAN LIGNITE OPEN CAST MINES

Summary

Bucket wheel excavators (*BWE*) are machines that are nowadays the most frequently used in the mass mining of coal, thanks to, more than all, a series of technical and exploitation advantages over other types of excavators. A variety of mining and technical mining requirements contributed to development of several types of these machines, so that each of them has its advantages and disadvantages compared to other type.

The subject of the thesis relates to the selection of the optimal excavator boom and its compliance with the conditions of the working environment, which will prevail on the opencast lignite mines in Serbia, having in mind the complex mining conditions (great depth of synclinal coal dipping, the necessity of selective operation, the presence of unfavorable material from the standpoint of slope stability, etc.).

Starting from the fact that there is still no generally accepted methodology for determining the optimum length of *BWE* boom, as well as its impact on the structure of the excavator, the thesis defines the overall research methodology of this issue to the analysis and systematization of current knowledge and research results in this area.

In this thesis were used modeling methods of excavator boom, working environment modeling and modeling of operating machinery with the use of real data from the opencast mines of *MB KOLUBARA* and field measurements of the dynamic behavior of excavator during operation.

Implementation of such designed methodology for optimization of *BWE's* boom length in the function of slope stability, during excavation of lignite excavation in Serbia, would allow significantly more reliable solutions, both the structure and geometry of the mine, i.e. its required heights and angle of inclination, with better economic and environmental effects.

Keywords: *open pit, block parameters, capacity, bucket wheel excavator, excavators boom length, geomechanics, slope stability, economy,*

Scientific field: *Mining Engineering*

Special scientific field: *rock mechanics*

UDK: 621.879:624.131.537(043.3)
 624.04:621.879.44(043.3)

Sadržaj:

1. UVOD	1
1.1. Predmet istraživanja	2
1.2. Cilj istraživanja	3
1.3. Osnovne hipoteze	3
1.4. Metodologija istraživanja	4
1.5. Naučni doprinos disertacije	7
1.6. Primenljivost rezultata istraživanja	8
1.7. Struktura disertacije sa kratkim pregledom poglavlja	8
2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA I ISKUSTAVA U OVOJ OBLASTI	11
3. TEORETSKE OSNOVE RADA ROTORNOG BAGERA	30
3.1. Klasifikacija rotornih bagera	32
3.2. Kostruktivni delovi rotornog bagera	35
3.3. Tehnologija rada rotornog bagera	44
3.4. Kapacitet rotornih bagera	62
4. MODELIRANJE RADNE SREDINE NA POVRŠINSKIM KOPOVIMA LIGNITA	68
4.1. Geotehnički model	70
4.2. Model površinskog kopa RADLJEVO	79
5. ANALIZA STABILNOSTI KOSINA	88
6. DINAMIČKO I STATIČKO PONAŠANJE STRELE BAGERA SchRs-630 KAO POSLEDICA TEHNOLOŠKOG ZAHTEVA ZA POVEĆANJEM DUŽINE STRELE	102
6.1. Metoda konačnih elemenata, osnovne postavke.....	102
6.2. Modeliranje strele bagera SchRs 630	105
6.3. Određivanje sopstvenih frekvencija oscilovanja strele bagera SchRs 630.....	110
6.4. Naponsko i deformaciono stanje u konstrukciji strele bagera SchRs 630 izloženoj radnom opterećenju	114
7. TERENSKA ISPITIVANJA DINAMIČKOG PONAŠANJA ROTORNOG BAGERA	123
7.1. Rezultati merenja sopstvenih frekvencija	125
7.2. Napon u lamelama strele bagera	130
8. MODELIRANJE PROCESA OTKOPAVANJA I PRORAČUN PARAMETARA BLOKA I PODETAŽE ZA RAZLIČITE DUŽINE STRELA	132

8.1	Analiza uticaja dužine strele bagera (L_s) na ugao nagiba bočne kosine (β_b)	133
8.2.	Analiza uticaja dužine strele bagera (L_s) na širinu bloka (B)	135
8.3.	Analiza uticaja dužine strele bagera (L_s) na dužinu bloka (Z)	137
8.4.	Analiza uticaja dužine strele bagera (L_s) na sigurnosno rastojanje bagera (L_{max}) od nožice etaže.....	140
8.5.	Analiza uticaja dužine strele bagera (L_s) na kapacitet bagera	142
9.	EKONOMSKA ANALIZA	150
9.1.	Definisanje odgovarajuće metodologije	151
9.2.	Polazni podaci	154
9.3.	Rezultati analize	155
10.	ZAKLJUČNA RAZMATRANJA	160
11.	LITERATURA	167
12.	BIOGRAFIJA AUTORA	173

Spisak slika

Slika 1.1. - Metodologija istraživanja	6
Slika 2.1. - Uticaj dužine strele bagera (L_s) na težinu bagera (G) različitih kapaciteta	11
Slika 2.2. - Uticaj dužine strele bagera (L_s) i prečnika rotora (D_p) na težinu bagera (G) kapaciteta $Q=5000$ (m^3/h)	12
Slika 2.3. - Uticajni faktori na efikasnost rada bagera	13
Slika 2.4. - Određivanje širine bloka	14
Slika 2.5. - Usporedna analiza efikasnosti rada rotornih bagera tipa (A),(B),(C) ..	14
Slika 2.6. - Oštećeni bager (G-3) usled zarušavanja etaže na severnoj kosini kopa POLJE D	21
Slika 2.7. - Model kosina sa mrežom konačnih elemenata	22
Slika 2.8. - Pad produktivnosti bagera u zavisnosti od ugla okretanja strele bagera	24
Slika 2.9. - 3D model strukture obrtne platforme	26
Slika 2.10. - Izmereni signali u vremenskom period br. 2	28
Slika 2.11. - Merenja akcelerometra A_063 z, vremenski period br. 2	28
Slika 2.12. - Merenja akcelerometra A_17 y, vremenski period br. 2	28
Slika 3.1. - Rotorni bageri	30
Slika 3.2. - Poređenje veličina rotornih bagera u vremenskom intervalu od 50 godina	32
Slika 3.3. - Različiti tipovi rotornih bagera	33
Slika 3.4. - Rotorni bager tip A	34
Slika 3.5. - Rotorni bager tip B.....	34
Slika 3.6. - Rotorni bager tip C.....	35
Slika 3.7. - Glavne komponente rotornog bagera	36
Slika 3.8. - Čelična konstrukcija nosača radnog točka (strele bagera)	38
Slika 3.9. - Šeme rada rotornih bagera u bloku (a) i boku (b)	45
Slika 3.10. - Visinski rad rotornog bagera u bloku	47

<i>Slika 3.11. - Šema za određivanje visine rezova</i>	48
<i>Slika 3.12. - Šematski prikaz bočne kosine</i>	50
<i>Slika 3.13. - Šema za određivanje graničnog ugla nagiba čeone kosine</i>	52
<i>Slika 3.14. - Šema za određivanje minimalnog odstojanja gusenica od donje ivice bloka</i>	54
<i>Slika 3.15. - Šema za određivanje širine bloka</i>	56
<i>Slika 3.16. - Šema za određivanje dužine bloka iz uslova prilaska bagera donjoj ivici kosine bloka</i>	58
<i>Slika 3.17. - Šema za određivanje dužine bloka iz uslova dodira konstrukcije</i>	59
<i>Slika 3.18. - Tehnološki parametri odreska</i>	60
<i>Slika 4.1. - Geotehnički model</i>	71
<i>Slika 4.2. - Triangulacijski model ležišta</i>	74
<i>Slika 4.3. - Prikaz mrežnog modela ležišta</i>	74
<i>Slika 4.4. - Konturni model</i>	75
<i>Slika 4.5. - Žičani model</i>	75
<i>Slika 4.6. - Blok model</i>	76
<i>Slika 4.7. - Dimenzije blok modela (osnovni blokovi i pod-blokovi)</i>	80
<i>Slika 4.8. - Šematizovani litološki profili u pravcu zapad-istok i sever-jug</i>	82
<i>Slika 4.9. - Model kosina radnih etaža</i>	83
<i>Slika 4.10. - Pregledna karta P.K. RADLJEVO sa lokacijom i profilima</i>	84
<i>Slika 4.11. - Istočno-zapadni profil E1 prikazuje rasprostiranje slojeva i uslove stratifikacije</i>	85
<i>Slika 4.12. - Istočno- zapadni profil E2 prikazuje rasprostiranje slojeva i uslove stratifikacije</i>	85
<i>Slika 4.13. - Istočno-zapadni profil E3 prikazuje rasprostiranje slojeva i uslove stratifikacije</i>	85
<i>Slika 4.14. - Severno-južni profil N1 prikazuje rasprostiranje slojeva i uslove stratifikacije</i>	86
<i>Slika 4.15. - Severno-južni profil N2 prikazuje rasprostiranje slojeva i uslove stratifikacije</i>	86

<i>Slika 4.16. - Severno-južni profil N3 prikazuje rasprostiranje slojeva i uslove stratifikacije</i>	<i>86</i>
<i>Slika 4.17. - Principijalan projektovani kop RADLJEVO sa prikazanim sistemom kosina i ugljem</i>	<i>87</i>
<i>Slika 4.18. - Severno-južni profil N koji prikazuje kombinaciju projektovanog kopa i rasprostiranje sloja</i>	<i>87</i>
<i>Slika 4.19. - Severno-južni profil M koji prikazuje kombinaciju projektovanog kopa i rasprostiranje sloja</i>	<i>87</i>
<i>Slika 5.1. - Model površinskog kopa POLJE E - R.B. KOLUBARA</i>	<i>96</i>
<i>Slika 5.2. - Proračun faktora sigurnosti (Fs) parcijalne kosine primenom softverskog paketa SLIDE v.6.0, Rocscience Inc.</i>	<i>97</i>
<i>Slika 5.3. - Faktori sigurnosti parcijalnih etaža za različite visine (He) i nagibe kosina (α_r) sitnozrnih peskova</i>	<i>100</i>
<i>Slika 5.4. - Faktori sigurnosti parcijalnih etaža za različite visine (He) i nagibe kosina (α_r) uglja (R.B. KOLUBARA)</i>	<i>100</i>
<i>Slika 6.1. - Bager tipa SchRs 630 25/6 (osnovne dimenzije)</i>	<i>102</i>
<i>Slika 6.2. - Čelična rešetkasta konstrukcija strele, izgled donjeg pojasa, gornjeg pojasa i bočnog zida</i>	<i>106</i>
<i>Slika 6.3. - Model strele sastavljen od grednih elemenata</i>	<i>107</i>
<i>Slika 6.4. - Porečni presek jednog grednog elementa strele</i>	<i>107</i>
<i>Slika 6.5. - Dinamički model strele bagera, granični uslovi i opterećenja</i>	<i>110</i>
<i>Slika 6.6. - Prva tri moda oscilovanja konstrukcije strele</i>	<i>111</i>
<i>Slika 6.7. - Promena geometrije jaram–zatega sa produženjem strele</i>	<i>112</i>
<i>Slika 6.8. - Dijagram promene sopstvenih frekvencija sa povećanjem dužine strele</i>	<i>113</i>
<i>Slika 6.9. - Dijagram promene mase sa povećanjem dužine strele</i>	<i>114</i>
<i>Slika 6.10. - Proračunski model (statika)</i>	<i>115</i>
<i>Slika 6.11. - Izgled elastične linije konstrukcije izložene fiktivnom radnom opterećenju (izvorna strela)</i>	<i>115</i>

<i>Slika 6.12. - Dijagrami promene napona u elementu donjeg pojasa prvog segmenta sa povećanjem dužine strele</i>	116
<i>Slika 6.13. - Dijagrami promene napona u kosom elementu desnog bočnog zida sa povećanjem dužine strele</i>	118
<i>Slika 6.14. - Dijagrami promene napona u elementu leve zatege strele sa povećanjem dužine strele</i>	119
<i>Slika 6.15. - Promena izgleda elastične linije strele sa promenom dužine (statički proračun)</i>	121
<i>Slika 6.16. - Grafički prikaz promene ugiba sa povećanjem dužine strele</i>	122
<i>Slika 7.1. - Senzor trokomponentnog ubrzanja</i>	123
<i>Slika 7.2. - Položaj mernih traka na bageru</i>	124
<i>Slika 7.3. - Merenje br.1</i>	125
<i>Slika 7.4. - Merenje br.2</i>	126
<i>Slika 7.5. - Merenje br.3</i>	127
<i>Slika 7.6. - Merenje br.4</i>	128
<i>Slika 7.7. - Merenje br.5</i>	129
<i>Slika 7.8. - Napon u desnoj lameli strele bagera</i>	131
<i>Slika 7.9. - Napon u desnoj lameli strele kontratega</i>	131
<i>Slika 8.1. - Uticaj dužine strele bagera (L_s) na ugao nagiba bočne kosine (β_b) za bager C-700</i>	133
<i>Slika 8.2. - Uticaj dužine strele bagera (L_s) na ugao nagiba bočne kosine (β_b) za bager SchRs-630x25/6</i>	134
<i>Slika 8.3. - Uticaj dužine strele bagera (L_s) na ugao nagiba bočne kosine (β_b) za bager SRs-2000x32/5</i>	134
<i>Slika 8.4. - Zavisnost ugla nagiba bočne kosine (β_b) od dužine strele bagera (L_s) za sva tri bagera</i>	135
<i>Slika 8.5. - Uticaj dužine strele bagera (L_s) na širinu bloka (B) za bager C-700</i>	135

Slika 8.6. - Uticaj dužine strele bagera (L_s) na širinu bloka (B) za bager SchRs-630x25/6	136
Slika 8.7 - Uticaj dužine strele bagera (L_s) na širinu bloka (B) za bager SRs-2000x32/5	136
Slika 8.8. - Uticaj dužine strele bagera (L_s) na širinu bloka (B) uporedno za sva tri bagera	137
Slika 8.9. - Uticaj dužine strele bagera (L_s) na dužinu bloka (Z) za bager C-700	138
Slika 8.10. - Uticaj dužine strele bagera (L_s) na dužinu bloka (Z) za bager SchRs-630x25/6	138
Slika 8.11. - Uticaj dužine strele bagera (L_s) na dužinu bloka (Z) za bager SRs-2000x32/5	139
Slika 8.12. - Uticaj dužine strele bagera (L_s) na dužinu bloka (Z) uporedno za sva tri bagera	139
Slika 8.13. - Uticaj dužine strele bagera (L_s) na rastojanje od ose bagera do nožice etaže (L_{max}) za bager C-700	140
Slika 8.14. - Uticaj dužine strele bagera (L_s) na rastojanje od ose bagera do nožice etaže (L_{max}) za bager SchRs-630x25/6	141
Slika 8.15. - Uticaj dužine strele bagera (L_s) na rastojanje od ose bagera do nožice etaže (L_{max}) za bager SRs-2000x32/5	141
Slika 8.16. - Uticaj dužine strele bagera (L_s) na rastojanje od ose bagera do nožice etaže (L_{max}) uporedno za sva tri bagera	142
Slika 8.17. - Vremensko i kapacitativno iskorišćenje bagera SchRs-630x25/6 (P.K. TAMNAVA-ZAPAD)	143
Slika 8.18. - Vremensko i kapacitativno iskorišćenje bagera SRs-2000x32/5 (P.K. TAMNAVA-ZAPAD)	144
Slika 8.19. - Vremensko i kapacitativno iskorišćenje bagera C-700 (P.K. POLJE B)	145
Slika 8.20. - Zavisnost efikasnosti bloka od dužine strele bagera za različite tipove bagera	148

<i>Slika 9.1. - Odnos fiksnih troškova, varijabilnih troškova, ukupnih troškova i godišnje proizvodnje za različite dužine strele bagera SchRs-630</i>	<i>158</i>
<i>Slika 9.2. - Prosečni troškovi proizvodnje bagera SchRs-630 za različite dužine strele bagera</i>	<i>159</i>

Spisak tabela

Tabela 2.1. - Faktori sigurnosti	27
Tabela 3.1. - Usporedni parametri različitih tipova rotornih bagera	33
Tabela 3.2. - Odnos dužine strele (L_s) i prečnika radnog točka (D_{rt}) za kompaktne bagere	39
Tabela 3.3. - Odnos dužine strele (L_s) i prečnika radnog točka (D_{rt}) za klasične bagere	39
Tabela 3.4. - Klasifikacija rotora po određenim karakteristikama	42
Tabela 4.1. - Korespondentni slojevi modela i terena	81
Tabela 4.2. - Fizičko-mehanička svojstva geoloških slojeva	83
Tabela 4.3. - Kvalitet uglja po slojevima	84
Tabela 5.1. - Uticajni faktori na stabilnost kosina	90
Tabela 5.2. - Sadržaj i obim laboratorijskih ispitivanja fizičko-mehaničkih svojstava stena	93
Tabela 5.3. - Rezultati proračuna faktora stabilnosti (F_s) parcijalne kosine sitnozrnog peska za različite visine (H_e) i nagibe etaže (α_r) na površinskom kopu POLJE E – R.B. KOLUBARA	98
Tabela 5.4. - Rezultati proračuna faktora stabilnosti (F_s) parcijalne kosine uglja za različite visine (H_e) i nagibe etaže (α_r) na površinskom kopu POLJE E – R.B. KOLUBARA	99
Tabela 6.1. - Geometrijske karakteristike pojedinih karakterističnih grednih elemenata	109
Tabela 6.2. - Rezultati dinamičkog proračuna	113
Tabela 6.3. - Promena napona u jednom elementu donjeg pojasa prvog segmenta	117
Tabela 6.4. - Promena napona u elementu bočnog desnog zida rešetkaste konstrukcije	117
Tabela 6.5. - Promena napona u elementu leve zatege strele bagera	120
Tabela 6.6. - Ukupni ugib za sve korake produženja strele	120
Tabela 8.1. - Karakteristike bagera	133
Tabela 8.2. - Dosadašnji rad bagera SchRs-630x25/6 (P.K. TAMNAVA-ZAPAD)	143
Tabela 8.3. - Dosadašnji rad bagera SRs-2000x32/5 (P.K. TAMNAVA-ZAPAD)	144
Tabela 8.4. - Dosadašnji rad bagera C-700 (P.K. POLJE B)	145
Tabela 8.5. - Vrednosti tehničkog kapaciteta (Q_{th}) za bager SchRs-630x25/6	146
Tabela 8.6. - Vrednosti tehničkog kapaciteta (Q_{th}) za bager SRs-2000x32/5	147
Tabela 8.7. - Vrednosti tehničkog kapaciteta (Q_{th}) za bager C-700	147

<i>Tabela 8.8. - Vrednosti tehničkog kapaciteta (Q_{th}) za bager SchRs-630x25/6 u funkciji promene dužine strele bagera (L_s)</i>	<i>149</i>
<i>Tabela 9.1. - Troškovi poslovanja prema normativima utrošaka</i>	<i>155</i>
<i>Tabela 9.2. - Cene proizvodnje po m^3 rotornog bagera SchRs-630, za dužine strele bagera $L_s=35$ m, $L_s=36$ m i $L_s=37$ m</i>	<i>156</i>
<i>Tabela 9.3. - Cene proizvodnje po m^3 rotornog bagera SchRs-630, za dužine strele bagera $L_s=38$ m, $L_s=39$ m i $L_s=40$ m</i>	<i>157</i>
<i>Tabela 9.4. - Prosečni troškovi proizvodnje</i>	<i>158</i>

1. UVOD

Rotorni bager predstavlja samohodnu mašinu kontinuiranog dejstva, namenjenu za otkopavanje jalovine i korisne mineralne sirovine na površinskim kopovima. Danas je, svakako, jedna od najrasprostranjenijih mašina na površinskim kopovima lignita za otkopavanje mekih i srednje tvrdih stenskih materijala. Tokom višedecenijskog razvoja ovih mašina razvijene 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. Prednosti rotornih bagera se ogledaju kroz visoku sigurnost u radu, relativno malu ugradnju metala $0.2-1.1 \text{ t./m}^3$, malu specifičnu potrošnju energije $0.15-0.5 \text{ kWh/m}^3$ i visoki koeficijent korisnog dejstva radnog organa (0.8-0.9). Prema DIN standardu svi rotoni bageri dele se na takozvane *kompaktne bagere klase A*, koji se odlikuju kratkom strelom i konstrukcijom strele od punih zidova, *klase B* sa rešetkastom strelom i kapacitetom do $6.000 \text{ m}^3/\text{h}$ i *klase C* sa rešetkastom strelom kapacitetom preko $6.000 \text{ m}^3/\text{h}$ i pretovarnim mostom. Svaki od ovih tipova bagera ima svoje prednosti i nedostatke koji se ogledaju u mogućnosti ostvarivanja tehničko-tehnoloških parametara bloka i podetaže, nabavnoj ceni i dr. U prethodnom periodu prilikom izbora rotornih bagera nije primenjivana uporedna sveobuhvatna tehnoko-ekonomska analiza pogodnosti tipa bagera i dužine strele za konkretne uslove radne sredine lignitskih basena Srbije, pre svega sa aspekta usaglašenosti dužine strele i mogućnosti ostvarivanja zahtevanih uglova nagiba kosina koji obezbeđuju uslove stabilnosti kosina i bezbednog rada na površinskom kopu.

1.1. Predmet istraživanja

Predmet ovog istraživanja je sveohvatna analiza i naučno zasnovana metodologija koja će omogućiti da se izabere optimalna konstrukcija strele rotornog bagera za uslove radne sredine koji će u narednom periodu vladati na našim površinskim kopovima lignita (*P.K. RADLJEVO, P.K. POLJE E, P.K. POLJE F, P.K. DRMNO* i dr.) imajući, pre svega, u vidu složene uslove eksploatacije kao što su velika dubina sinklinalnog zaleganja, neophodnost selektivnog rada, nepovoljni materijali sa aspekta stabilnosti kosina i dr.

Izbor rotornog bagera i naročito ostvarivanje njegovog projektovanog kapaciteta u realnim uslovima na jednom površinskom kopu u najvećoj meri zavisi od usaglašenosti geometrijskih parametara strele i radnog organa sa uslovima radne sredine. Naime, izbor dužine strele je u direktnoj zavisnosti od mogućnosti ostvarivanja tehničko-tehnoloških parametara bloka i podetaže i ostvarivanja optimalnih kapaciteta. Rotorni točak (rotor) i strela rotornog točka (strela bagera) predstavljaju dva najvitalnija dela rotornog bagera. Ovi delovi bitno utiču na konstrukciju celog bagera, određuju tehnološke parametre odreska, reza i bloka, njegov proizvodni potencijal i dr.). Povećanjem dužine strele rotornog točka ostvaruju se povoljniji uslovi za otkopavanje kao i parametri bloka. Veoma je važno odrediti optimalnu dužinu strele budući da svako povećanje dužine strele rotornog točka ima za posledicu povećanje mase celog bagera i to linerano, dok se ne zahteva promena prečnika obrtno-oslonog kruga i donje gradnje, nakon čega je povećanje mase daleko veće.

Prevelika dužina strele u odnosu na konkretne uslove radne sredine (broj, moćnost i položaj proslojaka) dovodi do osetnog povećanja mase bagera, a samim tim i njegove nabavne cene. Obrtnuto, poddimenzionisana dužina strele ima za posledicu osetan pad vremenskog i kapacitetnog iskorišćenja bagera, odnosno smanjenje koeficijenta efikasnosti rada bagera u bloku i nemogućnost ostvarivanja zahtevanih uglova nagiba bočnih kosina i dr., a pri tome, uslovi rada su manje bezbedni.

1.2. Cilj istraživanja

Iz navedenog se vidi da je osnovni cilj istraživanja da se analizom teoretskih i eksperimentalnih istraživanja rada rotornih bagera izvrši optimizacija dužine strele rotornog bagera za uslove radne sredine lignitskih basena Srbije, a u funkciji veće stabilnosti otkopnih etaža.

Primenjenom metodologijom obuhvaćeni su iskustveni podaci i dosadašnja istraživanja, savremeni postupci i metode istraživanja u ovoj oblasti. Razvojem algoritma samog toka istraživanja, uz primenu računara, omogućiće se stvaranje preduslova za izbor optimalne dužine strele rotornog bagera i njegove konstrukcije.

Dobijeni rezultati obezbediće bolju efektivnost rada rotornih bagera u sklopu kontinualnih sistema i postizanje pozitivnih ekonomskih efekata što će doprineti pravilnom izboru bagera pri otvaranju novih površinskih kopova.

1.3. Osnovne hipoteze

Polazeći od tih činjenica, a posebno uzimajući u obzir da još uvek ne postoji opšte prihvaćena metodologija određivanja optimalne dužine strele rotornog bagera u uslovima radne sredine lignitskih basena Srbije, kao i njihovog uticaja na konstrukciju bagera, u doktorskoj disertaciji definisana je celokupna metodologija istraživanja navedenog problema uz analizu i sistematizovanje dosadašnjih saznanja i rezultata istraživanja u ovoj oblasti .

Na površinskim kopovima izvršena su ispitivanja prvenstveno uticaja dužine strele na ostvarivanje tehnoloških parametara, odnosno mogućnost napredovanja u okviru podetaže, ostvarivanje širine bloka, ostvarivanje uglova nagiba bočnih kosina i proračun kapaciteta za konkretne uslove.

Dobijeni rezultati omogućiće pravilan izbor strele rotornog bagera što će uticati na veću sigurnost rada, bolju efektivnost rada rotornih bagera i BTO sistema (bager-traka-odlagač) kada se selektivno otkopavaju jalovina i ugalj, bolju stabilnost radnih i završih kosina, postizanje pozitivnih ekonomskih

efekata i doprineti pravilnom izboru bagera pri otvaranju novih površinskih kopova.

Prilikom izrade ove disertacije korišćeni su savremeni programski paketi za modeliranje strele primenom metode konačnih elementama, za modeliranje i proračun rada bagera u selektivnom radu, programski paketi za modeliranje i proračun stabilnosti kosina, kao i programski paketi za ekonomsku analizu.

1.4. Metodologija istraživanja

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

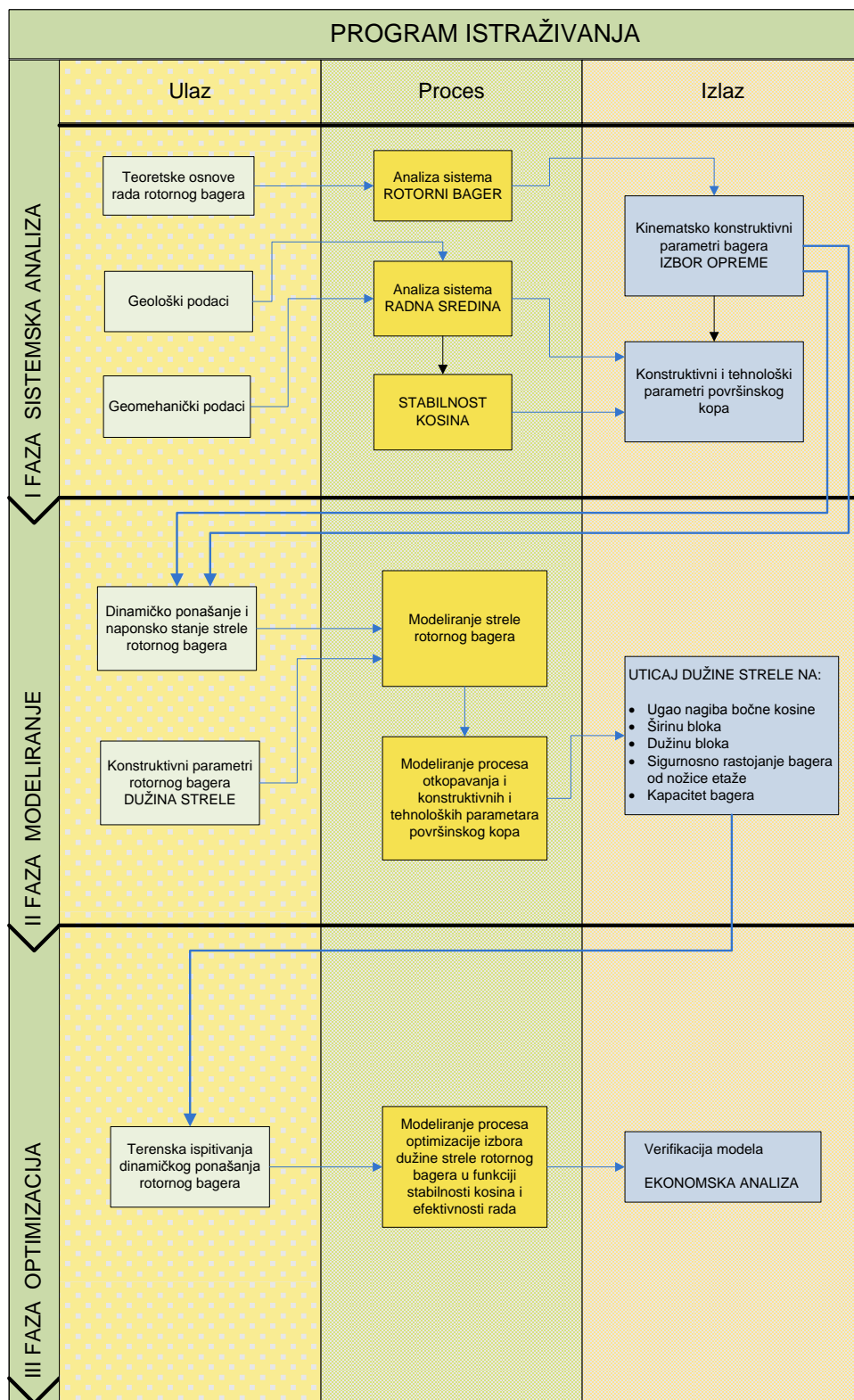
Pri izradi doktorske disertacije korišćene su metode modeliranja rada mehanizacije, kao i metode konačnih elemenata za modeliranje radnog organa rotornog bagera (rotora) i modeliranje radne sredine u cilju određivanja dinamičkog ponašanja i tehničko-tehnoloških mogućnosti rotornih bagera, u cilju pravilnog izbora konstrukcije bagera.

Provera definisane metodologije istraživanja je obavljena sa realnim podacima sa površinskih kopova *R.B. KOLUBARA* i terenskim merenjima dinamičkog ponašanja rotornog bagera u cilju izbora optimalnih parametara rada bagera tako da dobijeni rezultati mogu biti korišćeni za izbor optimalne dužine strele rotornih bagera prilikom izbora i kupovine mehanizacije za potrebe novih rudnika lignita Srbije.

Metodologija istraživanja je prikazana na *Slici 1.1.* i sastoji se iz tri faze: faze sistemske analize, faze modeliranja i faze optimizacije. Istraživanjem je obuhvaćeno:

- Analiza celokupne problematike, posebno pristup uticajnim faktorima, stabilnosti kosina, dijagnostici ponašanja i proučavanju postojeće literature ;

- Izrada modela strele rotornog bagera metodom konačnih elemenata ;
- Proračun sopstvene frekfence i dinamičkog ponašanja radnog organa;
- Izrada simulacionog modela rada rotornog bagera i proračun parametra bloka i podetaže za različite tipove rotornih bagera i dužine strela ;
- Izrada modela radne sredine za proračun njene stabilnosti ;
- Terenska merenja dinamičkog ponašanja strele i potvrda modela ;
- Obrada i ekonomska analiza dobijenih rezultata ;
- Diskusija i zaključak.



Slika 1.1. Metodologija istraživanja

1.5. Naučni doprinos disertacije

Tema doktorske disertacije obuhvata istraživanje veoma aktuelne i značajne problematike iz oblasti površinske eksploatacije i izbora opreme za rad u složenim uslovima radne sredine (velika raslojenost uglja, složeni uslovi zaleganja i dr.). Posebna pažnja biće posvećena detaljnom izučavanju i analizi uticaja dužine strele na obezbeđenje stabilnih kosina (izrada blagih kosina pri projektovanim visinama kopanja), kao i uticaj na efektivnost procesa rada bagera i ukupnu ekonomiku eksploatacije.

Na osnovu postavljenih ciljeva i zadataka, disertacija treba da pruži naučni doprinos kroz:

- detaljno izučavanje i analizu uticaja fizičko-mehaničkih svojstava radne sredine na stabilnosti kosina, odnosno na efektivnost procesa rada rotornog bagera ;
- definisanje metodologije za izradu simulacionog modela stabilnosti kosina i rada rotornog bagera ;
- definisanje metodologije za izradu modela radnog elementa rotornog bagera (strele bagera) metodom konačnih elemenata i terenskih merenja koja će verifikovati model rada bagera i dinamičko ponašanje pri otkopavanju u složenim uslovima radne sredine ;
- izbor optimalne dužine strele rotornih bagera za uslove radne sredine površinskih kopova lignita u Srbiji.

Sa realizacijom ovako postavljenih istraživanja stvoriće se uslovi za definisanje metodologije za optimalan izbor dužine strele uz smanjenje troškova eksploatacije.

1.6. Primenljivost rezultata istraživanja

Metodologija optimizacije dužine strele rotornih bagera u funkciji stabilnosti kosina i efektivnosti rada na površinskim kopovima lignita Srbije je veoma aktuelna jer do sada prilikom izbora rotornih bagera nije vršena naučna i tehno-ekonomska analiza pogodnosti tipa bagera i optimalne dužine strele za konkretne uslove radne sredine lignitskih basena Srbije, pre svega sa aspekta usaglašenosti dužine strele i mogućnosti ostvarivanja zahtevanih uglova nagiba kosina u cilju ostvarivanja stabilnosti kosina i bezbednog rada na površinskom kopu. Predložena metodologija će stvoriti preduslove da za složene uslove radne sredine koji se očekuju u narednom periodu (*P.K. POLJE E, P.K. RADLJEVO* i dr.) izvrši izbor, kako optimalnog tipa bagera, tako i optimalne dužine strele. Ovakvim pristupom će se omogućiti bezbedniji rad sa jedne strane, a sa druge strane postići će se maksimalni ekonomski efekti rada rotornih bagera.

Kako se za nove površinske kopove očekuje nabavka novih rotornih bagera, metodologija i integralni tehno-ekonomski model biće prihvatljivi već u fazi izrade tehno-ekonomske dokumentacije za otvaranje kopova i nabavku nove opreme.

1.7. Struktura disertacije sa kratkim pregledom poglavlja

Postavljeni ciljevi i metodologija istraživanja odredili su osnovni sadržaj disertacije koji je strukturiran u dvanaest poglavlja.

U prvom poglavlju dat je prikaz postavke i opis problema, ciljevi, osnovne hipoteze, primenjena metodologija i primenljivost istraživanja, kao i kratak prikaz sadržaja rada.

U drugom poglavlju dat je kratak pregled istraživanja i iskustava u predmetnoj oblasti, kako u zemlji, tako i u inostranstvu.

U trećem poglavlju date se teoretske osnove rada rotornih bagera, počev od konstruktivnih karakteristika, preko tehnologije rada i kapaciteta.

Četvrtim poglavljem opisano je modeliranje radne sredine na površinskim kopovima lignita, uz navođenje metoda i programskih paketa koji se tom prilikom koriste da bi se što realnije definisao prostor budućih površinskih kopova. U ovom poglavlju istaknut je značaj procesa modeliranja u svim periodima površinske eksploatacije.

U petom poglavlju dat je prikaz teoretskih osnova proračuna stabilnosti kosina (uticajni faktori, karakter uticaja kada se koji faktor uzima u obzir, sadržaj i obim potrebnih laboratorijskih ispitivanja fizičko-mehaničkih svojstava materijala i metode proračuna). Prikazan je proračun faktora stabilnosti parcijalnih kosina za različite visine i nagibe etaža za uslove radne sredine *R.B. KOLUBARA*.

U šestom poglavlju analizirano je dinamičko ponašanje i naponsko stanje strele bagera u funkciji promene dužine strele. Određene su promene sopstvenih frekvencija, mase strele i napona u funkciji dužine strele. Modeliranje je izvršeno metodom konačnih elemenata.

U sedmom poglavlju prikazana su terenska ispitivanja dinamike rada rotornog bagera u konkretnim uslovima radne sredine *R.B. KOLUBARA*, čime je potvrđena verodostojnost modela.

U osmom poglavlju izvršena je analiza tehnoloških mogućnosti za različite tipove rotornih bagera. Pre svega, razmatran je uticaj dužine strele bagera na ugao nagiba bočne kosine, širinu bloka, dužinu otkopavanja bloka u jednom tehnološkom ciklusu, kao i na sigurnosno rastojanje koje se može ostvariti između bagera i etaže. Posebno je razmatran uticaj dužine strele na kapacitet rotornog bagera, odnosno na efikasnost rada u okviru bloka kao i uticaj na stabilnost kosina i bezbedan rad bagera.

U devetom poglavlju izvršena je ekonomska analiza u funkciji promene dužine strele rotornog bagera. Uzeta su u obzir neophodna investiciona ulaganja koja su neophodna zbog promene dužine strele, kao i ekonomski efekti koji se dobijaju sa povećanjem dužine strele.

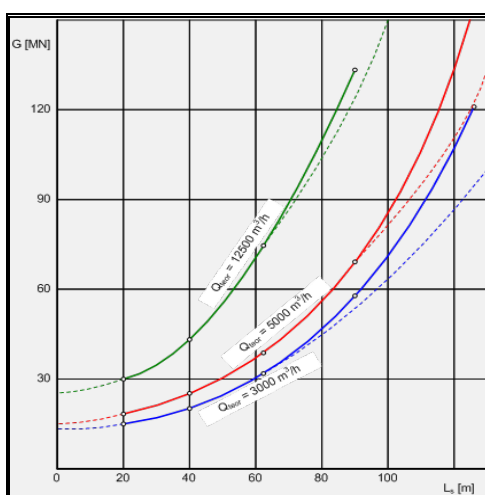
U desetom poglavlju data su zaključna razmatranja vezana za istraživanje uticaja promene dužine strele rotornih bagera.

U jedanaestom poglavlju dat je pregled korišćene literature.

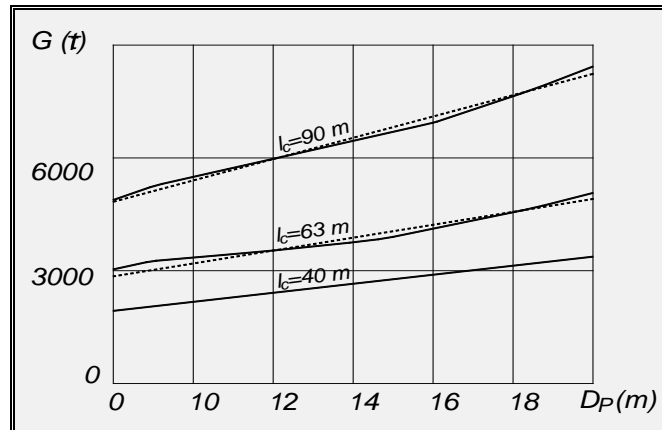
2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA I ISKUSTAVA U OVOJ OBLASTI

Strelna bagera čini najopterećeniji i najbitniji deo konstrukcije bagera, učestvujući sa svega 6 do 13 % u masi celog bagera. Njena dužina se bira u zavisnosti od tehnoloških zahteva otkopavanja ležišta, a mora biti usklađena i sa konstruktivnim mogućnostima bagera. Na osnovu zahteva tehnologije otkopavanja koja je usaglašena sa fizičko-mehaničkim svojstvima ležišta, stvaraju se uslovi za izbor optimalnih parametara bagera, a samim tim i za određivanje potrebne dužine strele.

Ruski stručnjak Н.Г. Домбровский je u svojoj monografiji *МНОГОКОВШОВЫЕ ЭКСКАВАТОРЫ* [12] naznačio faktore od kojih zavisi dužina strele bagera. Konstruktivna šema bagera (prečnik rotora, visina zgloba oslonca strele, poprečni presek strele, gabariti gusenica itd.), zadata tehnologija i rudarsko-geološki uslovi rada (karakteristike i sastav materijala u kojima radi bager, visina i dubina kopanja, nagibi čeonih i bočnih kosina itd.) su najznačajniji od njih. Promena težine bagera u zavisnosti od dužine strele i prečnika rotora na primeru bagera kapaciteta $Q=5000$ (m^3/h), prikazana je na *Slikama 2.1. i 2.2.*



Slika 2.1. - Uticaj dužine strele bagera (L_s) na težinu bagera (G) različitih kapaciteta



Slika 2.2. - Uticaj dužine strele bagera (L_s) i prečnika rotora (D_p) na težinu bagera (G) kapaciteta $Q=5000 \text{ (m}^3/\text{h)}$

Polazeći od osnovnih podataka, isti autor je dao izraz za proračun minimalne dužine strele :

$$L_s = \frac{H_k - h_z}{\sin \gamma_{\max}} \quad (2.1)$$

gde su :

L_s - dužina strele bagera (m) ;

H_k - maksimalna visina kopanja (m) ;

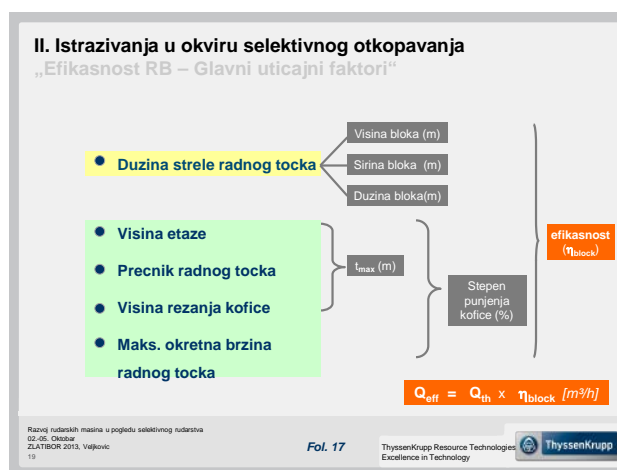
h_z - visina zgloba oslonca strele (m) ;

γ_{\max} - granični uglovi nagiba transporterera na streli bagera ($^\circ$).

Takođe, za određivanje dužine strele bagera (L_s) može se koristiti približna zavisnost od prečnika rotora (D_{rt}) :

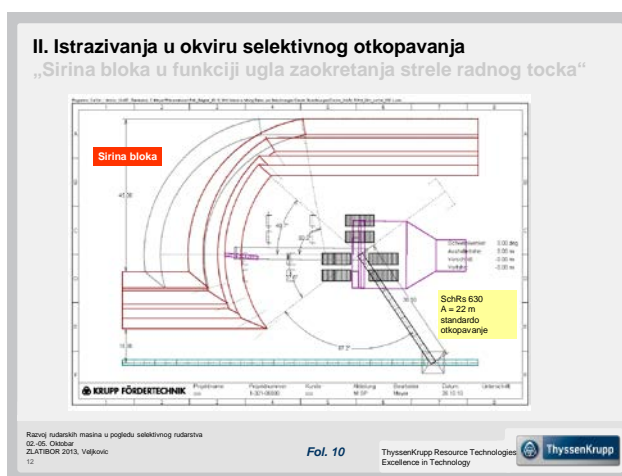
$$L_s \approx (2.6 \div 3.3) D_{rt} \quad (2.2)$$

Autor Thomas Meyer (*ThyssenKrupp*) u svom radu *Otkopavanje i transport uglja na površinskim kopovima uglja sa posebnim osvrtom na selektivno otkopavanje* [33], kao i Nenad Veljković (*ThyssenKrupp*) u svom radu *Razvoj kontinualnih rudarskih mašina u rudnicima lignita EPS-a i njihova primena u pogledu selektivnog otkopavanja* [66], dali su analizu rada nekih tipova rotornih bagera na kopovima Elektroprivrede Srbije, sa posebnim osvrtom na tip bagera, dužinu strele i njihov selektivni rad. Na osnovu analize urađene uz pomoć programskog paketa *CATSIM*, identifikovani su oni parametri koji utiču na efikasnost rada rotornog bagera u procesu selektivnog otkopavanja. Ulazni podaci su: visina i širina bloka, uglovi nagiba kosina, teoretski kapacitet, prečnik radnog točka, položaj zgloba strele bagera, dohvat rotora, dimenzije trake, brzina kretanja, brzina okretanja strele bagera i brzina njenog podizanja. Kao rezultat se dobijaju: pojedinačno radno vreme, ukupno radno vreme za jedan blok, efektivni kapacitet i efikasnost bagera. Tom prilikom je zaključeno da u zavisnosti od dužine strele bagera, rotorni bageri otkopavaju blokove određene visine, širine i dužine, tj. sa povećanjem dužine strele bagera povećava se i dužina bloka (*Slika 2.3.*). Takođe, sa povećanjem zapremine bloka povećava se i efikasnost bagera.

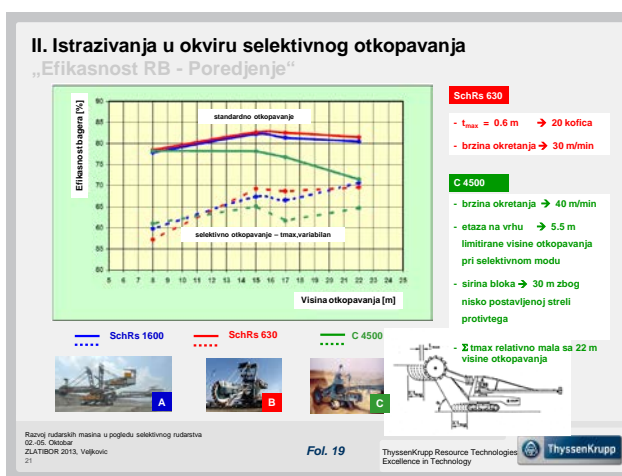


Slika 2.3. – Uticajni faktori na efikasnost rada bagera

Širina bloka je određena uglom okretanja strele bagera, kao i njenom dužinom (Slika 2.4.). Analiza rada navedenih bagera rađena je za različite visine bloka i to između 8 i 22 m. Kao referentni bager uzet je bager SchRs-630x25/6 (TIP B). Za selektivno otkopavanje urađene su varijacije ukupne visine kopanja i proizvoljno izabrane visine podetaža. Došlo se do zaključka da ne postoji velika razlika u efikasnosti između bagera tipa (A) i (B), dok je kod bagera tipa (C) uočena kao nedostatak relativno kratka dužina strele bagera (Slika 2.5.).



Slika 2.4. – Određivanje širine bloka



Slika 2.5. – Uporedna analiza efikasnosti rada rotornih bagera tipa (A), (B) i (C)

Kao konačni zaključak navedene su prednosti koje duža strela bagera ima u odnosu na kraću, i to :

- duža strela bagera je pogodnija za selektivno otkopavanje u gornjim podetažama;
- duža strela bagera ima manji nagib trake na streli bagera pri radu u gornjim podetažama;
- pri radu sa dužom strelom bagera, smanjuje se interval pomeranja transporterata;
- duža strela bagera omogućuje veće dubine kopanja;
- duža strela bagera omogućuje veću dužinu i efikasnost bloka, pa samim tim i veći kapacitet;
- sa dužom strelom bagera moguće je otkopavati etaže koje zahtevaju manje uglove nagiba što je posebno značajno pri radu u materijalu sa slabijim fizičko-mehaničkim svojstvima.

Studija pod naslovom *Istraživanje i utvrđivanje tehnološko-tehničkih osnova za projektovanje rotornih bagera za otkopavanje otkrivke i uglja na površinskim otkopima SR Srbije* [52], koja je uradjena od strane Stručnog tima na Katedri za mehanizaciju rudnika Rudarsko-geološkog fakulteta u Beogradu (1988. godina), imala je za cilj da na osnovu tadašnje Strategije dugoročnog razvoja energetike SR Srbije, utvrđenih rezervi uglja , rudarsko-geoloških uslova u kojima će raditi bageri, stečenih iskustava u dotadašnjoj eksploataciji i nabavci bagera, sagleda mogućnost za izbor, projektovanje i proizvodnju domaćih bagera za otkopavanje uglja i otkrivke na površinskim otkopima u SR Srbiji. Tom prilikom su obradjena dotadašnja iskustva i problematika u nabavci rotornih bagera za površinske kopove SR Srbije. Prikazani su razni tipovi bagera iz mnogih zemalja proizvođača te vrste mehanizacije (DR Nemačka, SSSR, ČSSR, SAD, SR Nemačka), date su njihove konstruktivne karakteristike kao i tehnološke šeme rada na otkrivci, uglju i odlaganju. Takodje su obrađena i poglavlja vezana za razvoj proizvodnje uglja iz površinske eksploatacije, postojeće stanje i dinamiku razvoja površinskih otkopa lignita, geološku građu,

inženjersko-geološke i hidrogeološke uslove ležišta, fizičko-mehanička svojstva radne sredine sa definisanjem građe ugljenog sloja, otpore rezanja, geomehaničke uslove stabilnosti kosina i nosivosti tla, instalisane kapacitete, dinamiku proizvodnje uglja i otkrivke, prikaz i analizu uzajamnih zavisnosti geometrijskih i kinematskih parametara bagera i parametara radne sredine, procenu budućih potreba za rotornim bagerima kao i ekonomska razmatranja. Zaključeno je da je za osvajanje proizvodnje rotornih bagera, koji će biti prilagođeni radnoj sredini površinskih kopova Srbije, neophodno angažovanje velikog broja stručnjaka rudarske, mašinske, elektro, građevinske i geološke struke sa prvenstvenim ciljem da se odrede parametri mehanizacije saglasni radnoj sredini u kojoj će oni raditi, urade projekti, organizuje probni rad bagera kao i njihovo uhodavanje. Pri tome, vrlo bitan je i organizacioni faktor kome treba posvetiti izuzetnu pažnju.

U svom magistarskom radu *Istraživanje uzajamnog uticaja konstrukcije točka i strele rotornog bagera i njihove pouzdanosti* [44], autor D. Polovina je analizom i obradom podataka za veći broj rotornih bagera pokazao značaj i ulogu njihove strele i rotora, tj. njihov uticaj na rad i pouzdanost rotornog bagera. Tom prilikom je naveo i materijale koji se primenjuju za izradu i montažu čelične konstrukcije strele, kao i antikoroziону zaštitu koja se primenjuje za njeno održavanje. Posebno poglavlje posvetio je dužini strele bagera, kao i njenom opterećenju gde je zaključeno da neadekvatno odabrana dužina strele ima za direktnu posledicu preveliku masu bagera ili nedovoljnu visinu otkopavanja.

Autor S. Kovačević je u svom radu *Tehničko-tehnološki zahtevi za konstruisanje rotornog bagera pogodnog za površinske kopove lignita u Srbiji* [23], dao prikaz zahteva za konstruisanje rotornog bagera za rad na površinskim kopovima lignita Srbije, koji su proistekli iz sagledavanja fizičko-mehaničkih svojstava materijala u kojima će raditi bager, tehničkih parametara bloka i kapaciteta, kao i pretpostavki nekih od bitnih karakteristika tog bagera koji ispunjava napred navedene uslove. Imajući u vidu fizičko-mehaničke

karakteristike materijala u kojima će raditi bager, kao i uslove koje treba da ispuni, pretpostavljeni su neki od tehničko-tehnoloških karakteristika koje bi taj bager trebalo da ima:

- teoretski kapacitet između $Q_t = 3500-4200 \text{ m}^3/\text{h}$;
- visina kopanja oko 20 m, sa mogućnošću rada ispod nivelete stajanja do 5m
- specifični pritisak na tlo $\sigma_p = 10 \text{ N/cm}^2$;
- prečnik radnog točka $D_{rt} = 12.2 \sqrt{Q}$;
- broj istresanja vedrice u min. 44-48;
- brzina rezanja 2,4-2,8 m/s;
- pri konstruisanju bagera težiti da odnos teoretskog kapaciteta (Q_t) i ukupne težine bagera (G) bude:

$$\frac{Q_t}{G} > 3 \quad (2.3)$$

Autori Pavlović V., Ignjatović D., Stepanović S. i Petrović B. su u svom radu *Metodologija izbora rotornog bagera za selektivnu eksploataciju uglja* [38], dali prikaz metodologije izbora rotornog bagera za selektivnu eksploataciju uglja na površinskom kopu kolubarskog basena uglja P.K. RADLJEVO. Analizirani su različiti tipovi rotornih bagera (kompaktni i standardni), uz proračun tehnoloških parametara i kapaciteta, kao i utvrđivanje efikasnosti rada, procena troškova nabavke i operativnih troškova. Ulazne podatke za analize predstavljaju: parametri radne sredine sa najznačajnijim strukturnim karakteristikama, kao što su: debljina i nagib proslojaka u uglju i kvalitet uglja. Fizičko-mehanička svojstva radne sredine utiču na dimenzionisanje otkopavanja sa parametrima bloka i izbor rotornog bagera preko moguće debljine reza i nivoa selekcije, kao i uslova vezanih za stabilnost kosina i nosivost podloge. Za svaki deo okonturenog

prostora etaže vrši se interpolacija i interpretacija karakteristika radne sredine i kapaciteta bagera u selektivnom radu za različite vrednosti otpora kopanja uglja i jalovine. Za upoređenje karakteristika standardnih i kompaktnih rotornih bagera posmatrani su sledeći tehničko-tehnološki i ekonomski parametri:

- tehnološke mogućnosti i konstruktivne karakteristike rotornih bagera;
- investicioni troškovi;
- eksploatacioni troškovi i
- troškovi održavanja.

Tom prilikom je konstatovano da kompaktni bageri imaju manji koeficijent vremenskog iskorišćenja rada u bloku (odnos proizvodnog i neproizvodnog vremena rada) koji iznosi 0.55 do 0.65, u odnosu na standardne rotorne bagere kod kojih je taj koeficijent od 0.75 do 0.85. Razlozi su brojni i raznovrsni a prevashodno se mogu izdvojiti nedostaci koji se ogledaju u činjenicama da manja dužina strele bagera povlači za sobom manju širinu, manju visinu i manji korak napredovanja bagera u bloku, da nije moguć nesmetani pristup dozera u cilju planiranja trase za nastup bagera, da se formiraju veći uglovi nagiba čeonih i bočnih etažnih kosina i dr. Preliminarna analiza investicionih troškova pokazala je da su kompaktni bageri nešto jeftiniji u nabavci ali da su troškovi održavanja nešto veći kao i da je nešto kraći njihov eksploatacioni vek. Prosečni eksploatacioni troškovi prema sprovedenoj analizi su kod kompaktnih bagera veći za oko 20%. Sprovedena tehno-ekonomska analiza je pokazala da je za uslove radne sredine površinskog kopa *RADLJEVO*, sa aspekta tehnologije rada i kapacitativnog iskorišćenja, optimalna primena rotornih bagera klase (B). U prilog tome idu i iskustva stečena na površinskim kopovima Tamnave.

Ilić Lj. je u svom radu *Uticaoj geomehaničkih karakteristika na izbor bagera* [20], prikazao rezultate višegodišnjeg istraživanja vezanih za uticaj geomehaničkih karakteristika radne sredine na izbor mehanizacije kao i dimenzionisanje geometrije etaža površinskog kopa. U konkretnom slučaju,

geomehanika se u rudarstvu razvila u dva pravca i to: oblast definisanja geometrije površinskog kopa i druga oblast, izbor rudarske opreme u zavisnosti od geoloških karakteristika ležišta. Prilikom izbora rudarske opreme za površinski kop sa određenim kapacitetom, veoma je značajno da izabrani bager pored potrebnih tehničko-tehnoloških parametara (kapacitet, visina i širina bloka, nagib etaža) zadovolji i sposobnost kopanja materijala u kome će raditi, što se prvenstveno odnosi na tačan proračun njegove rezne sile. Dosadašnja iskustva pokazuju da se ponekad za definisanje karakteristika rotornog bagera razmatrao samo njegov kapacitet koga on treba da ostvari, a da se zbog zanemarivanja ostalih kriterijuma često dolazilo u nepriliku kao što je slučaj na površinskom kopu *SUVODOL*, kada je izabran rotorni bager *SchRs-2000*, koji nije mogao u potpunosti da iskoristi svoju visinu kopanja zbog problema sa otporima pri kopanju materijala. Zato je neohodno da se nakon definisanja visine i nagiba etaže, tačno odrede i ostale osobine materijala koji se otkopava, a to su tvrdoća, abrazivnost, lepljivost, komadnost, otpori kopanja, tj. rezna sila za čije se određivanje mogu upotrebiti i neke od korelacionih metoda.

Autori Cvetković M., Popović R. i Majstorović J. su u svom radu *Geomehanička istraživanja u fazi eksploatacije i njihov značaj* [9], dali prikaz neophodnosti geomehaničkih istraživanja u fazi rudarske eksploatacije na površinskim kopovima. Kao pozitivan primer istraživanja u procesu eksploatacije, prikazali su dva slučaja, i to: prvi slučaj se odnosi na *P.K. TAMNAVA ZAPAD – RB KOLUBARA*, a drugi na površinski kop boksita *ZAGRAD – Nikšić*. Materijal koji se otkopava, bilo da je reč o mekom tlu ili pak steni, pod dejstvom spoljnih sila se deformiše a toj deformaciji suprotstavljaju se sile unutrašnje veze. Kada spoljne sile porastu do određene veličine i kada prekorače vrednost otpora unutrašnjih sila, tada dolazi do razaranja unutrašnje veze, a time i do rušenja tla. Na ovoj jednostavnoj i osnovnoj pretpostavci zasnivaju se svi inženjerski proračuni, pa time i proračuni stabilnosti radnih etaža i završne geometrije konstrukcije površinskog kopa. Sva istraživanja rudnog ležišta počevši od geoloških preko hidrogeoloških pa do geomehaničkih,

koja se obavljaju za potrebe projektovanja rudarske eksploatacije, bez obzira na obim i vrstu istražnih radova, imaju u većoj ili manjoj meri samo prognozni karakter. Otvaranjem i razvojem eksploatacije površinskog kopa, istraživanja se moraju usmeriti prevashodno na detaljno inženjersko-geološko kartiranje kako bi se uočili i najtanji litološki članovi ili pukotine, koje se bušenjem nisu mogle identifikovati. Tako je na površinskom kopu *TAMNAVA ZAPAD – RB KOLUBARA*, rudarska operativa uočila jedan proslojak ugljevit gline u alevritima koji nije bio identifikovan u fazi geoloških istraživanja bušenjem. Na osnovu toga, predloženo je da se tehnologija otkopavanja otkrivke prilagodi tako da suma smičućih sila bude manja od sile otpora najslabijeg litološkog člana (upravo kod proslojka ugljevit gline), uključujući i deformacije izazvane sniženjem nivoa podzemnih voda. Otvaranje i razrada površinskog kopa *ZAGRAD – Nikšić* izvršeni su po projektu koji je koristio geomehaničke parametre morenskog materijala dobijene u fazi geoloških istraživanja bušenjem. Na osnovu „*in-situ*“ definisanih vrednosti parametara čvrstoće na smicanje, došlo se do saznanja da se mogu povećati uglovi nagiba radnih etaža i završne kosine što se direktno odražava na smanjenje troškova nepotrebnog skidanja i transporta jalovinskih naslaga.

U svom radu, *Značaj analize stabilnosti kosina za proces eksploatacije uglja u RB KOLUBARA* [42], autori Petrović B., Radisavljević Z. i Milošević D. su na nekoliko primera vezanih za *R.B. KOLUBARA* pokazali značaj analize stabilnosti kosina površinskog kopa i njen uticaj na dalji tok proizvodnje. Osnovni cilj kod projektovanja kosina površinskog kopa je postići maksimalan nagib za zadatau maksimalnu visinu kosine pri minimalnom faktoru sigurnosti i optimalnim uslovima stabilnosti. Pravilno definisanje geometrije kosine, kako parcijalne tako i generalne, čini nešto neizostavno već u fazi projektovanja, a tokom eksploatacije nešto obavezno. Zadnjih petnaestak godina na kopovima *R.B. KOLUBARA* desio se izvestan broj havarija koje su posledica upravo nepoštovanja osnovnih načela projektovanja i razvoja rudarskih radova na njima. Neopravdana improvizacija, bez relevantnih analiza i proračuna, za posledicu je imala havariju unutrašnjeg odlagališta *POLJE B* (pokrenuto oko

80.000.000 m³ odložene mase). U zoni severne kosine površinskog kopa *POLJE D*, 2011. godine je usled klizanja gornjih delova etaže (gline), došlo do oštećenja rotornog bagera (pogonska oznaka G-3), pri čemu je bager bio van upotrebe oko godinu dana (*Slika 2.6.*).

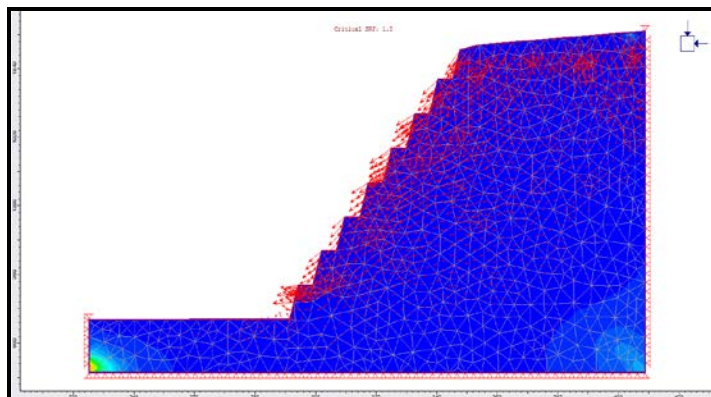


Slika 2.6.- Oštećeni bager (G-3) usled zarušavanja etaže na severnoj kosini kopa Polje D

Naknadnom analizom stabilnosti pomenute kosine utvrđena je vrednost faktora sigurnosti $F_s=0.83$, pri koeficijentu prornog pritiska $r_u=0$, odnosno $F_s=0.62$ pri $r_u=0.2$. Slično se desilo i sredinom 2013. godine u zoni sela Junkovac, kada su usled velikog ruča pokrenute odložene mase (oko 20.000.000 m³) ugrozile nekoliko domaćinstava pomenutog sela. I ovde je bilo reči o nepoštovanju struke i rada bez prethodnih i tokom proizvodnje uradjenih analiza stabilnosti kosina kopa.

Autori Čebašek V. i Gojković N. su u svom radu *Analiza stabilnosti kosina metodom konačnih elemenata* [11], prikazali mogućnost primene konačnih elemenata za određivanje faktora sigurnosti (F_s) pri analizi stabilnosti kosina površinskog kopa. Dobijene rezultate su uporedili sa rezultatima drugih metoda koje su u upotrebi za rešavanje ove problematike. Zaključeno je da u slučaju kada je kosina izgradjena od poluvezanih i nevezanih materijala, tada je

praktičnija primena metoda granične ravnoteže. Medjutim, u slučaju kada kosina ima složenu građu, tako da se pored poluvezanih i nevezanih nalaze i čvrsti stenski materijali, onda je primena metode konačnih elemenata opravdana (Slika 2.7.), bolje reći i poželjna.



Slika 2.7. - Model kosina sa mrežom konačnih elemenata

Tehno-ekonomska analiza optimalnog izbora opreme površinskog kopa uglja [68], je rad autora Vučetić A., Vučetić S. i Pešić M. u kome je prikazan izbor optimalnog rotornog bagera za selektivnu eksploataciju uglja sa aspekta mikroekonomije. Pri nabavci rotornog bagera za selektivno otkopavanje uglja na površinskom kopu dilema pred kojom se menadžment može naći je opravdanost izvršenog ulaganja, odnosno da li izabрати rotorni bager koji je jeftiniji ali nešto slabijih performansi ili skuplji ali sa boljim radnim karakteristikama. Kako bi menadžment doneo ispravnu odluku potrebno je da definiše metodologiju za optimalni izbor rotornog bagera, koja mora da bude objektivna i proveriva a rezultat koji opredeljuje izbor mora biti jasan i nedvosmislen. Kao mera za izbor uglavnom se uzima prosečni trošak proizvodnje jedne tone uglja koju otkopa bager. Kroz simulaciju rada dva izabrana rotorna bagera u periodu od 20 godina, uzeti su u obzir visina investicionih ulaganja, koja prethodi stavljanju bagera u funkciju, kao i operativni troškovi njihovog angažovanja u posmatranom periodu. Došlo se do zaključka da je i pored većeg početnog investicionog ulaganja bolje izabrati takav bager

nego bager sa manjim investicionim ulaganjem, a većim prosečnim troškovima proizvodnje.

T.S. Golosinski i R.K. Singhal su u svom radu *Productivity from bucket wheel excavators* [16], razmatrali produktivnost rotornih bagera, naglasivši da ona zavisi od nekoliko faktora i to: broja, veličine i oblika vedrica, prečnika rotora, njegove brzine okretanja u minuti, dužine strele bagera, njene brzine zaokretanja i podizanja, visine etaže, uglova nagiba etaža, pouzdanosti bagera, efikasnosti njegovog održavanja, pouzdanosti ostalih komponenti rudarskog sistema, organizacije posla, efikasnosti planiranja i upravljanja procesom itd. Istakli su da se proračun kapaciteta bloka (Q_b), koji se koristi za kratkoročno planiranje, može izraziti na sledeći način:

$$Q_b = \frac{Q_t}{\left(1 + \frac{t_m}{t_d}\right) f_s} \quad (\text{bm}^3/\text{h}) \quad (2.4)$$

gde su :

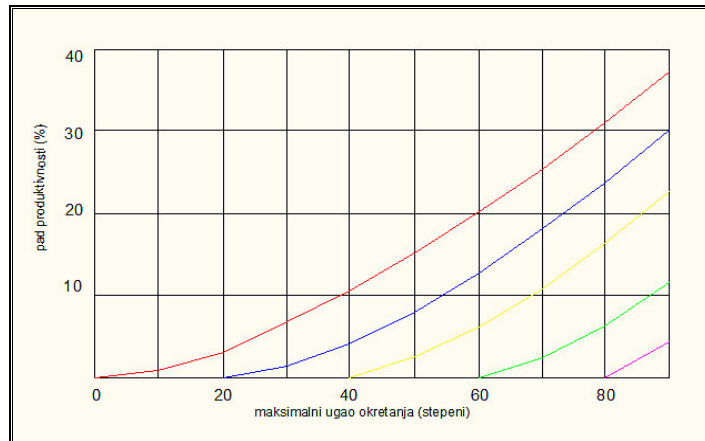
Q_t – teoretski kapacitet (rm^3/h),

t_d – neto vreme kopanja bloka (h),

t_m – vreme manevrisanja tokom kopanja bloka (h),

f_s – faktor bubrenja iskopanog materijala.

Produktivnost bloka (Q_b) ne odražava svu složenost procesa otkopavanja materijala rotornim bagerom, pa se za to i ne može koristiti za dugoročno planiranje rada rudnika već samo za kratkoročno. Dodatni gubitak produktivnosti se dešava na krajevima bloka i pri otkopavanju bloka u teškim vremenskim uslovima. Kako se ugao zaokretanja strele bagera povećava, tako se i produktivnost bagera smanjuje. Na (*Slici 2.8.*), prikazan je pad produktivnosti u zavisnosti od ugla okretanja strele bagera. Produktivnost se može održavati za uglove zaokretanja do 60° , mada većina rezova zahteva veće uglove što i rezultira padom produktivnosti.



Slika 2.8. - Pad produktivnosti bagera u zavisnosti od ugla okretanja strele bagera

Tačna procena vremena rada bagera zahteva poznavanje njegovih performansi, prateće opreme, precizne geološke karakteristike ležišta i organizaciju rada. Preporučljivo je da procenu godišnjeg kapaciteta bagera treba pratiti u odnosu na sličnu opremu pri sličnim uslovima otkopavanja.

Grupa autora A. Brkić, T. Manevski, D. Ignjatović, P. Jovančić i V. Spasojević-Brkić, je u svom radu *Diagnostics of bucket wheel excavator discharge boom dynamic performance and its reconstruction* [8], istražila uzroke loših dinamičkih performansi rotornog bagera C-700 S koji radi na površinskom kopu u R.B. KOLUBARA. Statički i dinamički proračuni su napravljeni primenom metode konačnih elemenata (MKE), a potvrđeni su eksperimentalnom metodom – analizom vibracija. Primena ove metodologije znatno doprinosi poboljšanju performansi cele konstrukcije bagera, što pokazuju i rezultati merenja (maksimalne deformacije su smanjene sa 104 mm na 51.5 mm), dok su sva ubrzanja strukture svedena u granice dozvoljenog (do 2m/s²).

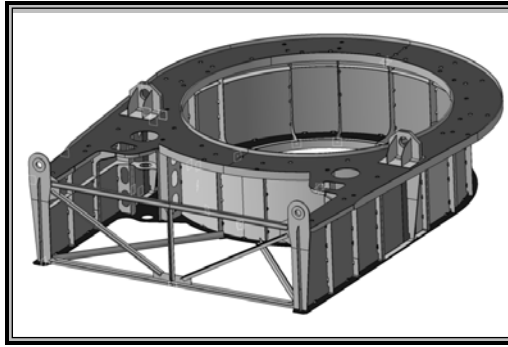
Bošnjak S. , Zarić N. , Oguamanam D. su u svom radu *On the dynamic modelling of bucket wheel excavators* [5], razmatrali dinamičko ponašanje bagera izazvano otporom kopanja, koje zavisi od relativno velikog broja faktora koji se mogu svrstati u dve grupe. Prvu grupu čine dinamičke karakteristike

noseće konstrukcije i mehanizma, a drugu, karakteristike tla. Analiza dinamičkog ponašanja je zahtevala rešavanje dva problema :

- problem dinamičkog modelovanja cele mašine ;
- problem modelovanja spoljašnjeg opterećenja izazvanog otporom tla pri kopanju.

Tokom procesa kopanja, osnovni elementi konstrukcije gornje gradnje rotornih bagera (stub, konzola protivteg, strela bagera, odložna strela) izloženi su opterećenjima koja izazivaju podužne, savojne i uvojne oscilacije. Podužne oscilacije rešetkastih struktura mogu da se razmatraju nezavisno od savojnih i uvojnih oscilacija, zbog relativno velike krutosti strukture u pomenutom pravcu. Dakle, pri modeliranju strukture rotornih bagera odgovarajućim izborom referentnih tačaka (čvorova) razmatrane konstrukcije i njihovih stepena slobode, trebalo je obuhvatiti savojne i uvojne oscilacije podstruktura. Na osnovu analize opterećenja i komparativne analize rezultata proračuna naponsko-deformacionog stanja originalne strukture obrtne platforme (*Slika 2.9.*), i nekoliko varijanti njenog konstrukcionog poboljšanja, razvijeno je:

- konstrukciono rešenje strukture obrtne platforme koja zadovoljava kriterijume čvrstoće i elastične stabilnosti, kao i zahtev da se rekonstrukcija izvede bez demontaže nadgradnje ;
- tehnologija zamene i sanacije teško oštećenih delova strukture obrtne platforme.
-



Slika 2.9. - 3D model strukture obrtne platforme

Rekonstrukcijom strukture obrtne platforme ojačavanjem donje ploče i zatvaranjem postojećeg tehnološkog otvora, ostvareni su sledeći efekti:

- eliminisan je konzentator napona u zoni pojave prslina i pukotina ;
- znatno blaža promena polja deformacije strukture i
- znatno niži (za 1,73 puta) nivo naponskog stanja u kritičnim zonama.

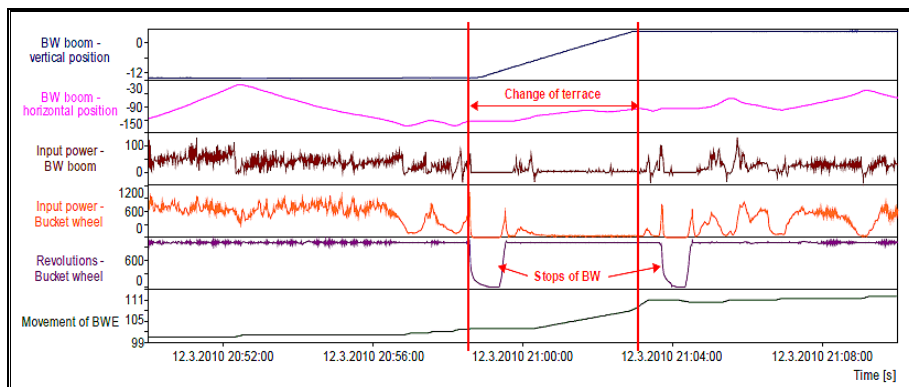
U svom radu *Slope stability evaluations by limit equilibrium and finite element methods applied to a railway in the moroccan rif* [3], autori K. Baba, L. Bahi, L. Ouadif, A. Akhssas su predstavili analizu stabilnosti kosine uz železničku prugu između Gangier-grada i Gangier-luke (Maroko), i to na dva načina, pomoću metode granične ravnoteže (konvencijalna metoda) i metodom konačnih elemenata (FEM). Proračuni su rađeni za dva stanja i to za suvo i zasićeno, uz primenu tri softvera: *PLAXIS*, *GEOSLOPE* i *TALREN* (prva dva programa za konvencijalnu metodu, a zadnji za metodu konačnih elemenata), pri *Mohr-Coulomb-ovom* kriterijumu loma. Faktori sigurnosti (Fs) su prikazani u (Tabeli 2.1.).

Tabela 2.1. - Faktori sigurnosti

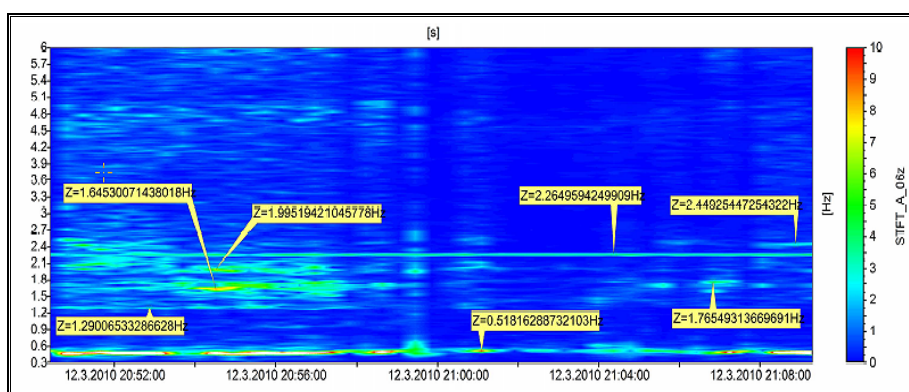
	METODA	(Fs) suvo stanje	(Fs) zavodnjeno
Metoda granične ravnoteže	<i>Bishop</i>	1.259	0.626
	<i>Felenjus</i>	1.201	0.498
	<i>Tanhu</i>	1.210	0.589
	<i>Morgenstern-Price</i>	1.253	0.628
Metoda konačnih elemenata	φ -C reduction	1.178	0.606

Može se zaključiti da su vrednosti dobijenih faktora sigurnosti (Fs) približne, pogotovo za *Morgenstern-Price*-ovu, *Bishop*-ovu metodu i (FEM). Takođe su zaključili da se primenom konačnih elemenata mogu odrediti pomeranja, predvideti mehanizam loma i korišćenjem rezultata proračuna bolje aproksimirati realno stanje terena.

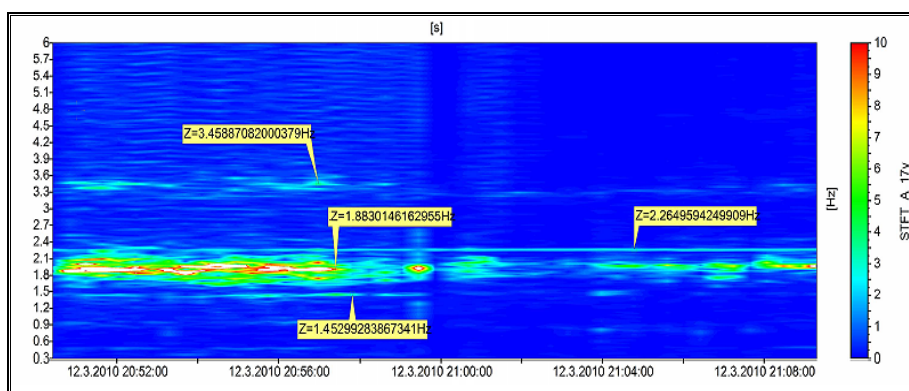
Autor Jakub Gottvald je u svom radu *Analysis of vibrations of bucket wheel excavator SchRs – 1320 during mining process* [17], prezentovao rezultate merenja vibracija na bageru SchRs – 1320 tokom otkopavanja na površinskom kopu *TUŠIMICE*. Vibracije su merene na 28 mesta gornje čelične konstrukcije pri čemu su izmereni signali povezani sa operativnim podacima centralnog kompjutera. Za izračunavanje frekvencijskih opsega mogu se koristiti razne vrste transformacija. Najpoznatije su *Fourier Transform (FT)* i njegove modifikacije *Fast Fourier Transform (FFT)*, koje su naročito pogodne za analize stacionarnih signala. Rezultati merenja pokazuju da su vibracije počele odmah nakon pokretanja rotora i da su se amplitude povećale nakon početka kopanja materijala (vrhovi amplitude 0.52 Hz, 1.38 Hz, 1.70 Hz i 2.0 Hz, a nakon uključenja pumpe reduktora rotora 2.26 Hz).



Slika 2.10. - Izmereni signali u vremenskom period br. 2



Slika 2.11. - Merenja akcelerometra A_063 z, vremenski period br. 2

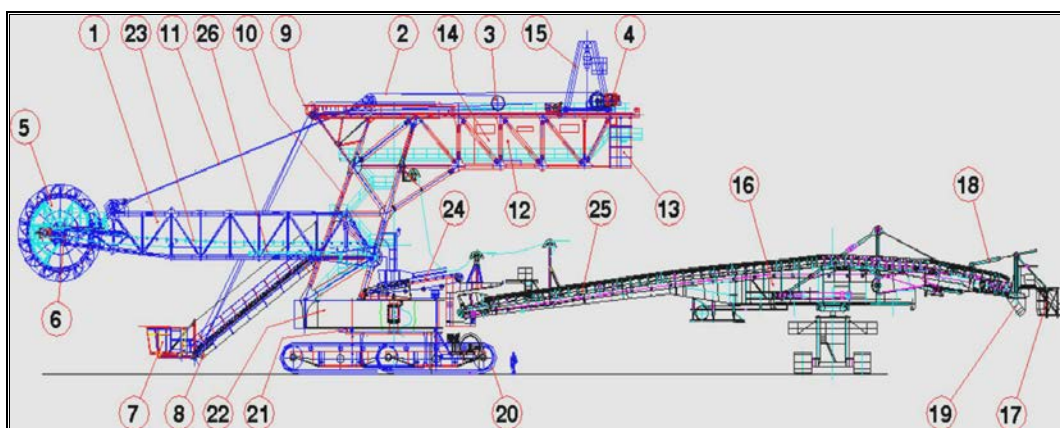


Slika 2.12. - Merenja akcelerometra A_17 y, vremenski period br. 2

Kao zaključak je izneto da su merenja urađena na celoj visini etaže čija visina ($H_e=20.5$ m) približno odgovara visini tačke vešanja strele bagera, što podrazumeva da je strela bagera bila u horizontalnom položaju. Rezultati merenja frekvencija za krajnje položaje strele se razlikuju za 0.035 Hz. Poređenjem prirodnih frekvencija tokom kopanja sa prirodnim frekvencijama koje su eksperimentalno merene, ustanovilo se da sile kopanja smanjuju vrednost ovih prvih.

3. TEORETSKE OSNOVE RADA ROTORNIH BAGERA

Rotorni bageri (Slika 3.1.) su samohodne mašine kontinualnog dejstva koje se koriste na površinskim kopovima za otkopavanje mekih i srednje tvrdih materijala. Otkopavanje materijala vrši se vedricama koje su ravnomerno raspoređene i pričvršćene na obodu rotora. Obrtanjem rotora u vertikalnoj ravni i nosača rotora zajedno sa platformom u horizontalnoj ravni, vedrice se pune i nailaskom u zonu istovarnog sektora prazne, pri čemu se materijal predaje prijemnom transporteru sa trakom na streli bagera i dalje redom, zavisno od broja transporteru na bageru, poslednjem istovarnom transporteru [21, 24, 25, 28, 37, 40, 51].



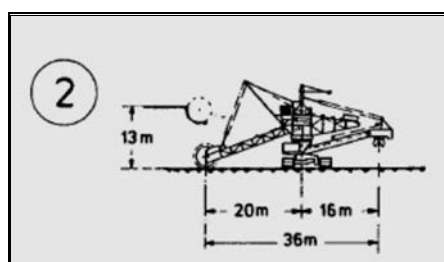
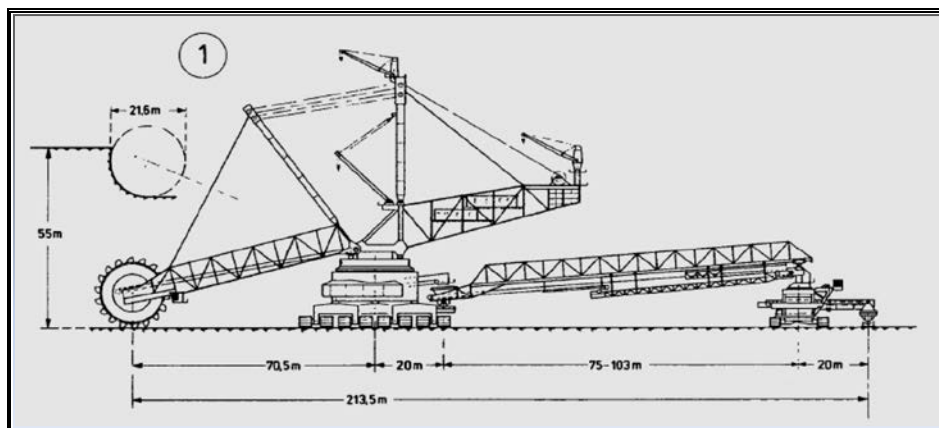
Slika 3.1. – 1. Strela bagera, 2. Uže za pomeranje kolica, 3. Vitlo za strelu bagera, 4. Pogon dizanja strele bagera, 5. Radni točak, 6. Pogon radnog točka, 7. Kabina rukovaoca, 8. Noseća konstrukcija kabine rukovaoca, 9. Pogon dizanja kabine rukovaoca, 10. Stub, 11. Zatege, 12. Strela protivtega, 13. Protivteg, 14. Elektro - kabina, 15. Kran, 16. Pretovarni uređaj, 17. Kabina rukovaoca pretovarnog uređaja, 18. Pogon za dizanja pretovarnog uređaja, 19. Istovarni levak, 20. Gusenice 21. Donji stroj sa kuglibanom 22. Obrtna platforma gornjeg stroja (sa pogonom za kružno kretanje), 23. Prijemni transporter-traka 1, 24. Transporter-traka 2, 25. Transporter-traka 3, 26. Transporter za prikupljanje materijala - prljava traka.

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 0,2-1,1 t.h/m³, mala specifična potrošnja energije 0,15-0,5 KWh/m³ i visoki koeficijent korisnog dejstva radnog organa 0,8-0,9).

Tokom istorije, ideja za kopanje tla točkom rodila se tek krajem XIX veka na osnovu obrtnog točka sa vedricama za dizanje vode za potrebe navodnjavanja koje je bilo poznato još u starom veku. Švander (Francuska) je 1913. godine patentirao radni točak sa kašikama koji iskopani materijal za vreme okretanja istovara direktno na transporter. Nemačka firma *Humbolt* je na osnovu toga 1916. godine konstruisala prvi rotorni bager na šinama koji je 1917. 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. U SSSR-u rotorni bageri su počeli da se primenjuju od 1934. godine dok je industrijska proizvodnja ovih mašina počela 1947. godine u *Зуевскомлитеинномеханическом заводу (ЗЛМЗ)*. Razvoj rotornih bagera u SAD je zapažen 1943. godine kada je prvi rotorni bager za direktno pebacivanje jalovine počeo sa radom na površinskom kopu *SIVA*.

Počev od 1955. godine počinje sve masovnija proizvodnja rotornih bagera i za dubinski i za visinski rad, dok od 1960. godine raste proizvodnja rotornih bagera sa povećanom reznom silom i većim kapacitetima (1987. *Krupp* je *Hambahu* isporučio bager teoretskog kapaciteta $Q_{\text{teor}} = 19200 \text{ m}^3/\text{h}$).

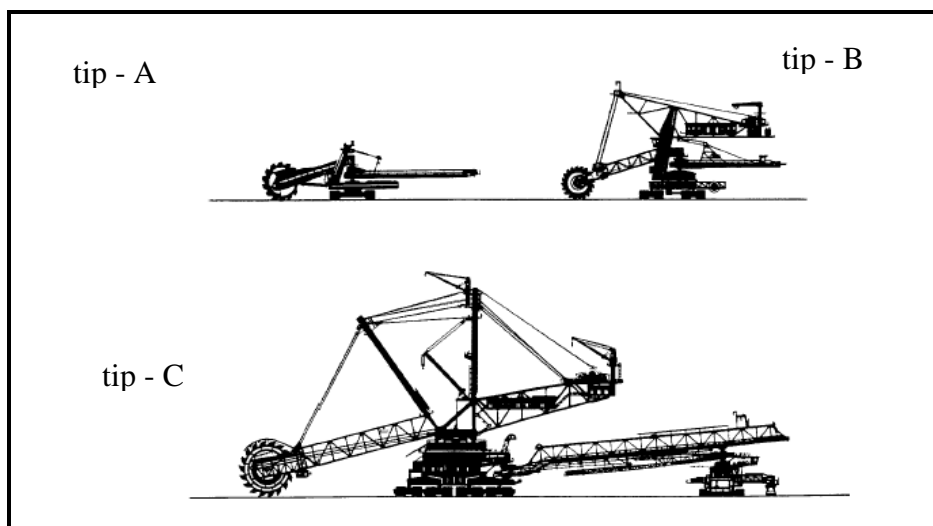


	②	①
Godina proizvodnje:	1933.	1979.
Prečnik rotornog točka, m:	5.0	21.6
Snaga pogonskih motora na rotoru, kW:	74	3360
Ukupna instalirana snaga motora, kW:	300	16900
Radna masa, t:	352	13265
Sekundni teoretski kapacitet, m ³ /s:	0.21	5.28
Teoretski kapacitet, m ³ /h:	756	19000

Slika 3.2. – Poređenje veličina rotornih bagera u vremenskom intervalu od 50 godina

3.1. Klasifikacija rotornih bagera

Klasifikacija rotornih bagera može se uraditi po raznim obeležjima, ali se danas najčešće koristi klasifikacija prema konstrukciji, na rotorne bagere tipa A, B i C (Slika 3.3. i Tabela 3.1.).



Slika 3.3. - Različiti tipovi rotornih bagera

Tabela 3.1. - Uporedni parametri različitih tipova rotornih bagera

Tip bagera	A kompaktni 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

Kompaktni (hidraulični) rotorni bageri - tip A (Slika 3.4.), 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 random veku konstrukcije a u tehnološkom smislu imaju niži koeficijent bagerovanja (tipični primeri ove klase bagera su C-700, SRs-400, SchRs-800).



Slika 3.4. - Rotorni bager tip A

Bageri sa "C" ramom - tip B (*Slika 3.5.*), imaju povezanu gornju gradnju, centralni stub i nosač balasta u obliku slova "C". Povoljan im je koeficijent bagerovanja, tehnološki veoma dobri uz relativno visoko težište (tipični primeri ove klase bagera su *SRs-1200*, *SchRs-630*, *SRs-2000*, *SRs-1300*).



Slika 3.5. – Rotorni bager tip B

Veliki bageri - tip C (*Slika 3.6.*), 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 otkopnog materijala (tipični primer ove klase bagera je *SRs-6300, SchRs-1760, SchRs-2300*).



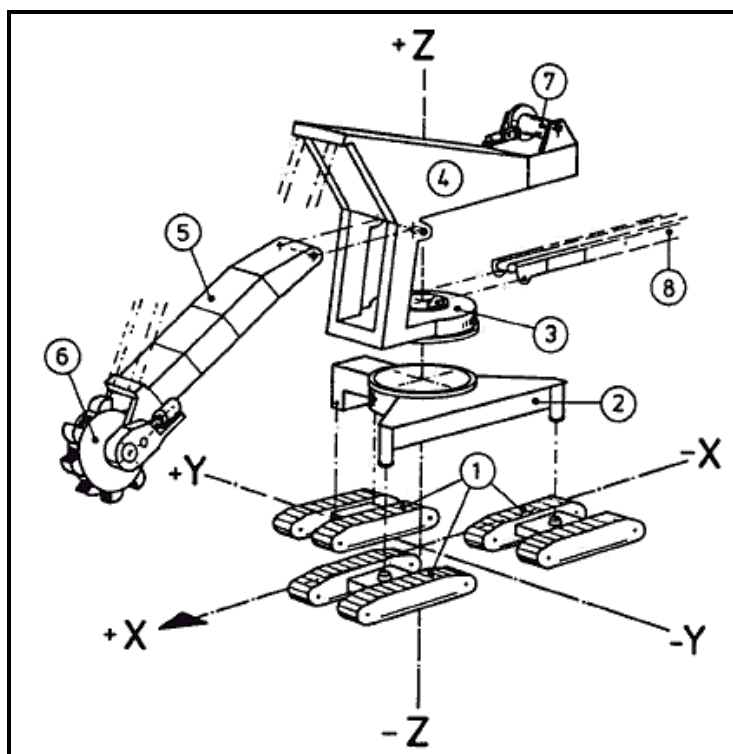
Slika 3.6. – Rotorni bager tip C

Zahtev za povećanjem proizvodnje na površinskim kopovima doprineo je da proizvođači rudarskih mašina povećaju jedinični kapacitet i visinu kopanja mašina, smanje radnu masu, prilagode rudarske mašine rudarsko-geološkim, hidrogeološkim i klimatskim uslovima, povećaju pouzdanost, poboljšaju komfor ljudstva koje opslužuje mašinu itd. Veličina, oblik i konstrukcija rotornog bagera zavise posebno od zahtevanog kapaciteta, načina utovara materijala i specifičnih uslova rada na površinskom koku. Na oblik i konstrukciju bitno utiče dozvoljeni nagib kosina, čvrstoća materijala koji se otkopava i dozvoljeni specifični pritisak na tlo.

3.2. Kostruktivni delovi rotornog bagera

Rotorni bager ima osnovne i pomoćne uređaje (*Slika 3.7.*). U osnovne uređaje spadaju: uređaj za kopanje, sistem za unutrašnji transport materijala na bageru, transportni uređaj, pogonski uređaj, uređaj za upravljanje, noseća konstrukcija. Pomoćne uređaje čine: uređaji za podmazivanje, uređaji za

zagrevanje, rasvetu, uređaji za potrebe tehničkog održavanja i remonta itd. [25, 37, 54, 55, 56, 57, 58, 59].



Slika 3.7. – Glavne komponente rotornog bagera: 1. gusenični transportni mehanizam, 2. donja gradnja, 3. oslono-obrtni deo, 4. gornja gradnja sa protivtegom, 5. strela bagera, 6. radni točak, 7. pogonski sistem za dizanje i spuštanje strele radnog točka, 8. istovarna strela

Radni organ rotornog bagera čine:

- strela bagera (radnog točka) i
- rotor (radni točak) sa elementima i pogonom (telo radnog točka, vedrice, skliznice, pogonski motor, reduktor, spojnica).

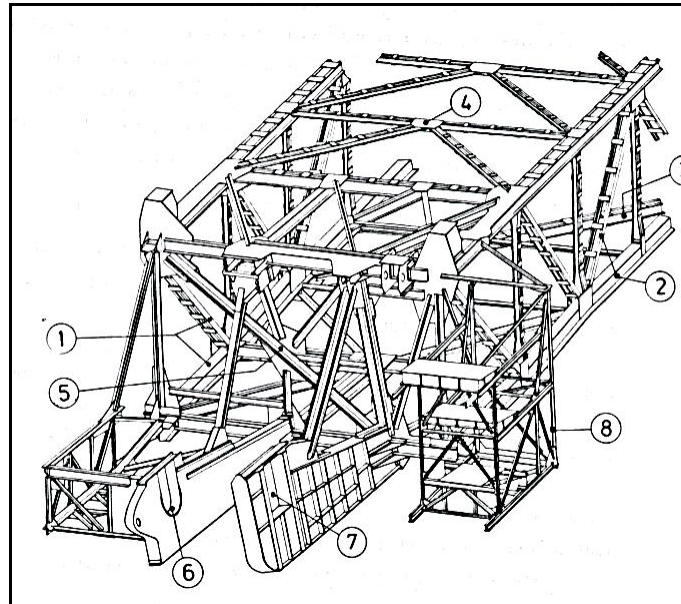
Strela bagera (Slika 3.8.) pripada glavnoj nosećoj čeličnoj konstrukciji bagera i ona je najodgovorniji i najopterećeniji deo konstrukcije bagera. Rad bagera se sastoji od glavnih kretanja (obrtanje radnog točka i kružno kretanje gornje gradnje) i pomoćnih kretanja (kretanje u pravcu nastupa i promena visinskog položaja radnog točka u vertikalnoj ravni).

Strela kao najopterećeniji deo konstrukcije bagera učestvuje svega sa 6 do 13% od mase celog bagera. Smanjenje naprezanja povećanjem poprečnih preseka delova konstrukcije dovodi do znatnog povećanja mase celog bagera. U opštem slučaju, procentualno učešće masa pojedinih delova u odnosu na ukupnu masu bagera približno iznosi:

- radni točak sa strelom 12%
- protivteg 18%
- odložna strela..... 4,5%
- konstrukcija centralnih stubova 9-10%
- obrtna platforma sa ležajem 17-18%
- donja gradnja sa transportom..... 40%

Noseća konstrukcija strele treba da prenese sve sile (koje se javljaju u radu, transportu i mirovanju) na centralnu konstrukciju bagera. Oblik noseće konstrukcije proizilazi iz pravca delovanja opterećenja, zahtevanih tehnoloških parametara bagera, pozicioniranja pomoćnih konstrukcija, ugradnje instalacija, položaja radnog točka, presipnih mesta, transportera i zahteva održavanja. Primenjuju se dva osnovna tipa konstrukcije i to:

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



1. desni noseći zid
2. levi noseći zid
3. donja poprečna veza
4. gornja poprečna veza
5. poprečna pregrada iza radnog točka
6. fiksni ležaj vratila radnog točka
7. slobodni ležaj vratila radnog točka
8. konstrukcija za uležištenje pogonskih motora radnog točka

Slika 3.8. - Čelična konstrukcija nosača radnog točka (strela bagera)

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

Dužina strele (L_s) je u određenoj srazmeri sa sledećim parametrima:

- prečnikom radnog točka ;
- dispozicijom uređaja i agregata ugrađenih na streli ;
- visinom tačke vešanja strele od planuma ;

- poprečnim presekom strele ;
- gabaritima hodnog uređaja.

Na osnovu statističke obrade više modela kompaktnih bagera (*Krupp*, *O&K*, *Demag*, *Takraf*) dobijeni su sledeći odnosi prečnika radnog točka i dužine strele (*Tabela 3.2.*):

Tabela 3.2. - Odnos dužine strele (L_s) i prečnika radnog točka (D_{rt}) za kompaktno bagere

proizvođač	tip bagera	odnos dužine strele i prečnika radnog točka
KRUPP	kompaktni bageri	$L_s = (1.7-2.1)*D_{rt}$
O&K	kompaktni bageri	$L_s = (1.5-1.9)*D_{rt}$
TAKRAF	kompaktni bageri	$L_s = (1.95-2.4)*D_{rt}$

Kod klasičnih bagera (*Krupp*, *O&K* i *Takraf*) odnos dužine strele i prečnika radnog točka je drugačiji (*Tabela 3.3.*).

Tabela 3.3. - Odnos dužine strele (L_s) i prečnika radnog točka (D_{rt}) za klasične bagere

proizvođač	tip bagera	odnos dužine strele i prečnika radnog točka
KRUPP i O&K	bageri klasične konstrukcije	$L_s = (3.22-4.02)*D_{rt}$
TAKRAF	bageri klasične konstrukcije	$L_s = (2.40-4.55)*D_{rt}$

Na osnovu uporednog pregleda može se zaključiti da se odnosi dužine strele i prečnika rotornog točka kreću u jednom širokom dijapazonu :

$$L_s = (1.5 - 4.55)D_{rt} \quad (3.1)$$

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

Uticaj dužine strele na masu bagera je očigledan i ukazuje na neopravdanost većih dužina od 70 m za bagere većeg kapaciteta. Određivanje optimalne dužine strele je veoma bitno radi usklađivanja sa uslovima radne sredine i konstruktivnim karakteristikama bagera. Neadekvatno odabrana dužina strele ima za direktnu posledicu preveliku masu bagera ili nedovoljnu visinu otkopavanja.

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

Prečnik rotora (D_{rt}) se kreće u opsegu od 4.2 m do 21.6 m, a sve u zavisnosti od veličine bagera i njegove namene. U zavisnosti od težine bagera, prečnik rotora u proseku se kreće:

$$D_{rt} = (0.75 - 0.86)\sqrt[3]{G_b} \quad (3.2)$$

gde je:

G_b – težina bagera ($G_b = M_b \cdot g$);

M_b - masa bagera ;

g - ubrzanje zemljine teže.

U zavisnosti od teoretskog kapaciteta (Q_{teo}) prečnik rotora se može izračunati iz izraza:

$$D_{rt} = 12.26\sqrt{Q_{teo}} \quad (3.3)$$

Pojedini autori , međutim kao polaznu osnovu uzimaju tehnički kapacitet bagera:

$$Q_t = \frac{60}{k_r} q n_c \quad (\text{m}^3/\text{h}) \quad (3.4)$$

gde je:

Q_t – tehnički kapacitet bagera ;

q – zapremina vedrice (m^3) ;

n_c – broj istresanja u minutu (min^{-1}) ;

k_r – koeficijent rastresitosti materijala.

Odgovarajućom smenom, dobija se zavisnost prečnika rotornog bagera od kapaciteta kao:

$$D_{rt} = 3600 \frac{qzV_p}{\pi k_r Q_t} \quad (\text{m}) \quad (3.5)$$

gde je:

z – broj vedrica ;

q – zapremina vedrice (m^3) ;

V_p –brzina rezanja (m/s) ;

Q_t – tehnički kapacitet bagera (m^3/h) ;

k_r – koeficijent rastresitosti materijala.

Često se koriste i formule:

$$D_{rt} = 5.5 + 2.3 q \frac{0.3}{q} \quad (3.6)$$

$$D_{rt} = (0.26 - 0.40) Q_t^{0.4} \quad (3.7)$$

mada se moraju obazrivo prihvatiti i smatrati da dobijene vrednosti imaju orijentacioni karakter.

Klasifikacija rotora po određenim karakteristikama data je u (Tabeli 3.4.

Tabela 3.4. - Klasifikacija rotora po određenim karakteristikama

Po načinu pražnjenja iskopanog materijala	<ul style="list-style-type: none"> – sa gravitacionim pražnjenjem; – sa inercionim pražnjenjem; – sa gravitaciono-inercionim pražnjenjem; <p>(Gravitaciono pražnjenje sa bočnim istovarom materijala na transport, primenjuje se danas redovno kod bagera koji se koriste u eksploataciji.</p> <p>Inerciono pražnjenje primenjuje se kod sipkih materijala ali i to veoma retko, ista konstatacija se odnosi i na gravitaciono-inerciono pražnjenje)</p>
Po konstruktivnom rešenju	<ul style="list-style-type: none"> – ćelijski radni točkovi, sa jednom ćelijom (komorom) za svaku vedricu ili sa jednom ćelijom (komorom) za dve vedrice; – bezćelijski; – polućelijski.
Po načinu izvođenja prijemnog uređaja	<ul style="list-style-type: none"> – sa nepokretnom šipkom; – sa nepokretnom šipkom i čistačima vedrica; – sa obrtnim konusom; – sa tračnim dodavačem; – sa tanjirastim dodavačem (obrnim diskom); – sa jednodobošnim ili dvodobošnim dodavačem.
Po obliku vedrica	<ul style="list-style-type: none"> – lučnog oblika – trapeznog oblika; – pravougaonog oblika. <p>(Sve sa čvrstim ili elastičnim dnom – lanci, kao i bez dna koriste se kao međurezači)</p>
Po obliku rezanog dela vedrice	<ul style="list-style-type: none"> – kontinualni nož; – nož sa ugrađenim zubima.

Po ugradnji pogona radnog točka	<ul style="list-style-type: none"> – pogon ugrađen u radni točak; – pogon postavljen van radnog točka; – pogon ugrađen delom u radni točak, delom izvan.
Po položaju pogona kada je ovaj van radnog točka	<ul style="list-style-type: none"> – na strani transportera; – na strani rotornog točka; – sa obe strane.
Po izvođenju pogona radnog točka	<ul style="list-style-type: none"> – sa reduktorom običnog izvođenja; – sa planetarnim reduktorom; – kombinovan, reduktor običnog izvođenja sa planetarnim delom; – hidraulični; – elektromotorni, bez prenosnika, sa specijalnim elektromotorom.
Po vezi pogona za strelu bagera	<ul style="list-style-type: none"> – kruta; – elastična, u jednoj tački, sa odgovarajućim amortizerom.
Po ostvarenju	<ul style="list-style-type: none"> – direktnom vezom, kada se obrtni moment radnom točku predaje preko vratila.
Veze pogona sa točkom	<ul style="list-style-type: none"> – posrednom vezom, kada se obrtni moment predaje radnom točku preko zupčastog venca.
Po broju pogonskih motora	<ul style="list-style-type: none"> – sa jednim pogonskim motorom; – sa više motora.
Po tipu sigurnosnih spojnice	<ul style="list-style-type: none"> – sa frikcionom spojnicom; – sa hidrodinamičkom spojnicom; – sa elektromagnetnom spojnicom.

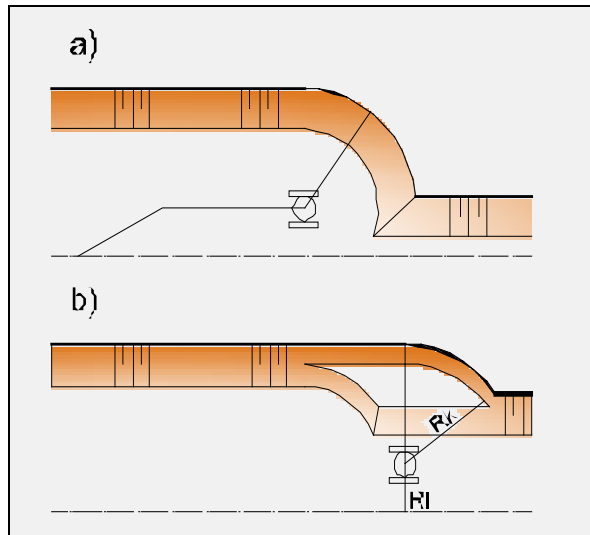
Transporter na streli bagera ima ulogu da otkopani materijal iz presipa u rotoru transportuje do presipa u obrtnoj osi bagera. Kapacitet transportera zavisi u osnovi od širine trake, njene brzine i ugla nagiba bočnih valjaka a treba ga uskladiti sa teoretskim kapacitetom rotora. Prilikom dubinskog rada,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

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

Mehanizam za kretanje služi za premeštanje mašine za vreme radnog procesa i pri transportovanju, pri čemu omogućuje da se težina bagera i druga spoljna opterećenja prenesu na tlo. Pri tome treba ostvariti ravnomeran raspored sila koje se prenose na sve elemente nosećeg mehanizma za kretanje i obezbediti što manji specifični pritisak na podlogu. Ravnomerno opterećenje nosećih delova zahteva primenu statički određene noseće konstrukcije, što se postiže pomoću oslanjanja cele konstrukcije na tri tačke. Malo specifično opterećenje podloge zahteva veliku noseću površinu mehanizma za kretanje, a ona se postiže povećanjem površine i broja gusenica (kod modernih bagera specifično opterećenje podloge se kreće od 10 do 16 N/cm²).

3.3 Tehnologija rada rotornog bagera

Rotorni bageri mogu raditi u frontu, boku (poluboku) i bloku (*Slika 3.9.*). Rad u frontu se retko koristi i to pre svega kod šinskih bagera i za selektivno otkopavanje [37, 39, 40, 41, 45].



Slika 3.9. - Šeme rada rotornih bagera u bloku (a) i boku (b)

Otkopavanje materijala se vrši sa dvostranim (blok) ili jednostranim (bok) obrtanjem strele bagera u odnosu na osu kretanja pri cikličnom pomeranju bagera ili bez obrtanja, kod stalnog kretanja pri radu u frontu.

Savremeni rotorni bageri konstruisani su prvenstveno za rad u bloku. Kinematika radnog procesa bagera u bloku bazira se na sledećim osnovnim pokretima:

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

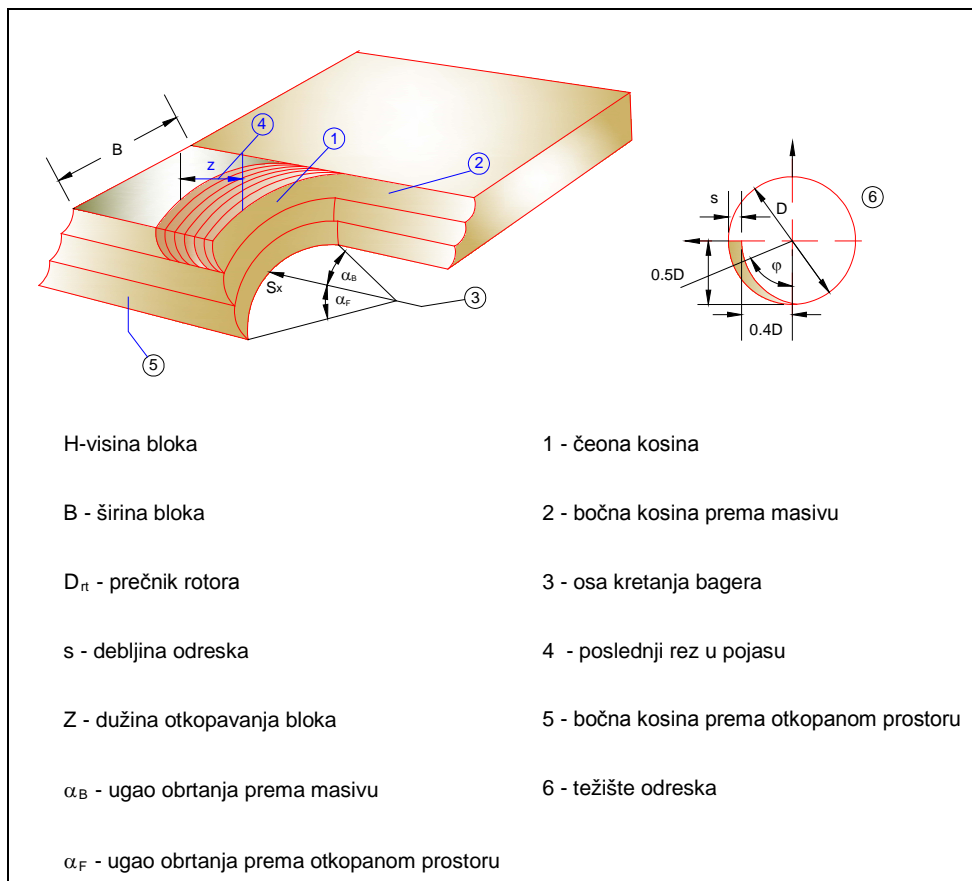
Radni parametri rotornog bagera su:

- *visina kopanja* (H_k) – visina merena od nivoa stajanja bagera do 0,75 od prečnika radnog točka (D_{rt}), kada je strela bagera maksimalno podignuta ;
- *radijus kopanja* (R_k) – predstavlja projekciju rastojanja od ose bagera do vrha noževa vedrice u gornjem položaju rotora i iznosi :

$$R_k = L_k + \frac{D_{rt}}{2} + x \quad (\text{m}) \quad (3.8)$$

- *dužina strele bagera* (L_s) – rastojanje od osovine rotora do osovine obrtanja na konstrukciji bagera ;
- *prečnik rotora* (D_{rt}) ;
- *horizontalno rastojanje* od osovine vešanja strele bagera do vertikalne ose bagera (x) ;
- *radijus istresanja* (R_i) ;
- maksimalna ($H_{i_{max}}$) i minimalna ($H_{i_{min}}$) visina istresanja.

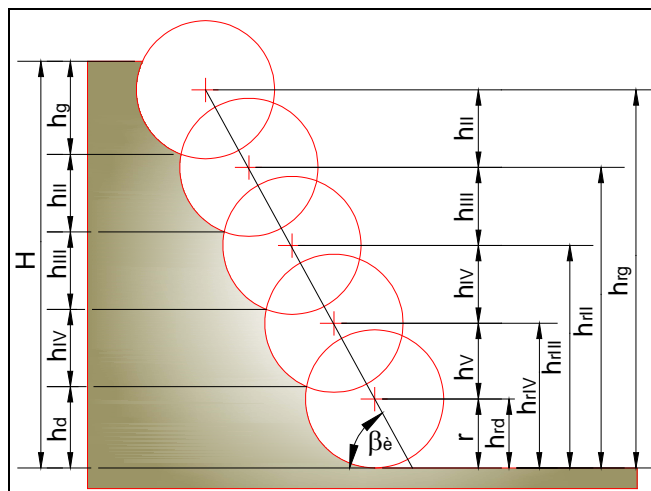
Osnovna tehnološka šema rada rotornih bagera je visinski rad u bloku koji ima svoju visinu, širinu i dubinu (*Slika 3.10.*).



Slika 3.10. - Visinski rad rotornog bagera u bloku

Visinski rad rotornog bagera u bloku sastoji se u otkopavanju celokupne visine bloka u nekoliko rezova (Slika 3.11.). Visine rezova po pravilu treba da iznose:

$$0.5 D_{rt} < h_i < 0.7 D_{rt} \quad (3.9)$$



Slika 3.11. - Šema za određivanje visine rezova

Broj rezova po visini bloka (ceo broj), može se dobiti iz uslova:

$$\frac{H}{(0.5 D_r)} > N > \frac{H}{(0.7 D_r)} \quad (3.10)$$

gde su :

H – visina bloka (m) ;

D_{rt} – prečnik rotora (m).

Visine pojedinačnih rezova su :

- gornji rez: $h_g = H - h_{rg} + r$ (3.11)

- ostali rezovi : $h_i = h_{r(i-1)} - h_{ri}$ (3.12)

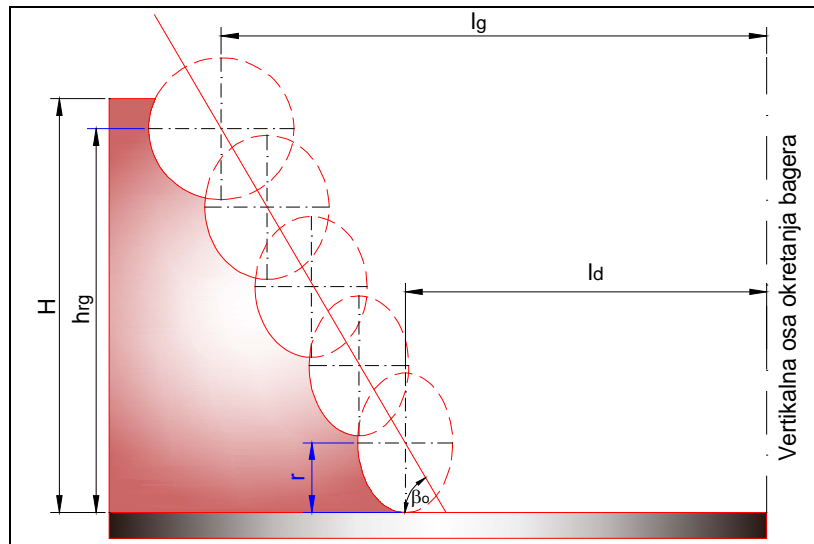
- donji rez: $h_d = h_{r(N-1)} - r$ (3.13)

Visina otkopnog bloka može, a ne mora da odgovara maksimalnoj otkopnoj visini bagera. U pogonskim uslovima se najčešće teži da se visina bloka izjednači sa maksimalnom otkopnom visinom bagera, jer se na taj način povećava opšta koncentracija radova na otkopu tj. smanjuje se broj etaža i zahvata veći obim masa za jedan korak pomeranja etažnih transporterata. Takva nastojanja, međutim, nije uvek moguće realizovati u radnim uslovima, jer je visina bloka često limitirana geomehničkim uslovima stabilnosti etažnih kosina. Smanjenjem visine bloka u odnosu na maksimalno moguću visinu, postiže se sledeće:

- povećava se dužina otkopavanja bloka za jedan ciklus napredovanja bagera što doprinosi da se sa istim vremenskim gubicima na neizbežnim pomoćnim operacijama (vreme promene podetaže i vreme promene bloka) otkopa veći obim masa za jedan ciklus napredovanja bagera, tj. da se ostvari bolje kapacitetno iskorišćenje bagera ;
- smanjuje se ugao okretanja nosača radnog točka koji izlazi van opsega ugla automatske regulacije brzine kružnog kretanja, pa se ostvaruje bolje punjenje vedrica na radnom točku tj. bolje kapacitetno iskorišćenje bagera.

Međutim, smanjenjem visine bloka smanjuje se koncentracija rada u okviru jedne etaže i šire u okviru celog otkopa (neopravdan je veći broj etaža i transportnih horizonata na otkopu) i povećava se vreme zastoja zbog češćeg pomeranja etažnih transporterata, pa se izbor optimalne visine bloka mora posmatrati, ne samo sa tehničkog (bolje kapacitetno iskorišćenje bagera) već sa tehnoekonomskog aspekta. Povećanje koncentracije rada, odnosno visine otkopnog bloka na račun rada bagera po visinskim i dubinskim rampama najčešće nema efekta, budući da rad bagera po rampama povlači za sobom mnogo manevarskih pokreta i praznih hodova bagera što se direktno odražava na gubitke u kapacitetnom i vremenskom iskorišćenju bagera.

Formiranje bočne kosine etaže rotornim bagerom se vrši tako što se sukcesivno smanjuje unutrašnji ugao okretanja strele bagera pri otkopavanju nižih rezova (Slika 3.12.).



Slika 3.12. - Šematski prikaz bočne kosine

Ugao nagiba bočne kosine (β_b) zavisi od radijusa kopanja gornjeg reza (R_{kg}), graničnog ugla okretanja strele bagera pri otkopavanju donjeg reza (φ_{udgr}) i visine bloka (H).

Ugao okretanja strele bagera prema masivu pri otkopavanju donjeg reza mora biti veći ili jednak uglu slobodnog rezanja:

$$\varphi_{udgr} \leq \psi \quad (3.14)$$

ψ – ugao slobodnog rezanja (u granicama 35°do 65°).

Ugao nagiba bočne kosine može se odrediti iz relacije :

$$\beta_o = \arctg\left(\frac{(h_{rg}-r)}{(l_g-l_d)}\right) \quad (3.15)$$

gde je:

h_{rg} - visina otkopavanja merena od nivoa stajanja bagera do centra ose rotora pri otkopavanju gornjeg reza (m);

r – poluprečnik rotora (m);

l_g - horizontalno rastojanje između ose bagera i ose rotora pri otkopavanju prvog reza (m);

l_d - horizontalno rastojanje između ose bagera i donje ivice bočne kosine (m);

$$l_g = R_g \sin\varphi_g \quad (3.16)$$

$$l_d = R_d \sin\varphi_d \quad (3.17)$$

gde je:

R_g - radijus kopanja gornjeg reza (m);

R_d - radijus kopanja donjeg reza (m);

φ_g - ugao obrtanja strele bagera prema masivu pri otkopavanju gornjeg reza ($^\circ$);

φ_d - ugao obrtanja strele bagera prema masivu pri otkopavanju donjeg reza ($^\circ$);

Radijus otkopavanja gornjeg reza (R_g), meren od ose rotora do vertikalne ose obrtanja, definisan je izrazom:

$$R_g = L_s \cos\alpha_g + e \quad (m) \quad (3.18)$$

a radijus kopanja donjeg reza (R_d), meren od ose rotora do vertikalne ose obrtanja bagera, definisan je izrazom:

$$R_d = L_s \cos\alpha_d + e \quad (m) \quad (3.19)$$

gde je:

L_s - dužina strele bagera (m);

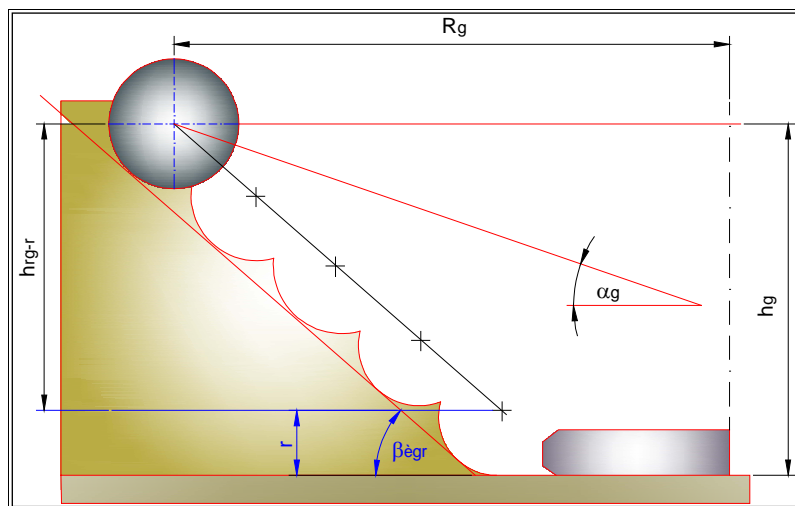
α_g, α_d - uglovi nagiba strele bagera pri otkopavanju gornjeg, odnosno, donjeg reza ($^\circ$);

e - horizontalno rastojanje između zglobnog oslonca strele bagera na platformi i vertikalne ose obrtanja bagera (m);

Pri formiranju čeone kosine, rotor bagera je postavljen upravno na etažnu kosinu pa luk koji u rezu formira rotor predstavlja deo kruga (Slika 3.13).

Ugao nagiba čeone kosine može se kretati u granicama:

$$\beta_{\check{c}gr} < \beta_{\check{c}} < \frac{\pi}{2} \quad (3.20)$$



Slika 3.13. - Šema za određivanje graničnog ugla nagiba čeone kosine

Granični ugao nagiba čeone kosine zavisi od visine otkopavanja i konstruktivnih karakteristika bagera :

$$\beta_{\check{c}gr} = \arctg\left(\frac{(h_{rg}-r)}{(R_g-F-f)}\right) \quad (3.21)$$

gde je:

F – dužina gusenica merena od vertikalne ose okretanja bagera do njene prednje ivice (m);

f - minimalno odstojanje krajnje prednje ivice gusenica do donje ivice etažne kosine (m);

Veličina (f) obuhvata vrednost (f') koja proizilazi iz polukružnog oblika donje ivice čeonke kosine i vrednosti (f'') kao graničnog sigurnosnog rastojanja gusenica od donje ivice kosine (*Slika 3.14.*):

$$f = f' + f'' \quad (3.22)$$

$$f' = R_p - f'' - \left((R_p - f'')^2 - E^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.23)$$

gde je:

E - odstojanje od krajnje bočne ivice gusenice do podužne ose bagera (m);

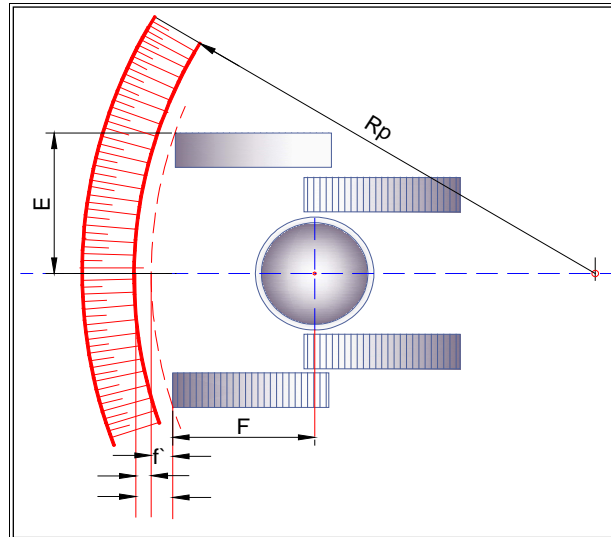
f'' - sigurnosno odstojanje gusenica od donje ivice etažne kosine obzirom na mogućnost pojave odrona iz kosina, obično 1.5 - 2 m.

Granični ugao nagiba čeonke kosine ima smisla samo kao završni ugao kosine na kraju etaže. Prema tome, za određene dužine otkopavanja bloka moguće je bagerom izvesti i određene minimalne uglove nagiba čeonih kosina prema obrascu:

$$\beta_{\check{c}min} = \arctg\left(\frac{(h_{rg}-r)}{(R_g-F-f-Z)}\right) \quad (3.24)$$

gde je:

Z – dužina (dubina) otkopavanja bloka (m).



Slika 3.14. - Šema za određivanje minimalnog odstojanja gusenica od donje ivice bloka

Širina bloka je u funkciji radijusa kopanja gornjeg i donjeg reza, visine bloka, ugla nagiba bočne kosine i uglova obrtanja strele bagera prema masivu pri otkopavanju gornjeg reza i ugla obrtanja prema otkopanom prostoru pri otkopavanju donjeg reza. Parametri koji ograničavaju širinu bloka su:

- Udaljenost gornje ivice bočne kosine prema masivu od podužne ose bagera, širina dela bloka prema masivu po gornjem rezu (β_g);
- Udaljenost donje ivice bočne kosine prema otkopanom prostoru od podužne ose bagera, širina dela bloka prema otkopanom prostoru po donjem rezu (β_d).

Maksimalna vrednost gornje širine dela bloka prema masivu se postiže kod punog okretanja strele bagera prema bočnoj kosini pri otkopavanju prvog reza za ugao $\varphi_{gu} = 90^\circ$. Veličina B_g je tada jednaka radijusu kopanja gornjeg reza. Veličina B_d zavisi od ugla okretanja strele bagera ka bočnoj kosini prema otkopanom prostoru pri otkopavanja donjeg reza (φ_{ds}). Širina bloka (Slika 3.15.) iznosi:

$$B = B_1 = B_{gu} + B_{gs} \quad (3.25)$$

Širina gornjeg dela reza prema masivu je:

$$B_{gu} = R_g \sin\varphi_{gu} \quad (3.26)$$

Za ugao $\varphi_{gu} = 90^\circ$, $B_{gu} = R_g$, širina gornjeg dela reza prema masivu je:

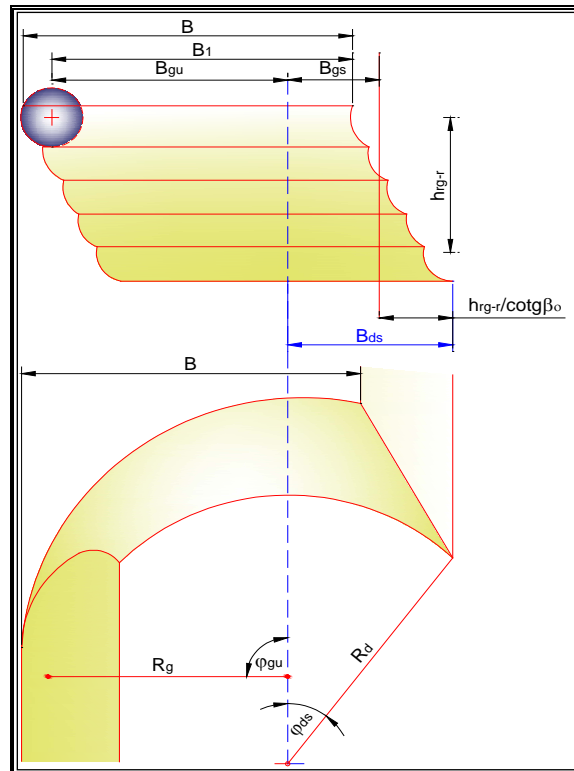
$$B_{gs} = B_{ds} - (h_{rg} - r) \operatorname{ctg}\beta_o \quad (3.27)$$

Obzirom da je širina donjeg dela reza prema otkopanom prostoru:

$$B_{ds} = R_d \sin\varphi_{ds} \quad (3.28)$$

sledi da je ukupna širina bloka:

$$B = R_g \sin\varphi_{gu} + R_d \sin\varphi_{ds} - (h_{rg} - r) \operatorname{ctg}\beta_o \quad (3.29)$$



Slika 3.15. - Šema za određivanje širine bloka

Maksimalna širina bloka koja se može ostvariti otkopavanjem rotornim bagerom pri određenom uglu okretanja strele bagera prema otkopanom prostoru, pri otkopavanju donjeg reza, smanjuje se sa porastom visine bloka i smanjenjem ugla nagiba bočne kosine. Gornja vrednost ovog ugla je ograničena na 50° (najčešće se usvaja 30°) jer pri prekoračenju ove vredosti nastaje potiskivanje materijala u stranu iz oblasti postojećeg "klina" što osetno smanjuje punjenje vedrica i povećava obim radova pomoćne mehanizacije.

Uticaj širine bloka na kapacitet bagera se manifestuje preko promene debljine reza usled povećanja ugla zaokretanja nosača radnog točka prema bočnoj kosini, kada je punjenje vedrica radnog točka slabije. Usvajanje manje širine bloka od maksimalno moguće, s obzirom na geometrijske parametre bagera, ima za posledicu smanjenje vremenskog iskorišćenja bagera zbog češćeg pomeranja etažnih trakastih transportera, a pri određenoj dužini etaže evidentno je smanjenje i vremenskog i kapacitetnog iskorišćenja bagera zbog češćeg uklapanja istog za otkopavanje novog bloka. Smanjenje širine bloka radi

povećanja ukupne otkopne širine, tj. otkopavanje bloka iz dva prolaza bagera za jedan položaj etažnog transportera (otkopavanje dva bloka umesto jednog) utiče na smanjenje kapacitnog iskorišćenja bagera jer je odnos vremena pomoćnih operacija i vremena čistog kopanja (glodanja) u ovom slučaju nepovoljniji. Pri ovakvom radu evidentno je smanjenje vremenskog iskorišćenja (manevrisanje bagerom radi uklapanja za otkopavanje novog bloka) mada je nekad ovakav rad opravdan zbog ređeg pomeranja etažnih transportera što naročito može biti značajno u zimskom i kišnom periodu. Na našim površinskim kopovima lignita, zbog geomehaničkih uslova stabilnosti, od interesa je da ugao nagiba bočne kosine bude što manji, kako bi se izbeglo obrušavanje bočne kosine sa svim negativnim posledicama koje takvo obrušavanje materijala iz kosine može izazvati. U cilju dobijanja što blažeg ugla nagiba bočne kosine neophodno je prvu podetažu otkopavati sa uglom zaokretanja prema unutrašnjoj kosini $\varphi_{gu} = 90^\circ$. Budući da kod rotornog bagera ugao zaokretanja sa regulisanom brzinom ne prelazi $\varphi_r = 60 \div 70^\circ$, to su evidentni gubici u kapacitetu bagera na ugaonim delovima podetaža $\varphi_{gu} - \varphi_r$ tj. na delovima podetaža gde bager radi sa konstantnom brzinom kružnog kretanja nosača radnog točka.

Procentualni gubitak kapaciteta u funkciji ugla regulisane brzine i maksimalnog ugla zaokretanja nosača radnog točka je definisan izrazom:

$$\text{za } \varphi_u = \varphi_r \quad \Delta Q = 0 \quad (3.30)$$

$$\text{za } \varphi_u > \varphi_r \quad \Delta Q = \left(1 - \frac{\sin \varphi_u}{(\varphi_u - \varphi_r) \cos \varphi_r + \sin \varphi_r} \right) 100 \quad (3.31)$$

Određeno smanjenje gubitaka u kapacitetu, i kod ugla zaokretanja nosača radnog točka $\varphi_u = 90^\circ$, može se ostvariti na taj način što se ne izvodi pun zaokret nosača radnog točka za svaki rez, već za svaki treći ili četvrti, čime se stvara uslov da se povećaju debljine odrezaka izvan opsega ugla automatske regulacije gde širine odrezaka ostaju konstantne.

Dužina otkopavanja bloka predstavlja zbir debljina pojedinačnih rezova po dubini bloka čime se formira pojas, koji se otkopava u jednom nastupanju bagera po njegovoj osi kretanja. Dužina pojasa, odnosno, nastupanja po dubini bloka posle koje se bager vraća nazad za prelazak u sledeći niži pojas, zavisi od visine bloka, ugla nagiba čeone kosine i gabarita strele bagera i guseničnog mehanizma za kretanje.

Za stvarnu maksimalnu dužinu otkopavanja bloka po pojasevima, usvaja se manja vrednost koja se dobija po osnovu dva ograničenja :

$$Z_{max} = \min(Z_1, Z_2) \quad (3.32)$$

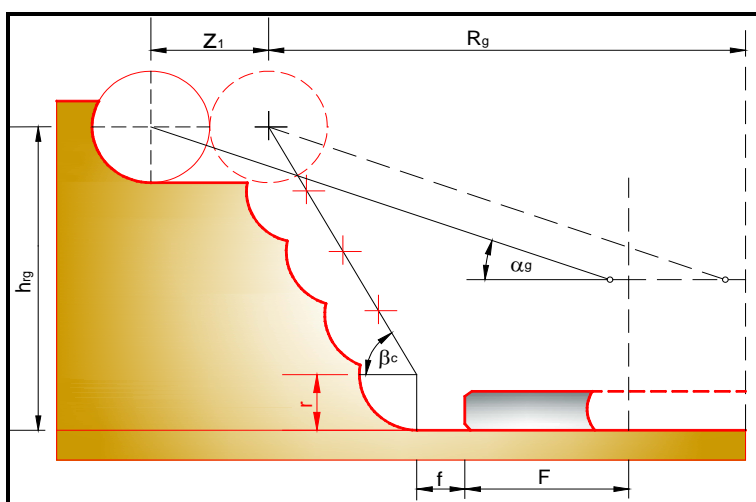
gde je:

Z_1 – dužina otkopavanja bloka ograničena prilaskom bagera donjoj ivici čeone kosine (m);

Z_2 – dužina otkopavanja bloka ograničena dodirom konstrukcije strele bagera i gornje ivice nižeg reza (m).

Dužina otkopavanja bloka koja proizilazi iz ograničenja prilaska bagera donjoj ivici čeone kosine može se odrediti po šemi prikazanoj na (Slici 3.16.) i iznosi:

$$Z_1 = R_g - (f - F) - (h_{rg} - r) \operatorname{ctg} \beta_c \quad (3.33)$$



Slika 3.16. - Šema za određivanje dužine bloka iz uslova prilaska bagera donjoj ivici kosine bloka

Dužina otkopavanja bloka koja proizilazi iz ograničenja dodira konstrukcije strele bagera i gornje ivice drugog reza može se odrediti po šemi prikazanoj na (Slici 3.17.) i iznosi:

$$Z_2 = r + \left(\frac{r-(d+t)}{\cos\alpha_g} \right) ctg\alpha_g - h_1 ctg\beta_c \quad (3.34)$$

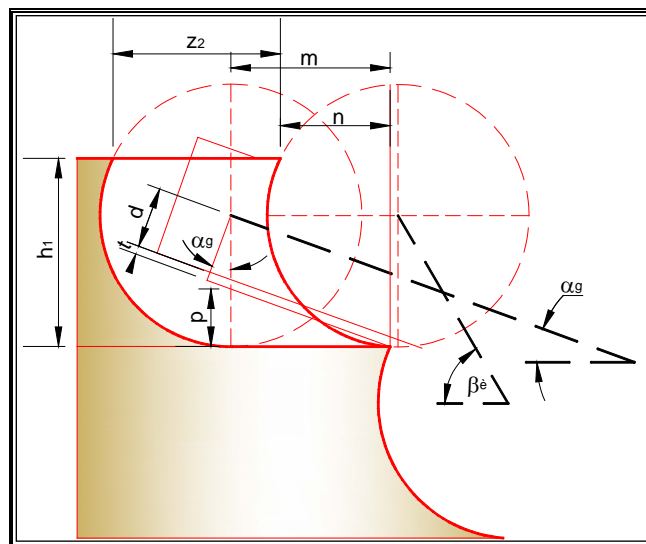
gde je:

d - odstojanje krajnje donje ivice strele bagera od njene ose (m);

t – granična udaljenost prilaska konstrukcije strele bagera gornjoj ivici drugog reza (m);

h_1 - visina gornjeg reza (m);

α_g - vertikalni ugao nagiba strele bagera pri otkopavanju donjeg reza ($^\circ$).



Slika 3.17. - Šema za određivanje dužine bloka iz uslova dodira konstrukcije

Veći uglovi nagiba čeone i bočne kosine utiču na povećanje kapaciteta bagera. Za veći ugao nagiba čeone kosine, a za određenu visinu bloka, moguće je ostvariti veću dužinu otkopavanja bloka za jedan ciklus napredovanja bagera, a s tim u vezi i bolje kapacitetno iskorišćenje. Za veći ugao nagiba bočne kosine, a za određenu širinu bloka, moguće je smanjiti uglove zaokretanja nosača radnog točka bagera koji izlaze van opsega ugla automatske regulacije.

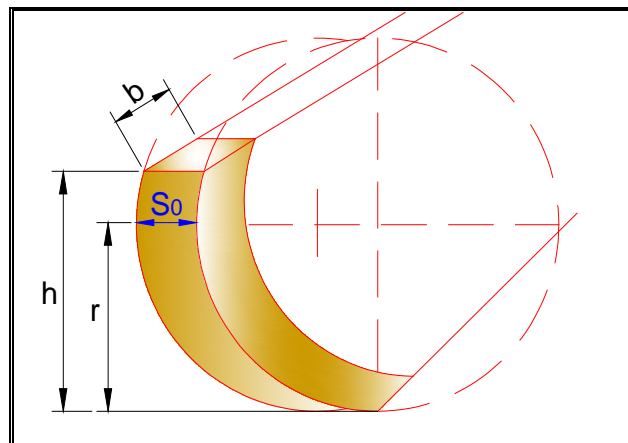
Smanjenjem uglova zaokretanja (obično u I-oj i II-oj podetaži) ostvaruje se bolje punjenje vedrica materijalom, a time i bolje kapacitetno iskorišćenje bagera.

Tehnološki parametri odreska (Slika 3.18.) su:

h - visina odreska koja odgovara visini reza (m);

S_o - debljina odreska koja je u funkciji ugla okretanja strele bagera u odnosu na podužnu osu bagera (φ) i ugla rezanja (ρ) (m);

b - širina odreska koja je u funkciji brzine okretanja strele bagera, V_φ , odnosno, ugla okretanja strele bagera u odnosu na podužnu osu bagera (φ).



Slika 3.18. - Tehnološki parametri odreska

Debljina odreska (S_o) koja je jednaka debljini reza, se ostvaruje pomeranjem bagera na početku ulaska u novi rez, odnosno, kada je strela rotora u krajnjim položajima prema masivu i otkopanom prostoru, kada se ujedno i menja smer okretanja. Debljina odreska se menja u zavisnosti od ugla okretanja strele bagera levo i desno od podužne ose bagera po zavisnosti:

$$S_\varphi = S_o \cos\varphi \quad (3.35)$$

i u zavisnosti od ugla okretanja vedrice oko horizontalne ose rotora po zavisnosti:

$$S_{\rho} = S_o \sin\rho \quad (3.36)$$

U opštem slučaju se debljina odrezaka, u zavisnosti od ugla okretanja strele bagera u odnosu na podužnu osu bagera i položaja vedrice u okviru ugla rezanja, može odrediti shodno zavisnosti:

$$S_{\varphi\rho} = S_o \cos\varphi \sin\rho \quad (3.37)$$

gde je:

$S_{\varphi\rho}$ - tekuća vrednost debljine odreska u funkciji od ugla okretanja strele bagera (φ) i ugla rezanja (ρ);

S_o - debljina odreska merena na visini poluprečnika rotora ($\rho = 90^\circ$) i za položaj strele bagera u pravcu podužne ose bagera ($\rho = 0^\circ$), kada je $S_o = S_{max}$.

Konstruktivno ograničenje maksimalne debljine odreska je bočna dužina vedrice, odnosno, $S_{max} \leq L_{bv}$. Širina odreska (b) se menja u zavisnosti od brzine okretanja strele bagera u odnosu na podužnu osu bagera i broja pražnjenja vedrica u minuti. Pri konstantnoj brzini okretanja strele bagera, širine odrezaka u okviru reza su jednake i iznose:

$$b = \frac{V_b}{n} \quad (3.38)$$

Pri promenljivoj brzini okretanja strele bagera promenljive su i širine odrezaka:

$$b_{\varphi} = \frac{V_{b\varphi}}{n} \quad (3.39)$$

pri čemu je:

$$V_{b\varphi} = \frac{V_{bo}}{\cos\varphi} \quad (3.40)$$

gde je:

V_b - konstantna brzina okretanja strele bagera (m/min);

V_{bo} - osnovna linearna brzina pomeranja strele bagera merena u pravcu podužne ose bagera, odnosno, za $\varphi = 0^\circ$ (m/min);

$V_{b\varphi}$ - promenljiva brzina okretanja strele bagera (m/min);

n - broj pražnjenja vedrica (min^{-1}).

3.4. Kapacitet rotornih bagera

Kapacitet kontinualnih sistema sa rotornim bagerima najviše zavisi od prvog i osnovnog elementa sistema - rotornog bagera [25, 27, 28, 35, 36, 37, 38, 44, 45, 51, 64, 65]. 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*.

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

Tehnički kapacitet, (Q_{th}) pored konstruktivnih karakteristika bagera, obuhvata i 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 (Q_e) 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 (Q_{ef}) 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 kinematički parametri kopanja i transporta, prečnik rotora i dužina strele, zapremina, broj i konstrukcija kašika, brzina rotacije, okretanje, spuštanje i podizanje 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 kinematički faktori za određeni model bagera konstantni. Ostali uticajni faktori su promenljivi i zavise od uslova eksploatacije.

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

$$Q_t = 60 q n \quad (\text{m}^3/\text{h}) \quad (3.41)$$

Pošto se kašike 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 kašika na rotoru, snagom pogona ili propusnom moći transportera. Teoretski kapacitet rotornog bagera može se računati i preko zapremina rezova po formuli:

$$Q_t = 60 s v h \quad (\text{m}^3/\text{h}) \quad (3.42)$$

gde je:

s - debljina reza (m);

v - brzina okretanja strele (nosača rotora) (m/min);

h - visina sloja (m).

Tehnički kapacitet (Q_{th}) *rotornog bagera* je njegov maksimalno mogući kapacitet u određenom otkopu i steni. U tehničkom kapacitetu su uključena svojstva stene i organizacija procesa bagerovanja otkopa, a računa se po formuli:

$$Q_{th} = Q_t k_p \frac{k_o}{k_r} \quad (\text{čm}^3/\text{h}) \quad (3.43)$$

gde je:

k_p - koeficijent punjenja kašika;

k_r - koeficijent rastresitosti stene;

k_o - koeficijent otkopa (produktivnosti).

Koeficijent otkopa (k_o) ili *koeficijent produktivnosti* uzima u obzir uticaj svih manevarskih operacija u bagerovanju bloka: približavanje bagera otkopu (kod bagera sa izvlačenjem katarke – izvlačenje), spuštanje rotora i odmicanje bagera, prelaz na obradu sledećeg bloka (u sledeći ciklus bagerovanja), tj. približavanje bagera otkopu 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 (obuhvataju dizanje i spuštanje rotora, produžavanje strele bagera i kretanje bagera) i bočni (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 čeone 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 reza, ali su sa aspekta tehnologije rada povoljnije visoke etaže.

Uticaj dužine etaže na kapacitet bagera izražava se preko *koeficijenta gubitaka u kapacitetu* (K_g) zbog usecanja bagera u novi blok, pošto je kapacitet bagera pri usecanju u novi blok osetno manji nego pri radu u regularnom bloku. Prema tome, broj usecanja u blok je u direktnoj zavisnosti od dužine etaže.

Koeficijent gubitaka u kapacitetu zbog usecanja u novi blok se može definisati izrazom:

$$K_g = \frac{(L-l_u)+\eta_k l_k}{L} \quad (3.44)$$

gde je:

L – dužina etaže (m);

l_u - dužina zone u kojoj se vrši usecanje u novi blok (m);

η_k - koeficijent korekcije kapaciteta bagera ($\eta_k \approx 0,6$).

Eksploatacioni kapacitet (Q_e) 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:

$$Q_e = Q_{th} k_v T \quad (\text{m}^3/\text{h}) \quad (3.45)$$

gde je:

T - posmatrano vreme (h);

k_v - koeficijent iskorišćenja vremena, računa se po formuli :

$$k_v = \frac{(T - t_{pz} - t_{nz})}{T} \quad (3.46)$$

gde je:

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_e) rotornog bagera u bilo kom razmatranom kalendarskom vremenskom periodu (smena, nedelja, mesec ili godina), računa se iz izraza:

$$Q_e = Q_{th} T_k K_t K_{th} K_o \quad (3.47)$$

gde je :

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

K_t - koeficijent tehnološkog iskorišćenja vremena rada bagera dat formulom:

$$K_t = \frac{t_v}{(t_v + t_p)} \quad (3.48)$$

gde je:

t_v - ukupno vreme rada bagera ;

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

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

$$K_{th} = \frac{T_k}{(T_k + T_o + T_r)} \quad (3.49)$$

gde je:

T_o - vreme tehničkog opsluživanja bagera;

T_r - vreme remonta bagera;

K_o - koeficijent organizacionog iskorišćenja vremena:

$$K_o = \frac{(T_k - t_o)}{T_k} ; \quad (3.50)$$

gde je :

t_o - ukupno vreme zastoja iz organizacionih razloga.

4. MODELIRANJE RADNE SREDINE NA POVRŠINSKIM KOPOVIMA LIGNITA

Pojam modela i modeliranja zasniva se na postojanju sličnosti između dva sistema i to realnog i apstraktnog sistema. Realni, stvarni procesi sadrže veliki broj promenljivih veličina koje treba obuhvatiti da bi se potuno i korektno opisao sistem. Radi upoznavanja i razumevanja procesa, delova i sistema koji se proučavaju u celini, a naročito radi predviđanja ponašanja sistema, potrebno je da se izvrše određeni eksperimenti i istraživanja. Direktna istraživanja na sistemima koji mogu biti poslovni, ekonomski, organizacioni, proizvodni, tehnički i dr., po pravilu su vrlo skupa, obimna ili nemoguća ako su sistemi u fazi projektovanja. Tada se za ispitivani sistem traži zamena sličnim sistemom – modelom [4, 6]. Osnovna osobina modela i istovremeno potreba za modeliranjem proizilazi iz činjenice da se na taj način omogućava eksperimentisanje i analiza koja na realnim sistemima nije moguća. Samim tim, direktno se koristi kod odlučivanja u slučaju predviđanja posledica ili nastalih stanja donetih odluka, bez intervencije na realnoj pojavi. Vrlo važna osobina je to da se rezultati dobijeni modelom mogu proveravati i analizirati jednostavno bez rizika i velikih troškova u relativno kratkom vremenskom periodu obrade.

Eksperimentalno ispitivanje radne sredine ili njenih modela je jedna dopunska mogućnost da se dođe do pouzdanih podataka o stanju napona, deformacija ili pomeranja, kao podataka koji su neophodni za analizu radne sredine. U okviru eksperimentalnih metoda razvijaju se razni postupci koji koriste podatke i saznanja iz fizike (posebno optike i elektronike), matematike, mehanike krutog i deformabilnog tela, reologije, hemije, geologije, mehanike tla, automatike i digitalne tehnike. Dobijeni podaci veoma su bitni za ocenu nosivosti i stabilnosti radne sredine, posebno u odnosu na dejstvo lokalnih koncentracija napona, stvaranja plastičnih područja, mehanizam loma, kao i na uticaj promene mehaničkih karakteristika materijala zavisno od vremena i temperaturnih promena.

Pri tome, opterećenje može da bude mehaničko, termičko, hemijsko i dr., može da bude statičko ili dinamičko (periodično, harmonijsko, udarno, impulsno ili stohastički promenljivo kao kod zemljotresa ili kod turbulentnih uticaja vetra ili vode). Ovim ispitivanjima analiziraju se problemi vezani za razna stanja u odnosu na prirodu sredine koja se ispituje: izotropna ili anizotropna, homogena ili nehomogena, kontinualna ili diskontinualna, u oblasti elastičnih, plastičnih ili viskoelastičnih deformacija. Ponekad se kao dopunski problem javlja problem prenošenja rezultata dobijenih modelskim ispitivanjem na originalnu radnu sredinu, služeći se pri tome teorijom modelske sličnosti. Veoma je važno poznavanje reoloških i mehaničkih karakteristika modelskih materijala pri čemu svako modelsko ispitivanje mora biti praćeno i baždarenjem (kalibracijom tog modelskog materijala).

U površinskoj eksploataciji uglja, modeliranje radne sredine podrazumeva detaljnu analizu realnog prostora površinskih kopova na nivou baza podataka etažnih ravni koje se formiranju interpolacijom i interpretacijom rezultata izvornih geoloških istražnih radova i svih ostalih rezultata ispitivanja. To su strukturne karakteristike, inženjersko-geološke karakteristike, fizičko-mehaničke karakteristike, karakteristike kvaliteta, hemijska, tehnička, mineraloško-petrografska ispitivanja, kao i sva ostala ispitivanja koja su potrebna da se u potpunosti definiše realni prostor površinskih kopova. Za modeliranje radne sredine koriste se metode interpolacije i optimizacije vertikalne podele ležišta na etaže [10, 27, 35, 43].

Druga faza modeliranja sistema površinske eksploatacije predstavlja modeliranje tehnologije rada opreme na površinskim kopovima, pošto je tehnologija otkopavanja najvažniji deo sistema površinske eksploatacije. Modeliranje se vrši na osnovu detaljne dekompozicije tehnoloških procesa otkopavanja na sve radne i manevarske operacije prema kinematsko-konstruktivnim karakteristikama i tehnološkim parametrima rada. U ovoj fazi modela obuhvaćena je i realna vremenska slika stanja i ponašanja proizvodnih sistema na površinskim kopovima. Primenjene su metode simulacionog modeliranja, statistička analiza i metoda Monte Karlo.

Treća faza modeliranja sistema površinske eksploatacije predstavlja integraciju prethodne dve faze modela. Realno okontureni prostor površinakih kopova interpretira se kao baza podataka koja sadrži sve bitne parametre radne sredine od kojih zavisi definisanje tehnoloških parametara eksploatacije. Simulacionom tehnikom vrši se izbor tehnoloških parametara rada opreme koji daju potreban kapacitet proizvodnje i istovremeno se preuzimaju podaci o kvalitetu otkopane sirovine. Stabilnost proizvodnje ispituje se na bazi raspona pojavljivanja kapaciteta i kvaliteta otkopane sirovine u realnom prostoru površinskog kopa u odnosu na graničnu vrednost. U zavisnosti od karakteristika ležišta definiše se kontura površinskog kopa prema prirodnim, tehničko-tehnološkim i ekonomskim kriterijumima i ona predstavlja ograničeni realni prostor određen za eksploataciju.

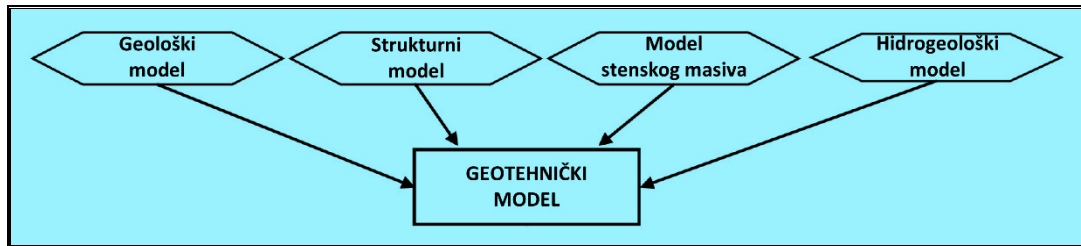
4.1. Geotehnički model

Geotehničkim model predstavlja osnovu za projektovanje nagiba kosina i sastoji se od četiri sastavna modela:

- *geološkog modela,*
- *strukturnog modela,*
- *modela stenskog masiva (svojstva stenskog materijala),*
- *hidrogeološkog modela.*

Prikazani modeli takođe se primenjuju i za druge aspekte projektovanja rudarske eksploatacija, na primer za određivanje rudnih rezervi i projektovanje rudarskih radova. Međutim, pojedina svojstva svakog od navedenih modela su od ključnog značaja za proces projektovanja nagiba kosina.

Geotehnički model je moguće primeniti i za druge važne potrebe, kao što je analiza primarnog ("in-situ") naponskog stanja i njegove promene, naročito kod projektovanja veoma visokim kosina, u slučajevima kada su u okolini prisutne podzemne prostorije, kao i za analizu uticaja seizmičnosti.



Slika 4.1. - Geotehnički model

Geološki model

Geološki model predstavlja 3D prikaz geološke građe terena u zoni gde će biti formirane kosine površinskog kopa. Kategorije zastupljenih materijala u modelu ne zavise samo od litološkog sastava nego i od vrste i stepena alteracije koji mogu značajno da utiču na svojstva materijala, kako pozitivno tako i negativno. U pojedinim ležištima, posebno kod onih koja se nalaze u tropskim predelima, veliki uticaj pri projektovanju nagiba kosina može da ima i geomorfologija.

Detaljno izučavanje regionalnih geoloških karakteristika terena i samog procesa mineralizacije je od posebne važnosti za formiranje ovog modela. Prilikom projektovanja kosina moraju se sprovesti detaljna i sveobuhvatna geološka istraživanja kako samog ležišta, tako i okolnog stenskog masiva uključujući i jalovinu, pri čemu je potrebno posebnu pažnju posvetiti istraživanjima inženjerskih karakteristika terena.

Povećanjem visine kosina površinskog kopa, posebnu pažnju je potrebno obratiti na uticaj izmenjenog naponskog stanja, naročito na koncentraciju napona u nožici kosine. Geološkim modelom je neophodno obuhvatiti procenu naponskog stanja.

Strukturni model

Strukturni model, koji je potreban za projektovanje kosina, obično se razvija na dva nivoa:

- glavne strukture (nabori, rasedi u zoni sistema radnih kosina i samog površinskog kopa);
- strukturne pukotine (pukotine, rasedi u zoni etaža).

Prethodna podela je izvršena, prvenstveno, na osnovu prostorne zastupljenosti navedenih strukturnih svojstava i očekivanog uticaja na konstruktivne elemente kosina površinskih kopova. Glavni rasedi su obično postojani, kako po pravcu pružanja, tako i po padu, mada mogu imati i veći zev. Shodno prethodnom, može se očekivati da će imati uticaja prilikom projektovanja sistema radnih kosina ili završnih kosina površinskog kopa. S druge strane, strukturne pukotine obično imaju ograničen postojanost i manji zev, pa samim tim se u razmatranje uzimaju prilikom projektovanja etaža i, eventualno, sistema radnih kosina.

Model stenskog masiva

Svojstva stenskog materijala, u kome se kosine formiraju, određuju njihovu geometriju i samim tim način na koji će biti izvršeno njihovo projektovanje. U vezanim stenskim materijalima, strukturna svojstva, najčešće, predstavljaju ograničavajući faktor, čak i kod relativno visokih kosina. U poluvezanim i nevezanim stenskim materijalima, kao i kod kosina sa velikom visinom, čvrstoća stenskog masiva predstavlja osnovni ograničavajući faktor. Prilikom utvrđivanja svojstava stenskog materijala, moraju se u obzir uzeti moguće promene karakteristika sa vremenom (reološka svojstva). Ovo je od posebnog značaja u slučajevima gde su u stenskom masivu zastupljeni glinoviti materijali skloni bubrenju ili škrljci ispunjeni glinom, kod kojih može doći do

redukovanja čvrstoće i drugih svojstava nakon njihovog otvaranja. Prilikom utvrđivanja svojstava stenskog materijala, projektant kosina može da pruži važne podatke koji su bitni za druge rudarske aktivnosti, na primer, za projektovanje bušačko-minerskih radova. Ovu činjenicu ne treba prevideti prilikom izrade programa za ispitivanje stenskog materijala.

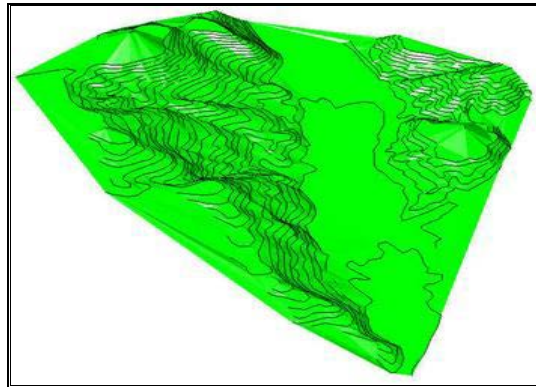
Povratna analiza uzroka pojave nestabilnosti, pa čak i stabilnih kosina, može imati velikog značaja prilikom određivanja svojstava stenskog materijala. Podaci prikupljeni detaljnim praćenjem promena stanja pojedinih delova kosina i u početnom periodu kod formiranih završnih kosina, mogu obezbediti podatke o svojstvima celokupnog stenskog masiva koje se obično ne mogu utvrditi pomoću laboratorijskih ispitivanjima na malim uzorcima, a koja se izvode za potrebe izrade Studije izvodljivosti i ranijim fazama projektovanja.

Hidrogeološki model

Hidrogeološke karakteristike terena, određene pomoću analize pritisaka podzemnih voda i karakteristika kretanja površinskih voda, mogu imati značajan negativan uticaj na stabilnost kosina, pa ih je neophodno detaljno izučiti. Ova svojstva su obično jedini elementi koji se, prilikom projektovanja kosina, mogu lako menjati primenom odgovarajućih mera za odvodnjavanje, naročito na nivo sistema radnih kosina ili većih sistema kosina. Međutim, odvodnjavanje i primena mera za smanjivanje pritisaka podzemnih voda zahtevaju potpunu posvećenost da bi se efikasno primenile na površinskom kopu, a obično zahtevaju značajno vreme za njihovo projektovanje i implementaciju. Identifikacija i definisanje hidrogeološkog režima u ranim fazama projektovanja su stoga od ključnog značaja.

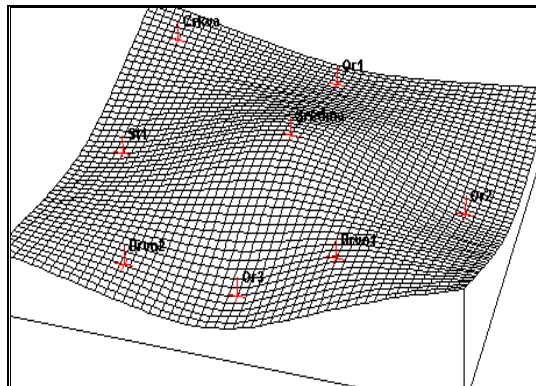
U fazi izrade računarskog modela ležišta, mogu se primeniti pet tipova modela. Ovi modeli uglavnom koriste iste ulazne podatke ali imaju razičite izlazne forme. Koriste se:

- *Triangulacijski model* – sačinjava niz trouglova formiranih na bazi referentnih tačaka (bušotina). Triangulacijom se predstavljaju površine terena, krovine ili padine sloja, rudnog tela, površinskog kopa i sl. (Slika 4.2.).



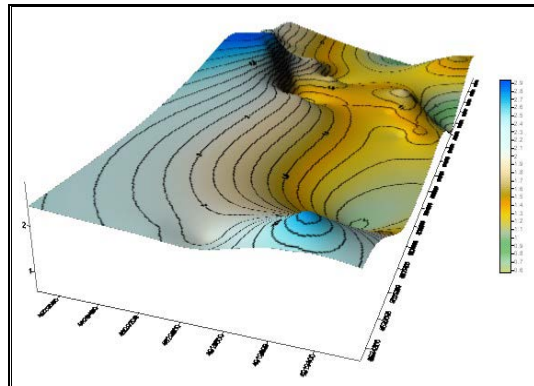
Slika 4.2. - Triangulacijski model ležišta

- *Mrežni – digitalni model* – predstavlja grupa linija ili stringova kojima se uglavnom ograničavaju površine, slično kao kod triangulacije. Može se izvoditi kao površinski ili prostorni model , pri čemu elementi mreže mogu biti pravougaonik (kvadrat) ili neki drugi prikaz (Slika 4.3).



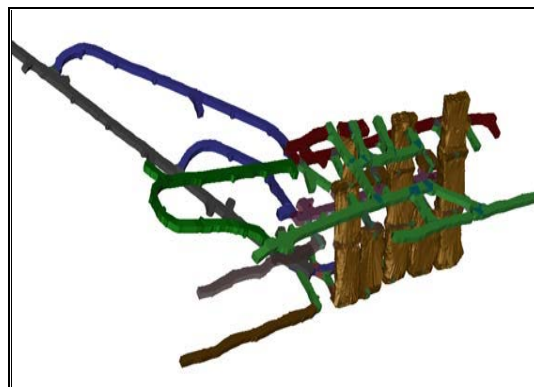
Slika 4.3. - Prikaz mrežnog modela ležišta

- *Konturni model* – posebno pogodan za prikazivanje planova koji se rade u dve dimenzije kao i za mrežni model kvaliteta izlaza koji zavisi od gustine same mreže (*Slike 4.4.*).



Slika 4.4. - Konturni model

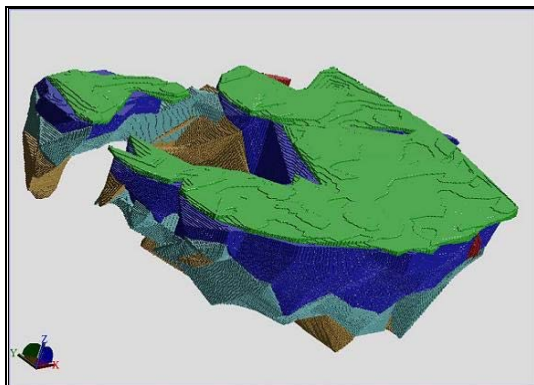
- *Žičani model* – definiše prostorni oblik objekta koji se modelira. Njime se predstavljaju rudna tela, rasedi, prostorije u rudnicima sa podzemnom eksploatacijom i td. (*Slika 4.5.*).



Slika 4.5. - Žičani model

- *Blok model* – definiše se model ležišta ili površinskog kopa sa 3D podelom na blokove i podblokove. Predstavlja se metodom interpolacije, statističkim ili geostatističkim metodama, krigovanjem i metodom

najbližih susednih tačaka. Ima najširu primenu u modeliranju ležišta i površinskih kopova (Slika 4.6.) [27].



Slika 4.6. - Blok model

Baza podataka predstavlja osnovu modeliranja sistema površinske eksploatacije za upravljanje proizvodnjom i obuhvata tri osnovne grupe podataka i to:

- podatke o izvornim geološkim istražnim radovima;
- podatke o vremenskim karakteristikama ponašanja proizvodnog sistema (vremenski periodi i zastoji proizvodnog sistema) u realnom vremenu eksploatacije i
- podatke o konstruktivnim, kinematskim i tehnološkim karakteristikama opreme za eksploataciju.

Podaci o izvornim geološkim istražnim radovima su dobijeni u fazi istraživanja ležišta i laboratorijskim ispitivanjima. Prema koncepciji modela grupišu se kao: strukturne karakteristike, fizičko-mehaničke karakteristike i karakteristike kvaliteta. Ovi podaci su vezani za lokaciju istražnog rada (istražne bušotine) i na taj način tačno je preciziran njihov prostorni položaj. U sledećem koraku ove podatke treba interpretirati na okonturenom prostoru površinskog kopa, tako da u celini bude pokriven svim potrebnim podacima. To se radi tako

što se prvo izvrši vertikalna podela na etaže, a zatim se svaka etaža deli na određeni broj miniblokova. Podela etaže na miniblokove (u horizontalnoj projekciji) znači diskretizaciju prostora etaže na skup tačaka za koje se vrši interpolacija izvornih geoloških podataka. U prvom slučaju pre interpolacije, nosilac niza informacija je bušotina ili neki drugi istražni rad, dok je u drugom slučaju posle interpolacije, dalji nosilac niza informacija težište minibloka. Izbor odgovarajuće metode za interpolaciju u ravni, vrši se prema kriterijumu najmanjeg odstupanja interpolovanih vrednosti u odnosu na realne vrednosti.

Forma i dimenzije mreže za interpolaciju i veličina miniblokova definišu se na osnovu više kriterijuma. Po pravilu visina miniblokova usaglašena je sa visinom etaže. Kod definisanja širine i dužine miniblokova postoji više uslova i to:

- ugao nagiba završne kosine etaže;
- dimenzije eksploatacionog bloka bagera;
- saglasnost površine miniblokova sa površinom poligona etaže i
- intezitet promena i veličina raspona pojavljivanja strukturnih karakteristika, fizičko-mehaničkih karakteristika i karakteristika kvaliteta.

Drugi deo baze sadrži podatke o vremenskom ponašanju proizvodnog sistema. To su periodi rada i zastoja sistema sa dužinom intervala i frekvencijom pojavljivanja. Predstavljanje podataka je kompleksno, u realnom prostoru (sa kordinatama x , y i z) i u realnom vremenu koje određuje aktuelnost prostornog položaja prema dinamici razvoja radova na površinskom kopu. Realni prostor i realno vreme su dva nivoa pripreme podataka koji se integrišu u zajedničku bazu podataka tako da potpuno definišu stanje radne sredine.

Treća grupa podataka predstavlja konstruktivne kinematske i tehnološke karakteristike opreme koja se koristi za eksploataciju i ima stalni karakter [5].

Informacione tehnologije (IT) su veoma zastupljene u rudarstvu pri obradi i upravljanju podacima, korišćenjem programskih paketa za 3D projektovanje, modeliranje i integraciju prostornih baza podataka sa primenom dobijenih rezultata. Suština njihove primene ogleda se u povezivanju funkcija planiranja,

projektovanja, nadzora, analize, odlučivanja i povratnog upravljačkog delovanja, kroz povećanje proizvodnje, produktivnosti, pouzdanosti, sigurnosti rada i operativnosti. Savremeni računarski programi kao osnovu za razvoj aplikacija koriste različite metode, od kojih su najčešće primenjene *Lerchsa-Grossmanova metoda* (LG), *Floating Cone Method – metod "plutajuće kupe"* i *dinamičko programiranje*.

U oblasti rudarstva danas se koriste brojni računarski programi koji su prilagođeni specifičnostima koje karakterišu rudarsku delatnost. Neki od njih su:

- ❖ *Surpac* (definisane kvantiteta i kvaliteta ležišta, geostatistike, modeliranje, planiranje eksploatacije mineralnih sirovina, kontrola proizvodnje, automatizacija određenih procesa eksploatacije) ;
- ❖ *Gems* (istraživanje, modeliranje, projektovanje rudarskih radova, praćenje proizvodnje) ;
- ❖ *Minex* (za slojevita ležišta (ugalj), upravljanje geološkim podacima i modelom, planiranje eksploatacije, definisanje najisplativijih delova ležišta, proračun rezervi, praćenje produktivnosti u proizvodnji, za rekultivaciju i saniranje kopa) ;
- ❖ *Whittle* (ekonomska optimizacija ležišta) ;
- ❖ *Rock Ware* (izrada kontura, mreža i karata određenih površina) ;
- ❖ *LogPlot* (izrada i prikaz geotehničkih, geofizičkih, rudarskih i ostalih podataka) ;
- ❖ *Vulcan* (analiza geološke građe ležišta, izrada blok modela, proračun rezervi, projektovanje plana i praćenje eksploatacije, upravljanje tim procesima) ;

- ❖ MineSuite (upravljanje i praćenje rudarskih procesa) ;
- ❖ Datamine (upravljanje geološkim podacima i rezervama mineralnih sirovina, razvoj plana eksploatacije, projektovanje i upravljanje rudarskim radovima, praćenje proizvodnje) ;
- ❖ Micromine (statistički proračuni, klasifikacija, kategorizacija i proračun rezervi, optimizacija kosina etaža, upravljanje i praćenje napredovanja rudarskih mašina).

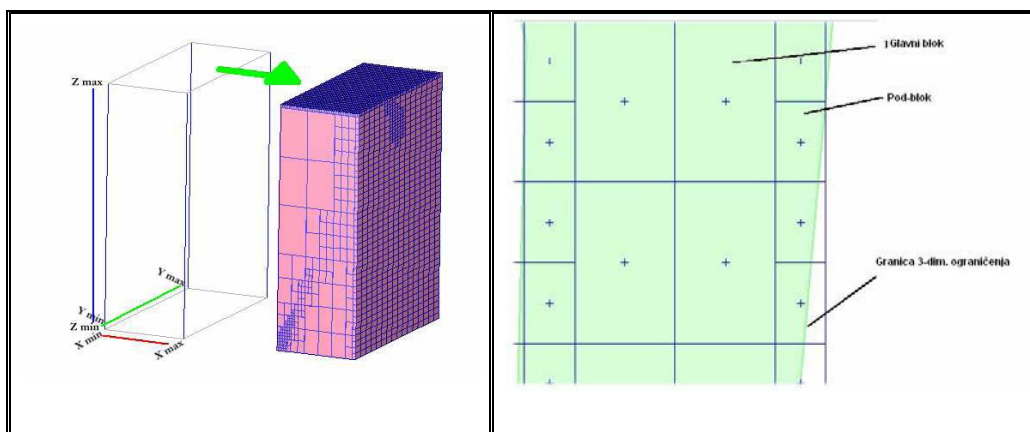
4.2. Model površinskog kopa **RADLJEVO**

Za izradu digitalnog modela površinskog kopa *RADLJEVO*, kao osnovne informacije korišćeni su podaci o istražnim bušotinama (ukupno 505 istražne bušotine). Ovi podaci su iskombinovani sa rezultatima uzorkovanja uglja (i analiza) i uključeni su u geološku bazu podataka modela za *P.K. RADLJEVO*. Uz pomoć baze podataka, izrađeno je 46 profila koji su služili kao osnova za povezivanje pojedinačnih slojeva, a napravljen je i digitalni model terena (DTM)- *Digital Terrain Model* koji predstavlja triangulaciju svih dostupnih podataka koji se tiču podine i krovine svakog sloja [65].

Blok model, korišćen za dalji rad, pokrio je celu razmatranu površinu i imao je dužinu od 8.440 m (sever-jug), širinu 8.975 m (istok-zapad) i visinu od 160 m (*Slika 4.7.*). Pošto se blok sastoji od brojnih modela pojedinačnih blokova, svakom od njih se mora odrediti veličina i pravac, tako da su za blok model Polja *RADLJEVO* određene sledeće veličine blokova:

X=30m; Y=30m; Z=2m (*osnovni blok*)

X=15m; Y=15m; Z=1m (*pod-blok*)



Slika 4.7. - Dimenzije blok modela (osnovni blokovi i pod-blokovi)

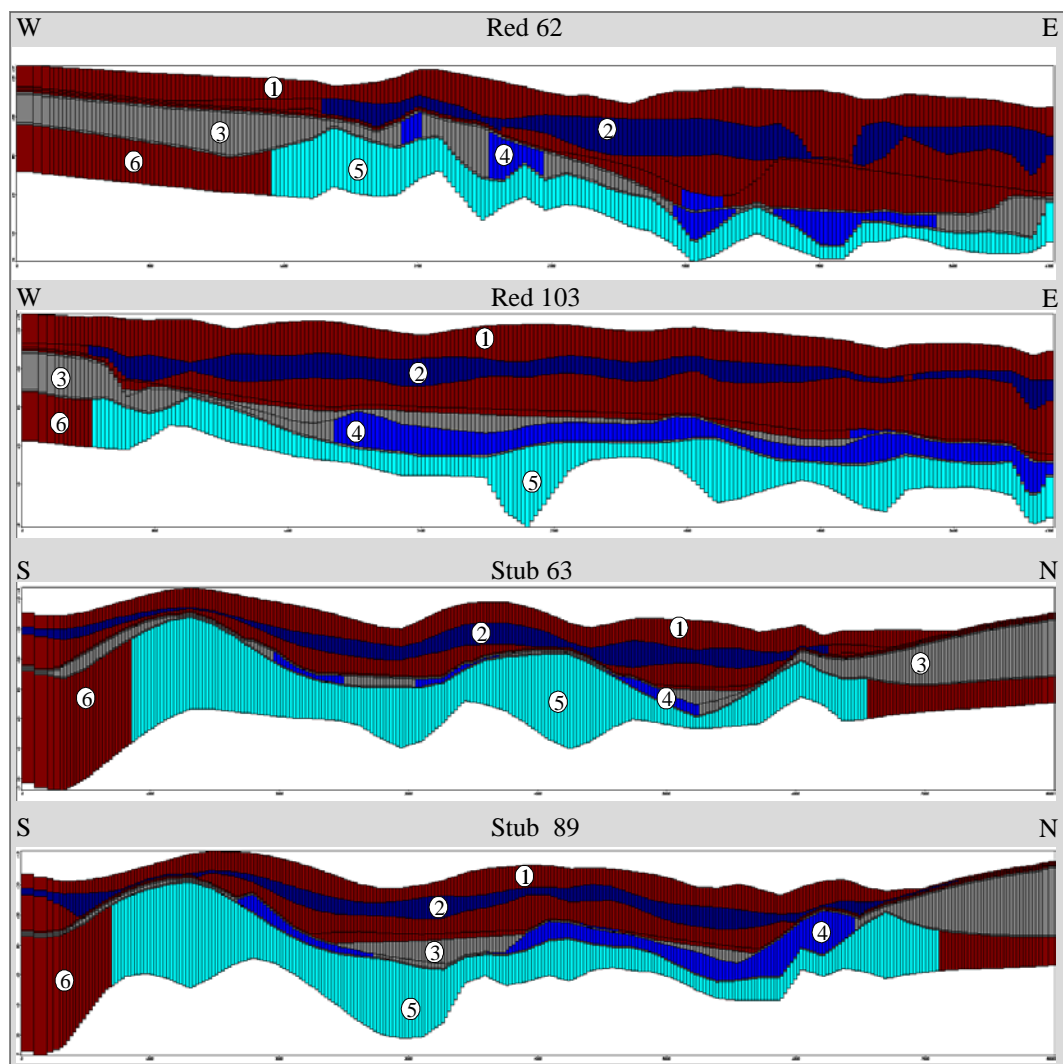
Osnovne karakteristike litoloških članova na istražnom području su: različito horizontalno rasprostranjeni, promenljive debljine i česte pojave proslojaka. Izražena litološka slojevitost u vertikalnom profilu i nejednako horizontalno prostiranje litoloških članova, imaju za posledicu izraženo horizontalno i vertikalno, odnosno prostorno strujanje podzemnih voda, koje je posebno izraženo u zonama kontakta peskova i šljunkova, odnosno gornjeg ugljenog sloja sa peskovima medjuslojne izdani. Ovih nekoliko pomenutih činjenica je uticalo na stratejsku odluku pri izboru osnovnih karakteristika modela, da se pristupi izradi višeslojevitog modela, sa mogućnošću automatske promene hidrodinamičkog stanja strujnog polja, zavisno od uslova strujanja podzemnih voda [65]. Hidrodinamički model površinskog kopa *RADLJEVO* je koncipiran i izražen kao višeslojeviti model sa ukupno osam slojeva, posmatrano u vertikalnom profilu i to počev od površine terena.

U *Tabeli 4.1.* dati su korespondentni slojevi modela i terena.

Tabela 4.1. – Korespondentni slojevi modela i terena

Modelski sloj	Litološki članovi
Prvi izolatorski sloj	Glinoviti i alevritični povlatni sedimenti
Drugi vodonosni sloj	Ppeskovi i šljunkovi krovinske izdani, koji delimično na severu i jugu prelaze u glinovite sedimente
Treći izolatorski sloj	Glinoviti sedimenti sa proslojcima uglja
Četvrti kombinovani izolatorsko- vodonosni sloj	Glinoviti sedimenti sa proslojcima uglja koji okružuju međuslojne peskove
Peti izolatorski sloj	Ugljevi sa proslojcima gline
Šesti kombinovani vodonosno- izolatorski sloj	Međuslojni peskovi koje okružuju ugljevi sa proslojcima gline
Sedmi izolatorski sloj	Ugljevi sa proslojcima gline
Osmi kombinovani vodonosno- izolatorski sloj	Podinski peskovi koji su na severu i jugozapadu u u kontaktu sa glinovitim sedimentima

Na *Slici 4.8.* prikazani su šematizovani litološki profili, pri čemu se težilo da se što više postigne vernost modela u odnosu na prirodu.



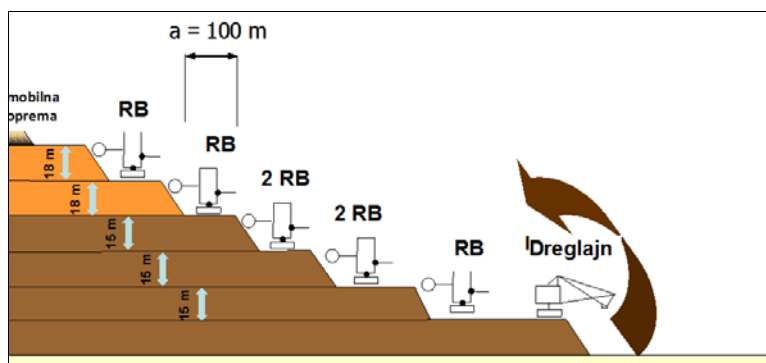
Slika 4.8. - Šematizovani litološki profili u pravcu zapad-istok i sever-jug
 Legenda: 1. Glinoviti i alevritični sedimenti; 2. Peskovi i šljunkovi povlatne izdani; 3. Ugljena serija; 4. Peskovi međuslojne izdani; 5. Peskovi podinske izdani; 6. Glinoviti sedimenti

Fizičko-mehanička svojstva zastupljenih geoloških slojeva prikazani su u **Tabeli 4.2.**

Tabela 4.2. - Fizičko-mehanička svojstva geoloških slojeva

Fizičko-mehanička svojstva			
Geološki sloj	ϕ^c (°)	c^c (kN/m ²)	γ (kN/m ³)
kvartarna glina	18	15	19.5
pliocenska glina	18	25	20.0
međuslojna jalovina	30	8	19.0
peskovita glina	19	30	19.5
ugalj	35	40	11.5
odlagalište	16	10	17.0

Nakon izvršene vertikalne podele na etaže i proračuna stabilnosti pojedinačnih kosina i celokupnog sistema kosina, a na osnovu fizičko-mehaničkih svojstava litoloških članova, formiran je model kosina radnih etaža (Slika 4.9.).



Slika 4.9. – Model kosina radnih etaža

U modelu su integrisani i sledeći parametri uglja:

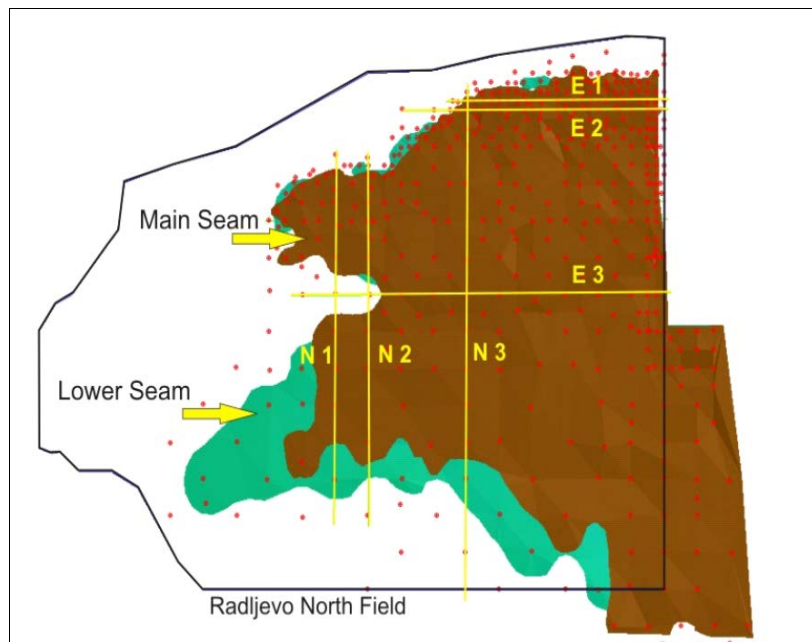
- donja toplotna vrednost (KJ/kg);
- sadržaj vlage (%);
- sadržaj pepela (%);
- sadržaj sumpora (%);
- pitanje isparljivosti (%).

Putem Inverzne metode procene razdaljine, ovi su atributi kasnije proračunati za sve ostale pojedinačne blokove i predstavljaju osnov za dalja razmatranja. U *Tabeli 4.3.* prikazan je kvalitet uglja po slojevima.

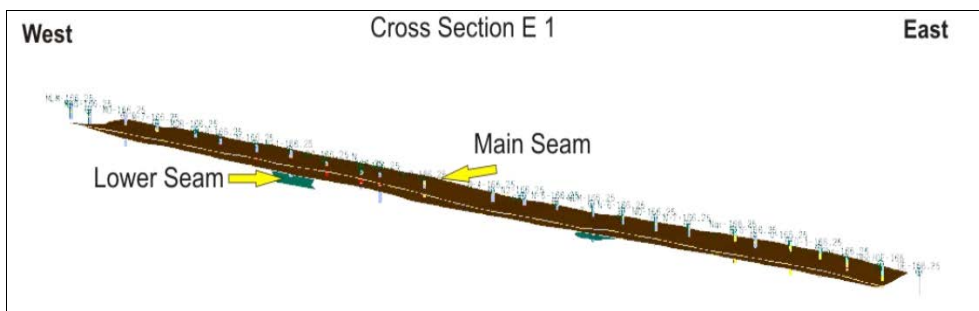
Tabela 4.3. - Kvalitet uglja po slojevima

KVALITET UGLJA PO SLOJEVIMA					
	DTV (kJ/kg)	Vlaga (%)	Pepeo (%)	Sumpor (%)	Isparljivost (%)
glavni sloj	6983	47.2	19.2	0.51	20.6
podinski sloj	7299	45.1	20.4	0.50	20.9

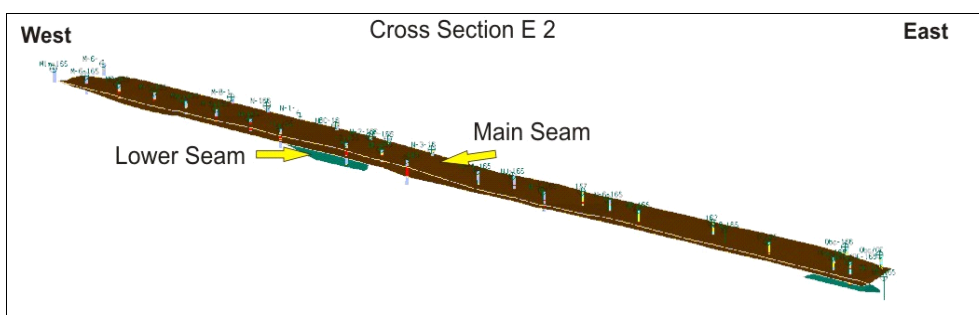
Na sledećim slikama, uz pomoć softverskog paketa za projektovanje *SURPAC*, prikazani su geološki uslovi ležišta *RADLJEVO*.



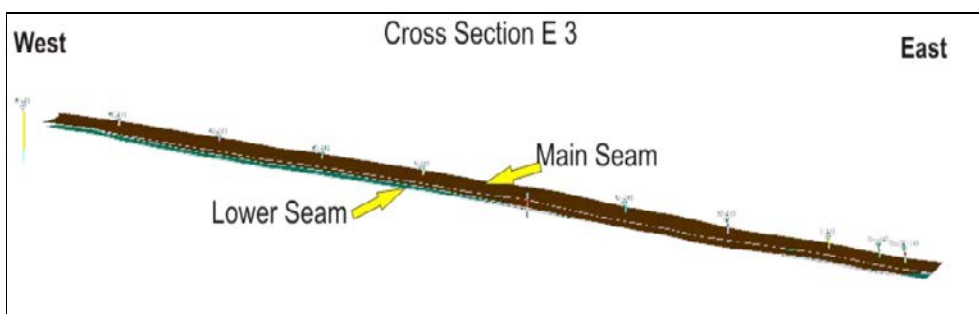
Slika 4.10. – Pregledna karta P.K. RADLJEVO sa lokacijom i profilima



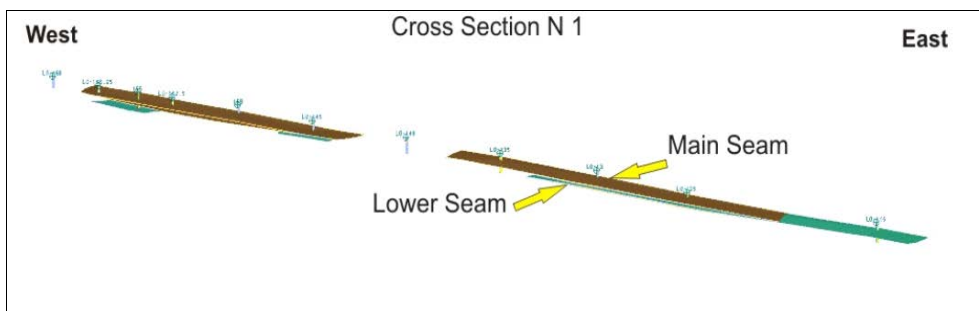
Slika 4.11. - Istočno-zapadni profil E1 prikazuje rasprostiranje slojeva i uslove stratifikacije



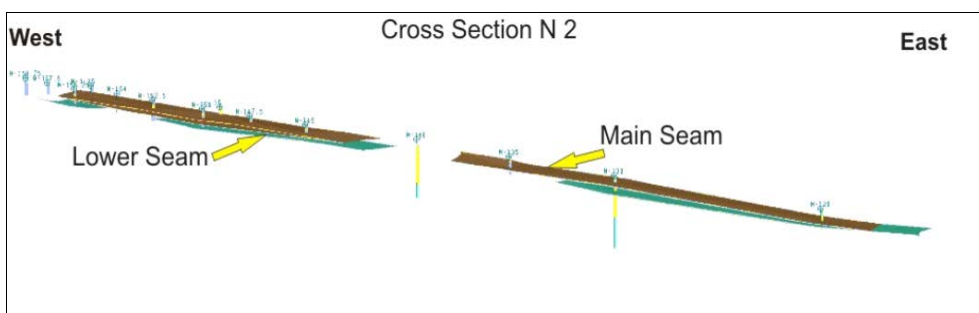
Slika 4.12. - Istočno- zapadni profil E2 prikazuje rasprostiranje slojeva i uslove stratifikacije



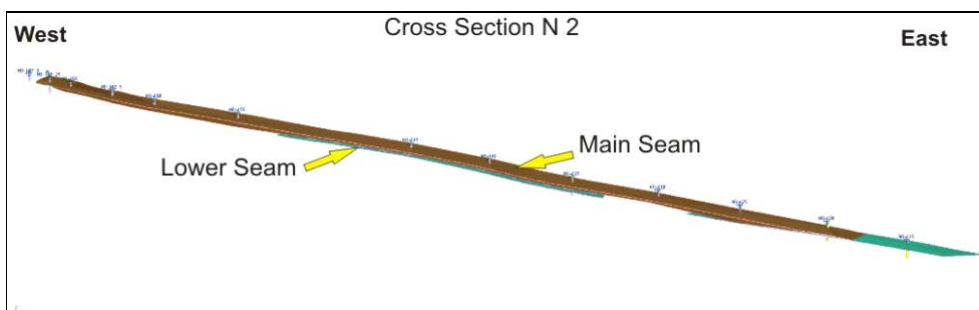
Slika 4.13. - Istočno-zapadni profil E3 prikazuje rasprostiranje slojeva i uslove stratifikacije



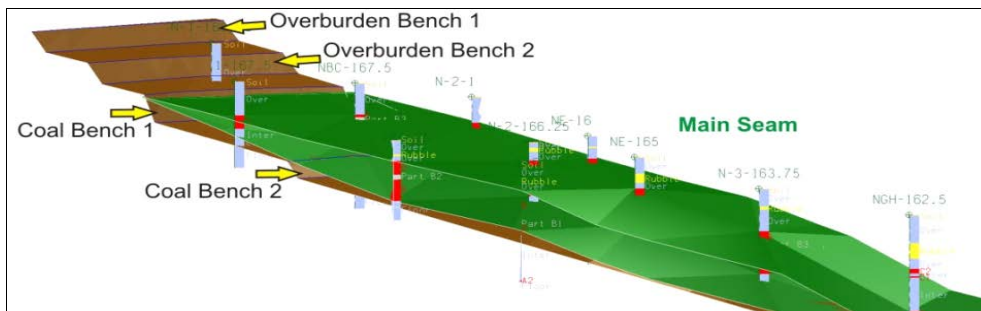
Slika 4.14. - Severno-južni profil N1 prikazuje rasprostriranje slojeva i uslove stratifikacije



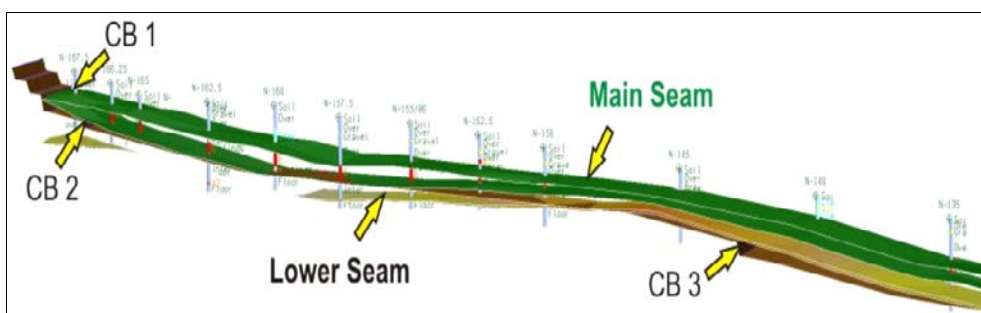
Slika 4.15. - Severno-južni profil N2 prikazuje rasprostriranje slojeva i uslove stratifikacije



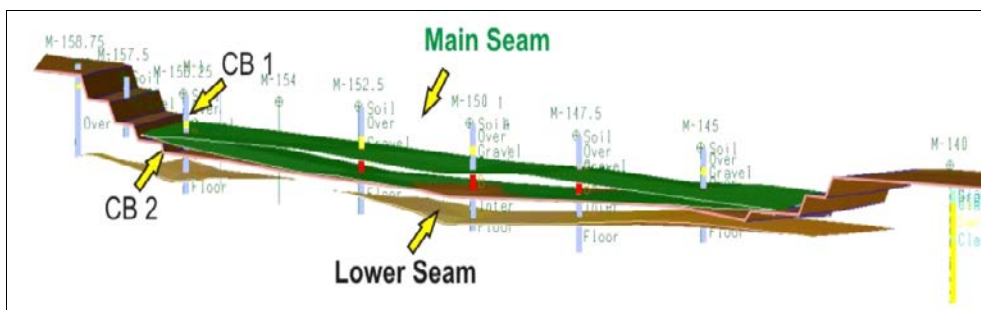
Slika 4.16. - Severno-južni profil N3 prikazuje rasprostriranje slojeva i uslove stratifikacije



Slika 4.17. – Principijalan projektovani kop RADLJEVO sa prikazanim sistemom kosina i ugljem



Slika 4.18. - Severno-južni profil N koji prikazuje kombinaciju projektovanog kopa i rasprostiranje sloja



Slika 4.19. - Severno-južni profil M koji prikazuje kombinaciju projektovanog kopa i rasprostiranje sloja

5. ANALIZA STABILNOSTI KOSINA

Analiza stabilnost kosina površinskog kopa spada među važnije inženjerske proračune koji služe kao osnova projektovanju površinskog kopa. Geometrija kosine određena je geomehničkim karakteristikama materijala u kosini, strukturno-geološkim karakteristikama ležišta u području završne kosine i rudarsko-tehnološkim uslovima. Tehnologija otkopavanja ne utiče na određivanje stabilnosti završne kosine, a geometrija kosine isključivo zavisi od parametara čvrstoće materijala u završnoj kosini.

Osnovni cilj kod završnih kosina površinskog kopa je postići maksimalni nagib za zadata konačnu maksimalnu visinu kosine pri minimalnom faktoru sigurnosti i optimalnim uslovima stabilnosti.

Uticajni faktori na stabilnost kosina dati su u *Tabeli 5.1*. U analizama stabilnosti kosina osnovni parametri koji kao svojstva materijala ulaze u proračun su: *kohezija* (C), *ugao unutrašnjeg trenja* (φ) i *zapreminska masa* (γ). Određivanje ovih parametara izvodi se metodom direktnog smicanja uzoraka ili metodom triaksijalne kompresije [7, 13, 14, 15, 29, 30, 34, 46, 49, 53].

Jednačina linije graničnog stanja za slučaj linearnog odnosa normalnog i smičućeg napona ima oblik:

$$\tau = C + \sigma_n \operatorname{tg}\varphi \quad (5.1)$$

gde su:

τ - smičući napon;

C - kohezija;

σ_n - normalni napon;

φ - ugao unutrašnjeg trenja;

Ako postoji pritisak vode uzduž ravni smicanja, tada jednačina graničnog stanja ima oblik:

$$\tau = C + (\sigma_n - u) \operatorname{tg} \varphi \quad (5.2)$$

gde je:

u - porni pritisak;

Tabela 5.1. - Uticajni faktori na stabilnost kosina [45]

Grupa faktora	Uticajni faktori	Karakter uticaja na stabilnost kosina	Uzima se u obzir
Geološki i inženjersko-geološki	1. Litološki sastav	Utiče na čvrstoću stena	Kod proračuna uglova završnih kosina površinskog kopa i kosina etaža u rastresitim stenama
	2. Čvrstoća stene	Određuje opštu stabilnost završnih kosina (osnovni faktor)	
	3. Raspucalost, slojevitost i tektonika	Smanjuje otpor masiva na smicanje (klizanje)	Kod proračuna uglova kosina etaža razrade mera protiv deformacija
	4. Raspadnutost i postojanost	Utiče na čvrstoću i razvoj osipanja	Kod proračuna uglova kosina površinskog kopa i etaža i razrade mera protiv deformacija
	5. Bubrenje i raskvašavanje	Smanjuje otpor na smicanje	Kod proračuna uglova kosina i razrade mera protiv deformacija
Hidrogeološki	1. Hidrostatički pritisak	Pokazuje uticaj na opštu stabilnost završnih kosina	Kod proračuna uglova završnih kosina površinskog kopa i načina isušivanja ležišta
	2. Hidrodinamički pritisak	Pokazuje uticaj na stabilnost peščanih kosina	Kod razrade mera protiv klizanja
	3. Sufozija	Izaziva procurivanje kosina	
	4. Dotok vode stenama koje bubre	Izaziva smanjenje otpora na smicanje	Kod proračuna kosina
	5. Izluživanje	Prodor vode	Kod razrade načina isušivanja ležišta
	6. Veće statičke rezerve vode pod pritiskom		
Rudarsko – tehnički	1. Bušačko - minerski radovi	Izazivaju drobljenje stena i pokazuju seizmički uticaj na kosine	Kod razrade bušenja i miniranja i proračuna stabilnosti kosina etaža
	2. Zakošavanje etaža	Utiče na stabilnost kosina etaža	Uglovi kosina etaža definišu se projektom
	3. Uticaj podzemne eksploatacije	Izaziva rušenje stena i stvaranje pukotina	Kod proračuna uglova nagiba završnih kosina; kod veštačkog učvršćenja kosina
	4. Profil radnih površina na etažama	Obezbeđuje oticanje atmosferskih voda i sprečava pojave klizanja	Kod izvođenja daje se potreban profil (nagib) radnim površinama etaže
	5. Redosled eksploatacije	Pomaže postizanje manjeg ekspl. koeficijenta otkrivke	Kod operativnog planiranja
	6. Opšti profil završne kosine površinskog kopa	Utiče na opštu stabilnost i zapreminu otkrivke	Kod proračuna uglova završnih kosina površinskog kopa

Faktor sigurnosti (F_s) predstavlja uslove ravnoteže u kosini i to u odnosu na graničnu ravnotežu. Graničnom ravnotežom smatramo uslove kada su sile koje teže da pomere materijal duž ravni klizanja, jednake otpornim silama koje deluju duž te ravni. Tako faktor sigurnosti (F_s) predstavlja i pokazatelj mogućnosti povećanja nagiba i visine kosine zavisno od otpornih parametara koji karakterišu materijal u kome se vrši analiza stabilnosti.

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau_m} \quad (5.3)$$

gde su:

F_s - faktor sigurnosti ;

τ_f - smičuća čvrstoća tla;

τ_m - prosečna veličina smičućih napona na kliznoj površini potrebna da održi klizno telo u ravnoteži;

Korektno utvrđivanje relevantnih fizičko – mehaničkih parametara, predstavlja jedan od najsloženijih inženjerskih zadataka s obzirom da je priroda veoma često komplikovana, teren varijabilan, izbor metoda relativno ograničen, a rizik manji ili veći, često neizbežan u svakoj ljudskoj aktivnosti. Obim i kvalitet terenskih istražnih radova i laboratorijskih ispitivanja, može često biti nedovoljan da bi se mogla izvršiti korektna i racionalna interpretacija rezultata merenja. Iz tog razloga, sadržaj i obim laboratorijskih ispitivanja fizičko – mehaničkih svojstava materijala, dati su u *Tabeli 5.2*.

Postoji više metoda ispitivanja stabilnosti kosina. Uglavnom se zasnivaju na pretpostavkama da se pri narušavanju stabilnosti kosine obrazuje klizna površina po kojoj gornja masa klizi na donjoj duž ove površine, pri čemu se gornja klizajuća i donja nepokretna masa usvajaju kao krute i da klizanje nastaje kada u svakoj tački klizne površine napon smicanja (τ_m) usled dejstva spoljne sile dostigne otpornost smicanja tla (τ_f). Prema tome, uslov za stabilnost kosina je da postoji ravnoteža između spoljnih sila (vlastita težina tla i svako drugo spoljno opterećenje) i unutrašnjeg otpora tla (kohezija i trenje).

Prvi radovi o stabilnosti kosina, koji su se pojavili u Francuskoj (Coulomb, 1773; Francais, 1820.), pretpostavljajući ravne površine klizanja, trasirali su dalji razvoj izučavanja kosina sa kružno - cilindričnim kliznim površinama. Daljim razvojem došlo se do toga da se klizno telo tretira kao jedno homogeno telo — *rezultantne metode* (Taylor, 1937. i 1948; Fröchlich, 1951.) ili se deli u lamele — *metode lamela* (Krey, 1926; Terzaghi, 1929; May i Brahtz, 1936.), a proračun se izvodi grafički (Fellenius, 1927. i 1936.) i analitički (Bishop, 1955.). Kružne površine klizanja nisu mogle uspešno da se primene u uslovima složenog nehomogenog terena, pa su se razvile metode sa proizvoljnim oblikom klizne ravni (Janbu, 1954, 1957. i 1973; Morgenstern i Price, 1965; Nonveiller, 1965.). Sve ove metode uzele su linearan kriterijum loma, međusobno se razlikuju po različitim pretpostavkama, redosledu i tehnici proračuna.

Drugi pravac izučavanja stabilnosti kosina bio je usmeren na osnovne postavke teorije plastičnosti (Druckor i Prager, 1952; Sokolovski, 1942.), a u kasnijim pristupima i na proračun stabilnosti metodom konačnih elemenata (Clough i Woodward, 1967; Chang i Duncan, 1970; Loo i Ler, 1973.).

Tabela 5.2. - Sadržaj i obim laboratorijskih ispitivanja fizičko-mehaničkih svojstava stena [45]

Redni broj	Vrsta Ispitivanja	Stene koje se ispituju	Broj Ispitivanja	Kratka karakteristika Ispitivanja i pribora
1	2	3	4	5
1.	Smicanje	Slabije peščane i glinaste stene	Od 12 do 48 za svaki jednorodni sloj	Brzo smicanje na običnim priborima sa jednom površinom uz normalna opterećenja koja dostižu 0,8 H
2.	Smicanje pod uglom (koso smicanje)	Srednje čvrstoće	Od 9 do 30 za svaki jednorodni sloj	Na priboru kosog smicanja po metodologiji VNIMI
3.	Triaksijalni pritisak	Male i srednje čvrstoće	Dopuna ispitivanju na smicanje	Nedrenirana ispitivanja u triaksijalnom aparatu kod bočnog pritiska do 0,4 H
4.	Jednoosni pritisak	Peščano-glinaste i glinaste	Od 9 do 30 za svaki litološki član	Visina uzorka dva puta veća od prečnika. Pritisak između nazubljenih ploča
5.	Granica puzanja (tečenja)	Peščano-glinaste i glinaste	Najmanje 50% od broja uzoraka na smicanje	Po metodologiji VNIMI preko osmatranja deformacija kod smanjenja naprežanja do prestanka puzanja
6.	Kompresija	Glinaste	2-4 uzorka iz svakog sloja	Kompresioni pribor prečnika 70 mm kod pritiska do H; obrnuto do potpunog rasterećenja i punog bubrenja
7.	Prirodna vlažnost i poroznost	Sve vrste stena	Svi uzorci od 1-6	Sušenje na $t = 105 - 110^{\circ}$ 5 - 6h, merenje i proračun
8.	Zapreminska masa γ	Sve vrste stena	Svi uzorci od 1-6	Metodom neposrednog merenja uzoraka, metodom pravilnih geometrijskih oblika i metodom parafinisanja
9.	Gustina γ_0	Sve vrste stena	10 - 15% uzoraka od r. br. 1 - 5, svi uzorci r. br. 6	Piknometarskom metodom
10.	Granulometrijski sastav	Slabije peščane i glinaste stene	10 - 15% uzoraka od r. br. 1 .	Vizuelno, sejanjem i dr.
11.	Indeks plastičnosti	Glinaste stene	Sve uzorke r. br. 6	Granica tečenja — ručno; granica plasticnosti Atebergovim aparatom
12.	Kapilarna i maksimalna molekularna vlažnost	Glinaste stene	Sve uzorke r. br. 6	Standardnim metodama; neposrednim osmatranjem
13.	Mineraloški sastav	Glinaste stene	1 — 2 uzorka iz svakog sloja	Standardnim metodama
14.	Petrografski sastav	Polučvrste i čvrste stene	1 — 2 uzorka za svaki litološki član	Standardnim metodama
15.	Koeficijent postojanosti	Polučvrste i čvrste stene	1 — 2 uzorka za svaki litološki član	Upoređenjem čvrstoće prirodne i posle višestrukog vlaženja i sušenja, a takođe zamrzavanja i odmrzavanja

Sve metode proračuna stabilnosti kosina u načelu mogu se podeliti na:

- metode granične ravnoteže ;
- metode teorije plastičnosti ;
- metode konačnih elemenata.

Metode granične ravnoteže — ove metode su zasnovane na ispitivanju stabilnosti celokupnog kliznog tela za stvarne ili potencijalne klizne ravni duž kojih se pomera nestabilna masa kao celina. Faktor sigurnosti (Fs) računa se za više potencijalnih kliznih ravni, a usvaja se ona klizna ravan sa minimalnim faktorom sigurnosti i naziva se *kritična klizna ravan*. U osnovi su dva postupka analize stabilnosti tla iznad pretpostavljene klizne ravni, i to:

a) analizira se ravnoteža celokupne mase tla iznad klizne ravni i te metode poznate su kao *rezultantne metode* (*metoda kruga trenja*-Taylorova metoda, *metoda logaritamske spirale*-metoda Pendulića i *grafičke metode*-kod homogenih materijala za brzu i orijentacionu proveru).

b) klizno telo se izdela na niz lamela, pa se ispituje ravnoteža svih lamela ponaosob, bilo grafičkim ili analitičkim putem. Metode su poznate kao *metode lamela*, a često su u upotrebi:

- *Švedska metoda* (*Fellenius, 1927.*) - netačan faktor sigurnosti (Fs) za razvučena klizišta sa visokim porednim pritiskom, klizna ravan kružnog oblika ;
- *Bišopova modifikovana metoda* (*Bishop, 1955.*) - tačna metoda samo za kružnu kliznu ravan, zadovoljava uslove ravnoteža vertikalnih sila i ukupnih momenata, međulamelarne sile su horizontalne ;
- *Metoda ravnoteže sila* - zadovoljava ravnotežu sila, primenjiva za sve izvedene i zakrivljene klizne ravni, usvaja nagnute međulamelarne sile;
- *Pojednostavljena metoda Janbua* (*Janbu, 1968.*) - zadovoljava ravnotežu sila, primenjiva za sve oblike klizne ravni, usvaja horizontalne

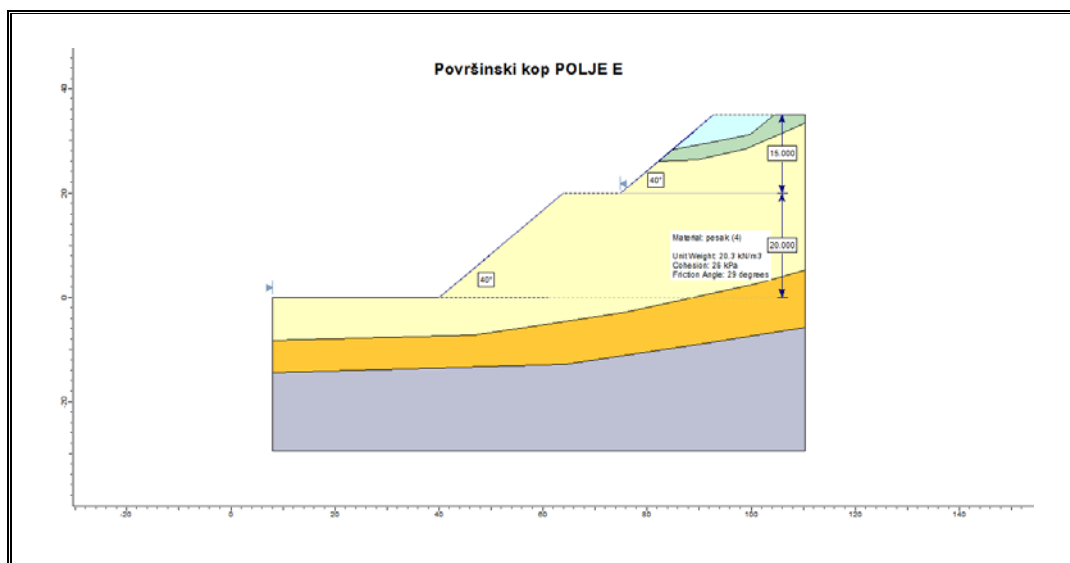
međulamelarne sile, faktor sigurnosti (F_s) je manji od izračunatog metodama koje zadovoljavaju sve uslove ravnoteže ;

- *Modifikovana švedska metoda (US Army Corps of Engineers, 1970.)* – zadovoljava ravnotežu sila, primenjiva za sve oblike klizne ravni, usvaja nagib međulamelarnih sila jednak nagibu padine, faktor sigurnosti (F_s) je često značajno veći od izračunatog metodama koje zadovoljavaju sve uslove ravnoteže ;
- *Metoda Lowea i Karafiatha (Lowe i Karafiath, 1960.)* - opšte najtačnija metoda ravnoteže sila, primenjiva za sve oblike klizne ravni, zadovoljava uslove ravnoteže za vertikalne i horizontalne sile ;
- *Opšta metoda Janbua (Janbu, 1968.)* - zadovoljava sve uslove ravnoteže, primenjiva za sve oblike klizne ravni, vrlo tačna vrednost faktora sigurnosti (F_s) ;
- *Metoda Spencera (Spencer, 1967.)* - zadovoljava sve uslove ravnoteže, primenjiva za sve oblike klizne ravni, vrlo tačna vrednost faktora sigurnosti (F_s) ;
- *Metoda Morgensterna i Pricea (Morgenstern i Price, 1965.)* - zadovoljava sve uslove ravnoteže, primenjiva za sve oblike klizne ravni, tačna vrednost faktora sigurnosti (F_s) ;
- *Metoda Sarma (Sarma, 1973.)* - zadovoljava sve uslove ravnoteže, primenjiva za sve oblike klizne ravni.

Metode teorije plastičnosti - zasivaju se na iznalaženju graničnog naponskog stanja, odnosno na određivanju uslova koji dovode do stvaranja plastičnih deformacija u kosinama. Manje se primenjuju nego navedene metode granične ravnoteže, ali imaju teoretski i razvojni značaj naročito prilikom analize nosivosti temelja i pritiska na potporne konstrukcije, kao i pri rešavanju specijalnih slučajeva stabilnosti. Primena teorije plastičnosti bazira se na diferencijalnim jednačinama ravnoteže u ravni i na Coulomb – Mohrovom kriterijumu loma.

Metoda konačnih elemenata (MKE) - upotrebom ove metode moguće je realnije proceniti raspodelu napona, deformacije i pomeranja u kosini i to na bazi modeliranja terena nakon geomehaničkih istraživanja kojima se obuhvataju sve njegove osobine i efekti, kao što su: primarni naponi u tlu, heterogenost, anizotropija, diskontinualnost, efekat progresivnog loma i sl.

Proračun faktora sigurnosti (F_s) etaža na površinskom koku POLJE E – R.B. KOLUBARA (sitnozrni pesak i uglj), urađen je korišćenjem tri metode : *Morgenstern-Price*, *Bishop* i *Janbu* (model na slici *Slici 5.1.*), pri različitim vrednostima pornog pritiska ($ru=0.0$, $ru=0.2$ i $ru=0.5$). Rezultati proračuna prikazani su tabelarno (*Tabela 5.3. i 5.4.*) i grafički (*Slika 5.2.*).



Slika 5.1. – Model površinskog kopa POLJE E - R.B. KOLUBARA

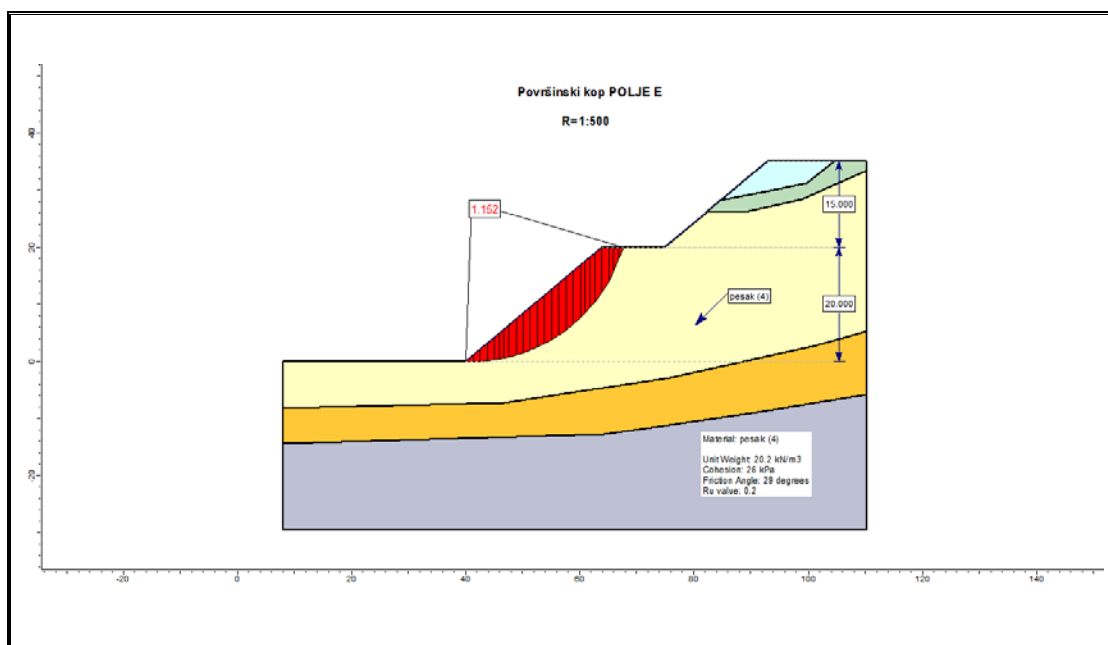
Fizičko-mehanička svojstva sitnozrnog peska su :

- ugao unutrašnjeg trenja $\varphi = 29^\circ$
- kohezija $C = 26$ (KN/m²)
- zapreminska masa $\gamma = 20.20$ (KN/m³)

Fizičko-mehanička svojstva uglja su :

- ugao unutrašnjeg trenja $\varphi = 34^\circ$
- kohezija $C = 180 \text{ (KN/m}^2\text{)}$
- zapreminska masa $\gamma = 11,47 \text{ (KN/m}^3\text{)}$

Visina etaža je definisana vertikalnom podelom ležišta i za analizirani prostor usvojeno je $H_e=20 \text{ m}$ (i za pesak i za uglj). *Ugao nagiba kosina* (α_r) za usvojenu visinu etaže određuje se nakon sprovedene analize stabilnosti tako da za konkretnu parcijalnu kosinu iznosi $\alpha_r = 40^\circ$ (pesak) i $\alpha_r = 70^\circ$ (ugalj).



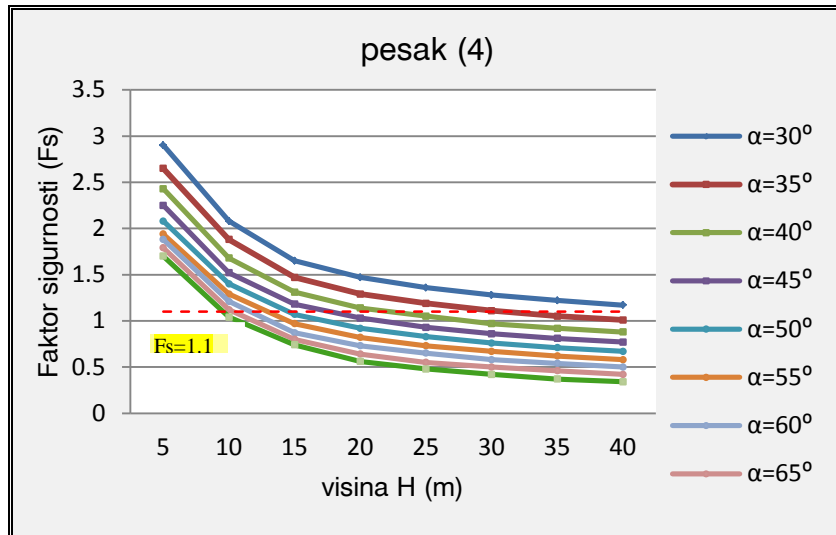
Slika 5.2. - Proračun faktora sigurnosti (F_s) parcijalne kosine primenom softverskog paketa SLIDE v.6.0, Rocscience In

Tabela 5.3. - Rezultati proračuna faktora stabilnosti (F_s) parcijalne kosine sitnozrnog peska za različite visine (H_e) i nagibe etaže (α_r) na površinskom kopu POLJE E – R.B. KOLUBARA

H/ α	30°		35°		40°		45°		50°		55°		60°		65°		70°	
	metoda	F_s	metoda	F_s	metoda	F_s	metoda	F_s	metoda	F_s	metoda	F_s	metoda	F_s	metoda	F_s	metoda	F_s
5	Janbu	2.82	Janbu	2.59	Janbu	2.40	Janbu	2.24	Janbu	2.10	Janbu	1.97	Janbu	1.86	Janbu	1.75	Janbu	1.64
	Spencer	2.94	Spencer	2.68	Spencer	2.47	Spencer	2.28	Spencer	2.12	Spencer	2.08	Spencer	2.03	Spencer	1.96	Spencer	1.79
	M-P	2.90	M-P	2.65	M-P	2.43	M-P	2.25	M-P	2.08	M-P	1.94	M-P	2.01	M-P	1.96	M-P	1.78
10	Janbu	1.94	Janbu	1.75	Janbu	1.58	Janbu	1.45	Janbu	1.33	Janbu	1.23	Janbu	1.13	Janbu	1.04	Janbu	0.96
	Spencer	2.01	Spencer	1.81	Spencer	1.64	Spencer	1.49	Spencer	1.37	Spencer	1.21	Spencer	1.18	Spencer	1.14	Spencer	1.03
	M-P	1.99	M-P	1.79	M-P	1.62	M-P	1.47	M-P	1.34	M-P	1.23	M-P	1.13	M-P	1.18	M-P	1.04
15	Janbu	1.62	Janbu	1.43	Janbu	1.28	Janbu	1.16	Janbu	1.05	Janbu	0.95	Janbu	0.86	Janbu	0.78	Janbu	0.70
	Spencer	1.68	Spencer	1.49	Spencer	1.33	Spencer	1.20	Spencer	1.09	Spencer	0.98	Spencer	0.86	Spencer	0.76	Spencer	0.83
	M-P	1.65	M-P	1.47	M-P	1.31	M-P	1.18	M-P	1.07	M-P	0.97	M-P	0.87	M-P	0.79	M-P	0.83
20	Janbu	1.45	Janbu	1.27	Janbu	1.12	Janbu	1.00	Janbu	0.90	Janbu	0.80	Janbu	0.72	Janbu	0.64	Janbu	0.56
	Spencer	1.49	Spencer	1.31	Spencer	1.16	Spencer	1.04	Spencer	0.93	Spencer	0.84	Spencer	0.74	Spencer	0.66	Spencer	0.59
	M-P	1.47	M-P	1.29	M-P	1.14	M-P	1.03	M-P	0.92	M-P	0.82	M-P	0.73	M-P	0.64	M-P	0.56
25	Janbu	1.34	Janbu	1.16	Janbu	1.02	Janbu	0.91	Janbu	0.80	Janbu	0.71	Janbu	0.63	Janbu	0.55	Janbu	0.47
	Spencer	1.38	Spencer	1.20	Spencer	1.06	Spencer	0.94	Spencer	0.83	Spencer	0.74	Spencer	0.66	Spencer	0.58	Spencer	0.49
	M-P	1.36	M-P	1.19	M-P	1.09	M-P	0.93	M-P	0.83	M-P	0.73	M-P	0.65	M-P	0.56	M-P	0.50
30	Janbu	1.26	Janbu	1.09	Janbu	0.95	Janbu	0.84	Janbu	0.74	Janbu	0.64	Janbu	0.56	Janbu	0.48	Janbu	0.40
	Spencer	1.30	Spencer	1.12	Spencer	0.99	Spencer	0.87	Spencer	0.77	Spencer	0.68	Spencer	0.59	Spencer	0.51	Spencer	0.43
	M-P	1.28	M-P	1.11	M-P	0.97	M-P	0.86	M-P	0.76	M-P	0.67	M-P	0.58	M-P	0.50	M-P	0.42
35	Janbu	1.21	Janbu	1.03	Janbu	0.90	Janbu	0.78	Janbu	0.68	Janbu	0.60	Janbu	0.51	Janbu	0.43	Janbu	0.35
	Spencer	1.23	Spencer	1.07	Spencer	0.93	Spencer	0.82	Spencer	0.72	Spencer	0.63	Spencer	0.55	Spencer	0.47	Spencer	0.39
	M-P	1.22	M-P	1.05	M-P	0.92	M-P	0.81	M-P	0.71	M-P	0.62	M-P	0.54	M-P	0.46	M-P	0.37
40	Janbu	1.16	Janbu	0.99	Janbu	0.86	Janbu	0.74	Janbu	0.65	Janbu	0.56	Janbu	0.47	Janbu	0.39	Janbu	0.31
	Spencer	1.19	Spencer	1.02	Spencer	0.89	Spencer	0.78	Spencer	0.68	Spencer	0.59	Spencer	0.51	Spencer	0.44	Spencer	0.35
	M-P	1.17	M-P	1.01	M-P	0.88	M-P	0.77	M-P	0.67	M-P	0.58	M-P	0.50	M-P	0.42	M-P	0.34

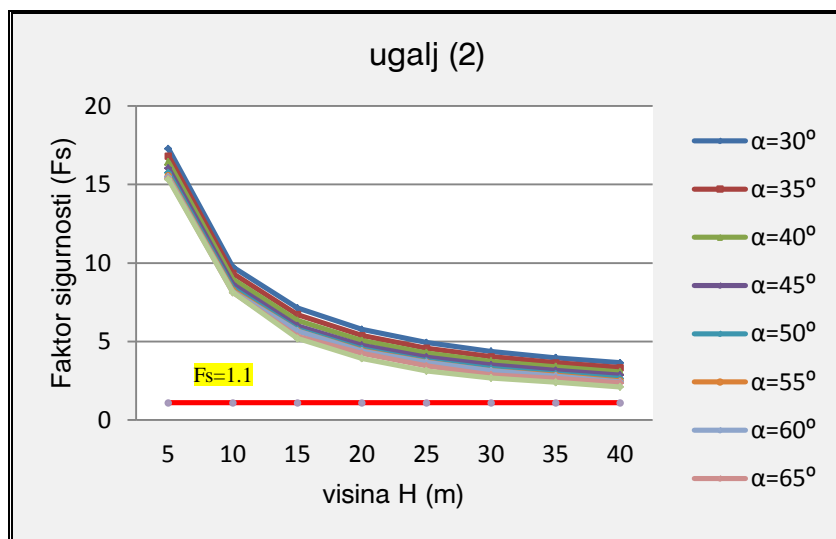
Tabela 5.4. - Rezultati proračuna faktora stabilnosti (F_s) parcijalne kosine uglja za različite visine (H_e) i nagibe etaže (α_r) na površinskom kopu POLJE E – R.B. KOLUBARA

H/ α	30 ⁰		35 ⁰		40 ⁰		45 ⁰		50 ⁰		55 ⁰		60 ⁰		65 ⁰		70 ⁰	
	metoda	Fs	metoda	Fs	metoda	Fs	metoda	Fs	metoda	Fs	metoda	Fs	metoda	Fs	metoda	Fs	metoda	Fs
5	Janbu	18.68	Janbu	10.08	Janbu	7.09	Janbu	5.60	Janbu	4.83	Janbu	3.95	Janbu	3.82	Janbu	3.12	Janbu	2.49
	Spencer	19.54	Spencer	10.99	Spencer	7.94	Spencer	6.42	Spencer	5.40	Spencer	4.83	Spencer	4.30	Spencer	3.97	Spencer	3.39
	M-P	19.65	M-P	11.07	M-P	8.06	M-P	6.53	M-P	5.56	M-P	4.91	M-P	4.42	M-P	4.06	M-P	3.53
10	Janbu	18.16	Janbu	9.82	Janbu	6.99	Janbu	5.75	Janbu	4.72	Janbu	3.67	Janbu	3.60	Janbu	3.58	Janbu	3.01
	Spencer	18.87	Spencer	10.48	Spencer	7.58	Spencer	6.00	Spencer	5.00	Spencer	4.22	Spencer	4.01	Spencer	3.66	Spencer	3.20
	M-P	18.89	M-P	10.51	M-P	7.62	M-P	6.09	M-P	5.16	M-P	4.53	M-P	4.07	M-P	3.72	M-P	3.31
15	Janbu	17.20	Janbu	9.42	Janbu	6.92	Janbu	5.32	Janbu	4.42	Janbu	3.98	Janbu	3.42	Janbu	3.01	Janbu	2.86
	Spencer	17.70	Spencer	9.61	Spencer	7.00	Spencer	5.58	Spencer	4.69	Spencer	4.01	Spencer	3.63	Spencer	3.33	Spencer	2.97
	M-P	17.91	M-P	9.73	M-P	7.13	M-P	5.69	M-P	4.80	M-P	4.21	M-P	3.77	M-P	3.44	M-P	3.02
20	Janbu	15.70	Janbu	8.66	Janbu	6.10	Janbu	4.97	Janbu	4.16	Janbu	3.78	Janbu	3.38	Janbu	2.95	Janbu	2.43
	Spencer	15.99	Spencer	8.87	Spencer	6.32	Spencer	5.01	Spencer	4.38	Spencer	3.82	Spencer	3.43	Spencer	3.01	Spencer	2.61
	M-P	16.12	M-P	9.06	M-P	6.56	M-P	5.18	M-P	4.48	M-P	3.91	M-P	3.50	M-P	3.19	M-P	2.82
25	Janbu	15.77	Janbu	8.57	Janbu	7.98	Janbu	4.52	Janbu	3.84	Janbu	3.42	Janbu	2.90	Janbu	2.70	Janbu	2.21
	Spencer	15.98	Spencer	8.86	Spencer	8.01	Spencer	4.77	Spencer	3.99	Spencer	3.32	Spencer	3.01	Spencer	2.77	Spencer	2.30
	M-P	16.02	M-P	8.92	M-P	8.12	M-P	4.86	M-P	4.07	M-P	3.56	M-P	3.18	M-P	2.91	M-P	2.40
30	Janbu	15.70	Janbu	9.20	Janbu	6.30	Janbu	4.78	Janbu	3.90	Janbu	3.66	Janbu	2.77	Janbu	2.40	Janbu	1.99
	Spencer	15.81	Spencer	9.32	Spencer	6.41	Spencer	4.99	Spencer	4.00	Spencer	3.79	Spencer	2.85	Spencer	2.54	Spencer	2.15
	M-P	15.99	M-P	9.49	M-P	6.55	M-P	5.13	M-P	4.16	M-P	3.84	M-P	2.99	M-P	2.71	M-P	2.21
35	Janbu	15.62	Janbu	8.77	Janbu	6.39	Janbu	4.98	Janbu	4.02	Janbu	3.92	Janbu	2.80	Janbu	2.59	Janbu	1.79
	Spencer	15.70	Spencer	8.81	Spencer	6.48	Spencer	5.01	Spencer	4.14	Spencer	3.39	Spencer	2.92	Spencer	2.61	Spencer	1.98
	M-P	15.84	M-P	8.94	M-P	6.67	M-P	5.11	M-P	4.24	M-P	3.53	M-P	3.01	M-P	2.70	M-P	2.05
40	Janbu	15.21	Janbu	8.92	Janbu	6.16	Janbu	4.92	Janbu	3.82	Janbu	3.32	Janbu	2.98	Janbu	2.41	Janbu	1.62
	Spencer	15.32	Spencer	9.01	Spencer	6.25	Spencer	5.01	Spencer	3.98	Spencer	3.48	Spencer	3.01	Spencer	2.50	Spencer	1.79
	M-P	15.54	M-P	9.17	M-P	6.36	M-P	5.10	M-P	4.06	M-P	3.57	M-P	3.05	M-P	2.62	M-P	1.81



Slika 5.3. - Faktori sigurnosti parcijalnih etaža za različite visine (H_e) i nagibe kosina (α_r)sitnozrnih peskova

Kao što se vidi na gornjem dijagramu za sitnozrni pesak (Slika 5.3.), pri visini etaže $H_e=20$ m, ugao nagiba kosine ne sme prelaziti 40° . Etaže na uglju (Slika 5.4.), za visinu etaže $H_e=20$ m, mogu imati nagib i do 70° . I za ostale materijale i kosine na površinskim kopovima R.B. KOLUBARA, princip proračuna faktora sigurnosti (F_s) i njegovih prikazivanja je isti. Mora se napomenuti da su analize rađene uz pretpostavku da su etaže homogene.

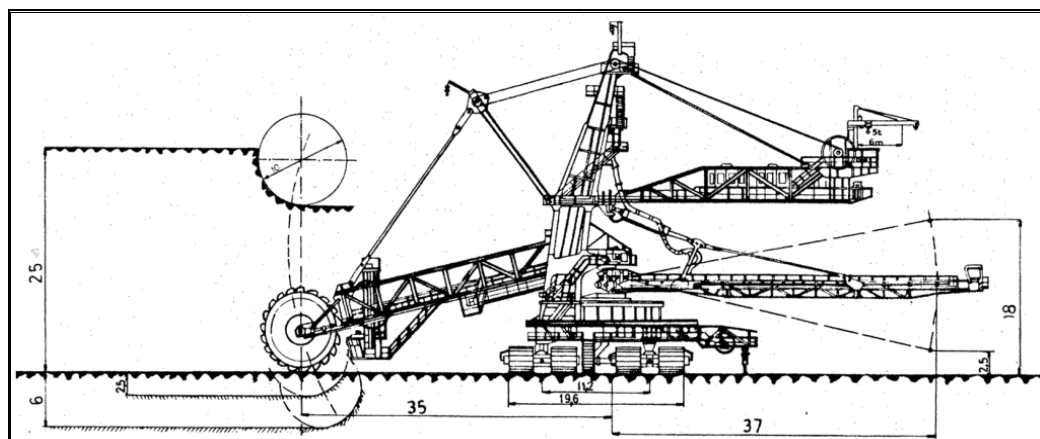


Slika 5.4. - Faktori sigurnosti parcijalnih etaža za različite visine (H_e) i nagibe kosina (α_r)uglja (R.B. KOLUBARA)

Može se zaključiti da pravilno proračunata i definisana geometrija kosine, pored toga što utiče na sigurnost rada tokom eksploatacije, ima i veliki značaj na odabir opreme, tj. u čvrstoj je vezi sa njenim konstruktivnim parametrima. Ovo se posebno odnosi na dužinu strele bagera jer, ukoliko je ona duža, moguće je otkopavati etaže koje zahtevaju manje uglove nagiba, što je od posebnog značaja pri radu u materijalima sa slabim fizičko-mehaničkim svojstvima. U narednim poglavljima to će biti prikazano kroz analizu rada tri različita tipa bagera.

6. DINAMIČKO I STATIČKO PONAŠANJE STRELE BAGERA SchRs-630 KAO POSLEDICA TEHNOLOŠKOG ZAHTEVA ZA POVEĆANJEM DUŽINE STRELE

Uticaj produžavanja strele bagera na dinamičko ponašanje konstrukcije strele i na naponsko stanje celokupne konstrukcije bagera, ispitano je numeričkim putem, primenom metode konačnih elemenata. Kao referentni bager za istraživanja usvojen je rotorni bager tipa SchRs 630 25/6 proizvođača O&K (sada Krupp). Ovo je jedan od najzastupljenijih tipova rotornih bagera na površinskim kopovima u okviru Elektroprivrede Srbije. Do sada je izrađivan u više modela (sa različitim zapreminom kašike (900 litara, 630 litara i 740 litara), ali sa istim konstruktivnim dimenzijama (dužina strele 35 metara).



Slika 6.1. - Bager tipa SchRs 630 25/6 (osnovne dimenzije)

6.1. 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 [1, 31, 32, 48, 50, 60, 61, 62, 63, 67].

Razlikuju se statički i dinamički proračuni nosećih struktura.

a). *Statički proračun nosećih struktura*

Jednačina statičke ravnoteže sila-pomeranje u matricnom obliku glasi:

$$[K]\{\delta\} = \{F\}, \quad (6.1)$$

gde je :

$[K] = \sum_{e=1}^m [\overline{k}_{rs}]_e$ – ukupna (globalna) matrica krutosti tela ;

$\{\delta\}$ – globalni vektor pomeranja ;

$\{F\}$ – ukupni vektor spoljašnjeg opterećenja elastičnog tela ;

$[\overline{k}_{rs}]_e = [T]^T [k_{rs}]_e [T]$ – matrica krutosti konačnog elementa u globalnom sistemu ;

$[T]$ – matrica transformacija lokalnog u globalni sistem ;

$[k_{rs}]_e$ – matrica krutosti konačnog elementa u lokalnom sistemu.

Za gredni element (strela će biti modelirana grednim elementima), kao što se može videti u nastavku, matrica krutosti u lokalnom koordinatnom sistemu glasi:

$$[k_{rs}]_e = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12B_Z}{l^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6B_Z}{l^2} & 0 & -\frac{12B_Z}{l^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6B_Z}{l^2} \\ 0 & 0 & \frac{12B_Y}{l^3} & 0 & -\frac{6B_Y}{l^2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{12B_Y}{l^3} & 0 & -\frac{6B_Y}{l^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GI_X}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{GI_X}{l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6B_Y}{l^2} & 0 & \frac{4B_Y}{l} & 0 & 0 & 0 & \frac{6B_Y}{l^2} & 0 & \frac{2B_Y}{l} & 0 \\ 0 & \frac{6B_Z}{l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4B_Z}{l} & 0 & -\frac{6B_Z}{l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2B_Z}{l} \\ -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12B_Z}{l^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6B_Z}{l^2} & 0 & \frac{12B_Z}{l^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6B_Z}{l^2} \\ 0 & 0 & -\frac{12B_Y}{l^3} & 0 & \frac{6B_Y}{l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{12B_Y}{l^3} & 0 & \frac{6B_Y}{l^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{GI_X}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GI_X}{l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6B_Y}{l^2} & 0 & \frac{2B_Y}{l} & 0 & 0 & 0 & \frac{6B_Y}{l^2} & 0 & \frac{4B_Y}{l} & 0 \\ 0 & \frac{6B_Z}{l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2B_Z}{l} & 0 & -\frac{6B_Z}{l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4B_Z}{l} \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

gde je :

B_Z – krutost grede na savijanje u XY ravni (oko Z –pravca) ;

GI_X – torziona krutost grede.

Metode za rešavanje statičke matrične jednačine ravnoteže dele se na direktne i iterativne. U direktne spadaju *Gauss-ove eliminacije* i *Dekompozicije Choleski*, a u iterativne *Gauss-Seidel-ova metoda* i *Gradijentna metoda*.

b). Dinamički proračun nosećih struktura

Za razliku od prethodno pomenutog statičkog proračuna gde su sva opterećenja konstantna u vremenu, pri dinamičkoj analizi na konstrukciju (posledično na svaki konačni element) deluju još i dinamičke sile koje su u funkciji vremena (inercijalne i prigušujuće sile).

Ponašanje konstrukcije izložene dejstvu dinamičkih sila u najopštijem slučaju, opisuje se osnovnom dinamičkom jednačinom prinudnih prigušenih oscilacija u matričnom obliku i globalnom sistemu:

$$[M]\{\ddot{\delta}(t)\} + [B]\{\dot{\delta}(t)\} + [K]\{\delta(t)\} = \{F(t)\}, \quad (6.3)$$

gde je:

$[M]$ – globalna matrica masa ;

$[B]$ – globalno prigušenje ;

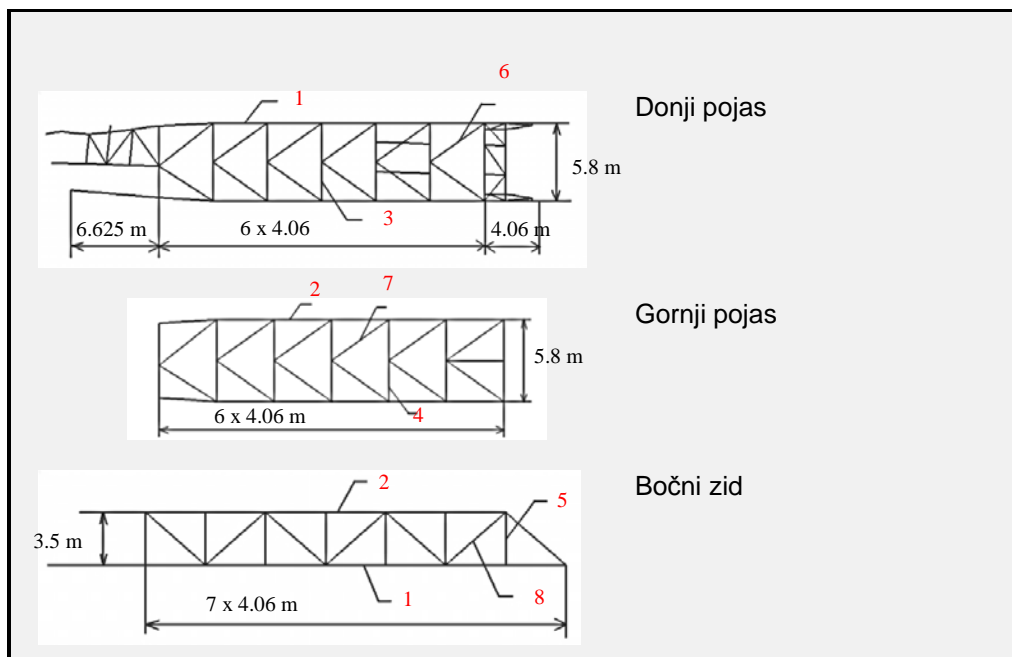
$[K]$ – globalna matrica krutosti ;

$\{F(t)\}$ – prinudni globalni vektor sila.

Pri dinamičkoj analizi konstrukcija treba imati na umu razliku između vibracija i oscilacija. Kod oscilacija postoji zakonomernost procesa ponavljanja, a kod vibracija zakonomernost ne može da se nađe, uz napomenu da kada se ispituje dinamičko ponašanje konstrukcija postoji problem kako modelirati vektor sila.

6.2. Modeliranje strele bagera SchRs 630

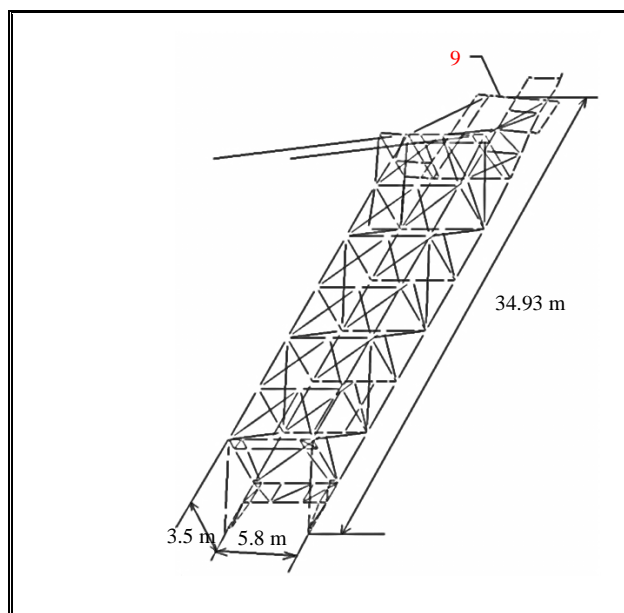
Za modeliranje strele bagera SchRs-630 korišćen je softverski paket *KOMIPS*. Uzimajući u obzir izgled konstrukcije strele bagera, konstrukcija je modelirana grednim elementima (elementima kratke grede). Rešetkasta čelična konstrukcija prikazana je na *Slici 6.2*.



Slika 6.2. - Čelična rešetkasta konstrukcija strele, izgled donjeg pojasa, gornjeg pojasa i bočnog zida

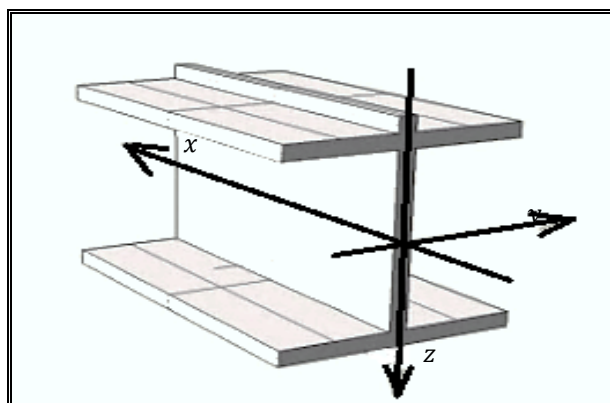
Osim rešetkaste čelične konstrukcije strele u obzir su uzeti i svi ostali elementi koji utiču na krutost konstrukcije strele, odnosno uzeta su i poprečna ukrućenja kao i vratila radnog točka i povratnog bubnja, moment-poluge oba reduktora, delovi konstrukcije za nošenje trake, kao i zatege.

Model strele sastoji se od 290 grednih elemenata i prikazan je na Slici 6.3.



Slika 6.3. - Model strele sastavljen od grednih elemenata

Geometrijske karakteristike poprečnih preseka svih greda, koje su važne za numerički proračun, kao što je rečeno izračunate su primenom softverskog paketa *KOMIPS*, a po pravilima Otpornosti materijala. Na *Slici 6.4.* prikazan je jedan tipičan gredni element konstrukcije strele (prolazni "I profil"), sa pripadajućim osama.



Slika 6.4. – Porečni presek jednog grednog elementa strele

Kao što se vidi sa slike, osa x je podužna osa, a y i z su glavne težišne ose poprečnog preseka. Geometrijske karakteristike poprečnog preseka grede važne za proračun su:

A_x – površina poprečnog preseka ;

A_y, A_z – smičuće površine duž osa y i z ;

I_x, I_y, I_z – momenti inercije za ose x, y i z (pokazuju kako se poprečni presek suprotstavlja savijanju oko ose, važni i za statički i za dinamički proračun) ;

W_x, W_y, W_z – otporni momenti inercije (važni za statički proračun).

Geometrijske karakteristike pojedinih karakterističnih grednih elemenata iz svake funkcionalne podgrupe od kojih je strela sastavljena, date su ilustrativno u *Tabeli 6.1*. Npr. element označen u tabeli kao "*podužna greda*" je prolazni "*I profil*" i predstavnik je svoje klase, iako su četiri noseće grede promenljivog poprečnog preseka (sve te promene su uzete u obzir u proračunu). Isto tako, vratilo radnog točka modelirano je kao greda promenljivog poprečnog preseka tako da su i tu sve promene prečnika vratila uzete u obzir.

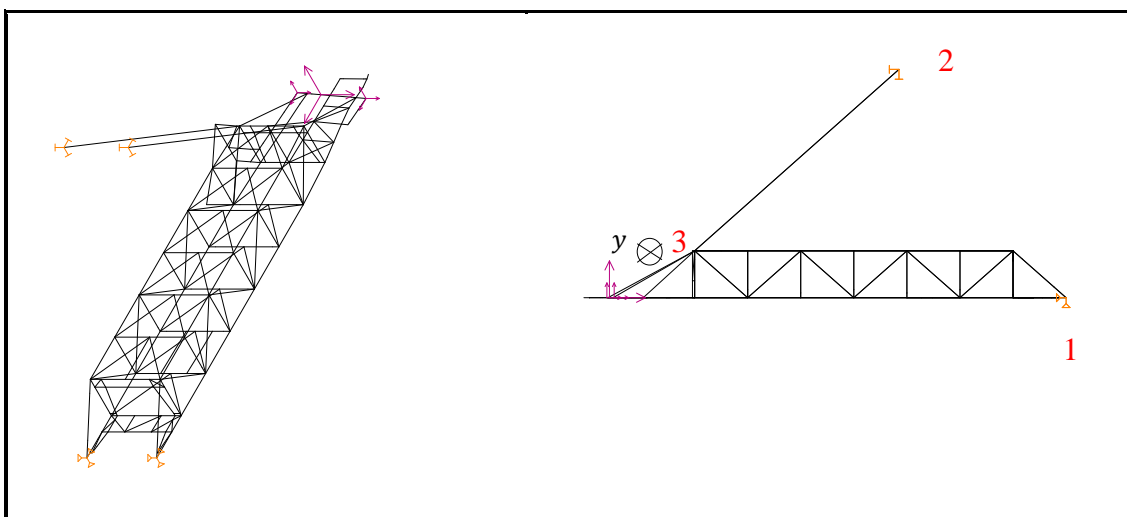
Tabela 6.1. - Geometrijske karakteristike pojedinih karakterističnih grednih elemenata

Elementi		A_x (cm ²)	A_y (cm ²)	A_z (cm ²)	I_x (cm ⁴)	I_y (cm ⁴)	I_z (cm ⁴)	W_x (cm ³)	W_y (cm ³)	W_z (cm ³)
Podužna gređa	1. Donji pojas (Sl.6.1)	192	130	58	256	36710	11360	128	2225	701
	2. Gornji pojas (Sl.6.1)	91	64	27	64	13180	2136	40	819	214
Poprečna gređa	3. Donji pojas (Sl.6.1)	63	40	23	18	10630	1335	18	686	134
	4. Gornji pojas (Sl.6.1)	44	29	15	8	5575	778	10	419	86
	5. Bočni zid (Sl.6.1)	29	16	13	8	329	342	8	39	43
Ispuna	6. Donji pojas (Sl.6.1)	63	23	40	18	1335	10630	18	134	686
	7. Gornji pojas (Sl.6.1)	38	34	34	2169	1084	1084	273	136	136
	8. Bočni zid (Sl.6.1)	50	25	25	24	1068	956	20	97	90
9. Vratilo radnog točka (Sl. 6.2)		1799	1619	1619	796436	398218	398219	29498	14749	14749

Geometrijske karakteristike poprečnih preseka date su u odnosu na lokalni koordinatni sistem gređe, a orijentacija u odnosu na globalne ose je naknadno definisana.

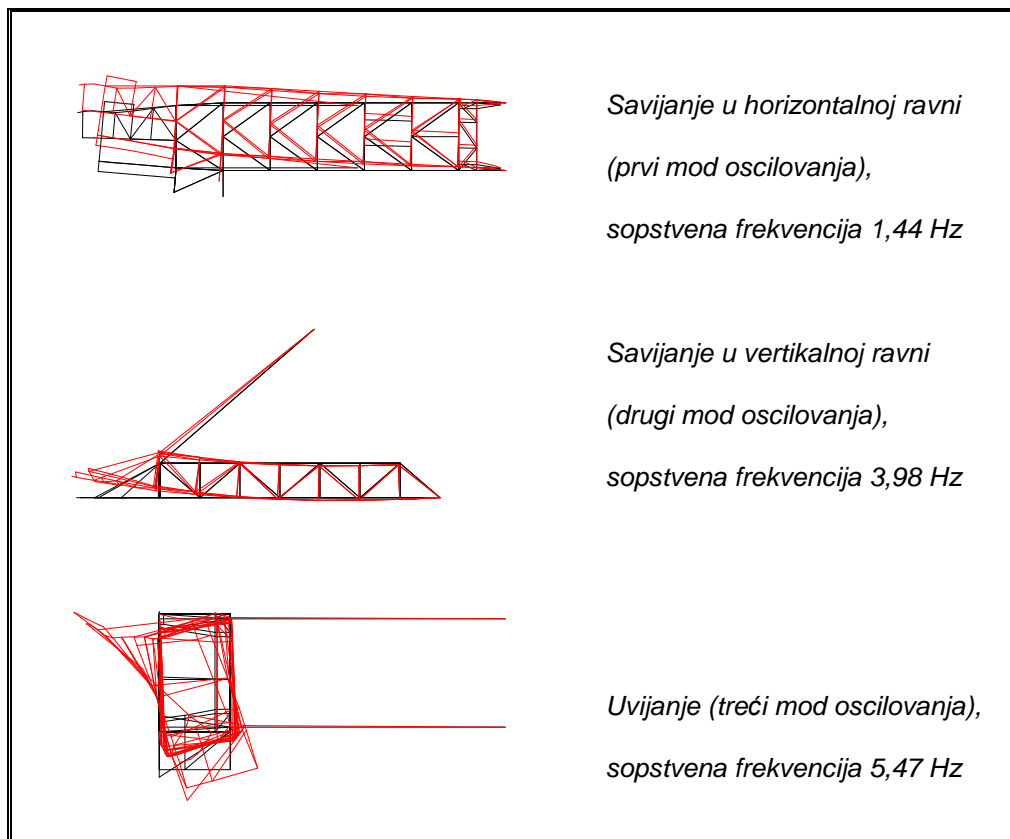
6.3. Određivanje sopstvenih frekvencija oscilovanja strele bagera SchRs 630

Strela bagera (sa pripadajućim graničnim uslovima) za koju je rađen dinamički proračun prikazana je na *Slici 6.5*. Strela je smeštena u elastično okruženje, odnosno modelirane su i zatege o kojima strela "visi" na jarmu.



Slika 6.5. - Dinamički model strele bagera, granični uslovi i opterećenja

Tačke 1 predstavljaju uležištenje strele i tim tačkama je sprečena translacija u sva tri pravca. *Tačke 2* su tačke veze zatege i jarma, pa su njima sprečena sva pomeranja (i translacije i rotacije). *Tačke 3* predstavljaju zglobne veze strele i zatega, pa je tim tačkama lokalno oslobođen jedan stepen slobode, odnosno dozvoljena je rotacija u tom zglobu oko ose y . Isto se može postići ako se zatege modeliraju elementima štapa, a ne elementima grede. Mase reduktora (oko 8 t) i radnog točka (oko 20 t) uzete su u obzir kao koncentrisane mase pri dinamičkom proračunu, što se može videti sa slike. Dužina osnovne strele iznosi 34,93 m, a masa 64869,48 kg.

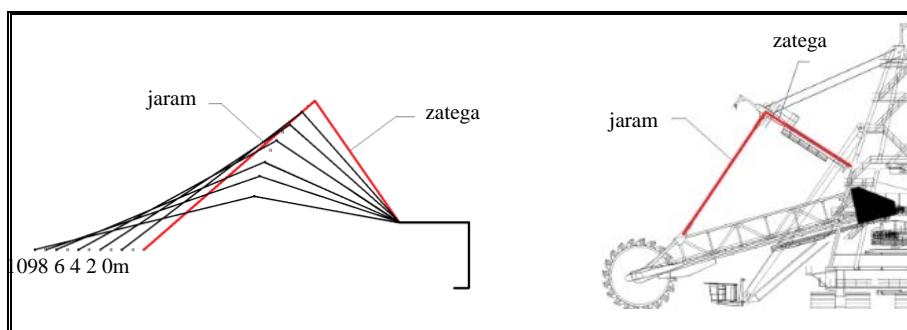


Slika 6.6. - Prva tri moda oscilovanja konstrukcije strele

Strela je produžavana sa korakom od 1 m, bez promene poprečnih preseka greda, visine i širine rešetke. Od 1 do 5 m strela je produžavana tako što se ukupno produženje ravnomerno raspodeljivalo na srednjih pet segmenata koji su gotovo jednaki što se tiče konstrukcije (postoje male razlike, odnosno ojačanja u donjoj zoni prvog i gornjoj zoni poslednjeg segmenta od srednjih pet). Ukupno produženje od 6m podrazumeva produženje jednog segmenta za 29,56% dužine, što je nepovoljno sa mnogo aspekata čvrstoće konstrukcije. Iz tog razloga se za ukupno produženje strele od 6m uvodi jedan novi segment i celokupno produženje se sada raspoređuje na šest (5+1) segmenata. Numeričkim putem je provereno da su dodavanjem tog segmenta zadržane dinamičke karakteristike konstrukcije, bez obzira na povećanje mase (oko 1 t), što samo potvrđuje da je ovakvo konceptijsko rešenje produženja od 6 m mnogo kruće ($\omega = \sqrt{\frac{c}{m}}$) u odnosu na rešenje gde je produženje od 6 m raspoređeno na pet

segmenata. Zato se i dalja produženja rade tako što se zadržava ubačeni segment, a ukupna dužina se raspodeljuje na šest segmenata.

Pri ovom proračunu originalne zatege postojeće strele korišćene su za svaku sledeću produžavanu strelu. Pritom je položaj zatega diktiran geometrijom (dužinom) jarma i samih zatega, što podrazumeva da nije isti za izvornu i za produžene strele.



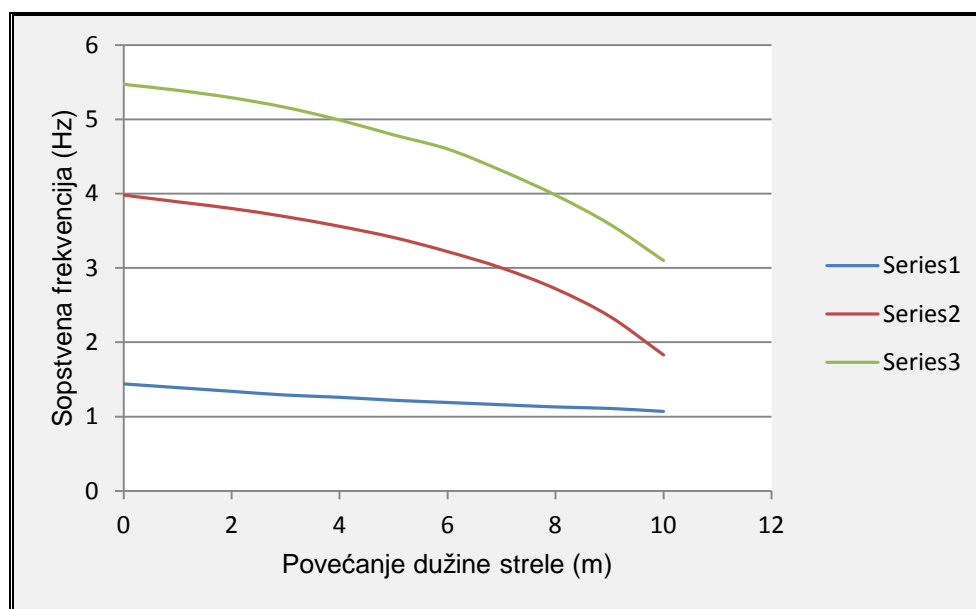
Slika 6.7. - Promena geometrije jaram-zatega sa produženjem strele

Jasno je da se sa produženjem strele položaj zatege menja, odnosno ugao koji zaklapaju konstrukcija strele i zatega se smanjuje. Pritom, 10 m predstavlja krajnju granicu do koje mogu biti korišćene postojeće zatege i jaram, jer za svako sledeće produženje dva kruga koja predstavljaju jaram i zategu se uopšte ne bi preseklala. Međutim, sa prethodne slike može se videti da je i pri dužini od 10 m geometrija jaram-zatega jako narušena (ugao između zatega i strele jako mali, a između jarma i zatega jako veliki). Ove varijacije nužno dovode do promene geometrije mehanizma za podizanje-spuštanje strele radnog točka, a što implicira nužnost preprojektovanja elemenata ovog mehanizma (koturače, užad, užni bubnjevi, pogonski agregati). Isto tako, za produženje od 10 m ukupna masa strele povećala se za oko 5 t, što bi imalo svoje posledice na noseću konstrukciju celog bagera. Međutim, to nije predmet ovog razmatranja, ovde se razmatranje ograničava samo na konstrukciju strele.

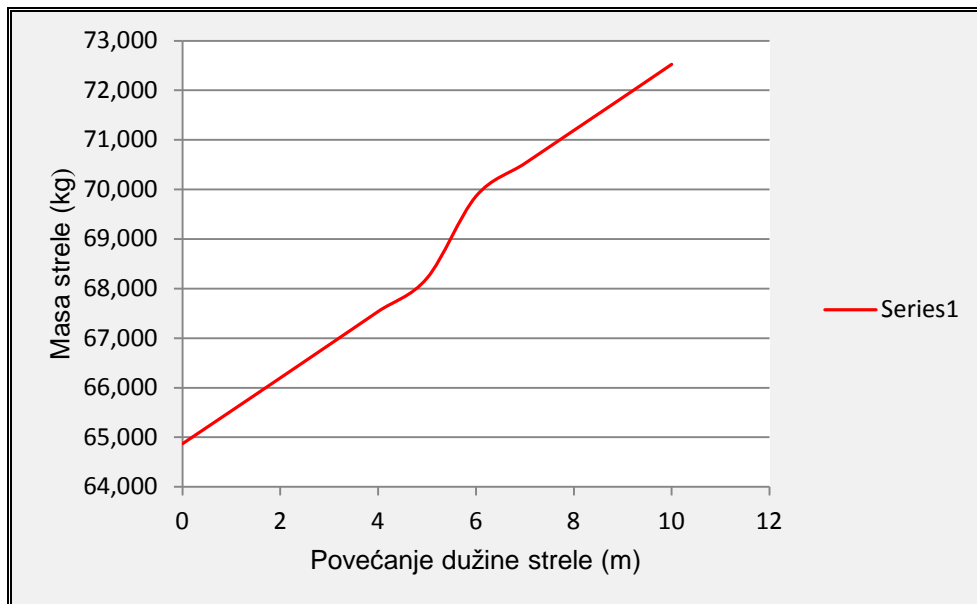
Rezultati dinamičkog proračuna prikazani su u *Tabeli 6.2.* za strelu produžavanu od 1m do (fiktivnih) 10 m.

Tabela 6.2. - Rezultati dinamičkog proračuna

Ukupno produženje (m)	Broj produženih segmenata	Produženje jednog segmenta (%)	Ukupna masa strele (t)	Sopstvena frekvencija (Hz)		
				Savijanje, horizontalna ravan	Savijanje, vertikalna ravan	Uvijanje
0			64.86948	1.44	3.98	5.47
1	5	4.93	65.53222	1.39	3.89	5.39
2	5	9.85	66.19788	1.34	3.80	5.29
3	5	14.78	66.86666	1.29	3.69	5.16
4	5	19.70	67.53775	1.26	3.56	4.99
5	5	24.63	68.21152	1.22	3.41	4.79
6	5+1	7.96	69.86218	1.19	3.22	4.60
7	5+1	12.07	70.52558	1.16	3.00	4.31
8	5+1	16.18	71.19101	1.13	2.72	3.98
9	5+1	20.27	71.85472	1.11	2.35	3.59
10	5+1	24.38	72.52422	1.07	1.83	3.10



Slika 6.8. - Dijagram promene sopstvenih frekvencija sa povećanjem dužine strele

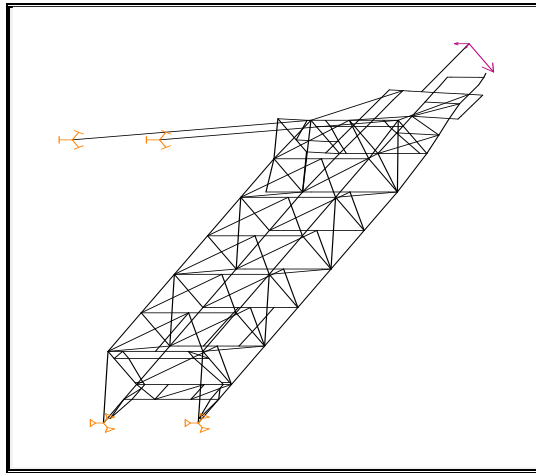


Slika 6.9. - Dijagram promene mase sa povećanjem dužine strele

Kao što je prethodno rečeno, za produženje strele od 6 m, ubačen je novi segment, odnosno masa konstrukcije je svesno povećana, tako da se taj "skok" na dijagramu ne može smatrati važnim.

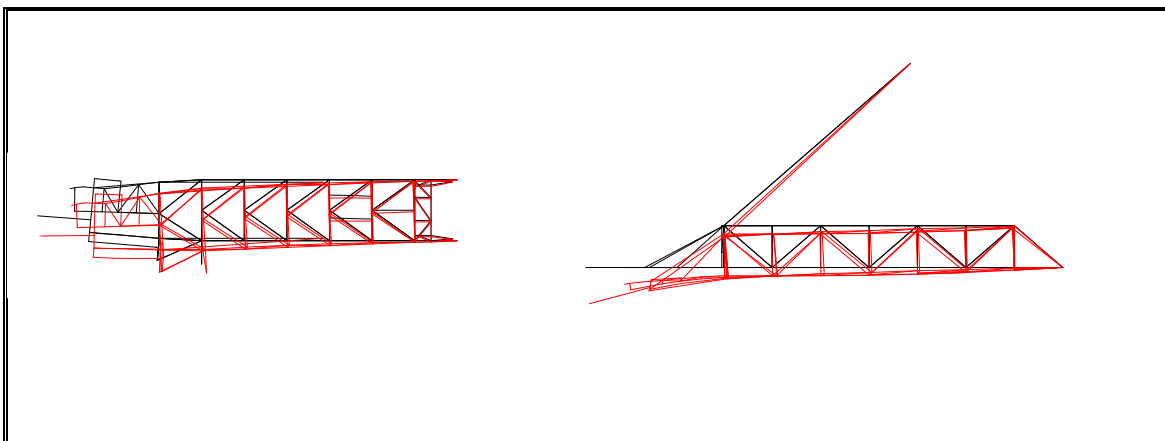
6.4. Naponsko i deformaciono stanje u konstrukciji strele bagera SchRs-630 izloženoj radnom opterećenju

Rađen je numerički proračun konstrukcije opterećene referentnim radnim opterećenjem (statički proračun) i sopstvenom težinom gređa koje čine datu konstrukciju.



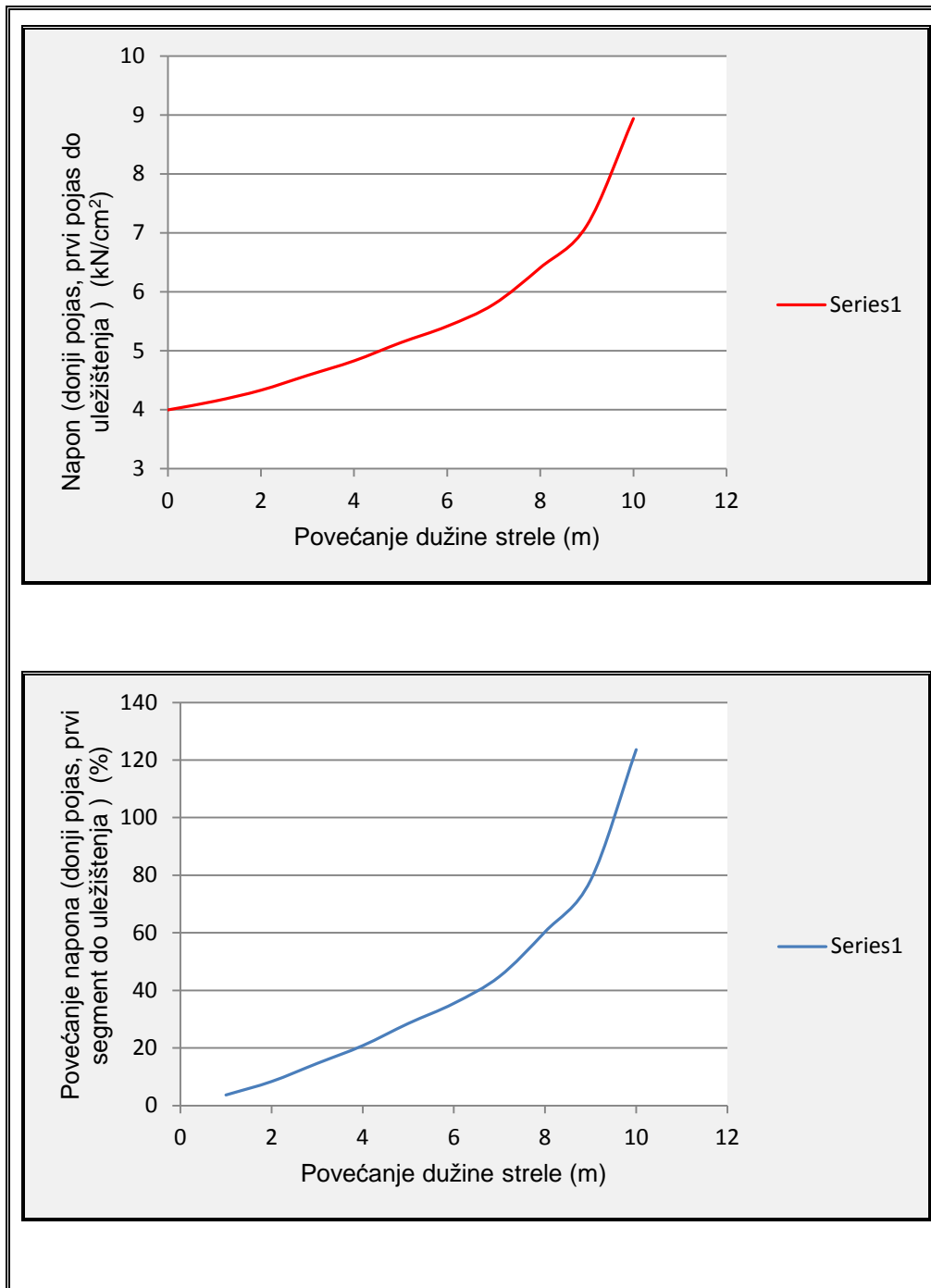
Slika 6.10. - Proračunski model (statika)

Sa *Slike 6.10.* se može videti da su granični uslovi isti kao i za dinamički proračun, jer reprezentuju realne uticaje uklonjenog dela konstrukcije. Što se prividnog radnog opterećenja tiče, ukupna sila kopanja od 25 t raspodeljena je u realnim odnosima na tri sile (*vertikalna 1, obimna 0,3 i čeona 0,15*). U obzir nisu uzete mase reduktora i radnog točka, kao ni ostala opterećenja (težine) kojima je strela radnog točka izložena u realnim radnim uslovima. Zato su dobijeni nivoi napona (proračunski je dobijen napon oko 4 (kN/cm²)) znatno niži od očekivanih. Opterećenje je uneto na obimu radnog točka (koncentrisana sila u jednoj tački), koji je simuliran krutom gredom (*Slika 6.11.*).



Slika 6.11. - Izgled elastične linije konstrukcije izložene fiktivnom radnom opterećenju (izvorna strela)

Promena napona u jednom elementu donjeg pojasa prvog segmenta (blizu uležištenja strele), koji poseduje respektivno visok nivo napona i za slučaj osnovne i produženih strela, data je u *Tabeli 6.3*.



Slika 6.12. - Dijagrami promene napona u elementu donjeg pojasa prvog segmenta sa povećanjem dužine strele

Sa dijagrama se može uočiti da se za produženje strele od 6 m napon u ovom elementu povećao za više od 30 % vrednosti napona u istom elementu postojeće strele bagera. Takođe se može uočiti da velika produženja strele (8, 9, 10 m) nemaju smisla.

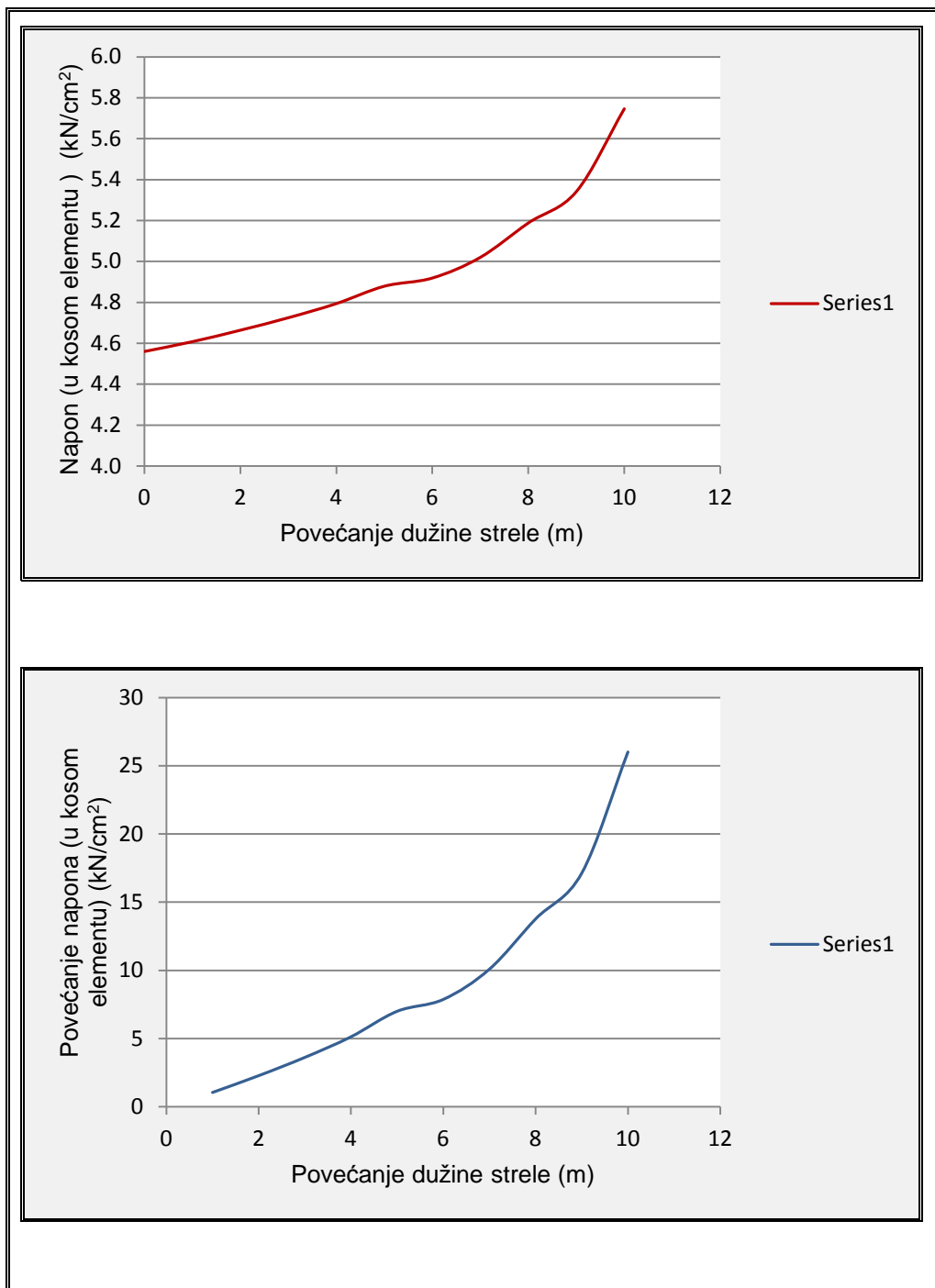
Promena napona u elementu bočnog desnog zida rešetkaste konstrukcije (gledano od uležištenja ka vrhu strele), u daljem tekstu "kosi element", koji spaja poslednje vertikalne stubove i uležištenje vratila radnog točka, prikazana je u *Tabeli 6.4.*

Tabela 6.3. - Promena napona u jednom elementu donjeg pojasa prvog segmenta

Ukupno produženje (m)	Napon (kN/cm ²) (referentni)	Povećanje napona (%)
0	3.997	
1	4.144	3.68
2	4.331	8.36
3	4.582	14.64
4	4.829	20.82
5	5.137	28.52
6	5.416	35.50
7	5.789	44.83
8	6.409	60.34
9	7.125	78.26
10	8.938	123.62

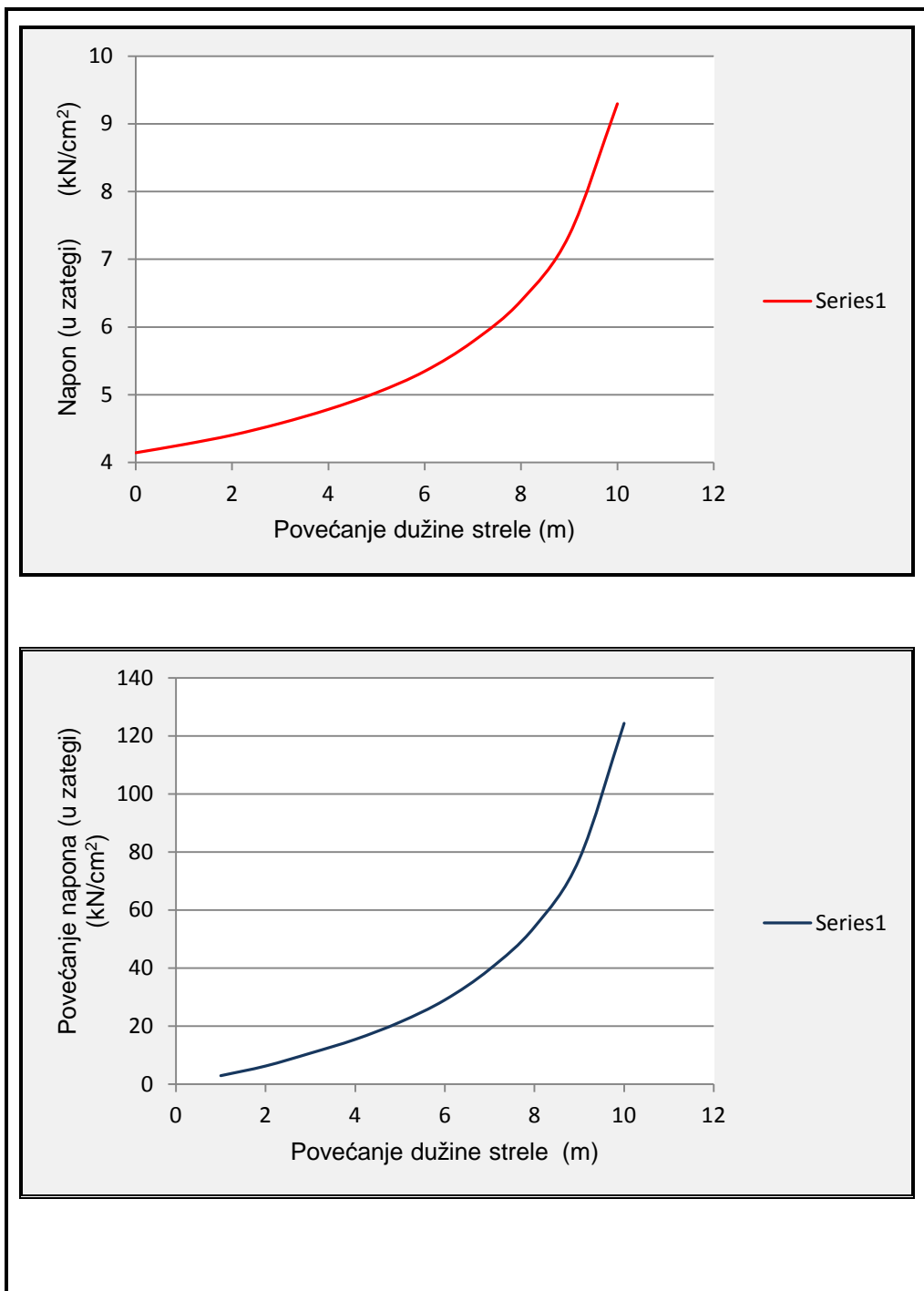
Tabela 6.4. - Promena napona u elementu bočnog desnog zida rešetkaste konstrukcije

Ukupno produženje (m)	Napon (kN/cm ²)	Povećanje napona (%)
0	4.560	
1	4.608	1.05
2	4.664	2.28
3	4.725	3.62
4	4.794	5.13
5	4.879	7.00
6	4.919	7.87
7	5.020	10.09
8	5.188	13.77
9	5.341	17.13
10	5.746	26.01



Slika 6.13. - Dijagrami promene napona u kosom elementu desnog bočnog zida sa povećanjem dužine strele

Promena napona u elementu leve zatege strele bagera (gledano od vrha jarma ka vrhu strele) prikazana je u Tabeli 6.5.



Slika 6.14. - Dijagrami promene napona u elementu leve zatege strele sa povećanjem dužine strele

Tabela 6.5 - Promena napona u elementu leve zatege strele bagera

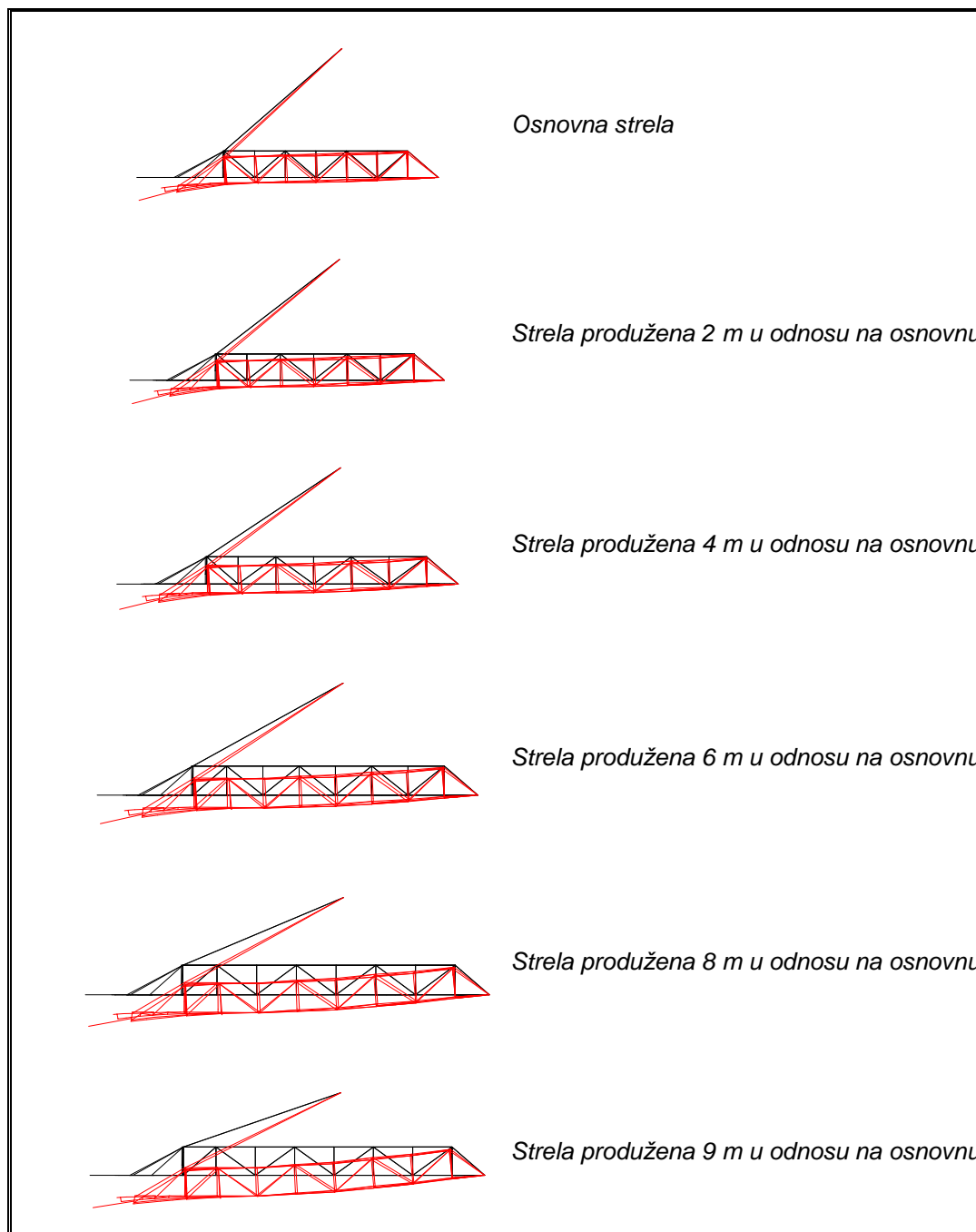
Ukupno produženje (m)	Napon (kN/cm ²)	Povećanje napona (%)
0	4.144	
1	4.266	2.94
2	4.404	6.27
3	4.578	10.69
4	4.784	15.44
5	5.031	21.40
6	5.347	29.03
7	5.786	39.62
8	6.387	54.13
9	7.357	77.53
10	9.296	124.32

Izgled elastične linije deformacije osnovne i strele produženih za 2, 4, 6, 8 i 9 m može se videti na *Slici 6.15.* Strela bagera ponaša se kao greda sa prepustom (uočava se fiktivni pokretni oslonac na levom kraju pre tačke gde se strela vezuje za zategu) na čijem kraju se nalazi sila, a koja je kontinualno opterećena sopstvenom težinom. Vidi se da za mala produženja strela ostaje kruta, dok se za velika ponaša elastično.

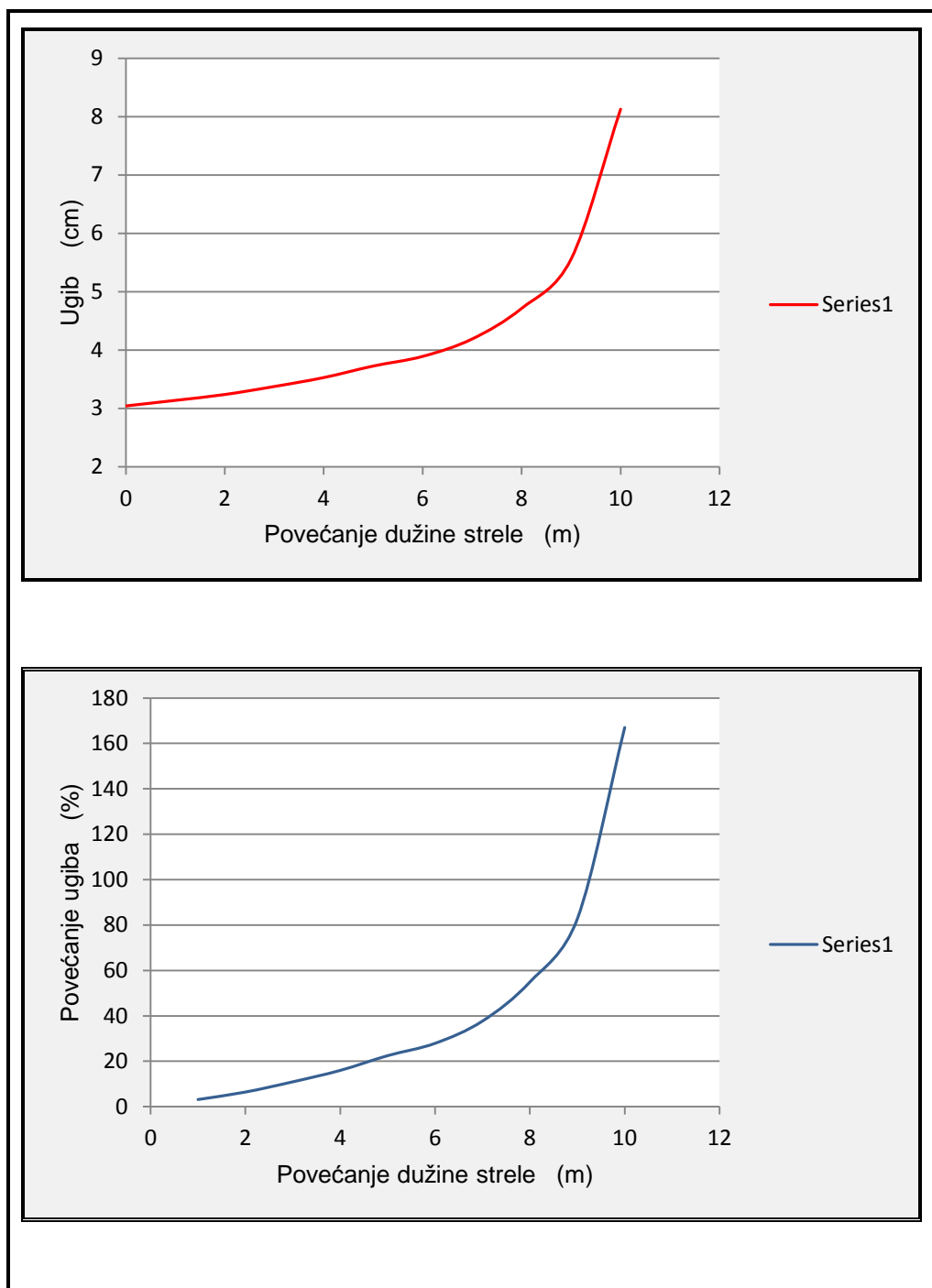
U *Tabeli 6.6.* prikazan je ukupni ugib za sve korake produženja strele.

Tabela 6.6. - Ukupni ugib za sve korake produženja strele

Ukupno produženje (m)	Ugib (kN/cm ²)	Povećanje ugiba (%)
0	3.04345	
1	3.13900	3.14
2	3.23929	6.43
3	3.37636	10.94
4	3.52942	15.97
5	3.72692	22.46
6	3.89234	27.89
7	4.19063	37.69
8	4.71449	54.91
9	5.55951	82.67
10	8.12600	167



Slika 6.15. - Promena izgleda elastične linije strele sa promenom dužine (statički proračun)

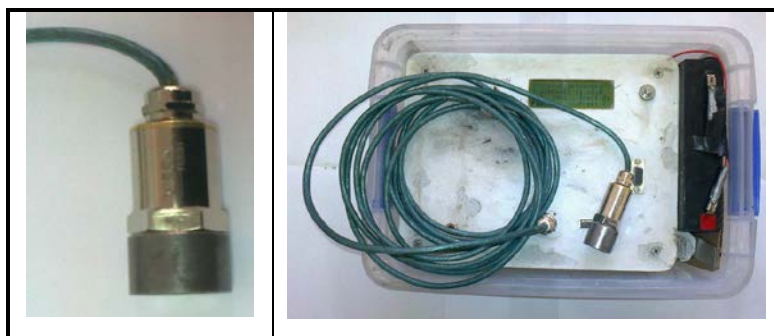


Slika 6.16. – Grafički prikaz promene ugiba sa povećanjem dužine strele

Zaključak i preporuka na osnovu svega prethodno prikazanog je da se, bez promene konstrukcije rešetkaste strukture (visine, širine rešetke i poprečnih preseka greda), **može ići maksimalno na produženje strele do 5m.**

7. TERENSKA ISPITIVANJA DINAMIČKOG PONAŠANJA ROTONOG BAGERA

Terenska ispitivanja dinamičkog ponašanja rotornog bagera SchRs 630 izvršena su na površinskom kopu *TAMNAVA ZAPAD* u cilju validizacije modela koji je dobijen na modelu urađen metodom konačnih elemenata. Merenja su obavljena korišćenjem senzora trokomponentnog ubrzanja, tipa *VIBRO*, *Mikroelektronika Beograd-Analog device USA* (Slika 7.1.).



Slika 7.1.- Senzor trokomponentnog ubrzanja

Prva tri moda oscilovanja konstrukcije strele primenom metode konačnih elemenata (Slika 6.6.) su sledeća:

- Savijanje u horizontalnoj ravni (prvi mod oscilovanja) - sopstvena frekvencija 1,4 Hz
- Savijanje u vertikalnoj ravni (drugi mod oscilovanja) - sopstvena frekvencija 3,9 Hz
- Uvijanje (treći mod oscilovanja) - sopstvena frekvencija 5,4 Hz

Kao što je prethodno rečeno, ispitivanja sopstvenih frekvenciji izvršeno je na rotornom bageru, u normalnom radu bagera, uz pomoć gorenavedenog

senzora ubrzanja, kada su merne trake postavljene na vrh strele bagera (Slika 7.2.).



Slika 7.2. – Položaj mernih traka na bageru

Dobijeni rezultati prikazani su na Slikama 7.3., 7.4., 7.5., 7.6. i 7.7.. Sa dijagrama se može uočiti tehnički prihvatljiva saglasnost numerički izračunatih i izmerenih sopstvenih vrednosti. Dobijeni rezultati potvrđuju validnost numeričkog modela, jer se sa dijagrama jasno uočavaju navedene frekvence. Prema tome, numerički model je verodostojan i može se koristiti za analizu produžetka strele.

Ispitivanja naponskog stanja u streli bagera izvršeno je pre završetka montaže bagera, kada su lamele još uvek bile neopterećene. Dobijena vrednost napona u modelu (oko 4 kN/cm^2) je niža od stvarne jer u modelu nisu uzete u obzir težine.

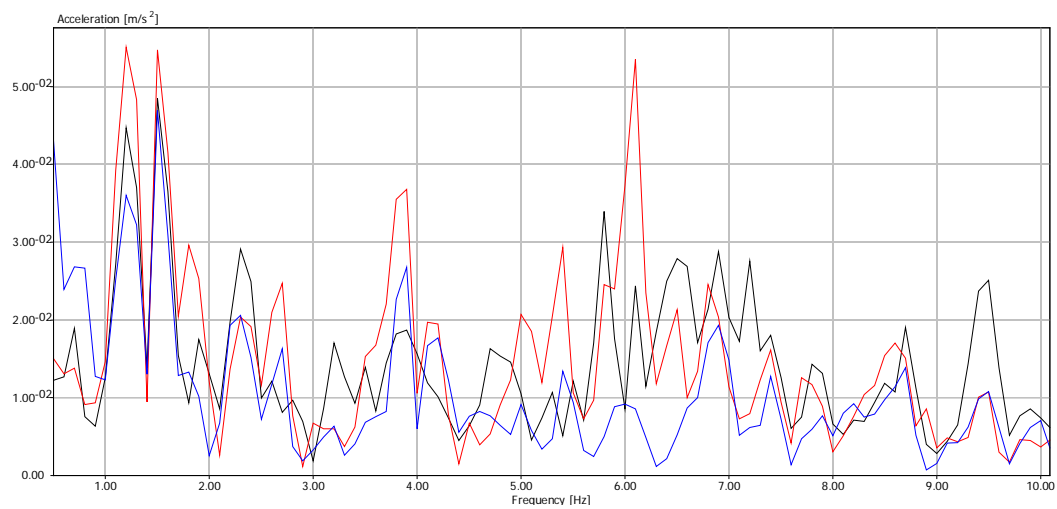
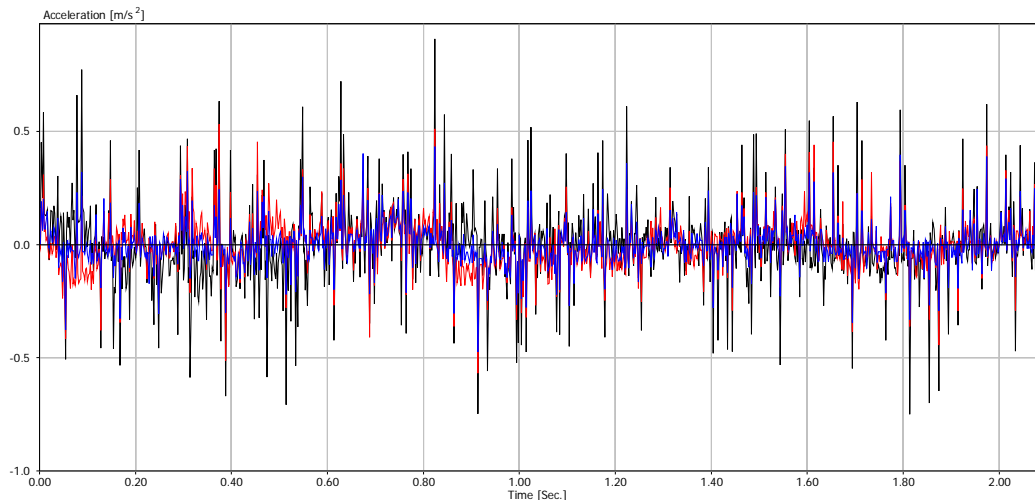
Crvena boja – vertikalni pravac;

Plava boja – bočni pravac radne strele;

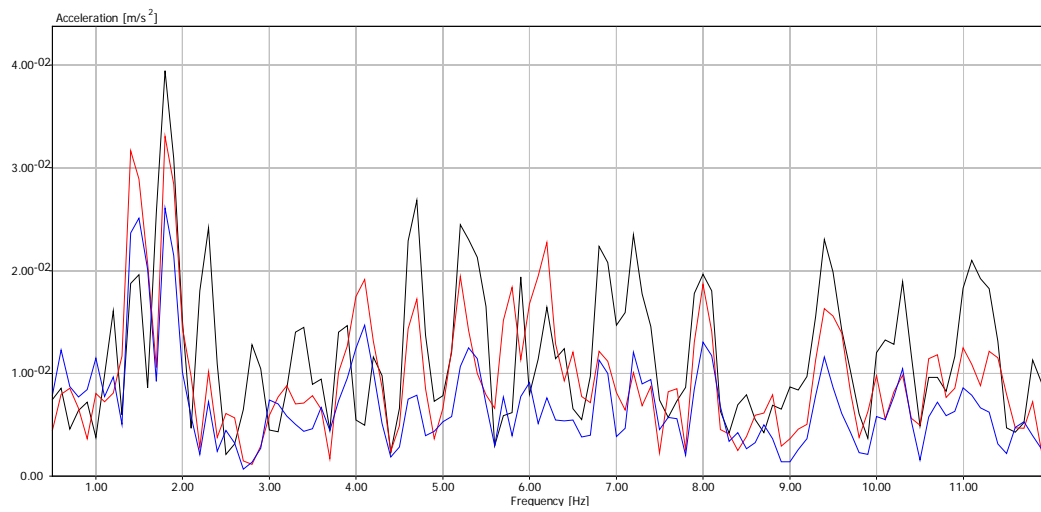
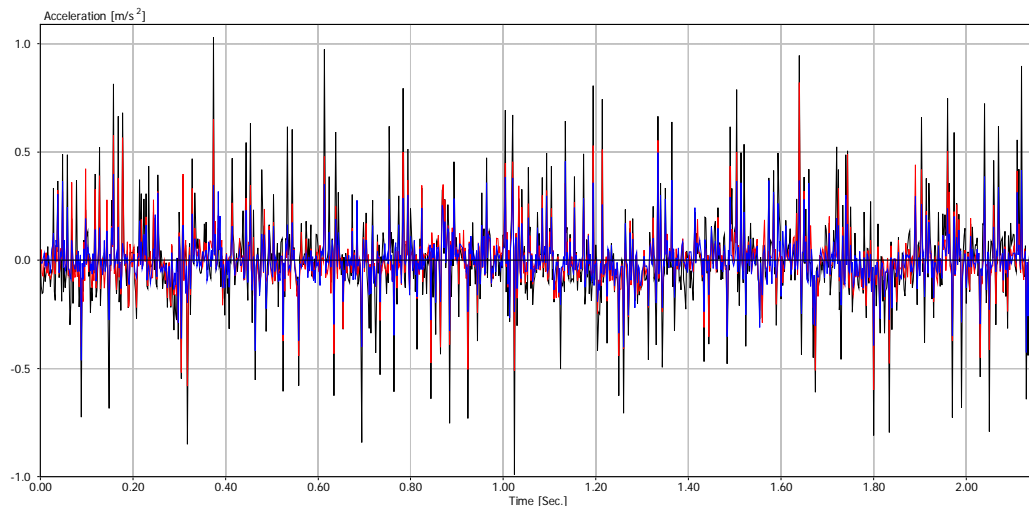
Crna boja – podužni pravac radne strele.

U nastavku su data pojedina karakteristična merenja.

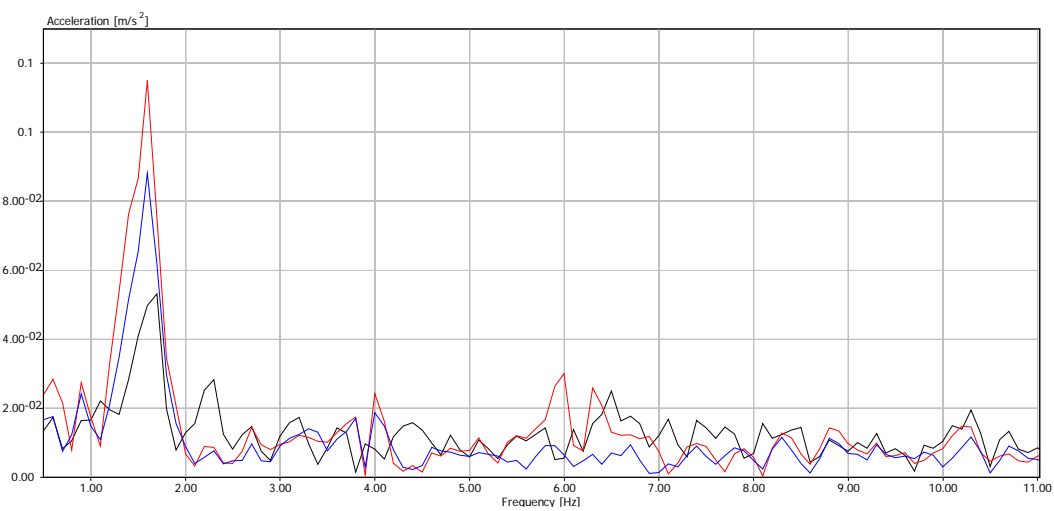
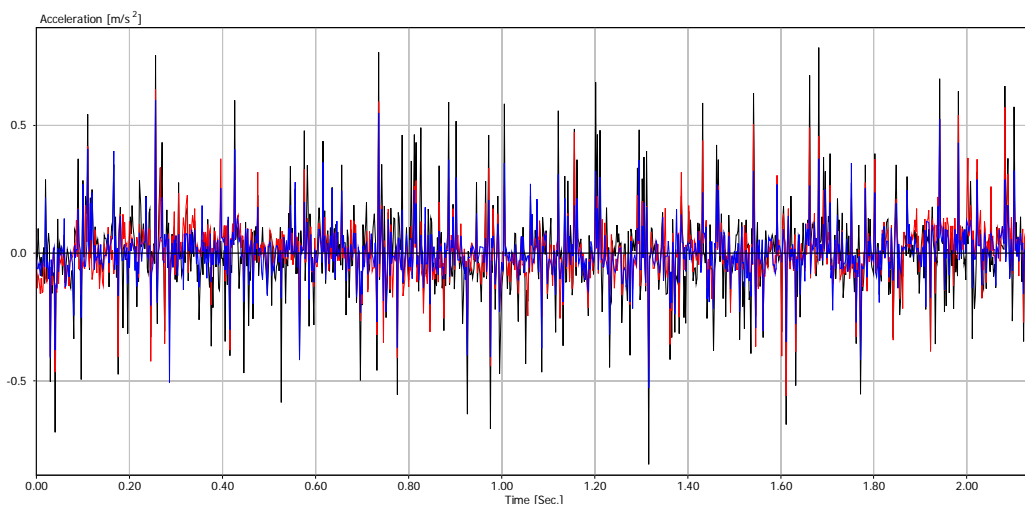
7.1. Rezultati merenja sopstvenih frekvenciji



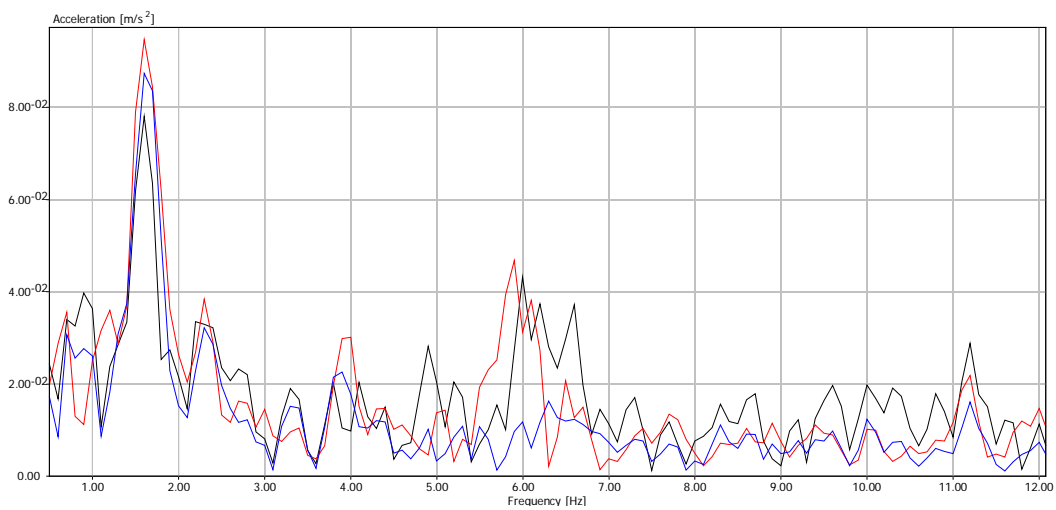
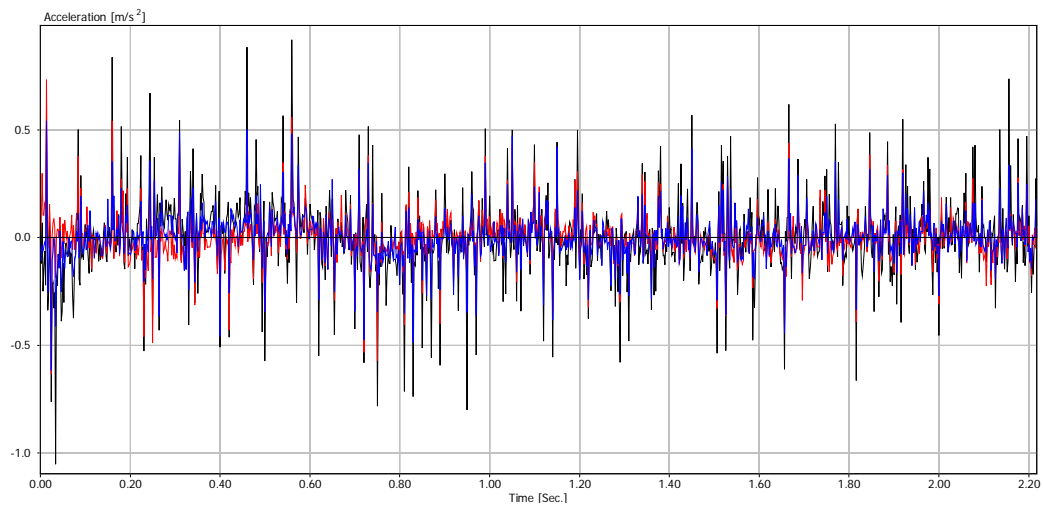
Slika 7.3. - Merenje br.1



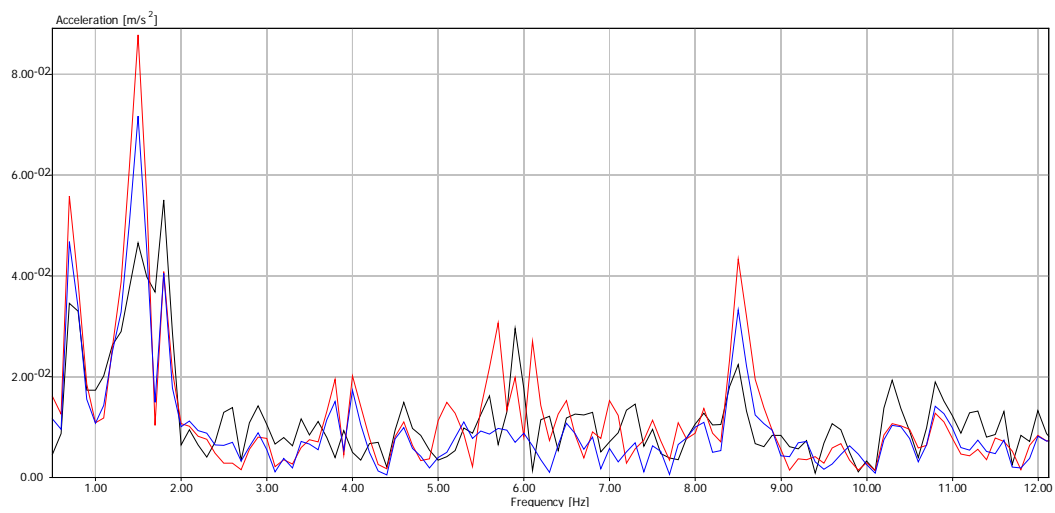
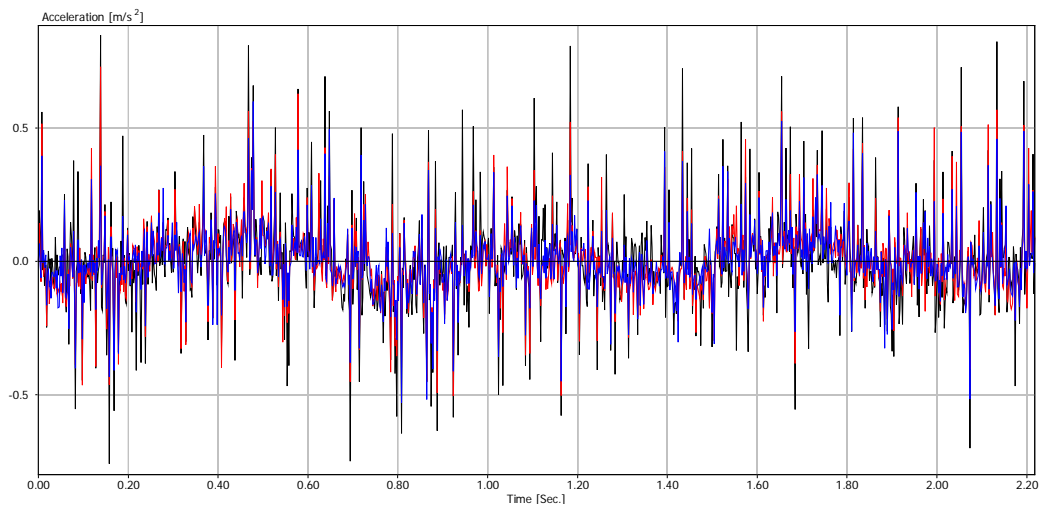
Slika 7.4. - Merenje br.2



Slika 7.5. - Merenje br.3



Slika 7.6. - Merenje br.4



Slika 7.7. - Merenje br.5

7.2. Napon u lamelama strele bagera

Merenje sila u lamelama strele bagera izvršeno je primenom ekstenziometrijskih mernih traka.

Izvršenim merenjima određen je napon u levoj lameli strele bagera, od sopstvenih težina bagera i iznosi:

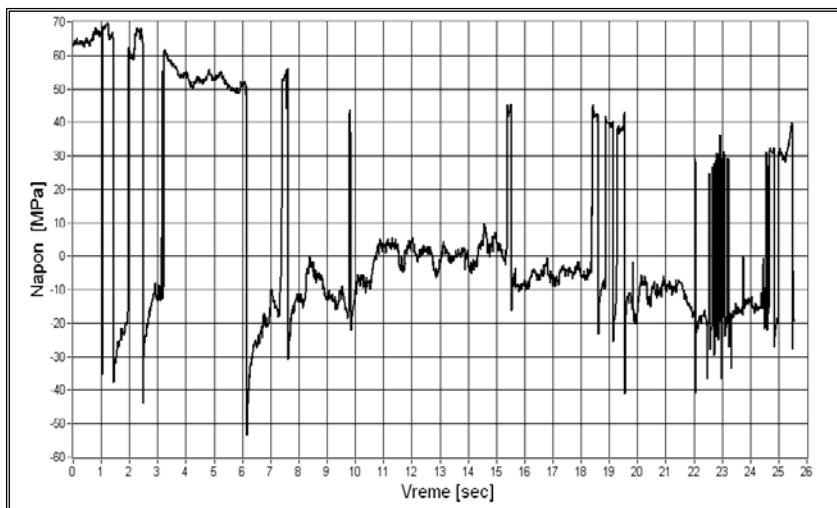
$$\sigma = 2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2 \cdot 174 \mu\epsilon \cdot 10^{-6} = 36,5 \text{ MPa}$$

Izvršenim merenjima određen je napon u desnoj lameli strele bagera, od sopstvenih težina bagera (*Slika 7.8.*) i iznosi :

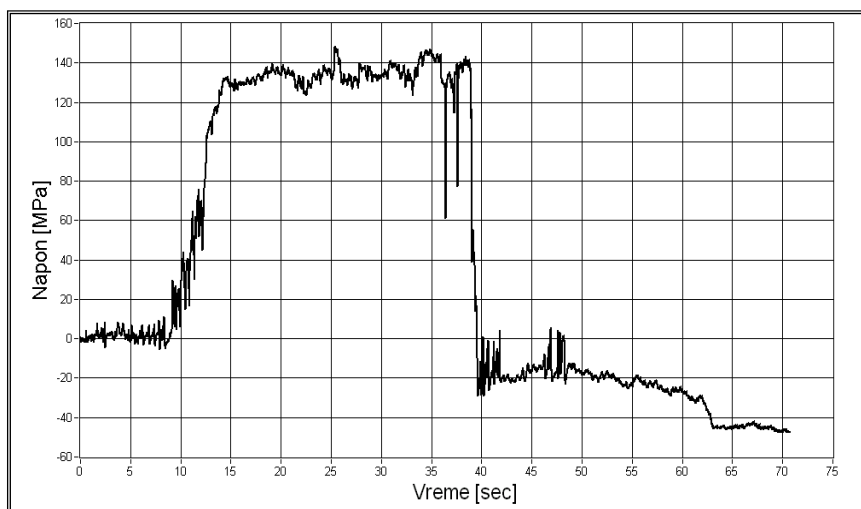
$$\sigma = 2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2 \cdot 154 \mu\epsilon \cdot 10^{-6} = 32,3 \text{ MPa}$$

Izvršenim merenjima određen je napon u desnoj lameli kontratega od sopstvenih težina bagera (*Slika 7.9.*) i iznosi:

$$\sigma = 2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2 \cdot 586 \mu\epsilon \cdot 10^{-6} = 113 \text{ MPa}$$



Slika 7.8. - Napon u desnoj lameli strele bagera



Slika 7.9. - Napon u desnoj lameli strele kontratega

8. MODELIRANJE PROCESA OTKOPAVANJA I PRORAČUN PARAMETARA BLOKA I PODETAŽE ZA RAZLIČITE DUŽINE STRELE

Kao što je u predhodnom tekstu izneto, otkopavanje materijala rotornim bagerom je veoma složen fizičko-mehanički proces, a pokazatelji efektivnosti tog procesa zavise od brojnih i raznovrsnih činilaca od kojih posebno treba istaći: fizičko-mehaničke karakteristike materijala koji se otkopava, režim rada bagera, izbor tehnoloških parametara bloka, podetaže i odreska, geometriju vedrica i reznih elemenata, itd. [19, 21, 25, 27, 28, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 45].

Da bi celokupan proces eksploatacije u svakom svom segmentu posedovao sigurnost kako za mašine kojima se vrši otkopavanje tako i za ljudstvo koje ih opslužuje, neophodno je uticajne parametre definisati tako da se rizik koji je tom prilikom prisutan svede na najmanju moguću meru. Istovremeno, mora se voditi računa da i ekonomski pokazatelji ne odstupaju od normi koje ih čine opravdanim.

Dužina strele bagera (L_s), kao vrlo bitan konstruktivni parametar bagera, znatno utiče na *širinu bloka* (B), *ugao nagiba bočne kosine* (β_b), *rastojanje od ose bagera do nožice kosine* (L_{max}), *dužinu bloka* (Z) i *kapacitet bagera* (Q). Često se međutim u praksi ovo zanemaruje tako da menadžment kompanije tek sa zakašnjenjem uočava propust koji uglavnom za posledicu ima bespotrebni utrošak značajnih novčanih sredstava.

Kroz analizu ovih parametara za tri tipa bagera *C-700* (tip A), *SchRs-630x25/6* (tip B) i *SRs-2000x32/5* (tip C)), potvrđuje se gore izneto i pokazati neophodnost za ovakvom analizom uvek pre donošenja konačne odluke o dimenziji bagera kao i njegove strele bagera.

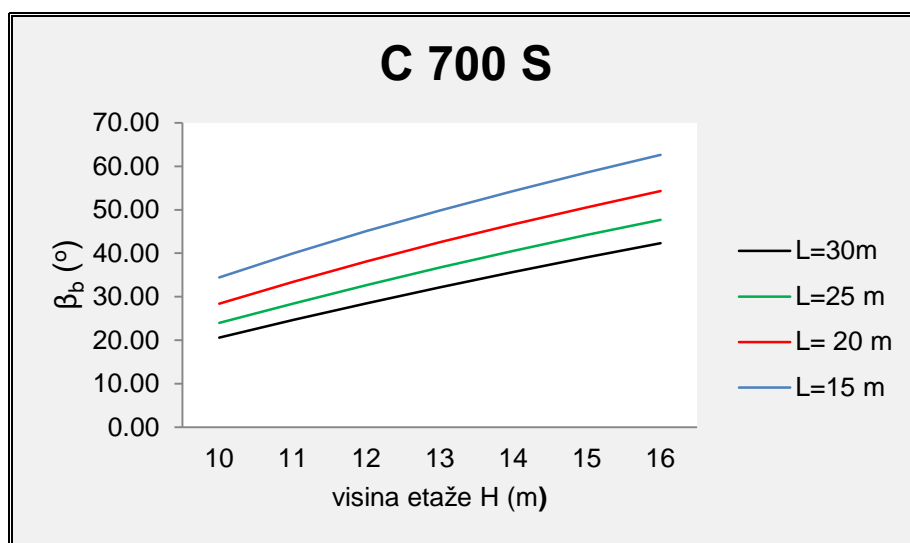
Konstruktivni parametri navedenih bagera dati su u *Tabeli 8.1*.

Tabela 8.1 - Karakteristike bagera

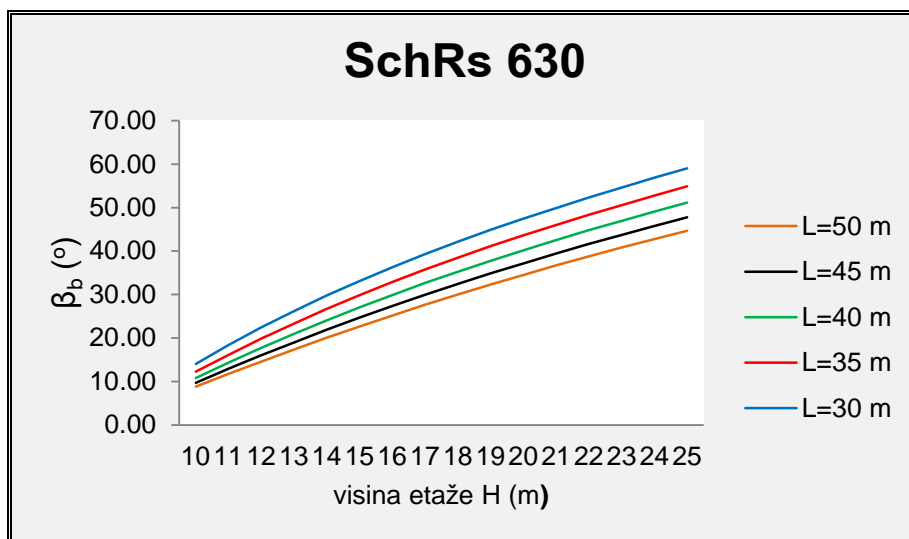
karakteristike	TIPOVI BAGERA			jedinica mere
	C-700 (tip A)	SchRs-630x25/6 (tip B)	SRs-2000x32/5 (tip C)	
teoretski kapacitet	3024	4100	6600	(m ³ /h)
visina kopanja	16	25	32	(m)
dubina kopanja	1.2	6	5	(m)
prečnik rotora	7.7	10.2	12	(m)
zapremina kašike	700	630	1000	(l)
broj kašika	12	20	20	kom.
dužina strele bagera	15.4	35	44	(m)
radna masa	539	1.500	2234	(t)
pritisak na tlo	9.1	12	10	(N/cm ²)

8.1. Analiza uticaja dužine strele radnog točka (L_s) na ugao nagiba bočne kosine (β_b)

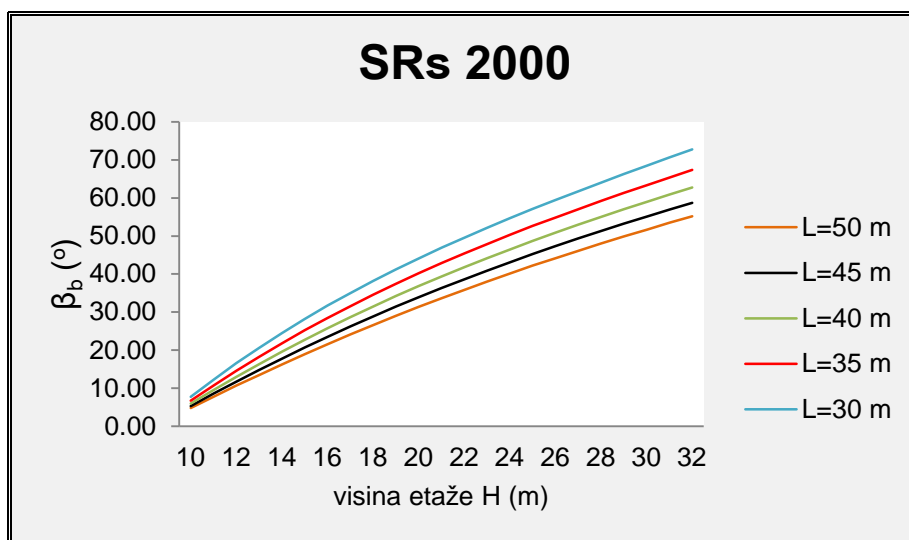
Rezultati analize uticaja dužine strele bagera (L_s) na ugao nagiba bočne kosine (β_b) za svaki od navedenih bagera prikazani su na Slikama 8.1., 8.2., 8.3. i 8.4.



Slika 8.1. - Uticaj dužine strele bagera (L_s) na ugao nagiba bočne kosine (β_b) za bager C-700

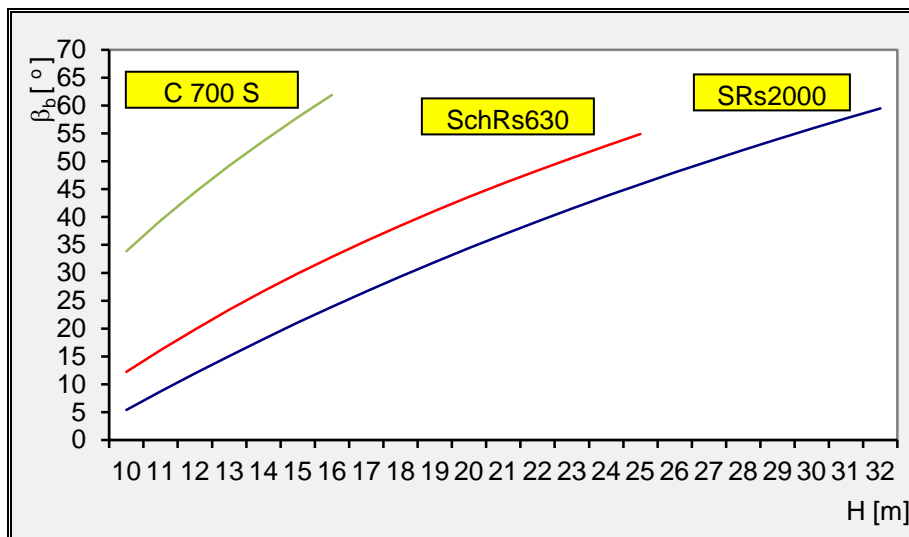


Slika 8.2. - Uticaj dužine strele bagera (L_s) na ugao nagiba bočne kosine (β_b) za bager SchRs-630x25/6



Slika 8.3. - Uticaj dužine strele bagera (L_s) na ugao nagiba bočne kosine (β_b) za bager SRs-2000x32/5

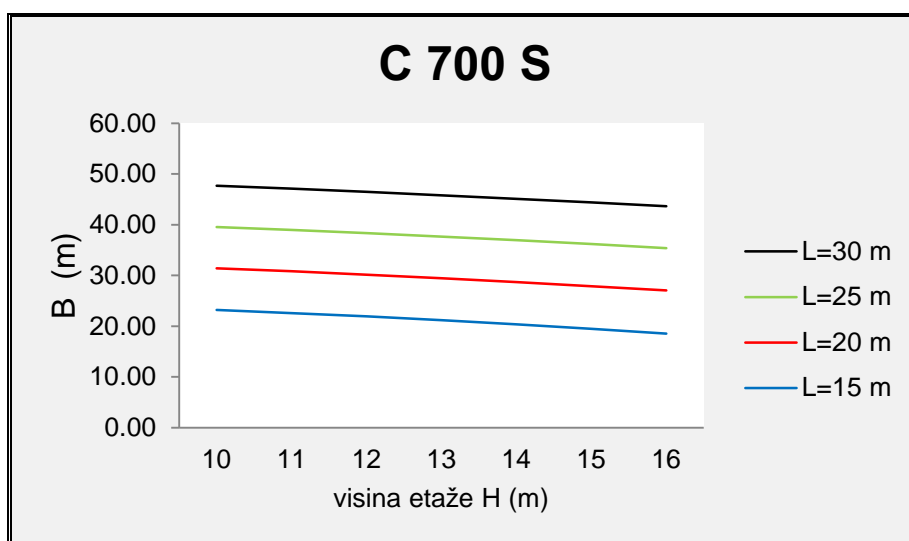
Na Slici 8.4. prikazani su zajedno rezultati analize sva tri bagera i lako je uočljivo da veće dužine strele bagera omogućavaju otkopavanje materijala takvih karakteristika čije etaže zahtevaju manje nagibe bočnih kosina (β_b).



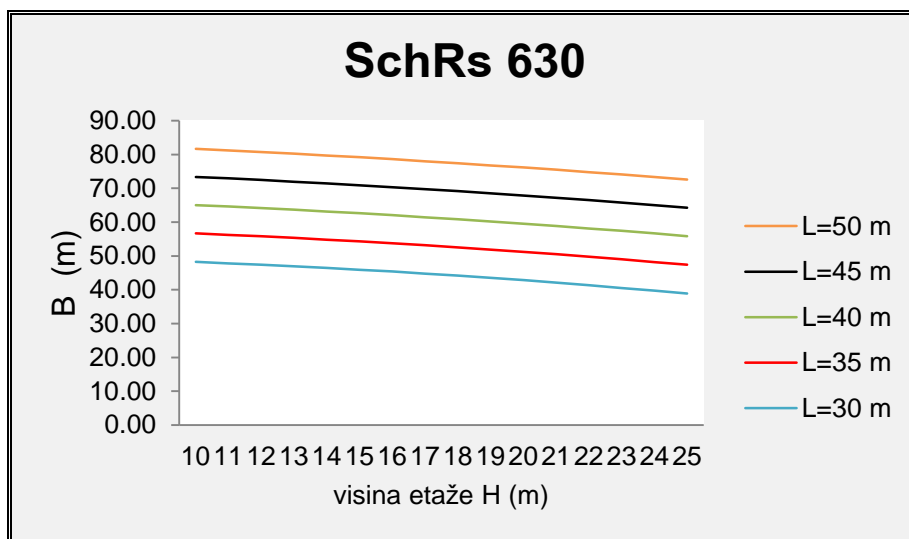
Slika 8.4. - Zavisnost ugla nagiba bočne kosine (β_b) od dužine strele bagera (L_s) za sva tri bagera (za vrednost osnovnih dužina strela)

8.2. Analiza uticaja dužine strele radnog točka (L_s) na širinu bloka(B)

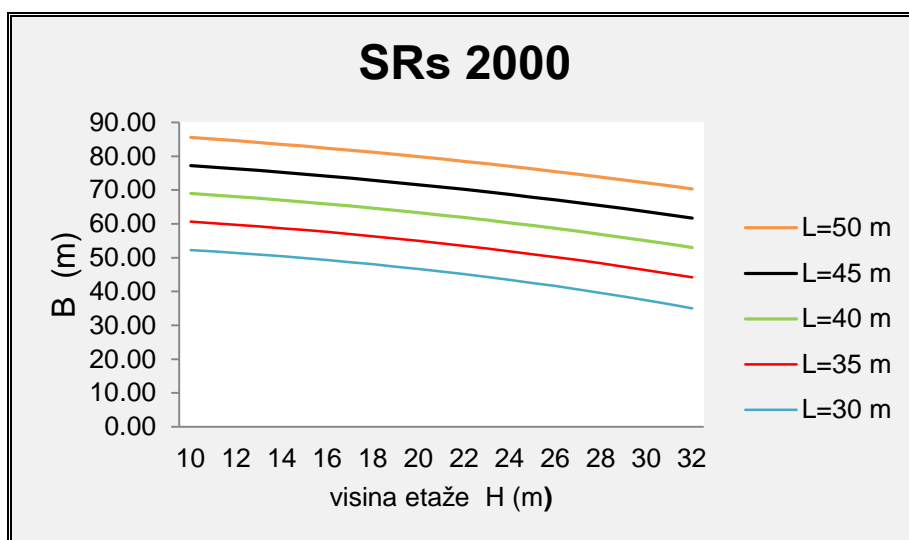
Rezultati proračuna širine bloka (B) u zavisnosti od dužine strele bagera (L_s) prikazani su za svaki bager pojedinačno (Slike 8.5., 8.6., 8.7.), kao i za sva tri bagera uporedno (Slika 8.8.).



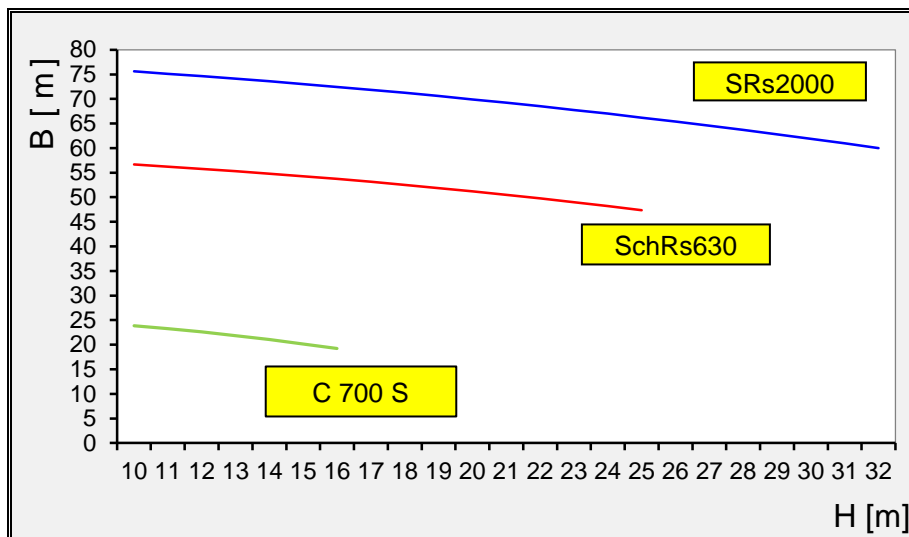
Slika 8.5. - Uticaj dužine strele bagera (L_s) na širinu bloka (B) za bager C-700



Slika 8.6. - Uticaj dužine strele bagera (L_s) na širinu bloka (B) za bager SchRs-630x25/6



Slika 8.7 - Uticaj dužine strele bagera (L_s) na širinu bloka (B) za bager SRs-2000x32/5

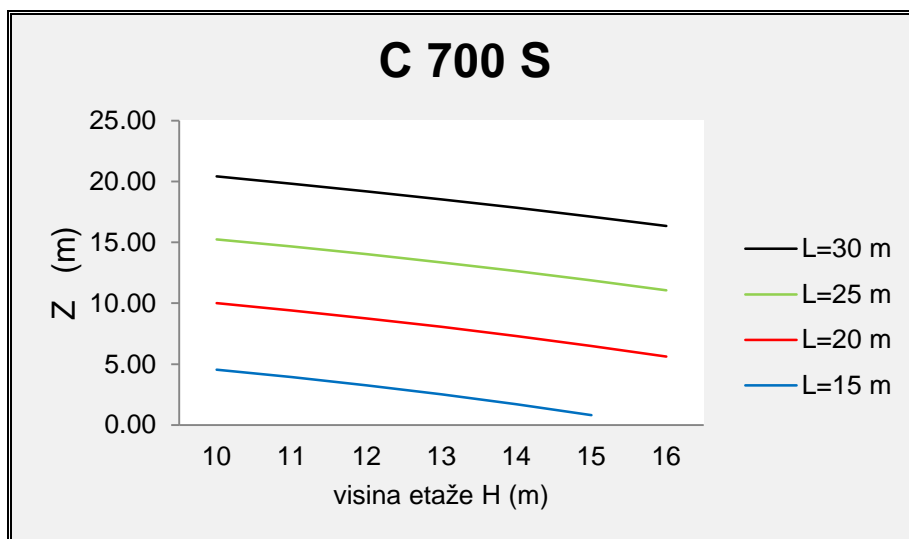


Slika 8.8. - Uticaj dužine strele bagera (L_s) na širinu bloka (B) uporedno za sva tri bagera (za vrednost osnovnih dužina strela)

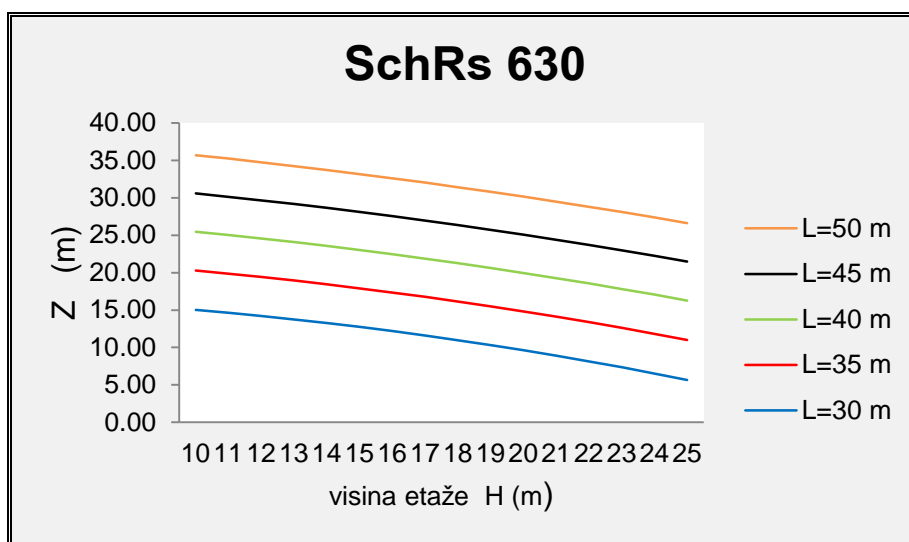
Uočljivo je da veća dužina strele bagera (L_s) omogućava otkopavanje bloka veće širine (B) pri istoj visini etaže (H_e). To opet dovodi do zaključka da će bageri sa većom dužinom strele bagera ostvariti veći kapacitet tj. ostvariće veću efikasnost bloka (veća širina bloka smanjuje obim pomoćnih radova na pomeranju transporterata).

8.3. Analiza uticaja dužine strele radnog točka (L_s) na dužinu bloka (Z)

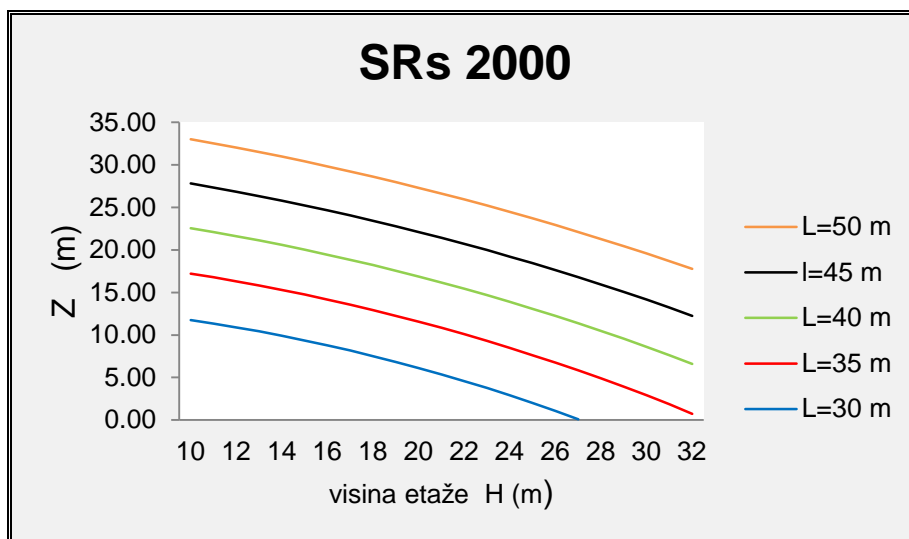
Rezultati proračuna dužine bloka (Z) u zavisnosti od dužine strele bagera (L_s) prikazani su za svaki bager pojedinačno (Slike 8.9., 8.10., 8.11.), dok je uporedna analiza za sva tri bagera data na Slici 8.12. (sa osnovnim dužinama strele).



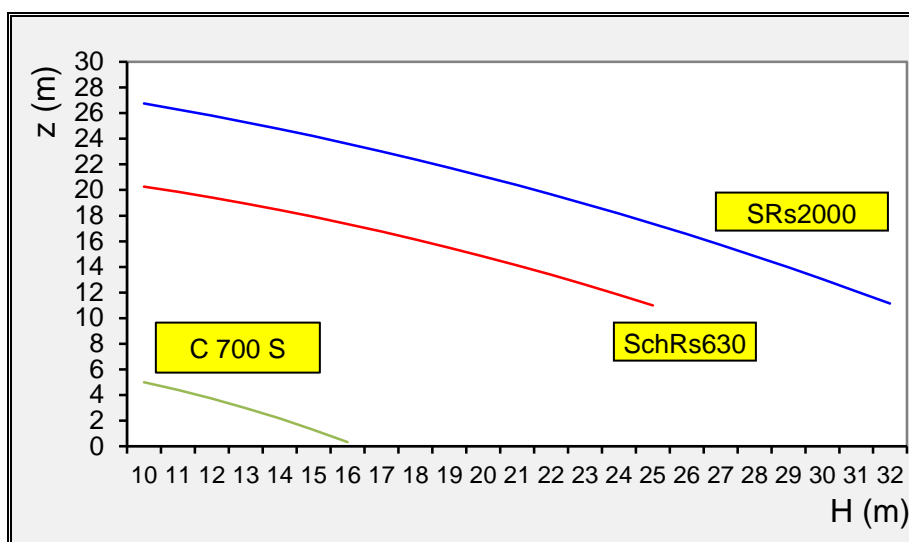
Slika 8.9. - Uticaj dužine strele bagera (L_s) na dužinu bloka (Z) za bager C-700



Slika 8.10. - Uticaj dužine strele bagera (L_s) na dužinu bloka (Z) za bager SchRs-630x25/6



Slika 8.11. - Uticaj dužine strele bagera (L_s) na dužinu bloka (Z) za bager SRs-2000x32/5

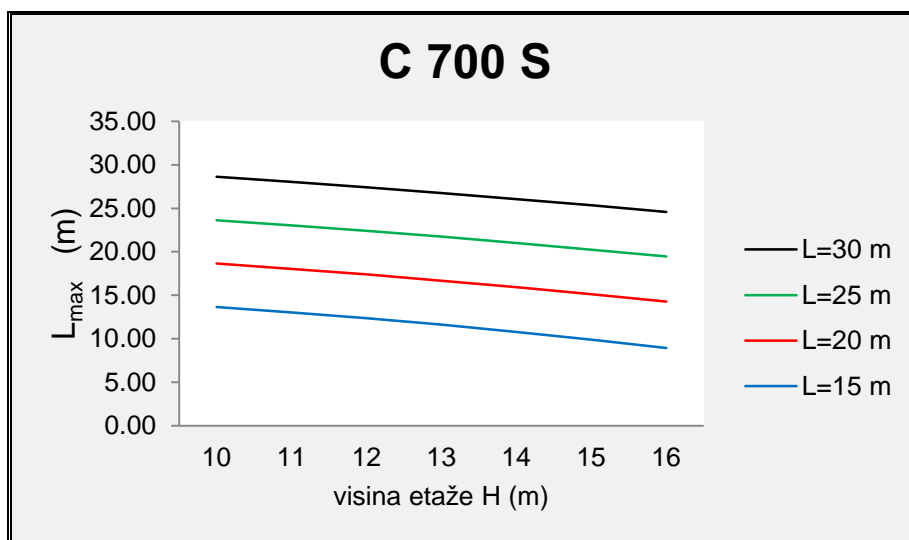


Slika 8.12. - Uticaj dužine strele bagera (L_s) na dužinu bloka (Z) uporedno za sva tri bagera (za vrednost osnovnih dužina strela)

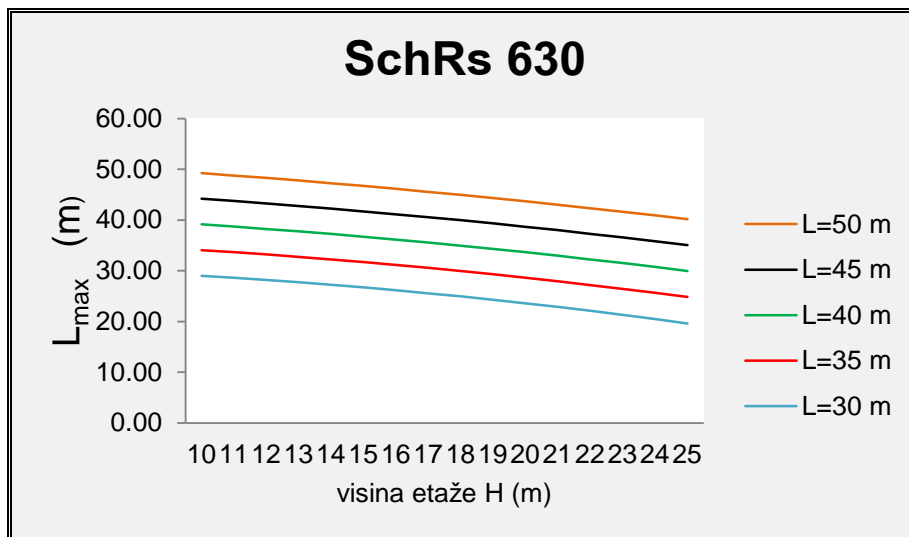
Evidentno je da bageri sa većom dužinom strele bagera (L_s) mogu otkopati veću dužinu bloka (Z) što dovodi do smanjenja vremena manipulativnih radnji bagera, a samim tim do povećanja njegovog vremenskog iskorišćenja (veće napredovanje u okviru jedne podetaže smanjuje obim radova pomoćne mehanizacije na ravnanju planuma i njeno angažovanje uz rotorne bagere).

8.4. Analiza uticaja dužine strele radnog točka (L_s) na sigurnosno rastojanje bagera od nožice etaže (L_{max})

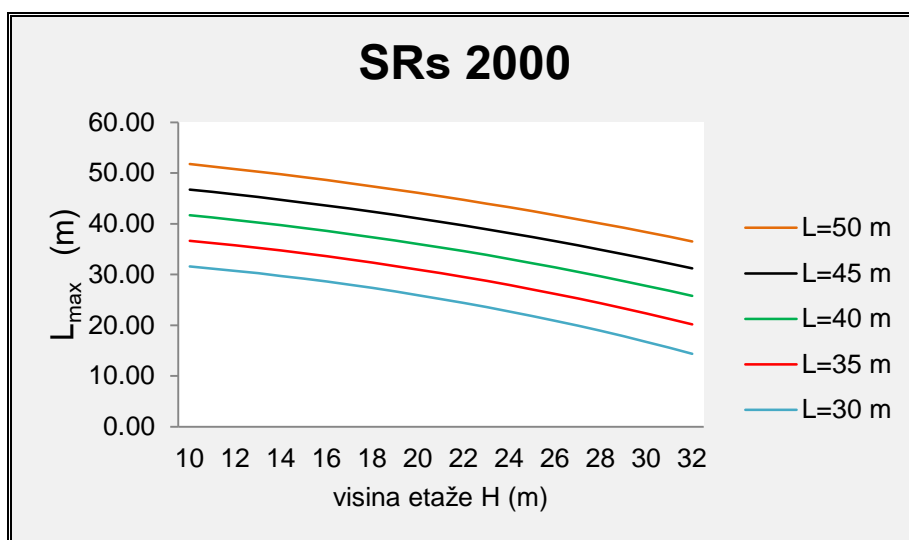
Što se tiče sigurnosnog rastojanja bagera od nožice etaže (L_{max}), logično je da veća udaljenost bagera od etaže garantuje njegov sigurniji rad tj. eventualno zarušavanje etaže ne može ga ugroziti. To potvrđuju i rezultati analize uticaja dužine strele bagera (L_s) na rastojanje od ose bagera do nožice etaže (L_{max}), koji su prikazani na *Slikama 8.13., 8.14., 8.15.*, (posebno za svaki od bagera). Uporedna analiza za sva tri bagera prikazana je na *Slici 8.16.*



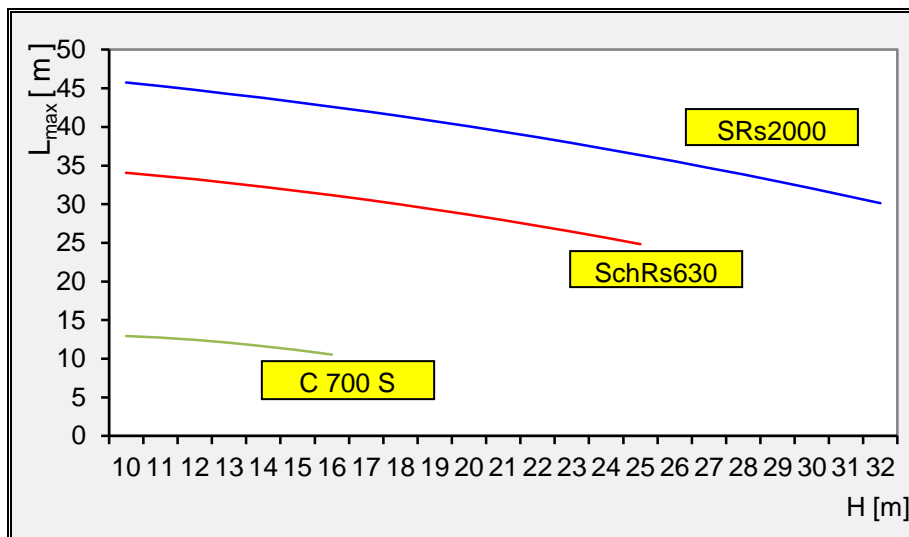
Slika 8.13. - Uticaj dužine strele bagera (L_s) na rastojanje od ose bagera do nožice etaže (L_{max}) za bager C-700



Slika 8.14. - Uticaj dužine strele bagera (L_s) na rastojanje od ose bagera do nožice etaže (L_{max}) za bager SchRs-630x25/6



Slika 8.15. - Uticaj dužine strele bagera (L_s) na rastojanje od ose bagera do nožice etaže (L_{max}) za bager SRs-2000x32/5



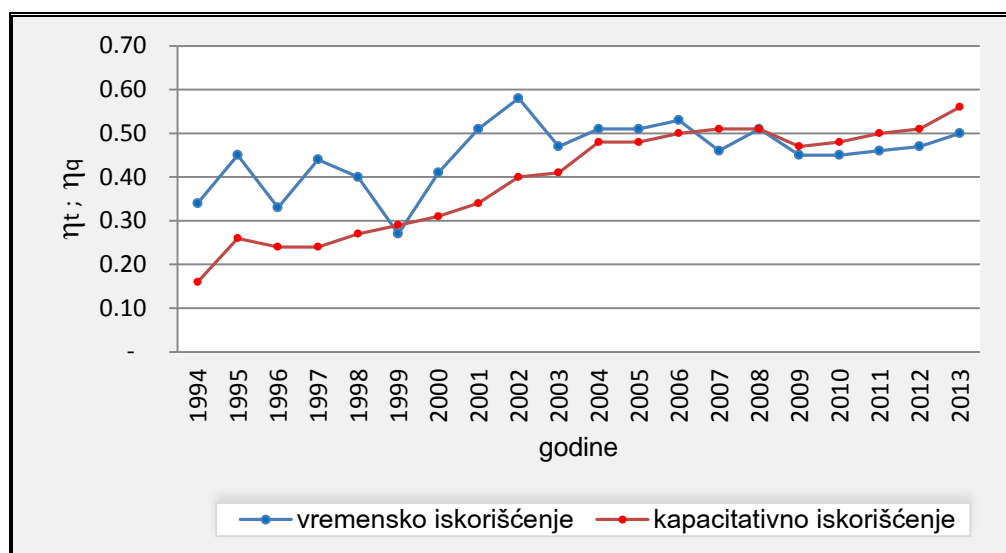
Slika 8.16. - Uticaj dužine strele bagera (L_s) na rastojanje od ose bagera do nožice etaže (L_{max}) uporedno za sva tri bagera (za vrednost osnovnih dužina strela)

8.5. Analiza uticaja dužine strele bagera (L_s) na kapacitet bagera (Q)

Analiza kapaciteta navedenih bagera, koje su oni ostvarili od početka njihovog rada pa do 2013. godine (RB KOLUBARA), prikazana je na sledećim tabelama i slikama (2014. i 2015. godina nisu razmatrane iz razloga što je poplava onemogućila normalan rad mehanizacije tako da bi se u analizu ušlo sa nerelevantnim podacima), [54, 55, 56, 57, 58, 59].

Tabela 8.2. - Dosadašnji rad bagera SchRs-630x25/6 (P.K. TAMNAVA-ZAPAD)

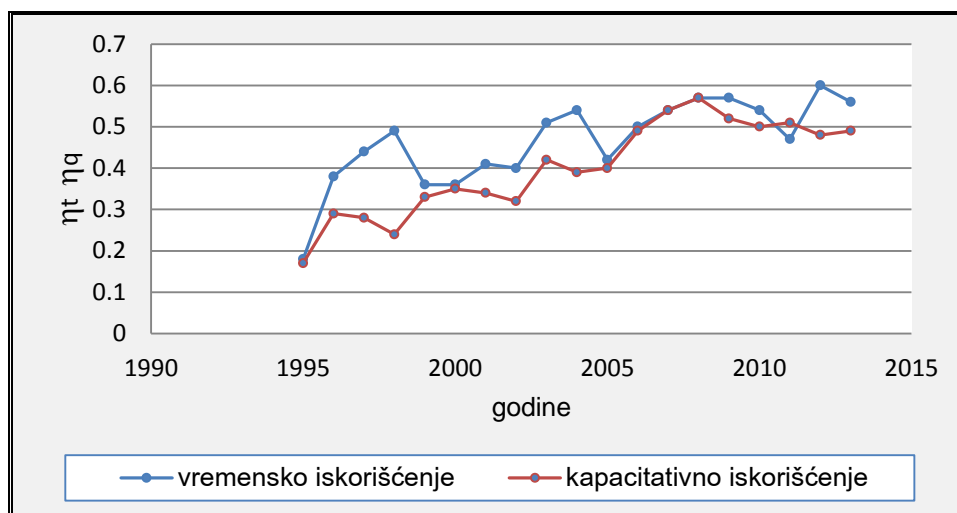
Godina	Ostvarena proizvodnja		Efektivno vreme rada, h		Ostvareni kapacitet		Vremen. iskorišć. η_T	Kapacit. iskorišć. η_Q	$\eta_T \eta_Q$
	Ugalj, t	Otkrivka, m ³	Ugalj	Otkr.	ugalj t/h	Otkrivka m ³ /h			
1994	/	258195	/	394	/	655	0.34	0.16	0.05
1995	646634	4336303	701	3269	922	1326	0.45	0.26	0.12
1996	3367801	/	2980	/	1139	/	0.33	0.24	0.08
1997	4270042	/	3819	/	1118	/	0.44	0.24	0.11
1998	4394863	/	3481	/	1263	/	0.40	0.27	0.11
1999	2454510	/	2392	/	1026	/	0.27	0.29	0.08
2000	3868977	/	3591	/	1085	/	0.41	0.31	0.13
2001	5291567	/	4472	/	1183	/	0.51	0.34	0.17
2002	7154013	/	5058	/	1414	/	0.58	0.40	0.23
2003	6035839	/	4144	/	1457	/	0.47	0.41	0.19
2004	7540694	/	4499	/	1676	/	0.51	0.48	0.24
2005	7620527	/	4505	/	1692	/	0.51	0.48	0.24
2006	8266077	/	4678	/	1767	/	0.53	0.50	0.27
2007	7222464	/	4019	/	1797	/	0.46	0.51	0.23
2008	7982836	/	4436	/	1800	/	0.51	0.51	0.26
2009	6604773	/	3946	/	1674	/	0.45	0.47	0.21
2010	6619902	/	3944	/	1678	/	0.45	0.48	0.22
2011	7117758	/	4046	/	1759	/	0.46	0.50	0.23
2012	7408482	/	4123	/	1797	/	0.47	0.51	0.24
2013	8530738	/	4345	/	1963	/	0.50	0.56	0.28



Slika 8.17. - Vremensko i kapacitativno iskorišćenje bagera SchRs-630x25/6 (P.K. TAMNAVA-ZAPAD)

Tabela 8.3. - Dosadašnji rad bagera SRs-2000x32/5 (P.K. TAMNAVA-ZAPAD)

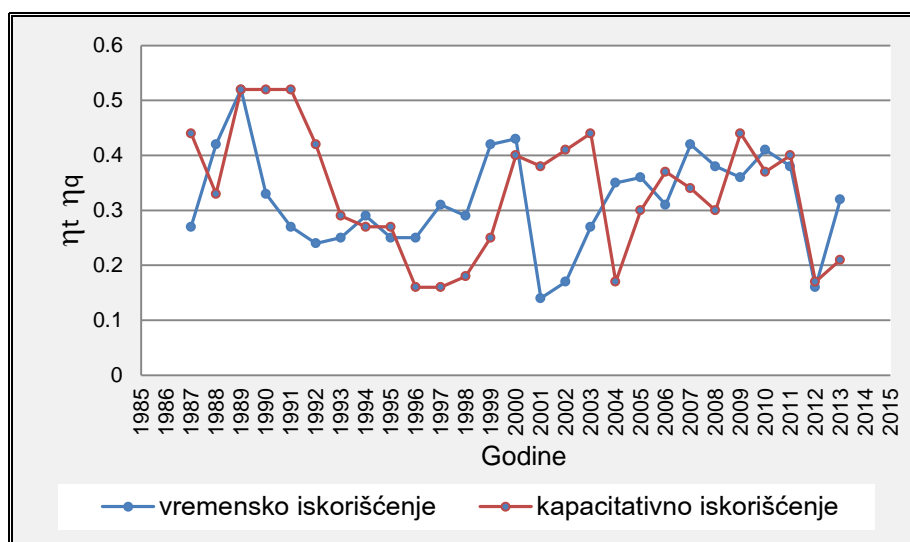
Godina	Ostvarena proizvodnja (otkrivka) m ³ cm	Efektivno vreme rada h	Ostvareni kapacitet, m ³ cm/h	Vremensko iskorišćenje, η_T	Kapacitetno iskorišćenje, η_Q	$\eta_T \eta_Q$
1995	297951	263	1133	0.18	0.17	0.03
1996	6358811	3356	1895	0.38	0.29	0.11
1997	7212117	3894	1852	0.44	0.28	0.12
1998	6928368	4315	1606	0.49	0.24	0.12
1999	5277833	3136	1683	0.36	0.33	0.12
2000	5632093	3149	1789	0.36	0.35	0.13
2001	6206962	3629	1710	0.41	0.34	0.14
2002	5653521	3471	1629	0.40	0.32	0.13
2003	9447116	4466	2115	0.51	0.42	0.21
2004	9397411	4730	2583	0.54	0.39	0.21
2005	7362749	3656	2618	0.42	0.40	0.17
2006	10365367	4164	3236	0.50	0.49	0.23
2007	13007207	4709	3591	0.54	0.54	0.29
2008	14492434	4977	3785	0.57	0.57	0.33
2009	13117727	4999	3411	0.57	0.52	0.30
2010	11974221	4753	3275	0.54	0.50	0.27
2011	10871518	4172	3388	0.47	0.51	0.24
2012	12818326	5242	3179	0.60	0.48	0.29
2013	12231016	4960	3206	0.56	0.49	0.27



Slika 8.18. - Vremensko i kapacitetno iskorišćenje bagera SRs-2000x32/5 (P.K. TAMNAVA-ZAPAD)

Tabela 8.4. - Dosadašnji rad bagera C-700 (P.K. POLJE B)

Godina	Ostvarena proizvodnja		Efektivno vreme rada, h		Ostvareni kapacitet		Vrem. iskorišć. η_T	Kapac. is korišć η_O	η_{TO}
	Ugalj, t	Otkriv., m ³	Ugalj	Otkr.	Ugalj t/h	Otkrivka, m ³ /h			
1987	/	2404000	/	2352	/	1080	0.27	0.44	0.12
1988	/	3598002	/	3574	/	1006	0.42	0.33	0.14
1989	/	5438035	/	4519	/	1203	0.52	0.52	0.27
1990	778836	4383005	490	2425	1589	1807	0.33	0.52	0.17
1991	2534000	/	1413	/	1009	/	0.27	0.52	0.14
1992	2437000	/	1660	/	1202	/	0.24	0.42	0.10
1993	1579681	/	1557	/	1013	/	0.25	0.29	0.07
1994	2022523	/	2151	/	941	/	0.29	0.27	0.08
1995	2060248	/	2385	/	934	/	0.25	0.27	0.07
1996	1224884	/	2176	/	563	/	0.25	0.16	0.04
1997	1544863	/	2677	/	562	/	0.31	0.16	0.05
1998	1529000	/	2566	/	624	/	0.29	0.18	0.05
1999	142647	2195454	256	3420	557	642	0.42	0.25	0.11
2000	/	2307817	/	2508	/	920	0.43	0.40	0.17
2001	/	610531	/	707	/	864	0.14	0.38	0.05
2002	55091	1504797	77	1429	715	1235	0.17	0.41	0.07
2003	/	/	/	/	/	/	0.27	0.44	0.12
2004	/	1176873	/	2943	/	520	0.35	0.17	0.06
2005	/	2164002	/	3122	/	901	0.36	0.30	0.11
2006	/	2350729	/	2733	/	1118	0.31	0.37	0.12
2007	/	2897230	/	3702	/	1017	0.42	0.34	0.14
2008	/	2299406	/	3306	/	904	0.38	0.30	0.11
2009	/	3254647	/	3194	/	1325	0.36	0.44	0.16
2010	/	3073015	/	3602	/	1109	0.41	0.37	0.15
2011	/	2903335	/	3082	/	1225	0.38	0.40	0.15
2012	/	562981	/	1443	/	507	0.16	0.17	0.03
2013	/	1243975	/	2498	/	647	0.32	0.21	0.07



Slika 8.19. - Vremensko i kapacitativno iskorišćenje bagera C-700 (P.K. POLJE B)

Takođe, za svaki od navedenih bagera izračunat je tehnički kapacitet (Q_{th}) u funkciji njihove dužine strele bagera (L_s), visine etaže (H_e), i ugla bočne kosine (β_b). Rezultati proračuna dati su u *Tabelama 8.5., 8.6., 8.7.*

*Tabela 8.5. - Vrednosti tehničkog kapaciteta (Q_{th}) za bager **SchRs-630x25/6***

SchRs-630x25/6	dužina strele (m)	β_b (m)	visina etaže - He (m)					
			10	15	20	25	30	32
			L=50	55	3213	4031	4075	4239
50	3147	3931		3985	4178	4065	4046	
45	3128	3889		3993	4017	3979	/	
40	3108	3833		3856	3891	/	/	
35	3088	3731		3756	3650	/	/	
30	3072	3538		3548	/	/	/	
L=45	55	3208	3889	4005	4131	3942	3908	
	50	3137	3794	3892	4039	3896	/	
	45	3061	3652	3761	3808	/	/	
	40	3035	3549	3627	/	/	/	
	35	3006	3442	3547	/	/	/	
	30	2970	3335	/	/	/	/	
L=40	55	3118	3898	3876	3903	3884	/	
	50	3096	3784	3639	3776	/	/	
	45	3064	3700	3706	/	/	/	
	40	3026	3589	3461	/	/	/	
	35	2973	3439	/	/	/	/	
	30	2900	3076	/	/	/	/	
L=35	55	3390	3765	3725	3763	/	/	
	50	3090	3631	3650	3625	/	/	
	45	2956	3645	3447	/	/	/	
	40	3003	3338	3264	/	/	/	
	35	2847	3162	/	/	/	/	
	30	3637	2777	/	/	/	/	

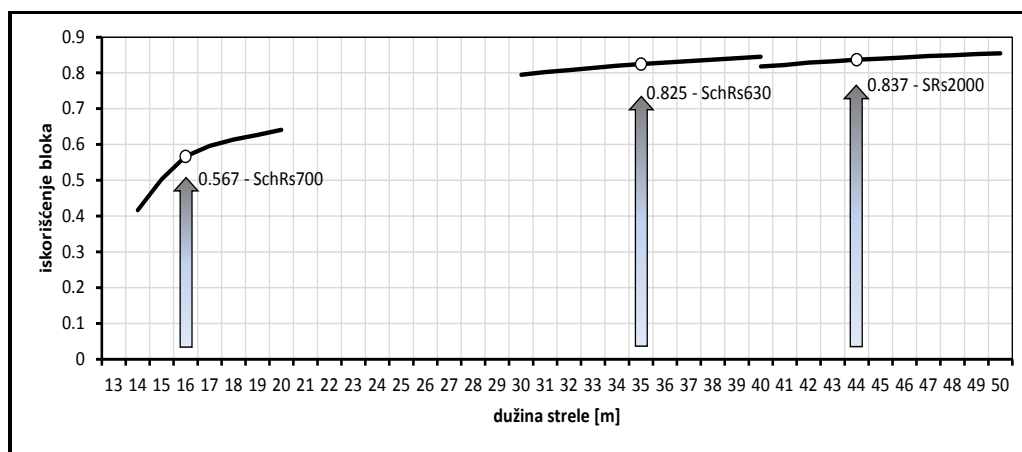
Tabela 8.6. - Vrednosti tehničkog kapaciteta (Q_{th}) za bager **SRs-2000x32/5**

SRs-2000x32/5	dužina strele (m)	β_b (m)	visina etaže - He (m)					
			10	15	20	25	30	32
			L=50	55	3476	4362	4409	4587
50	3405	4253		4312	4521	4398	4378	
45	3385	4208		4321	4346	4305	4267	
40	3363	4147		4172	4210	/	/	
35	3341	4037		4064	3949	/	/	
30	3324	3828		3839	/	/	/	
L=45	55	3471	4208	4334	4470	4265	4229	
	50	3394	4105	4211	4370	4216	/	
	45	3312	3952	4070	4120	/	/	
	40	3284	3840	3925	3796	/	/	
	35	3253	3724	3838	/	/	/	
	30	3214	3608	/	/	/	/	
L=40	55	3374	4218	4194	4223	4203	4265	
	50	3350	4094	4183	4086	/	/	
	45	3315	4004	4012	3952	/	/	
	40	3274	3883	3745	/	/	/	
	35	3217	3721	/	/	/	/	
	30	3138	3328	/	/	/	/	
L=35	55	3668	4074	4031	4072	3761	/	
	50	3343	3929	3949	3922	/	/	
	45	3198	3944	3730	/	/	/	
	40	3249	3612	3532	/	/	/	
	35	3081	3421	/	/	/	/	
	30	3935	3005	/	/	/	/	

Tabela 8.7. - Vrednosti tehničkog kapaciteta (Q_{th}) za bager **C-700**

C-700	dužina strele (m)	β_b (m)	visina etaže - He (m)			
			10	12	14	16
			L=25	65	1402	1372
60	1365	1241		1195	1070	
55	1304	1105		1085	983	
50	1262	/		/	/	
45	/	/		/	/	
40	/	/		/	/	
L=20	65	1385	1284	1210	1186	
	60	1312	1241	1124	1004	
	55	1252	1118	/	/	
	50	/	/	/	/	
	45	/	/	/	/	
	40	/	/	/	/	
L=15.4	65	1417	1392	1354	1282	
	60	1322	1278	1205	/	
	55	1218	1115	/	/	
	50	/	/	/	/	
	45	/	/	/	/	
	40	/	/	/	/	

Može se izvesti zaključak da veća dužina strele bagera (L_s), (*bageri Tipa B i C*), omogućava mnoge prednosti u odnosu na manju dužinu strele, koja je karakteristična za kompaktne bagere (*bageri Tipa A*). Navedene tehnološke pogodnosti bagera sa dužim strelama utiču na povećanje njegove efikasnosti rada u bloku (*Slika 8.20.*), pa tako u zavisnosti od visine efikasnosti bloka, kod bagera sa dužim strelama ona se kreće oko 80%, dok je za kompaktne bagere sa kratkom strelom do 70%.



Slika 8.20. - Zavisnost efikasnosti bloka od dužine strele bagera za različite tipove bagera

Takođe se može konstatovati da se pri radu bagera sa dužom strelom smanjuje broj i interval pomeranja transportera, što svakako utiče na efikasnost otkopavanja. Visina, širina i dužina bloka koji se otkopava, evidentno mogu imati veće vrednosti ako bager poseduje dužu strelu, što se direktno odražava i na njegov veći učinak. Takođe, duža strela omogućuje i veću dubinu kopanja što opet pruža veću fleksibilnost pri selektivnom radu. To se odnosi i na selektivni rad bagera u gornjim podetažama, kada duža strela bagera usled svog podizanja može obezbediti manji nagib, koji je veoma značajan za rad tračnog trtransportera koji se nalazi na njoj. Duža strela bagera ima značaj i za stabilnost kosina etaža, posebno kada se otkopava materijal sa slabijim fizičko-mehaničkim svojstvima. Sa dužom strelom moguće je otkopati etaže koje zahtevaju manje uglove nagiba, pri čemu je i sigurnosno rastojanje između

bagera i nožice etaže veće, što garantuje i veću sigurnost usled eventualnog obrušavanja etaže.

Analizom tehničkog (Q_{th}) i eksploatacionog (Q_{ex}) kapaciteta bagera *SchRs-630x25/6* u funkciji promene dužine njegove strele od $L_s = 35$ m do 40 m (visina etaže $H_e = 20$ m, nagib čeone kosine $\alpha_c = 40^\circ$), dobijaju se rezultati prikazani u *Tabeli 8.8.* Te vrednosti predstavljaju osnov za razmatranja koja za krajnji cilj treba da pokažu ekonomsku opravdanost povećanja postojeće dužine strele (L_s). Pošto je u prethodnim analizama utvrđeno da to povećanje dužine strele može ići samo do 5 m (zaključak iz 6. poglavlja), ekonomska analiza je rađena shodno tim dužinama, kao što je prikazano u *Tabeli 8.8.*, uz korak promene njene dužine od 1 m.

*Tabela 8.8. – Vrednosti tehničkog (Q_{th}) i eksploatacionog (Q_{ex}) kapaciteta za bager *SchRs-630x25/6* u funkciji promene dužine strele bagera (L_s)*

L_s (m)	Q_{th} (m^3/h)	Q_{ex} (m^3/h)	Q_{th} (m^3/god)	Q_{ex} (m^3/god)
35	3264	2611	28.200.960	10.152.346
36	3288	2630	28.408.320	10.226.995
37	3315	2652	28.641.600	10.310.976
38	3383	2706	29.229.120	10.522.483
39	3455	2764	29.851.200	10.746.432
40	3461	2769	29.903.040	10.765.094

9. EKONOMSKA ANALIZA

Da bi se uradila ekonomska ocena nekog projekta, neophodno je integrisati tržišne karakteristike sa karakteristikama proizvodnog procesa, što nimalo nije jednostavno. Zato proces inženjerskog odlučivanja treba shvatiti kao proces koji se ostvaruje kroz nekoliko faza:

- a) *faza pripreme* – nakon proučavanja određenog problema započinje se sa analizom ideja i predlaganjem mogućih inženjersko-ekonomskih rešenja. Poređenje alternativnih rešenja vrši se komparacijom na osnovu ukupnih i jediničnih troškova, kao i na osnovu „*principa kompleksnosti*“. Najpre treba utvrditi obim i strukturu troškova za svaku alternativu a potom sagledati ekonomsku opravdanost svake alternative, pri čemu sve inženjerske odluke moraju polaziti od onih alternativa koje zadovoljavaju sledeći uslov :

$$SV = \sum_{n=1}^N \frac{P_n - T_n}{(1+K)^n} \quad (9.1)$$

gde su :

SV – sadašnja vrednost svih očekivanih budućih troškova;

P – ukupni prihod;

T – ukupni troškovi;

$(1 + K)$ – funkcija novca tokom vremena (diskontni faktor);

K – godišnja diskontna stopa;

n – broj godina, odnosno diskontnih perioda.

- b) *donešenje odluke* - konačnu odluku treba da donesu menadžeri proizvodnje zajedno sa odabranim timom stručnjaka pri čemu treba znati da pogrešno donešena odluka može imati dalekosežne posledice po

dalju egzistenciju preduzeća. Ispravno doneta odluka treba da omogući stvaranje povoljnih uslova poslovanja uz ostvarenje štovećeg profita ;

- c) *implementacija (sprovođenje) donete odluke* - traje određeno vreme i po pravilu se odvija u više etapa.

9.1. Definisanje odgovarajuće metodologije

Za donošenje ispravne odluke pri izboru najboljeg od razmatranih varijantnih rešenja dužine strele bagera, neophodno je definisati odgovarajuću metodologiju. Ona mora biti objektivna i proverena a rezultat koji opredeljuje izbor mora biti jasan i nedvosmislen. Zato, pored visine investicionih ulaganja, koja se menja upravo proporcionalno sa promenom dužine strele, na donošenje konačne odluke bitan uticaj imaju i troškovi rada svakog varijantnog rešenja sprave u zadanom vremenskom periodu.

Najpre treba utvrditi zajednički imenitelj varijantnih rešenja koji će poslužiti za njihovo upoređivanje. Kao najpogodniji zajednički imenitelj za poređenje se nameću *prosečni troškovi proizvodnje kubnog metra jalovine ili korisne mineralne sirovine koju otkopa bager tokom posmatranog perioda eksploatacije*. Matematičko-statističkim modelom se simulira kretanje ekonomskih parametara vezanih za otkop (u ovom slučaju jalovine) prema predviđenoj dinamici u zadanom vremenskom periodu (analiza rađena za 20 godina), pri čemu se u obzir uzima kako visina investicionih ulaganja koja prethodi stavljanju varijantnih rešenja sprave u funkciju, tako i operativni troškovi njenog angažovanja u posmatranom periodu. Na kraju se upoređuju prosečni troškovi proizvodnje za svako varijantno rešenje [2, 18, 22, 26, 47, 68].

Ako ukupne troškove proizvodnje obeležimo sa (C) a obim proizvodnje sa (q), pri čemu znamo da ukupni troškovi proizvodnje (C) prvenstveno zavise od ostvarenog obima proizvodnje (q), ovu njihovu zavisnost možemo predstaviti monotono rastućom i neprekidnom funkcijom:

$$C = F(q) \tag{9.2}$$

gde su :

C – ukupni troškovi proizvodnje ;

q – obim proizvodnje.

Ova funkcija ukupnih troškova izražava zavisnost njihovog kretanja od obima proizvodnje u jednom vremenskom trenutku i za date tehničko-tehnološke i organizacione uslove proizvodnje. Jasno je da veći obim proizvodnje zahteva uvećanje ukupnih troškova i obratno, manji obim proizvodnje znači manje troškove.

Troškovi sami po sebi nisu homogena kategorija i zavisno od potrebe ili kriterijuma mogu se klasifikovati na više načina. Tako se klasifikacija troškova može izvršiti prema mestu njihovog nastanka (troškovi izrade i troškovi režije), prema faktorima proizvodnje (troškovi radne snage, materijala i sredstava za rad), prema vezanosti za nosioce troškova (pojedinačni i zajednički), prema načinu vezivanja za nosioce (direktni i indirektni troškovi), itd.

Za potrebe ove analize korišćena je podela troškova na *fiksne* i *varijabilne*. Fiksni troškovi su konstantni i u ukupnom iznosu ne zavise od ostvarenog obima proizvodnje ali se u zavisnosti od ostvarenog obima proizvodnje menjaju po jedinici proizvoda. Tipični fiksni troškovi koji se javljaju u analizi su amortizacija (5% od vrednosti sprave godišnje) i troškovi osiguranja. Varijabilni troškovi se menjaju sa promenom obima proizvodnje (tipičan predstavnik varijabilnih troškova u modelu su troškovi energije). Ostali troškovi su grupisani po kategorijama i razvrstani su na fiksnu i varijabilnu komponentu. Treba napomenuti da je podela troškova na fiksne i varijabilne relativna i da su na duži rok posmatrano svi troškovi varijabilni. Pošto se naredna analiza zasniva na praćenju rezultata za svaku godinu pojedinačno, to je odabrana klasifikacija troškova na fiksne i varijabilne metodološki opravdana.

Imajući u vidu da je za date tehničko-tehnološke i organizacione uslove proizvodnje visina varijabilnih troškova upravo proporcionalna ostvarenom obimu

proizvodnje (fiksni troškovi u celini ostaju konstantni), gornja funkcija ukupnih troškova može biti predstavljena na sledeći način:

$$C = F(q) + f \quad (9.3)$$

gde su:

$F(q)$ - varijabilni troškovi ;

f - fiksni troškovi.

Funkcionalna zavisnost obima proizvodnje i fiksnih i varijabilnih troškova data je kroz normalnu jednačinu prave koja predstavlja funkciju ukupnih troškova i glasi:

$$C = ax + b \quad (9.4)$$

gde su:

C - ukupni troškovi ;

x - obim proizvodnje (jalovine) ;

a - koeficijent proporcionalnosti (predstavlja prosečne varijabilne troškove i određuje

ugao (uspon) trenda ekstrapolirane funkcije) ;

b - slobodni član u funkciji (predstavlja fiksne troškove).

Ekstrapolacija funkcije vrši se statističkom metodom najmanjih kvadrata. Sistem normalnih jednačina za datu funkciju troškova glasi:

$$\sum C_i = a \sum X_i + nb \quad (9.5)$$

$$\sum X_i C_i = a \sum X_i^2 + b \sum X_i \quad (9.6)$$

gde je :

n - broj parova vrednosti (X_i, C_i) .

9.2. Polazni podaci

Za utvrđivanje prosečnih troškova proizvodnje kubnog metra jalovine, koga otkopa bager u svojim varijantnim rešenjima, pošlo se od sledećih činjenica:

- *Dužina strele radnog točka* menja se u granicama od 35 do 40 m (ova granica je određena proračunima u *Poglavlju 6*) ;
- *Dinamika godišnje proizvodnje bagera* data je po varijetetima dužine strele radnog točka, a na osnovu tehničkog kapaciteta bagera (Q_{th});
- *Visine investicionih ulaganja* sa cenama izraženim u evrima (€) date su po varijetetima dužine strele radnog točka, pri čemu je kao polazna uzeta cena sprave od 18.000.000 (€). Obzirom na njenu težinu od 1.700 (t), to daje cenu od 10.588,25 (€/t). Svako razmatrano produženje strele prouzrokuje dodatno povećanje cene sprave za 7.500 (€/t) ;
- Efekti distorzije sadašnjih investicionih ulaganja i budućih operativnih troškova eliminisani su diskontovanjem projektovanih troškova i proizvodnje na sadašnju vrednost diskontnom stopom od 8% ;
- Visina troškova poslovanja definisana je normativima utrošaka prema podacima iz *Tabele 9.1.*, pri čemu je izvršeno dekomponovanje ovih

troškova na fiksnu i varjabilnu komponentu prema zajedničkom algoritmu za sva varijantna rešenja dužine strele.

Tabela 9.1. – Troškovi poslovanja prema normativima utroška

Vrsta troškova	Normativ utroška (€/m ³)	proporcionalni udeo	
		Fiksni (%)	Varijabilni (%)
<i>energija</i>	0.0315	0	100
<i>održavanje</i>	0.1165	40	60
<i>zarade</i>	0.0660	80	20
<i>ostalo</i>	0.0580	10	90

- *Amortizacija*, koja predstavlja tipičan fiksni trošak poslovanja obračunata je proporcionalnom metodom po godišnjoj stopi od 5% vrednosti za sve varijante produženja strele radnog točka ;
- *Troškovi osiguranja*, koji su po svojoj prirodi takođe fiksni troškovi, obračunati su po stopi od 1% vrednosti bagera ;
- Pošto se radi o mikroekonomiji sprave (bagera), plasman i prodajna cena otkrivenog uglja nisu razmatrani ;
- Pretpostavljena stopa inflacije iznosi 0%.

9. 3. Rezultati analize

Primenjujući prethodno definisane parametre u modelu za analizu došlo se do prosečne cena proizvodnje po m³ rotornog bagera *SchRs-630* za različite dužine strele radnog točka. Ti rezultati su prikazani u *Tabeli 9.2.* i *Tabeli 9.3.*

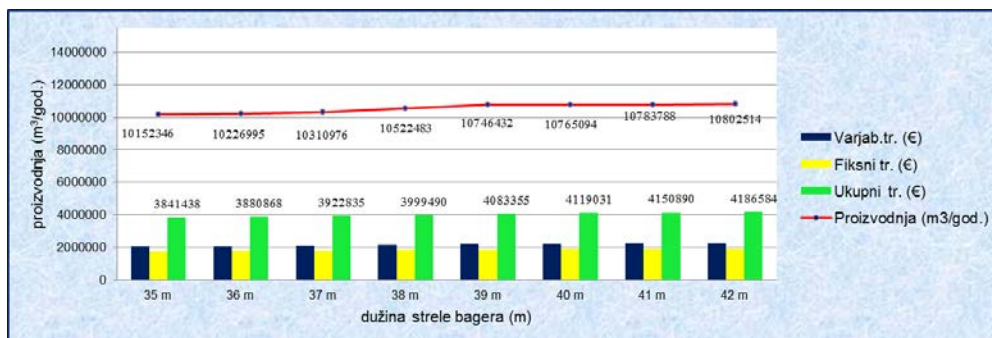
Tabela 9.2. - Cene proizvodnje po m³ rotornog bagera SchRs-630, za dužine strele bagera Ls=35 m, Ls=36 m i Ls=37 m

		dužina strele bagera (m)					
		35		36		37	
Red. br.	Opis	Prosečno godišnje	Ukupno	Prosečno godišnje	Ukupno	Prosečno godišnje	Ukupno
I	TROŠKOVI POSLOVANJA (€)	3.841438	76.828.762	3.880.868	77.617.353	3.922.835	78.456.709
1	Troškovi električne energije	319.799	6.395.978	322.150	6.443.007	324.796	6.495.915
2	Održavanje (varjabilni deo)	709.649	14.192.980	714.867	14.297.339	720.737	14.414.744
3	Zarade (varjabilni deo)	134.011	2.680.219	134.996	2.699.927	136.105	2.722.098
4	Ostalo (varjabilni deo)	529.952	10.599.049	533.849	10.676.983	538.233	10.764.659
8	Svega VARJABILNI TROŠKOVI	1.693.411	33.868.226	1.705.863	34.117.255	1.719.871	34.397.416
9	Amortizacija	900.000	18.000.000	915.938	18.318.750	931.875	18.637.500
10	Troškovi osiguranja	180.000	3.600.000	183.188	3.663.750	186.375	3.727.500
11	Održavanje (fiksni deo)	473.099	9.461.986	476.578	9.531.559	480.491	9.609.830
12	Zarade (fiksni deo)	536.044	10.720.877	539.985	10.799.707	544.420	10.888.391
13	Ostalo (fiksni deo)	58.884	1.177.672	59.317	1.186.331	59.804	1.196.073
14	Svega FIKSNI TROŠKOVI	2.148.027	42.960.535	2.175.005	43.500.097	2.202.965	44.059.294
II	INVESTICIJE (€)	900.000	18.000.000	915.938	18.318.750	931.875	18.637.500
III	Godišnja proizvodnja (m3)	10.152.346	203.046.920	10.226.995	204.539.900	10.310.976	206.219.520
	Broj radnih sati	8.640	172.800	8.640	172.800	8.640	172.800
IV	UKUPNI RASHODI (€)	4.741.438	94.828.761	4.796.805	95.936.103	4.854.710	97.094.209
V	NPV ukupnih rashoda za diskontnu stopu 8 %	54.382.472		55.064.736		55.771.921	
	NPV proizvodnje za diskontnu stopu 8 %	99.677.230		100.410.144		101.234.682	
	Prosečni troškovi proizvodnje (€/m3)	0.5456		0.5484		0.5509	

Tabela 9.3. - Cene proizvodnje po m³ rotornog bagera SchRs-630, za dužine strele bagera Ls=38 m, Ls=39 m i Ls=40 m

		dužina strele bagera (m)					
		38		39		40	
Red. br.	Opis	Prosečno godišnje	Ukupno	Prosečno godišnje	Ukupno	Prosečno godišnje	Ukupno
I	TROŠKOVI POSLOVANJA (€)	3.999.490	79.989.808	4.083.355	81.667.090	4.119.031	82.380.611
1	Troškovi električne energije	331.458	6.629.164	338.513	6.770.252	339.100	6.782.009
2	Održavanje (varjabilni deo)	735.522	14.710.431	751.176	15.023.512	752.480	15.049.601
3	Zarade (varjabilni deo)	138.897	2.777.936	141.853	2.837.058	142.099	2.841.985
4	Ostalo (varjabilni deo)	549.274	10.985.472	560.964	11.219.275	561.938	11.238.758
8	Svega VARJABILNI TROŠKOVI	1.755.150	35.103.003	1.792.505	35.850.097	1.795.618	35.912.354
9	Amortizacija	947.813	18.956.250	966.938	19.338.750	992.438	19.848.750
10	Troškovi osiguranja	189.563	3.791.250	193.388	3.867.750	198.488	3.969.750
11	Održavanje (fiksni deo)	490.348	9.806.954	500.784	10.015.675	501.653	10.033.068
12	Zarade (fiksni deo)	555.587	11.111.742	567.412	11.348.232	568.397	11.367.939
13	Ostalo (fiksni deo)	61.030	1.220.608	62.329	1.246.586	62.438	1.248.751
14	Svega FIKSNI TROŠKOVI	2.244.340	44.886.804	2.290.850	45.816.993	2.323.413	46.468.258
II	INVESTICIJE (€)	947.813	18.956.250	966.938	19.338.750	992.438	19.848.750
III	Godišnja proizvodnja (m ³)	10.522.483	210.449.660	10.746.432	214.928.640	10.765.094	215.301.880
	Broj radnih sati	8.640	172.800	8.640	172.800	8.640	172.800
IV	UKUPNI RASHODI (€)	4.947.303	98.946.058	5.050.292	101.005.840	5.111.468	102.229.361
V	NPV ukupnih rashoda za diskontnu stopu 8 %	56.819.669		57.997.226		58.819.722	
	NPV proizvodnje za diskontnu stopu 8 %	103.311.289		105.510.053		105.693.280	
	Prosečni troškovi proizvodnje (€/m³)	0.5508		0.5497		0.5465	

Grafička interpretacija rezultata iz prethodne dve tabele (*fiksni troškovi, varijabilni troškovi, ukupni troškovi i godišnja proizvodnja*), data je na *Slici 9.1.*

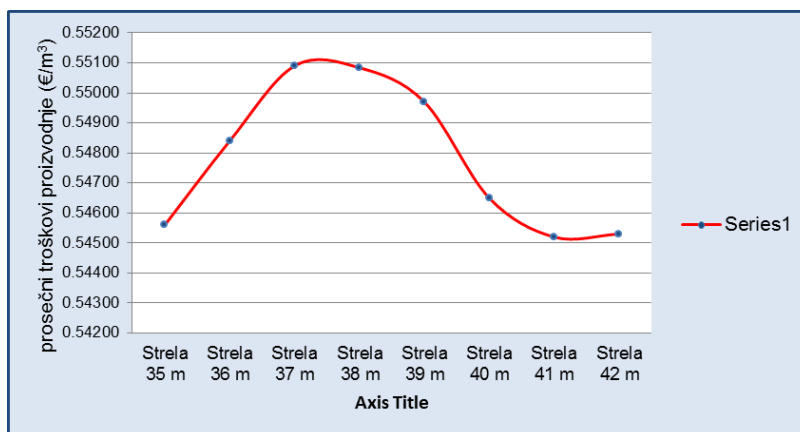


Slika 9.1. – Odnos fiksnih troškova, varijabilnih troškova, ukupnih troškova i godišnje proizvodnje za različite dužine strele bagera SchRs-630

U *Tabeli 9.4.* date su vrednosti prosečnih troškova proizvodnje (€/m³) za svaku analiziranu dužinu strele bagera, a njihova grafička interpretacija je prikazana na *Slici 9.2.*

Tabela 9.4. – Prosečni troškovi proizvodnje

Dužina strele (m)	Prosečni troškovi proizvodnje (€/m ³)
35	0.5456
36	0.5484
37	0.5509
38	0.5508
39	0.5497
40	0.5465
41	0.5452
42	0.5453



Slika 9.2. – Prosečni troškovi proizvodnje bagera SchRs-630 za različite dužine strele bagera

Razmatrajući prethodne rezultate analize može se zaključiti da u slučaju promene dužine strele bagera do 2 m ($L_s=36\text{ m}$ i $L_s=37\text{ m}$), prosečni troškovi proizvodnje rastu. Sa daljom promenom dužine strele ($L_s=38\text{ m}$, $L_s=39\text{ m}$ i $L_s=40\text{ m}$), ti troškovi opadaju čime je mogućnost produženja strele bagera potvrđena i preko ekonomskih pokazatelja.

10. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Rotorni bageri su mašine koje su u današnje vreme našle najveću primenu pri kontinualnoj eksploataciji uglja u Srbiji. Zahvaljujući svojim tehničko-tehnološkim karakteristikama u mogućnosti su da ostvare veoma raznovrsne rudarsko-tehničke zahteve otkopavanja, ostvarujući pri tome visoku sigurnost u radu, malu specifičnu potrošnju energije, visoki koeficijent korisnog dejstva radnog organa itd. U zavisnosti od fizičko-mehaničkih svojstava radne sredine u kojoj radi, bager je neophodno prilagoditi tim uslovima rada. Izbor bagera i ostvarenje njegovog projektovanog kapaciteta u realnim uslovima na površinskom kopu u najvećoj meri zavisi od usaglašenosti geometrijskih parametara strele bagera i radnog organa sa uslovima radne sredine. Strela bagera i rotor (rotorni točak) predstavljaju dva najvitalnija dela rotornog bagera koja bitno utiču na konstrukciju celog bagera, kao i na tehnološke parametre odreska, reza i bloka, njegov proizvodni potencijal i dr. Prema najčešće primenjivanoj podeli, bageri se dele na takozvane *kompaktne bagere klase A*, koji se odlikuju kratkom strelom i konstrukcijom strele od punih zidova, *klase B* sa rešetkastom strelom i kapacitetom do $6.000 \text{ m}^3/\text{h}$ i *klase C* sa rešetkastom strelom kapaciteta preko $6.000 \text{ m}^3/\text{h}$ i pretovarnim mostom. Svaki od ovih tipova bagera ima svoje prednosti i nedostatke koji se ogledaju u mogućnosti ostvarivanja tehničko-tehnoloških parametara bloka i podetaže, nabavnoj ceni i dr.

Izbor rotornog bagera i naročito ostvarivanje njegovog projektovanog kapaciteta u realnim uslovima na jednom površinskom kopu, u najvećoj meri zavisi od usaglašenosti geometrijskih parametara strele bagera i radnog organa sa uslovima radne sredine. Naime, izbor dužine strele je u direktnoj zavisnosti od mogućnosti ostvarivanja tehničko-tehnoloških parametara bloka i podetaže i ostvarivanja optimalnih kapaciteta. Rotor (rotorni točak) i strela bagera predstavljaju dva najvitalnija dela rotornog bagera. Ovi delovi bitno utiču na konstrukciju celog bagera, određuju tehnološke parametre odreska, reza i bloka, njegov proizvodni potencijal i dr. Povećanjem dužine strele bagera

ostvaruju se povoljniji uslovi za otkopavanje kao i parametri bloka. Veoma je važno odrediti optimalnu dužinu strele, budući, da svako povećanje dužine strele bagera ima za posledicu povećanje mase celog bagera i to linerano, dok se ne zahteva promena prečnika obrtno-oslonog kruga i donje gradnje, nakon čega je povećanje mase daleko veće.

Prevelika dužina strele u odnosu na konkretne uslove radne sredine (broj, moćnost i položaj proslojaka) dovodi do osetnog povećanja mase bagera, a samim tim i njegove nabavne cene. Obrtno, poddimenzionisana dužina strele ima za posledicu osetan pad vremenskog i kapacitetnog iskorišćenja bagera, odnosno smanjenje koeficijenta efikasnosti rada bagera u bloku i nemogućnost ostvarivanja zahtevanih uglova nagiba bočnih kosina i dr., a pri tome, uslovi rada su manje bezbedni.

U dosadašnjem periodu primene rotornih bagera u svrhu eksploatacije uglja, prilikom izbora rotornog bagera, nije primenjivana uporedna sveobuhvatna tehno-ekonomska analiza pogodnosti tipa bagera i dužine strele za konkretne uslove radne sredine, pre svega sa aspekta usaglašenosti dužine strele i mogućnosti ostvarivanja zahtevanih uglova nagiba kosina koji obezbeđuju bezbedan rad na površinskom kopu. Dosadašnja istraživanja koja su razmatrala ovu problematiku, uglavnom su se bavila ili samo bagerom i njegovim konstruktivnim delovima ili samo radnom sredinom u kojoj se obavlja eksploatacija. Cilj ovog istraživanja bio je da se analizom teoretskih i eksperimentalnih istraživanja rada rotornih bagera izvrši optimizacija dužine strele bagera za uslove radne sredine basena lignita Srbije, a u funkciji veće stabilnosti otkopnih etaža i ostvarivanja maksimalnih kapaciteta. Dobijeni rezultati doprineće boljoj efektivnosti rada bagera u sklopu kontinualnih sistema i postizanju pozitivnih ekonomskih efekata, što će značajno doprineti pravilnom izboru bagera pri otvaranju novih površinskih kopova.

Dužina strele bagera, kao vrlo bitan konstruktivni parametar bagera, znatno utiče na širinu bloka, ugao nagiba bočne kosine, rastojanje od ose bagera do nožice etaže, dužinu bloka i kapacitet bagera. Visina, širina i dužina bloka koji se otkopava, evidentno mogu imati veće vrednosti ako bager poseduje dužu strelu, što se direktno odražava i na njegov veći učinak. Takođe,

duža strela omogućuje i veću dubinu kopanja što opet pruža veću fleksibilnost pri selektivnom radu. To se odnosi i na selektivni rad bagera u gornjim podetažama, kada duža strela bagera usled svog podizanja može obezbediti manji nagib, koji je veoma značajan za rad tračnog transportera koji se nalazi na njoj. Duža strela bagera ima značaj i za stabilnost kosina etaža, posebno kada se otkopava materijal sa slabijim fizičko-mehaničkim svojstvima. Sa dužom strelom moguće je otkopati etaže koje zahtevaju manje uglove nagiba, pri čemu je i sigurnosno rastojanje između bagera i nožice etaže veće, što garantuje i veću sigurnost usled eventualnog obrušavanja etaže.

Sva istraživanja u okviru ove disertacije su realizovana na teorijskom i eksperimentalnom nivou, uz korišćenje savremenih programskih paketa za modeliranje strele bagera (konačni elementi), modeliranje i proračun rada bagera u bloku, modeliranje i proračun stabilnosti kosina i programskog paketa za ekonomsku analizu. Provera definisane metodologije istraživanja je obavljena sa realnim podacima sa površinskih kopova *RB KOLUBARA* i terenskim merenjima dinamičkog ponašanja bagera.

Primenjena metodologija se sastoji iz tri faze:

- *Faza sistemske analize* – analiza sistema rotorni bager, sistema radna sredina, stabilnost kosina;
- *Faza modeliranja* – modeliranje strele bagera, procesa otkopavanja i konstruktivnih i tehnoloških parametara površinskog kopa;
- *Faza optimizacije* – optimizacija izbora dužine strele bagera u funkciji stabilnosti kosina i efektivnosti rada sa verifikacijom kroz ekonomsku analizu.

Ovako definisana metodologija i integralni tehno-ekonomski model svakako će doprineti da se već u fazi izrade tehno-ekonomske dokumentacije

za otvaranje novog površinskog kopa izvrši izbor, kako optimalnog bagera, tako i njegove optimalne dužine strele, što će omogućiti bezbedniji rad sa jedne strane, a sa druge strane, postići će se maksimalni ekonomski efekti rada bagera.

Da bi se utvrdila zavisnost dužine strele i neophodnih investicija, neophodno je izraditi dinamički model strele bagera i utvrditi mogućnost produženja strele bagera, kako sa aspekta povećanja mase, tako i sa njenog uticaja na dinamiku bagera. Istraživanja na primeru strele bagera tipa SchRs 630 pokazala su da se povećanjem dužine strele za prvih 5 metara masa strele gotovo linerano raste. Takođe, povećanjem dužine strele, raste i napon u streli. Zaključak i preporuka na osnovu svega prethodno prikazanog je da se, bez promene konstrukcije rešetkaste strukture (visine, širine rešetke i poprečnih preseka greda), može ići maksimalno na produženje strele do 5m. Povećanje dužine strele preko 5 metara uticalo bi na promenu dizajna bagera, povećanje prečnika oslonog ležaja, površine gusenica i dr.

Dobijeni rezultati terenskih ispitivanja pokazali su tehnički prihvatljivu saglasnost numerički izračunatih i izmerenih sopstvenih vrednosti. Ti rezultati potvrdili su i validnost numeričkog modela, i dokazali da je on verodostojan i da se može koristiti za analizu uticaja produžetka strele na masu i dinamiku bagera.

Budući da se na površinskim kopovima koriste 3 vrste rotornih bagera (tipa A, B i C) izvršena je analiza tehničko-tehnoloških mogućnosti svakog od navedenih tipova bagera i to za različite dužine strela. Kao primer korišćeni su rotorni bageri koji se najčešće koriste u Elektroprivredi Srbije, i to kao primer za bager klase A, bager SchRs 700, kao primer za klasu B, bager SchRs 630 i kao primer za klasu C, bager SRs 2000.

Analiza je pokazala da kompaktni bageri (tip A) imaju niz ograničenja u tehničko-tehnološkom smislu, pre svega sa aspekta širine i dužine bloka, visine otkopavanja bloka, dužine napredovanja u okviru jedne podetaže i dr., što uslovljava smanjenje efikasnosti u okviru bloka, pa samim tim i efektivnog kapaciteta. Takođe, pri produžetku strele bagera za 5 metara, ne mogu se

ostvariti neophodni parametri sigurnosti sa aspekta stabilnosti kosina (nemogućnost formiranja kosina sa blažim uglom za potrebnu visinu etaže).

Sa druge strane, bageri tipa B i C imaju značajnih prednosti koje im omogućavaju povećanje kapaciteta i ostvarivanje neophodnih blagih kosina što garantuje potrebnu stabilnost kosina. Budući da su se bageri tipa SchRs 630 u dosadašnjoj eksploataciji pokazali kao najpouzdaniji tipovi bagera, oni su uzeti kao primer za optimizaciju dužine strele u funkciji efektivnosti rada i stabilnosti kosina na površinskim kopovima lignita Srbije.

Na osnovu proračuna iz modela rada rotornog bagera, za različite dužine strele, dobijene su vrednosti tehničkog i eksploatacionog kapaciteta za različite visine otkopavanja i uglove nagiba kosina. Sa dobijenim vrednostima kapaciteta i potrebnim ulaganjima za produžetak strele, urađena je ekonomska analiza za te dužine strele bagera SchRs 630. Kao najpovoljniji zajednički imenitelj za poređenje uzet je prosečan trošak proizvodnje kubnog metra otkrivke, koga bager otkopa tokom posmatranog perioda, tako da se matematičko-statističkim modelom simuliralo kretanje ekonomskih parametara vezanih za otkopavanje otkrivke prema predviđenoj dinamici, za vremenski period od 20 godina. Dobijeni rezultati analize potvrđuju mogućnost produženja dužine strele bagera i preko ekonomskih pokazatelja, tačnije, za produženje strele za 5 m prosečni troškovi proizvodnje imaju manju vrednost u odnosu na bager sa osnovnom dužinom strele.

Produžetkom strele za preko 5 metara znatno brže raste masa bagera (gotovo eksponencijalno), pri čemu, efekti povećanja efikasnosti rada bagera u bloku znatno sporije rastu.

Urađena ekonomska analiza je, preko utvrđenih ekonomskih parametara, pokazala da je optimalna dužina strele za ovaj tip bagera 40 m, što verifikuje i rezultate dobijene matematičkim modeliranjem strele bagera i terenskim ispitivanjima dinamičkog ponašanja bagera.

Generalno, može se zaključiti:

- geološkim modelom i analizom stabilnosti kosina neophodno je definisati parametre etaža koje bager treba da otkopa;
- matematičkim modelom strele bagera treba odrediti dužine za koju strela može da se produži;
- potvrdu, tj. verifikaciju ovog modela, treba uraditi terenskim ispitivanjima dinamičkog ponašanja bagera;
- modeliranjem procesa otkopavanja i proračuna parametara bloka i podetaža, za različite dužine strele bagera, treba dokazati da bageri sa dužom strelom imaju veću efektivnost, da mogu otkopati blok veće širine, dužine i visine, da imaju manji broj i interval pomeranja transportera, da mogu da ostvare manje nagibe bočnih kosina etaža koji su veoma bitni za njihovu stabilnost, da imaju veće sigurnosno rastojanje između bagera i nožice etaže, da mogu da ostvare veću dubinu kopanja, kao i ostvarenje manjih uglova dizanja strele pri selektivnom radu u gornjim podetažama;
- sa povećanjem dužine strele bagera, prosečni troškovi proizvodnje opadaju;

Ovako definisana metodologija i integralni tehno-ekonomski model mogu se vrlo uspešno primeniti prilikom izbora bagera i određivanja njegove optimalne dužine strele.

Kada je reč o pravcima daljih istraživanja u ovoj oblasti, svakako da za analizu može biti interesantan odnos dužine strele bagera i njegove sile rezanja. Naime, može se ostvariti i veća dužina strele na račun smanjenja potrebne sile kopanja, odnosno smanjivanja potrebne mase pogonskog

sistema. Drugi pravac može biti istraživanje i optimizacija parametara bloka i podetaže za konkretne uslove rada, kroz model ležišta i model površinskog kopa, kao i specifičnih analiza rizika (tehničko-tehnoloških, ekoloških i ekonomskih) u svim fazama realizacije modela.

11. Literatura

- [1.] *Allaboudi E., Maneski T., Trisović N., Ergić T.*; IMPROVING STRUCTURE DYNAMIC BEHAVIOUR USING A REANALYSIS PROCEDURES TECHNIQUE, Technical Gazette reanalysis of structures, Strojarsstvo , 52 (2) 147-158 (2010).
- [2.] *Aswath D.*; INVESTMENT VALUATION: TOOLS AND TECHNIQUES FOR DETERMINING THE VALUE OF ANY ASSET, Wiley, New York, 2012.
- [3.] *Baba K., Bahi L., Ouadif L., Akhssas A.*; SLOPE STABILITY EVALUATIONS BY LIMIT EQUILIBRIUM AND FINITE ELEMENT METHODS APPLIED TO A RAILWAY IN THE MOROCCAN RIF, Open Journal of Civil Engineering, 2012.
- [4.] *Bošnjak S., Zrnić N., Gnjatović N.*; REDESIGN OF THE CONNECTING EYE-PLATE OF THE BUCKET WHEEL BOOM HOISTING SYSTEM, 50-th Anniversary of the faculty of technical sciences, Novi Sad, 2010.
- [5.] *Bošnjak S., Zrnić N., Oguamanam D.*; ON THE DYNAMIC MODELLING OF BUCKET WHEEL EXCAVATORS, Mašinski fakultet u Beogradu, FME transaction 34, Beograd, 2006.
- [6.] *Brčić V., Čukić R.*; EKSPERIMENTALNE METODE U PROJEKTOVANJU KONSTRUKCIJA, Beograd, 1998.
- [7.] *Braja M.D.*; PRINCIPLES OF GEOTECHNICAL ENGINEERING, Seven edition, Nevada, USA, 2013.
- [8.] *Brkić A., Manevski T., Ignjatović D., Jovančić P., Spasojević-Brkić V.*; DIAGNOSTICS OF BUCKET WHEEL EXCAVATOR DISCHARGE BOOM DYNAMIC PERFORMANCE AND ITS RECONSTRUCTION, Eksploatacija i Niezawodnosc-Maintenance and Reliability, Vol. 16, 2014.
- [9.] *Cvetković M., Popović R., Majstorović J.*; GEOMEHANIČKA ISTRAŽIVANJA U FAZI EKSPLOATACIJE I NJIHOV ZNAČAJ, I Međunarodno savetovanje o površinskoj eksploataciji uglja UGALJ 1998, Beograd, 1998.
- [10.] *Čebašek V., Gojković N., Miladinović M.*; RAČUNARSKI PROGRAMI ZA PROJEKTOVANJE I MODELIRANJE U RUDARSTVU, Podzemni radovi 19, Beograd, 2011.

- [11.] Čebašek V., Gojković N.; ANALIZA STABILNOSTI KOSINA METODOM KONAČNIH ELEMENATA, IV Međunarodna Konferencija UGALJ 2008, Beograd, 2008.
- [12.] Домбровски Н. Г.; МНОГОКОВШОВЫЕ ЭКСКАВАТОРЫ, Издательство Машиностроение, Moskva, 1972.
- [13.] Gojković N., Obradović R., Čebašek V.; GEOMEHANIČKA SVOJSTVA MATERIJALA ODLAGALIŠTA POVRŠINSKIH KOPOVA, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, 2008.
- [14.] Gojković N., Obradović R., Čebašek V.; STABILNOST KOSINA POVRŠINSKIH KOPOVA, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, 2004.
- [15.] Gojković N., Obradović R., Čebašek V.; STABILNOST ODLAGALIŠTA POVRŠINSKIH KOPOVA, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, 2008.
- [16.] Golosinski T. S., Singhal R. K.; PRODUCTIVITY FROM BUCKET WHEEL EXCAVATORS, World Mining Equipment, Tehnical publishing, septembar, 1985.
- [17.] Gottvald J.; ANALYSIS OF VIBRATIONS OF BUCKET WHELL EKCAVATOR SchRs-1320 DURING MINING PROCESS, Mašinski fakultet u Beogradu, FME transaction 40, Beograd, 2012.
- [18.] Götze U., Northcott D., Schuster P.; INVESTMENT APPRAISAL: METHODS AND MODELS, Springer, London, 2015.
- [19.] Ignjatović D., Petrović B., Jovančić P., Bošković S.; IMPACT OF THE BUCKET WHEEL SUPPORT AT TECHNICAL PARAMETERS OF THE BLOCK AND BUCKET WHEEL EXCAVATOR CAPACITY, Proceedings of the 12th international symposium continuous surface mining-Aachen 2014., 73-81, Aachen, 2015.
- [20.] Ilić L.J.; UTICAJ GEOMEHANIČKIH KARAKTERISTIKA NA IZBOR BAGERA, IV Jugoslovenski naučno-stručni skup sa međunarodnim učešćem MEHANIZACIJA U RUDARSTVU-proizvodnja, primena i održavanje, Beograd, 1995.

- [21.] *Jakovljević I.* ; ODREĐIVANJE OPTIMALNIH PARAMETARA ROTORNIH BAGERA U FUNKCIJI OTPORA NA KOPANJE, Doktorska disertacija, Beograd, 2008.
- [22.] *Jordan D. Bradford, Miller W. Thomas, Dolvin D. Steven,*; FUNDAMENTALS OF INVESTMENTS : VALUATION AND MANAGEMENT, *McGraw-Hill*, New York, 2015.
- [23.] *Kovačević S.*; TEHNIČKO-TEHNOLOŠKI ZAHTEVI ZA KONSTRUISANJE ROTORNOG BAGERA POGODNOG ZA POVRŠINSKE KOPOVE LIGNITA U SRBIJI, IV Jugoslovenski naučno-stručni skup sa međunarodnim učešćem MEHANIZACIJA U RUDARSTVU-proizvodnja, primena i održavanje, Beograd, 1995.
- [24.] *Kričković V.* ; MAŠINE ZA POVRŠINSKU EKSPLOATACIJU UGLJA, KOSTOLAČKI UGLJENI BASEN, JP Elektroprivreda Srbije, Beograd, 2011.
- [25.] *Kun J.* ; POVRŠINSKA EKSPLOATACIJA LIGNITA, Rudarski Institut Zemun, Beograd , 1981.
- [26.] *Larrabee T. D., Voss A. J.*; VALUATION TECHNIQUES: DISCOUNTED CASH FLOW, EARNINGS QUALITY, MEASURES OF VALUE ADDED, AND REAL OPTIONS, *CFA Institute*, New York, 2013.
- [27.] *Lazić A.*; PROJEKTOVANJE POVRŠINSKIH KOPOVA SA MODELIRANJEM SISTEMA EKSPLOATACIJE, Beograd, 2006.
- [28.] *Makar M.* ; TEORIJA BAGEROVANJA ROTORNIM BAGERIMA, Rudarski Institut Zemun, Beograd , 1990.
- [29.] *Maksimović M.* ; MEHANIKA TLA, Četvrto izdanje, Beograd, 2008.
- [30.] *Maksimović M.* ; MEHANIKA TLA, Beograd, 1995.
- [31.] *Maneski T.*; KOMIPS KOMPJUTERSKO MODELIRANJE I PRORAČUN STRUKTURA, Monografija, Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, 1998, ISB, 20, 2(2013)
- [32.] *Maneski, T., Milošević-Mitić, V.*; NUMERICAL AND EXPERIMENTAL DIAGNOSTIC OF STRUCTURAL STRENGTH. // Structural integrity and life, 10, 1(2010), pp. 3-10.

- [33.] *Meyer T.*; MINING AND HAULAGE OF COAL IN OPEN PIT MINES PARTICULARLY WITH REGARD TO SELECTIVE MINING, International Workshop Coal Quality Management-MAREN 2011, Lazarevac, 2011.
- [34.] *Nonveiller E.*; MEHANIKA TLA I TEMELJENJE GRAĐEVINA, Zagreb, 1979.
- [35.] *Pavlović V.* ; SISTEMI POVRŠINSKE EKSPLOATACIJE, Rudarsko-geološki fakultet u Beogradu, 1998.
- [36.] *Pavlović V.* ; TEHNOLOGIJA POVRŠINSKOG OTKOPAVANJA, Rudarsko-geološki fakultet u Beogradu, 1992.
- [37.] *Pavlović V., Ignjatović D.*; SELEKTIVNA POVRŠINSKA EKSPLOATACIJA UGLJA KONTINUALNIM SISTEMIMA, Rudarsko-geološki fakultet u Beogradu, 2012.
- [38.] *Pavlović V., Ignjatović D., Stepanović S., Petrović B.*; METODOLOGIJA IZBORA ROTORNOG BAGERA ZA SELEKTIVNU EKSPLOATACIJU UGLJA, VI Međunarodna Konferencija UGALJ 2013, Zlatibor, 2013.
- [39.] *Pavlović V., Kolonja B., Ignjatović D., Životić D., Jovančić P., Šubaranović T., Stepanović S., Dimitrijević B.* ; STRATEGIJA UPRAVLJANJA MINERALNIM RESURSIMA UGLJA U KOLUBARSKOM I KOSTOLAČKOM BASENU ZA PERIOD DO KRAJA 2017. GODINE, Beograd, 2012.
- [40.] *Pavlović V., Kolonja B., Lilić N., i dr.* ; IZBOR OTKOPNO-TRANSPORTNO-ODLAGALIŠNE OPREME PRI SELEKTIVNOM OTKOPAVANJU UGLJENIH SERIJA, Studija, Rudarsko-geološki fakultet u Beogradu, 2010.
- [41.] *Pavlović V., Kolonja B., Ignjatović D., i dr.* ; STRATEGIJA UPRAVLJANJA MINERALNIM RESURSIMA U REPUBLICI SRBIJI, Beograd, 2011.
- [42.] *Petrović B., Radisavljević Z., Milošević D.*; ZNAČAJ ANALIZE STABILNOSTI KOSINA ZA PROCES EKSPLOATACIJE UGLJA U RB KOLUBARA, VI Međunarodna Konferencija UGALJ 2013, Zlatibor, 2013.
- [43.] *Petrović B.*; GEOMEHANIČKI PROCESI PRI POVRŠINSKOJ I PODZEMNOJ EKSPLOATACIJI LEŽIŠTA VENČAC-ARANĐELOVAC, Magistarska teza, Beograd, 1994.
- [44.] *Polovina D.* ; ISTRAŽIVANJE UZAJAMNOG UTICAJA KONSTRUKCIJE TOČKA I STRELE ROTORNOG BAGERA I NJIHOVE POUZDANOSTI, Magistarska teza, Beograd, 1999.

- [45.] *Popović N.* ; NAUČNE OSNOVE PROJEKTOVANJA POVRŠINSKIH KOPOVA, Udžbenik, Sarajevo, 1984.
- [46.] *Roje-Bonaci T.*; MEHANIKA TLA, Sveučilište u Splitu, Građevinsko-arhitektonski fakultet, 2007.
- [47.] *Rudenno V.*; THE MINING VALUATION HANDBOOK: MINING AND ENERGY VALUATION FOR INVESTORS AND MANAGEMENT, *Wiley*, New York, 2012.
- [48.] *Sedaghati R., Suleman A., Tabarrok B.*; STRUCTURAL OPTIMIZATION WITH FREQUENCY CONSTRAINTS USING THE FINITE ELEMENT FORCE METHOD, *AIAA Journal*, 40, 2(2002)
- [49.] *Selimović M.* ; MEHANIKA TLA I TEMELJENJE, Mostar, 2000.
- [50.] *Sergeyev O., Mroz Z.*; SENSITIVITY ANALYSIS AND OPTIMAL DESIGN OF 3D FRAME STRUCTURES FOR STRESS AND FREQUENCY CONSTRAINTS, *Computers and Structures*, 75, 2(2000)
- [51.] *Simonović M.* ; BAGERI I, Rudarsko-geološki fakultet u Beogradu, 1987.
- [52.] *Simonović M., Stojanović D., Ignjatović D., Ivković S.*; ISTRAŽIVANJE I UTVRĐIVANJE TEHNOLOŠKO-TEHNIČKIH OSNOVA ZA PROJEKTOVANJE ROTORNIH BAGERA ZA OTKOPAVANJE OTKRIVKE I UGLJA NA POVRŠINSKIM OTKOPIMA SR SRBIJE, Studija, Rudarsko-geološki fakultet u Beogradu, 1988.
- [53.] *Stević M.*; MEHANIKA TLA I STIJENA, Rudarsko-geološki fakultet u Tuzli, 1991.
- [54.] Tehnička dokumentacija JP ELEKTROPRIVREDA SRBIJE.
- [55.] Tehnička dokumentacija O & K (Nemačka).
- [56.] Tehnička dokumentacija PD RB KOLUBARA.
- [57.] Tehnička dokumentacija PD TE-KO KOSTOLAC.
- [58.] Tehnička dokumentacija TAKRAF-a (Nemačka).
- [59.] Tehnička dokumentacija THYSSENKRUPP (Essen, Nemačka).

- [60.] *Tong W. H., Liu G. R.*; AN OPTIMIZATION PROCEDURE FOR TRUSS STRUCTURE WITH DISCRETE DESIGN VARIABLES AND DYNAMIC CONSTRAINTS, *Computers and Structures*, 79, 2(2001)
- [61.] *Tong W.H., Jiang J. S., Liu G. R.*; SOLUTION EXISTENCE OF THE OPTIMIZATION PROBLEM OF TRUSS STRUCTURE WITH FREQUENCY CONSTRAINTS, *International Journal of Solids and Structures*, 37, 30(2000)
- [62.] *Trisović N., Maneski T., Kozak D.*; DEVELOPED PROCEDURE FOR DYNAMIC N 86-7083-319-0.
- [63.] *Trisović N.*; MODIFIKACIJA DINAMIČKIH KARAKTERISTIKA U STRUKTURALNOJ REANALIZI DINAMIČKIH SISTEMA, Doktorska teza, Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, 2007.
- [64.] *Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet*, USKLADIVANJE KAPACITETA TRANSPORTNOG SISTEMA ZA OTKRIVKU P.K. TAMNAVA-ZAPADNO POLJE, Beograd, 2003.
- [65.] *Vattenfall Europe Mining Consulting, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet*; IDEJNI PROJEKAT SA STUDIJOM EKONOMSKE OPRAVDANOSTI EKSPLOATACIJE UGLJA NA P.K. RADLJEVO, Elektroprivreda Srbije, Beograd, 2010.
- [66.] *Veljković N.*; DEVELOPMENT OF CONTINUOUS MINING MACHINES AT EPS LIGNITE MINES AND ITS APPLICATION IN VIEW OF SELECTIVE MINING, VI Međunarodna Konferencija UGALJ 2013, Zlatibor, 2013.
- [67.] *Vladić J., Đokić R, Kljajin M., Karakašić M.*; MODELLING AND SIMULATIONS OF ELEVATOR DYNAMIC BEHAVIOUR, *Tehnicky vjesnik - Technical Gazette*, 18, 3(2011)
- [68.] *Vučetić A., Vučetić S., Pešić M.*; TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA OPTIMALNOG IZBORA OPREME POVRŠINSKOG KOPA UGLJA, X Međunarodna Konferencija o površinskoj eksploataciji OMC 2012, Zlatibor, 2012.

12. BIOGRAFIJA AUTORA

Mr Branko M. Petrović, dipl. inž. rudarstva rođen je 19.08.1963. godine u Beogradu, gde je završio osnovnu i srednju školu. Školske 1982/83. godine upisao je Rudarski odsek Rudarsko-geološkog fakulteta u Beogradu, gde je odbranom diplomskog rada 1988. godine na Katedri za površinsku eksploataciju mineralnih sirovina stekao zvanje diplomiranog inženjera rudarstva. Magistarski rad pod nazivom *Geomehanički procesi pri površinskoj i podzemnoj eksploataciji mermera ležišta Venčac-Arandelovac*, uspešno je odbranio januara 1995. godine na istom fakultetu.

Položio je Stručni ispit 1993.godine iz oblasti rudarstva.

Uža specijalnost mu je površinska eksploatacija mineralnih sirovina, oblast geomehanika.

Nakon diplomiranja zaposlio se u Obrazovnom centru Lazarevac gde je predavao predmete iz oblasti rudarstva. Tokom 1990. godine prelazi na Rudarsko-geološki fakultet u Beogradu gde je radio kao asistent na predmetu *Geomehanika*. U *Rudarski basen Kolubara* prelazi 1997. godine gde je obavljao različite poslove: – inženjer za geomehaniku, glavni inženjer za geomehaniku, direktor dela preduzeća *Kolubara-Projekt*, projekt menadžer *POLJA E*, pomoćnik direktora za investicije, razvoj i unapređenje proizvodnje. Od 2005. godine član je menadžmenta kompanije *Stone Word international Inc.* iz Finiksa (SAD). Takođe, od 2013. godine član je Nadzornog odbora *JP PEU RESAVICA*.

Mr Branko Petrović je učestvovao u izradi i realizaciji velikog broja studija i projekata (oko 50), a na domaćim i međunarodnim skupovima, kao i u časopisima objavio je preko 30 naučno-stručna rada, od toga dva rada na SCI listi. Posebno treba istaći njegov doprinos u izradi brane *PRVONEK* (ispitivanje primeraka stena, etapa izgradnje 2-temeljni ispust i vodozahvat, 1992.godine), sanaciji klizišta na severo-zapadnoj kosini *POLJA B*, *P.K. GRAČANICA-GACKO* (2004.godine), izradi *PRELIMINARY STUDY* i otvaranja površinskog kopa oniksa u Arizoni (USA, 2005.godine), izradi predloga rešenja sanacije unutrašnjeg odlagališta *P.K. POLJE B - R.B. KOLUBARA* (2006. godine), razvoju eksploatacije

peščara ležišta *FOSSIL CREEK* u New Mexiko (USA, 2012.godine), kao i pri sanaciji kosina odlagališta PK TAMNAVA-ZAPADNO POLJE pri ispumpavanju vode iz kopa (2014. godine).

U navedenim radovima težište interesovanja bilo je vezano za stabilnost kosina površinskih kopova, kao i uticaj uslova radne sredine na izbor mehanizacije na površinskim kopovima.

U periodu od 2002. do 2014. godine bio je i stručni izvestilac Komisije za utvrđivanje i overu rezervi mineralnih sirovina Republike Srbije pri Ministarstvu rudarstva i energetike Republike Srbije.

Sa porodicom živi u Lazarevcu.

13. PRILOZI

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани-а _____ Бранко М. Петровић

број индекса _____ Р 209 _____

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Оптимизација дужине стреле роторних багера у функцији стабилности

косина и ефективности рада на површинским коповима лигнита Србије

- 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, _____ 05.05.2016.

_____ 

Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Бранко М. Петровић

Број индекса P209

Студијски програм Рударско инжењерство

Наслов рада Оптимизација дужине стреле роторних багера у функцији стабилности косина и ефективности рада на површинским коповима лигнита Србије

Ментор Доц. др Владимир Чебашек

Потписани/а Бранко М. Петровић

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.

Потпис докторанда

У Београду, 05.05.2016.



Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Оптимизација дужине стреле роторних багера у функцији стабилности

косина и ефективности рада на површинским коповима лигнита Србије

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).

У Београду, 05.05.2016.

Потпис докторанда



1. Ауторство - Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. Ауторство – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.