

**UNIVERZITET U BEOGRADU**

**TEHNIČKI FAKULTET U BORU**

Jovica J. Radisavljević

**PRILOG VREDNOVANJU UTICAJNIH  
FAKTORA NA INTENZITET SEIZMIČKIH  
POTRESA IZAZVANIH MINIRANJEM  
PRIMENOM VEŠTAČKIH NEURONSKIH  
MREŽA**

Doktorska disertacija

Bor, 2024

**UNIVERSITY OF BELGRADE  
TECHNICAL FACULTY IN BOR**

Jovica J. Radisavljević

**CONTRIBUTION TO THE  
EVALUATION OF INFLUENCING  
FACTORS ON THE INTENSITY OF BLAST  
INDUCED GROUND VIBRATIONS WITH  
THE APPLICATION OF ARTIFICIAL  
NEURAL NETWORKS**

Doctoral dissertation

Bor, 2024

**Mentor:**

Dr Radoje Pantović, redovni profesor  
Tehnički fakultet u Boru,  
Univerzitet u Beogradu

**Članovi komisije:**

Dr Lazar Kričak, redovni profesor  
Rudarsko-geološki fakultet,  
Univerzitet u Beogradu

Dr Saša Stojadinović, redovni profesor  
Tehnički fakultet u Boru,  
Univerzitet u Beogradu

Dr Dejan Tanikić, redovni profesor  
Tehnički fakultet u Boru,  
Univerzitet u Beogradu

**Datum odbrane:** \_\_\_\_ . \_\_\_\_ . 2024. godine

## REZIME

Doktorska disertacija predstavlja prilog vrednovanju pojedinačnih uticaja faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla izazvanih miniranjima, upotrebom pouzdanog sistema za prognozu intenziteta seizmičkih potresa. Pouzdan sistem, u ovom slučaju, bila je obučena i verifikovana veštačka neuronska mreža.

Polazne osnove za razvoj modela bile su zakon oscilovanja tla i skup ulazno-izlaznih podataka miniranih serija na površinskom kopu Veliki Krivelj. Skup ulazno-izlaznih podataka sadrži vrednosti faktora seizmičkih potresa pojedinačnih minskih serija, rastojanje minskih serija do mernih mesta i izmerene brzine oscilovanja tla prilikom miniranja tih serija.

Prvo je izvršena obuka i verifikacija veštačke neuronske mreže, čime je dobijen pouzdan sistem za predviđanje intenziteta seizmičkih potresa izazvanih miniranjima. Obučena i verifikovana mreža je korišćena za postizanje pomenutog cilja.

Formirani su dijagrami zavisnosti između pojedinačnih faktora seizmičkih potresa i brzine oscilovanja tla. Zavisnosti su predstavljene jednačinama regresionih linija uz odgovarajuću vrednost koeficijenta determinacije  $R^2$ . Zatim je kroz rad utvrđen i vrednovan uticaj svakog faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla, određivanjem vrednosti koeficijenta uticaja. Upoređenjem koeficijenta uticaja pojedinih faktora seizmičkih potresa dobijen je i njihov redosled uticaja na brzinu oscilovanja tla. Za uslove na razmatranoj lokaciji najveći uticaj ima rastojanje minske serije do mernog mesta ( $R$ ), zatim maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom nominalnom vremenu iniciranja ( $Q_i$ ) i maksimalna masa eksploziva inicirana u jednom vremenskom intervalu od 8 milisekundi ( $Q_{8ms}$ ). Slede srednje mase eksploziva u minskim bušotinama ( $Q_{bsr}$ ), koeficijent punjenja minskih bušotina ( $K_p$ ), ukupne mase eksploziva u minskoj seriji ( $Q_{buk}$ ) itd.

Rezultat predstavljen ovom disertacijom je model dobijen kombinacijom terenskih istraživanja i sposobnosti neuronskih mreža da reše složenije problema koji uključuju brojne faktore od kojih zavisi ishod ili rezultat. Model je kasnije poslužio za formiranje algoritma primenljivog na površinskim kopovima, koji u tehnološkom lancu imaju fazu bušenja i miniranja, uz neophodnost korišćenja izvornih podataka ulazno-izlaznog skupa.

**Ključne reči:** Brzina oscilovanja tla, ANN, koeficijent determinacije  $R^2$

**Naučna oblast:** Rudarstvo

**UDK:**

## ABSTRACT

The Ph.D. dissertation represents a contribution to the evaluation of individual effects of ground vibration factors on the peak particle velocity caused by blasting, using a reliable system for predicting the intensity of ground vibrations. The reliable system in this case was a trained and verified ANN (Artificial Neural Network).

The starting bases for the development of the model were the propagation law, and the dataset of blasted patterns at the "Veliki Krivelj" open pit. The dataset contains the values of ground vibration parameters of individual blast patterns, the distance of blast patterns from the measuring points, and the measured peak particle velocities during the blasting of those patterns. First, training and verification of the artificial neural network were performed, which resulted in a reliable system for predicting the intensity of seismic vibrations caused by blasting. The trained and verified network was used to achieve the aforementioned primary goals.

Diagrams showing the dependency between individual factors of ground vibrations and peak particle velocity were formed. Dependencies are represented by regression line equations with the corresponding value of the coefficient of determination  $R^2$ . Then, the influence of each ground vibration factor on the peak particle velocity was determined and evaluated through the paper, by determining the value of the influence coefficient. By comparing the influence coefficient of individual ground vibration factors, their order of influence on the peak particle velocity was obtained. For the conditions at the considered location, the greatest influence is the distance of the blast pattern from the measuring point ( $R$ ), then the maximum charge weight initiated within a nominal delay ( $Q_i$ ) and the maximum charge weight initiated within a delay of 8 milliseconds ( $Q_{8ms}$ ). After that, the average charge weight in blastholes ( $Q_{bsr}$ ), the drill holes charging coefficient ( $K_p$ ), the total charge weight in a blast pattern ( $Q_{buk}$ ), etc.

The result of research through the dissertation is a model obtained by a combination of field research and the ability of neural networks needed to solve more complex problems that include numerous factors on which the outcome or result depends. The model was later used for the formation of the algorithm, which can be applied to open pits that have a drilling and blasting phase in the technological chain, with the necessity of using the original data of the dataset.

**Key words:** Peak particle velocity, ANN, coefficient of determination  $R^2$

**Scientific field:** Mining

**UDK:**

# Sadržaj

<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
1.1. Predmet istraživanja .....	2
1.2. Cilj istraživanja.....	3
1.3. Polazne postavke u istraživanju .....	4
1.4. Naučne metode istraživanja.....	4
<b>2. DROBEĆE I SEIZMIČKO DEJSTVO MINIRANJA NA POVRŠINSKIM KOPOVIMA .....</b>	<b>6</b>
2.1. Faze drobljenja stenske mase .....	6
2.2. Drobljenje stenske mase u neograničenoj sredini .....	8
2.3. Drobljenje stenske mase u ograničenoj sredini.....	9
2.4. Vrste seizmičkih talasa .....	11
2.5. Seizmički efekat miniranja .....	14
2.6. Raspodela energije eksploziva prilikom miniranja.....	14
<b>3. EMPIRIJSKI MODELI ZA PROGNOZU BRZINE OSCILOVANJA TLA PRI IZVOĐENJU MINIRANJA .....</b>	<b>16</b>
<b>4. FAKTORI KOJI UTIČU NA KARAKTERISTIKE SEIZMIČKIH POTRESA UZROKOVANIH MINIRANJIMA .....</b>	<b>20</b>
<b>5. PRIMENA VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA KOD REŠAVANJA PRAKTIČNIH PROBLEMA U RUDARSTVU.....</b>	<b>25</b>
5.1. Modeli prognoze seizmičkih potresa na bazi ANN.....	25
5.2. Primena ANN kod rešavanja ostalih problema u rudarstvu .....	38
<b>6. OPIS LOKACIJE I PRIKUPLJANJE PODATAKA SA TERENA .....</b>	<b>40</b>
6.1. Osnovni podaci o površinskom kopu Veliki Krivelj .....	40
6.2. Tehnologija bušenja i miniranja.....	43
6.3. Prikupljanje podataka o miniranjima .....	46
6.4. Prikupljanje podataka o položajima minskih serija .....	48
6.5. Prikupljanje podataka o brzinama oscilovanja tla .....	48

6.6. Formiranje ulazno-izlaznog skupa podataka .....	50
<b>7. UTVRĐIVANJE UTICAJA POJEDINAČNIH FAKTORA SEIZMIČKIH POTRESA NA BRZINU OSCILOVANJA TLA PRIMENOM STATISTIČKIH METODA .....</b>	<b>51</b>
7.1 Metodologija utvrđivanja uticaja faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja primenom statističkih metoda .....	51
7.1.1 Uticaj maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom nominalnom vremenu iniciranja na brzinu oscilovanja tla .....	53
7.1.2 Uticaj maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom vremenskom intervalu od 8ms na brzinu oscilovanja tla .....	55
7.1.3. Uticaj srednjih masa eksploziva po minskoj bušotini na brzinu oscilovanja tla .....	57
7.1.4. Uticaj ukupnih masa eksploziva u minskoj seriji na brzinu oscilovanja tla.....	59
7.1.5. Uticaj broja bušotina u minskoj seriji na brzinu oscilovanja tla .....	61
7.1.6. Uticaj ukupne dužine bušotina u minskoj seriji na brzinu oscilovanja tla .....	63
7.1.7. Uticaj koeficijenta punjenja bušotina na brzinu oscilovanja tla.....	65
7.1.8. Uticaj rastojanja minske serije do mernih mesta na brzinu oscilovanja tla.....	67
7.2. Analiza uticaja faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla primenom statističkih metoda.....	69
<b>8. OSNOVE TEORIJE VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA (ANN).....</b>	<b>70</b>
<b>9. OBUKA I VALIDACIJA ANN U CILJU VREDNOVANJA UTICAJA FAKTORA INTENZITETA SEIZMIČKIH POTRESA .....</b>	<b>76</b>
9.1. Upotreba ANN u cilju predviđanja brzina oscilovanja tla za uslove miniranja na površinskom kopu Veliki Krivelj .....	76
9.2. Određivanje dozvoljene greške i vrednosti standardne devijacije za interval poverenja 95% .....	78
9.3. Priprema mreže za obuku .....	79
9.4. Obuka mreže.....	83
9.5 Verifikacija mreže .....	86
<b>10. VREDNOVANJE UTICAJA FAKTORA SEIZMIČKIH POTRESA NA BRZINU OSCILOVANJA TLA PRIMENOM VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA .....</b>	<b>91</b>

10.1 Metodologija vrednovanja uticaja faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla.....	91
10.2 Pojedinačni uticaj faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla primenom veštačkih neuronskih mreža .....	95
10.2.1 Uticaj maksimalnih masa eksploziva iniciranih u jednom nominalnom vremenu iniciranja na brzinu oscilovanja tla .....	95
10.2.2 Uticaj maksimalnih masa eksploziva iniciranih u jednom vremenskom intervalu od 8ms na brzinu oscilovanja tla.....	97
10.2.3 Uticaj srednje mase eksploziva po bušotini na brzinu oscilovanja tla.....	99
10.2.4 Uticaj ukupnih masa eksploziva u minskoj seriji na brzinu oscilovanja tla.....	100
10.2.5 Uticaj broja bušotina u minskoj seriji na brzinu oscilovanja tla.....	102
10.2.6 Uticaj ukupnih dužina bušotina u minskoj seriji na brzinu oscilovanja tla .....	103
10.2.7 Uticaj koeficijenta punjenja minskih bušotina na brzinu oscilovanja tla .....	105
10.2.8 Uticaj rastojanja minskih serija do mernih mesta na brzinu oscilovanja tla.....	106
10.3 Analiza uticaj faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla primenom veštačkih neuronskih mreža .....	108
<b>11. ANALIZA I DISKUSIJA REZULTATA ISTRAŽIVANJA .....</b>	<b>110</b>
<b>12. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>115</b>
<b>13. LITERATURA .....</b>	<b>119</b>
<b>PRILOZI.....</b>	<b>124</b>



## **POPIS SLIKA DATIH U TEKSTU**

<i>Slika 1</i> – Zone dejstva eksplozije u neograničenoj sredini.....	9
<i>Slika 2</i> – Prostiranje uzdužnih talasa i način oscilovanja čestica tla.....	12
<i>Slika 3</i> – Prostiranje poprečnih talasa i način oscilovanja čestica tla.....	12
<i>Slika 4</i> – Prostiranje rejli seizmičkih talasa i način oscilovanja čestica tla .....	13
<i>Slika 5</i> – Ilustracija delovanja usporenja između redova.....	24
<i>Slika 6</i> – Relativni uticaj faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla i frekvenciju na rudniku „Jaiant“.....	28
<i>Slika 7</i> – RSE faktora seizmičkih potresa u podzemnom rudniku u Boru.....	31
<i>Slika 8</i> – Uticaj faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla na kamenolomima u Indiji.....	34
<i>Slika 9</i> – Saobraćajno-geografska karta područija severoistočne Srbije.....	41
<i>Slika 10</i> – Izgled površinskog kopa Veliki Krivelj .....	42
<i>Slika 11</i> – Šema iniciranja sa 4 reda i 14 bušotina u redu.....	45
<i>Slika 12</i> – Položaj minskih serija i mernih mesta sistema monitoringa.....	47
<i>Slika 13</i> – Zavisnost maksimalnih masa eksploziva iniciranih u jednom nominalnom vremenu iniciranja i maksimalne izmerene brzine oscilovanja.....	53

<i>Slika 14</i> – Promena srednjih vrednosti maksimalnih masa eksploziva iniciranih u jednom nominalnom vremenu iniciranja i srednjih vrednosti brzina oscilovanja tla za osam opsega .....	54
<i>Slika 15</i> – Zavisnost maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom vremenskom intervalu od 8 ms i maksimalne izmerene brzine oscilovanja.....	55
<i>Slika 16</i> – Promena srednjih vrednosti maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom vremenskom intervalu od 8 ms i srednjih vrednosti brzine oscilovanja tla za osam opsega.....	56
<i>Slika 17</i> – Zavisnost srednjih masa eksploziva po bušotini i maksimalne izmerene brzine oscilovanja.....	57
<i>Slika 18</i> – Promena srednjih vrednosti mase eksploziva po bušotini i srednjih vrednosti brzina oscilovanja tla za osam opsega.....	58
<i>Slika 19</i> – Zavisnost ukupnih masa eksploziva u minskoj seriji i maksimalne izmerene brzine oscilovanja.....	59
<i>Slika 20</i> – Promena srednjih vrednosti ukupnih masa eksploziva u minskoj seriji i srednjih vrednosti brzina oscilovanja tla za osam opsega .....	60
<i>Slika 21</i> – Zavisnost broja bušotina u minskoj seriji i maksimalne izmerene brzine oscilovanja.....	61
<i>Slika 22</i> – Promena srednjih vrednosti broja bušotina u minskoj seriji i srednjih vrednosti brzina oscilovanja tla za osam opsega.....	62
<i>Slika 23</i> – Zavisnost ukupne dužine bušotina u minskoj seriji i maksimalne izmerene brzine oscilovanja.....	63

<i>Slika 24</i> – Promena srednjih vrednosti ukupne dužine bušotina u minskoj seriji i srednjih vrednosti brzine oscilovanja tla za osam opsega.....	64
<i>Slika 25</i> – Zavisnost koeficijenta punjenja i maksimalne izmerene brzine oscilovanja.....	65
<i>Slika 26</i> – Promena srednjih vrednosti koeficijenta punjenja i srednjih vrednosti brzine oscilovanja tla za osam opsega.....	66
<i>Slika 27</i> – Zavisnost rastojanja minske serije do mernog mesta i maksimalne izmerene brzine oscilovanja.....	67
<i>Slika 28</i> – Promena srednjih vrednosti rastojanja minske serije do mernog mesta i srednjih vrednosti brzine oscilovanja tla za osam opsega.....	68
<i>Slika 29</i> – Dijagram uticaja faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla na bazi statističke obrade podataka za uslove na površinskom kopu Veliki Krivelj.....	69
<i>Slika 30</i> – Biološki neuron.....	71
<i>Slika 31</i> – Veštački neuron.....	71
<i>Slika 32</i> – Jednoslojna arhitektura mreže.....	73
<i>Slika 33</i> – Višeslojna arhitektura mreže.....	73
<i>Slika 34</i> – Grafički prikaz nekih od aktivacionih funkcija.....	74
<i>Slika 35</i> – Arhitektura predložene mreže.....	81
<i>Slika 36</i> – Relativni uticaj faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla pre obuke mreže.....	83
<i>Slika 37</i> – Urađena podešavanja, arhitektura mreže i vrednost MSE .....	83

<i>Slika 38</i> – Opcija Probe za korišćenje u realnom vremenu .....	84
<i>Slika 39</i> – Dijagram raspodele greške .....	84
<i>Slika 40</i> – Standardna devijacija $\delta$ za interval poverenja 95% .....	85
<i>Slika 41</i> – Relativni uticaj faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla nakon obuke mreže .....	85
<i>Slika 42</i> – Dijagram $V_{izmer}$ , $V_{ANN}$ mreže za verifikaciju.....	86
<i>Slika 43</i> – Zakon oscilovanja za ukupne mase eksploziva u minskoj seriji.....	88
<i>Slika 44</i> – Dijagram $V_{izmer}$ , $V_{zak}$ za ukupne mase eksploziva na osnovu zakona oscilovanja .....	88
<i>Slika 45</i> – Zakon oscilovanja za maksimalne mase eksploziva inicirane u intervalu od 8ms.....	89
<i>Slika 46</i> – Dijagram $V_{izmer}$ , $V_{zak}$ za za maksimalne mase eksploziva inicirane u intervalu od 8ms na osnovu zakona oscilovanja .....	89
<i>Slika 47</i> – Zakon oscilovanja za maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom nominalnom vremenu usporenja.....	90
<i>Slika 48</i> – Dijagram $V_{izmer}$ , $V_{zak}$ za maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom nominalnom vremenu usporenja na osnovu zakona oscilovanja .....	90
<i>Slika 49</i> – Algoritam primenjene metodologije utvrđivanja uticaja faktora seizmičkih potresa na maksimalnu brzinu oscilovanja tla.....	94
<i>Slika 50</i> – Uticaj maksimalnih masa eksploziva iniciranih u jednom nominalnom vremenu iniciranja na brzinu oscilovanja tla za uslove na površinskom kopu Veliki Krivelj.....	96

<i>Slika 51</i> – Uticaj maksimalnih masa eksploziva iniciranih u vremenskom intervalu od 8ms na brzinu oscilovanja tla za uslove na površinskom kopu Veliki Krivelj.....	98
<i>Slika 52</i> – Uticaj srednjih vrednosti mase eksploziva po bušotini $Q_{bsr}$ na brzinu oscilovanja tla za uslove na površinskom kopu Veliki Krivelj.....	99
<i>Slika 53</i> – Uticaj ukupnih masa eksploziva u minskoj seriji na brzinu oscilovanja tla za uslove na površinskom kopu Veliki Krivelj.....	101
<i>Slika 54</i> – Uticaj broja bušotina u minskoj seriji na brzinu oscilovanja tla za uslove na površinskom kopu Veliki Krivelj.....	102
<i>Slika 55</i> – Uticaj ukupne dužine bušotina u minskoj seriji na brzinu oscilovanja tla za uslove na površinskom kopu Veliki Krivelj.....	104
<i>Slika 56</i> – Uticaj koeficijenta punjenja bušotina na brzinu oscilovanja tla za uslove na površinskom kopu Veliki Krivelj.....	105
<i>Slika 57</i> – Uticaj rastojanja minskih serija do mernih mesta na brzinu oscilovanja tla za uslove na površinskom kopu Veliki Krivelj.....	107
<i>Slika 58</i> – Dijagram uticaja faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla za uslove na površinskom kopu Veliki Krivelj.....	108
<i>Slika 59</i> – Relativni uticaji faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla izraženi u procentima.....	111

## **POPIS TABELA DATIH U TEKSTU**

Tabela 1 – Raspodela energije po Berti.....	15
Tabela 2 – Modeli prognoze potresa po Siskindu.....	18
Tabela 3 – Pregled empirijskih modela za prognozu brzine oscilovanja tla.....	19
Tabela 4 – Stepen uticaja pojedinih parametara seizmičkih potresa na intenzitet seizmičkog potresa.....	24
Tabela 5 – Vrednosti i MAE za različite modele predviđanja brzine oscilovanja na rudniku „Jaiant“ .....	27
Tabela 6 – Vrednosti $R^2$ , MAPE, MEDEA i VAF za različite modele predviđanja brzine oscilovanja tla u podzemnom rudniku u Boru.....	30
Tabela 7 – Vrednosti $R^2$ , MAE, RMSE, RSR i d za različite modele predviđanja brzine oscilovanja tla na kamenolomima u Indiji.....	33
Tabela 8 – Novi radovi na predviđanju brzine oscilovanja tla sa korišćenjem mekog računarstva .....	37
Tabela 9 – Geometrijske karakteristike površinskog kopa Veliki Krivelj.....	42
Tabela 10 – Karakteristike eksploziva.....	44
Tabela 11 – Parametri miniranja za prečnik 251 mm eksploziv SLURRY.....	44
Tabela 12 – Parametri miniranja za prečnik 251 mm eksploziv AN-FO.....	45
Tabela 13 – Kordinate mernih mesta.....	49

Tabela 14 – Raspored instaliranih akcelometara, monitoring sistema na mernim mestim.....	49
Tabela 15 – Plan i rezultati izbora podešavanja.....	82
Tabela 16 – Vrednosti predviđenih brzina oscilovanja tla u zavisnosti od maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom nominalnom vremenu iniciranja.....	95
Tabela 17 – Vrednosti predviđenih brzina oscilovanja tla u zavisnosti od maksimalnih masa eksploziva inicirane u vremenskom intervalu od 8ms.....	97
Tabela 18 – Vrednosti predviđenih brzina oscilovanja tla u zavisnosti od srednjih vrednosti mase eksploziva po bušotini .....	99
Tabela 19 – Vrednosti predviđenih brzina oscilovanja tla u zavisnosti od ukupnih masa eksploziva u minskoj seriji.....	100
Tabela 20 – Vrednosti predviđenih brzina oscilovanja tla u zavisnosti od broja bušotina u minskoj seriji .....	102
Tabela 21 – Vrednosti predviđenih brzina oscilovanja tla u zavisnosti od ukupnih dužina bušotina u minskoj seriji.....	103
Tabela 22 – Vrednosti predviđenih brzina oscilovanja tla u zavisnosti od koeficijenta punjenja bušotina .....	105
Tabela 23 – Vrednosti predviđenih brzina oscilovanja tla u zavisnosti od rastojanja minskih serija do mernih mesta .....	106
Tabela 24 – Uticaj pojedinačnih faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla primenom veštačkih neuronskih mreža.....	108

# 1. UVOD

Razvoj ljudskog društva je u korak pratila i potreba za metalničnim i nemetalničnim mineralnim sirovinama. U nekim periodima, to je bio vrlo dinamičan proces koji je približio rudnike gradovima i selima. Dešavalo se i suprotno, pa su u blizini novootvorenih rudnika formirana nova naselja. Povećanjem kapaciteta proizvodnje rasla je i potrošnja eksploziva, a samim tim i štetni uticaji izazvani miniranjima na objekte koji pripadaju naseljima. Bilo je neophodno da se na neki način predvide potresi izazvani miniranjima, pa su se u prošlosti mnogobrojni istraživači bavili tim problemom. Najranije metode koje su korišćene bile su statističke, ali su se kasnije pojavile savremene metode bazirane na novim naučnim saznanjima. Radi opisa fenomena vibracije tla korišćeni su različiti pokazatelji. Najčešće je primenjivana brzina oscilovanja čestica tla, mada su korišćeni još i ubrzanje i pomeraj čestica tla.

Širenje seizmičkih talasa izazvanih miniranjima na površinskim kopovima mineralnih sirovina predstavlja vrlo složen proces. Uzroci te složenosti vezani su za promenljivost geoloških uslova na putu širenja seizmičkih talasa, kao i za karakteristike same tehnologije miniranja. Tokom prolaska seizmičkog talasa kroz određenu tačku u stenskom masivu dolazi do naglog izbacivanja čestica tla iz ravnotežnog položaja, koje zatim osciluju oko svog ravnotežnog položaja dok se ne smire. Sve ovo se manifestuje u vidu vibracija tla. Vrlo rano se pojavila potreba utvrđivanja prirode i zakonitosti procesa vibracije tla koji su izazvani primenom eksploziva u rudarstvu. Pomenuta potreba je pre svega bila uslovljena mogućnošću predviđanja štetnih efekata miniranja koje sa sobom nose opasnosti kako za ljudske živote, tako i za objekte u bližoj okolini.

Sam uticaj seizmičkog talasa koji nastaju pri miniranju na objekte u bližoj okolini površinskih kopova predstavlja vrlo kompleksan problem. Razlog za složenost problema leži u velikom broju uticajnih faktora. Neki od tih faktora se mogu kontrolisati i oni su pre svega vezani za faktore seizmičkih potresa. Međutim na prirodne faktore se ne može uticati, a samim tim, oni se ne mogu ni kontrolisati. Geološka građa terena, topografska situacija, mehanizmi prenosa seizmičke energije kroz tlo i mehanizmi prenosa energije seizmičkog talasa na objekat, neki su od prirodnih faktora na koje se ne može uticati. Upravo je definisanje i vrednovanje uticaja pojedinačnih faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla na koje se može uticati od izuzetne važnosti, pa će to i biti tema doktorske disertacije. Nova naučna saznanja i razvoj računarske tehnike su doprineli da se tokom izrade disertacije koriste metode koje



omogućavaju uključanje i ispitivanje velikog broja faktora seizmičkih potresa koji utiču na brzinu oscilovanja tla.

Primena veštačkih neuronskih mreža (*ANN-Artificial Neural Networks*) je jedna od savremenih metodologija koja to omogućava i korišćena je tokom obrade teme doktorske disertacije. Sam način rada ANN zahteva postojanje baze egzaktnih skupova podataka, koji su korišćeni u fazi obuke (učenja). Za te potrebe uključeni su faktori seizmičkih potresa i brzine oscilovanja tla izminiranih serija na poršinskom kopu Veliki Krivelj. Faktore seizmičkih potresa predstavljaju svi parametri miniranja koji mogu da se brojčano iskažu, opišu i prate tokom miniranja, a za koje se pretpostavlja da imaju značajan uticaj na intenzitet seizmičkih potresa i rastojanje minske serije do mernog mesta. Miniranja ovih serija su izvršena tokom 2018. i 2019. godine. Obučena veštačka neuronska mreža i njena mogućnost upotrebe u realnom vremenu poslužila je za vrednovanje uticaja faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla.

## **1.1. PREDMET ISTRAŽIVANJA**

Predmet istraživanja u doktorskoj disertaciji je vibracija tla izazvana prostiranjem seizmičkih talasa nastalih kao posledica miniranja na površinskim kopovima. Pored toga predmet istraživanja su i odgovarajući parametri primenjene tehnologije miniranja na površinskim kopovima.

Zato je od velike važnosti utvrditi zavisnosti intenziteta vibracija tla izazvanih miniranjima od svih uticajnih parametra same tehnologije miniranja i karakteristika stenskog masiva u kojima su ta miniranja izvršena.

Utvrđivanjem ovih zavisnosti značajno se podiže mogućnost kontrole minskih serija, a samim tim i štetnih uticaja izazvanih miniranjima. Kontrola minskih serija zasniva se na korišćenju utvrđenih saznanja o jačini uticaja pojedinih faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla, prilikom projektovanja ali i pri samom izvođenju miniranja.

Međutim, definisani uticaj pojedinačnog faktora seizmičkih potresa sam za sebe nema preveliki značaj. Razlog za to je što prilikom miniranja pojedinačni faktor ne deluje samostalno, već u sadejstvu sa ostalim faktorima seizmičkih potresa. Zato je potrebno da se uticaj pojedinačnih faktora sagledava u okviru rezultata koji je posledica zajedničkog delovanja. U ovom slučaju to je intenzitet seizmičkog potresa predstavljen brzinom oscilovanja tla i definisan kroz zakon oscilovanja tla izazvanih miniranjima.

U opštem obliku zakon oscilovanja tla izazvanih miniranjima predstavljen je *Formulom br.1*:

$$V = k \cdot Rr^{-n} \quad (\text{mm/s}) \quad (1)$$

gde su:

V – brzina oscilovanja tla, (mm/s)

$R_r$  – redukovano rastojanje koje je predstavljeno *Formulom br.2*.

k – koeficijent koji uglavnom zavisi od karakteristika stenske mase i tehnologije miniranja.

n – izložilac koji definiše stepen prigušenja seizmičkih talasa, a zavisi od karakteristika stenske mase, tehnologije miniranja, rastojanja i preovlađujućih tipova seizmičkih talasa,

$$R_r = \frac{R}{m\sqrt{Q_x}} \quad \text{m/kg}^{1/m} \quad (2)$$

gde su:

R – rastojanje minske serije do mernog mesta (m),

$Q_x$  – inicirana masa eksploziva u minskoj seriji (kg),

m – izložilac korena za odgovarajuću vrednost mase eksploziva.

U koeficijentima k i n su na neki način kvantifikovani uticaji većeg broja faktora seizmičkih potresa. Kroz ovu doktorsku disertaciju njihovi uticaji će biti direktno iskazani na osnovu korišćenja metoda veštačkih neuronskih mreža. Na taj način dobijeni model omogućiće vrednovanje većeg broja uticajnih faktora na prognozu brzine oscilovanja tla izazvanih miniranjima.

## 1.2. CILJ ISTRAŽIVANJA

Osnovni cilj doktorske disertacije je da se korišćenjem veštačkih neuronskih mreža utvrde pouzdane zavisnosti između što većeg broja faktora seizmičkih potresa, karakteristika stenskog masiva i intenziteta seizmičkih potresa. Sve prethodno pomenuto u stvari znači formiranje sveobuhvatnijeg i pouzdanijeg modela prognoze intenziteta seizmičkih potresa za uslove miniranja na površinskim kopovima. Takođe, istraživanje kroz doktorsku disertaciju treba da da doprinos kod detaljne analize vrednovanja (kvantifikacije) uticaja tih faktora na brzinu oscilovanja tla.

### 1.3. POLAZNE POSTAVKE U ISTRAŽIVANJU

1. Neuronske mreže, zbog svoje adaptivne sposobnosti kao i sposobnosti procesiranja više ulaznih parametra koji imaju uticaj na izlazni parametar, mogu definisati i kvantifikovati korelativne veze ulaznih parametara i izlaznog parametra.

2. Pojedinačni vrednovani uticaj svakog od ulaznih parametara (faktora seizmičkih potresa) na izlazni parametar (brzinu oscilovanja tla izazvanu miniranjem), može se utvrditi upotrebom obučene neuronske mreže.

3. Baza ulaznih podataka sa površinskog kopa Veliki Krivelj je na zadovoljavajućem nivou kada su kvalitet i kvantitet podataka u pitanju.

4. Opšta formula zakona oscilovanja (Formula br. 1) i izračunavanje redukovanog rastojanja (Formula br. 2) su teorijska osnova na kojoj su bazirana dalja istraživanja.

5. Faktori seizmičkih potresa vezani za mase eksploziva su:

$(Q_{buk})$  – Ukupne mase eksploziva u seriji,

$(Q_{bsr})$  – Srednja masa eksploziva po bušotini,

$(Q_{8ms})$  – Maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom vremenskom intervalu od 8ms,

$(Q_i)$  – Maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom nominalnom vremenu iniciranja.

6. Korelativna zavisnost predstavljena jednačinom regresione linije, uz odgovarajuću vrednost koeficijenta determinacije  $R^2$ , između pojedinačnog faktora seizmičkih potresa i brzine oscilovanja tla, dobiće se iz dijagrama zavisnosti tog faktora i brzine oscilovanja tla. Samo vrednovanje uticaja biće predstavljeno kroz vrednost koeficijenta uticaja tog faktora dobijenog na bazi podataka sa dijagrama zavisnosti.

Uzimajući u obzir napred navedeno, osnovna polazna hipoteza ima sledeći oblik:

*Primenom veštačke neuronske mreže i baze podataka sa površinskog kopa Veliki Krivelj, čiji su podaci na zadovoljavajućem kvalitativnom i kvantitativnom nivou, moguće je vrednovati pojedinačni uticaj svakog od faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla.*

### 1.4. NAUČNE METODE ISTRAŽIVANJA

Na samom početku istraživanja prikupljeni su literaturni izvori koji su u prošlosti obrađivali teme vezane za brzine oscilovanja tla izazvanih miniranjima. Istovremeno je prikupljena dostupna literatura iz domena upotrebe neuronskih mreža u rudarstvu. Prikupljena literatura je sistematizovana i klasifikovana po oblastima nakon čega je analizirana i odabrana

ona koja najviše odgovara temi doktorske disertacije. Odabrana literatura je dublje proučena nakon čega je dat i kritički osvrt predloženih modela.

Sledio je terenski deo istraživanja tokom koga su prikupljeni izvorni podaci na površinskom kopu Veliki Krivelj. Terenska istraživanja su izvršena pomoću sistema monitoringa seizmičkih potresa koji omogućava sinhronizovano *Real-Time* registrovanje i prikupljanje podataka o intenzitetu seizmičkih potresa na tri merne lokacije. Pored toga, prikupljeni su podaci o pozicijama mesta miniranja i parametrima seizmičkih potresa. Podaci o fizičko-mehaničkim i strukturnim karakteristikama stenskog masiva između mesta miniranja i registrovanja potresa nisu bili dostupni.

Tokom prvog koraka rada na modelu veštačke neuronske mreže, sistem je učio na osnovu podataka koji su mu sukcesivno dodavani od sistema za akviziciju podataka. Tokom drugog koraka nakon učenja, sistem je bio u stanju da generalizuje podatke.

Obučena i verifikovana veštačka neuronska mreža je upotrebljena za definisanje korelativnih veza ulaznih faktora seizmičkih potresa i izlaznog parametra brzine oscilovanja tla. Dobijene performanse obučene veštačke neuronske mreže su vrednovane upoređivanjem sa rezultatima dobijenim iz klasičnog zakona oscilovanja tla izazvanog miniranjima. Na kraju, urađene su i analize vezane za dobijene rezultate.

Opšte naučne metode istraživanja u disertaciji su:

- opservacija, analitičko-sintetičke metode, sistematizacija i klasifikacija u toku obrade prikupljene literature;

- prikupljanje i sistematizacija tokom prikupljanja podataka o faktorima seizmičkih potresa na terenu;

- statističke metode tokom obrade podataka prikupljenih na terenu;

- analitičko-deduktivne metode, metode modeliranja i metoda generalizacije u procesu formiranja i upotrebe modela na bazi veštačke inteligencije.

Pored opštih naučnih metoda, u disertaciji su primenjene i metode koje se zasnivaju na dosadašnjim saznanjima iz oblasti seizmičkih efekata miniranja, zatim na detaljnim razmatranjima faktora koji utiču na intenzitet potresa izazvanih miniranjima, izmerenim podacima na terenu, analizi dobijenih podataka kao i primeni modela veštačkih neuronskih mreža koji je upoređen sa postojećim modelom dobijenim regresionom analizom.

## 2. DROBEĆE I SEIZMIČKO DEJSTVO MINIRANJA NA POVRŠINSKIM KOPOVIMA

### 2.1. FAZE DROBLJENJA STENSKE MASE

#### Detonacija

Prilikom iniciranja eksploziva u bušotini, od same tačke iniciranja pa nadalje, razvija se front na čijem čelu se odvija proces *razlaganja eksploziva*. Pomenuti front je, u stvari, front detonacionog talasa koji se kreće kroz eksplozivno punjenje detonacionom brzinom. Iza detonacionog fronta nalaze se gasoviti produkti detonacije, dok je ispred fronta eksploziv ostao u neizmenjenom stanju. Naglo oslobađanje gasovitih proizvoda, koji su izazvani velikom brzinom hemijskih reakcija u eksplozivu, kao posledicu ima nagli porast pritiska na liniji fronta detonacionog talasa. Ovaj pritisak se naziva *detonacioni pritisak* i nemeđljiv je zbog kratkog delovanja u jednoj tački, ali i zbog njegove veličine koja se kreće od 5 do 20 GPa. Dejstvo detonacionog pritiska na zidove bušotine prouzrokuje impulsni talasni poremećaj koji se kroz stensku masu širi radijalno u vidu kompresivnog longitudinalnog talasa. Tokom napredovanja poremećaja kroz stensku masu deo energije se prenosi na čestice stene koje se izvode iz ravnotežnog položaja i pomeraju se unapred u pravcu kretanja poremećaja. Ovo izaziva nagli porast pritiska u steni neposredno ispred fronta poremećaja koji zatim eksponencijalno opada. Na određenom rastojanju iza fronta poremećaja, pritisak opada i tada se jednoosijalni pritisak u steni vraća na početnu vrednost. Iza ove zone, ponovo usled potiskivanja čestica stena u smeru kretanja poremećaja, nalazi se zona smanjene gustine i nižeg pritiska koja se naziva *zona rasterećenja*. Energija poremećaja koji se kao posledica bušotinskog pritiska širi kroz stensku masu opada sa povećanjem rastojanja od mesta detonacije eksplozivnog punjenja. Opadanje energije je uslovljeno geometrijskim rasipanjem energetskog fluksa, apsorpcijom energije usled nepotpune elastičnosti sredine, kao i rasipanjem energije na diskontinuitetima i nehomogenostima.

U zavisnosti od energije koju poremećaj nosi to jest amplitude, brzine kojom se kreće, kao i po deformacijama koje poremećaj izaziva u stenskoj masi, može se pratiti transformacija poremećaja od udarnog talasa, preko talasa pritiska, do elastičnog talasa.

U zoni koja je u neposrednoj blizini bušotine, čija širina iznosi 3 do 7 prečnika minske bušotine, poremećaj se kreće brzinom koja je veća od brzine zvuka za tu sredinu i može se posmatrati kao udar. Otud potiče i naziv *udarni talas*.

Pritisak koji se javlja na čelu fronta udarnog talasa daleko prevazilazi čvrstoću stene na jednoaksijalna naprezanja i sve deformacije koje udarni talas izaziva su plastične. U ovoj zoni je stenska masa smrvljena u prah, pa se naziva *zona sprrašivanja* [1].

Faza detonacije prethodi procesu drobljenja stenske mase.

### **Prostiranje udarnog talasa**

Sa povećanjem rastojanja opada energija poremećaja, pa više nema intenzivnog sprrašivanja stenske mase. Međutim, poremećaj i dalje izaziva naprezanja u stenskoj masi koja su veća od dinamičke triaksijalne čvrstoće i stvara pukotinske sisteme. I u ovoj zoni poremećaj izaziva porast pritiska na frontu i može se smatrati kao talas pritiska koji se kreće brzinom koja je jednaka brzini kretanja zvuka u toj sredini. Ova zona se naziva *zona drobljenja* i prostire se na rastojanju od 7 do 150 prečnika minske bušotine [1].

Kod etažnog miniranja, kod koga je odnos dužine i prečnika punjenja preko 6, udarni talas počinje kretanje kroz stensku masu dok detonacija još traje u eksplozivnom stubu. Iz tog razloga, u blizini bušotine udarni talas ima prelazni oblik između sfere i cilindra, a zavisi od odnosa detonacione brzine i brzine kretanja talasa kroz stensku masu.

Prilikom prostiranja, udarni talas na svom frontu teži da sabije delove stenske mase smanjujući joj zapreminu uz povećanje gustine. Istovremeno u pravcu normalnom na pravac prostiranja udarnog talasa javljaju se tangencionalni naponi, koji stensku masu opterećuju na istežanje. Ukoliko su tangencionalni naponi veći od zatezne čvrstoće stenske mase, dolazi do stvaranja pukotina koje imaju radijalni pravac, zato se nazivaju *radijalne pukotine*.

Zonu kompresije prati zona rasterećenja u kojoj dolazi do zateznih naprezanja u pravcu prostiranja talasa, koji, ako su dovoljnog intenziteta, stvaraju takozvane *koncentrične pukotine*.

Najveća koncentracija pukotina očekuje se oko bušotine jer je tu intenzitet udarnog talasa najveći. Sa udaljavanjem udarnog talasa i opadanjem njegovog intenziteta smanjuje se i gustina novonastalih pukotina [2].

### **Pritisak gasova**

Po završetku formiranja gasovitih produkata nastalih na visokim temperaturama i pod visokim pritiscima dolazi do njihovog širenja i popunjavanja proširenog prostora bušotine. Gasoviti proizvodi vrše kvazistatički radijalni pritisak koji oko bušotine izaziva naponsko polje.

Gasovi pod priskom mogu različito da deluju na okolnu stensku masu.

- Prva manifestacija dejstva se ogleda kroz dodatno proširenje bušotine kompresijom stenske mase, a zatim kroz stvaranje novih radijalnih pukotina.

- Druga manifestacija je prodor gasova u pukotinski sistem pri čemu ga proširuju do loma stenske mase.

Gasovi se uvek kreću linijom *najmanjeg otpora*. Ukoliko između bušotine i neke slobodne površine postoji veza sa slabijim otporom, oni će se tu usmeriti uz pad pritiska. Pad pritiska gasova uslovljava slabiji uticaj na drobljenje i pomeranje stenske mase. Vreme trajanja gasnog pritiska je od 5 do 110 ms i jako varira, a zavisi od mase i vrste eksploziva, vrste i strukture stenske mase, mreže pukotina, linije najmanjeg otpora i kvaliteta čepa [2].

### **Odbacivanje stenske mase**

Poslednja faza u procesu drobljenja je *odbacivanje stenske mase*. Prilikom odbacivanja stenske mase nastaje dodatno usitnjavanje usled slučajnih sudara delova izminirane mase, kao i udara prilikom pada na počišćenu etažu. Najznačajniji uticajni faktor na odbacivanje stenske mase je, svakako, pritisak gasova. Pored pritiska gasova, tu su još i veličina otpora u vrhu i nožici etaže, nabušenje i kvalitet čepa [2].

## **2.2 DROBLJENJE STENSKE MASE U NEOGRANIČENOJ SREDINI**

U slučaju kada je eksplozivno punjenje na velikom rastojanju od slobodne površine, drobljenje stenske mase izazvane eksplozijom je u svim pravcima podjednako. Pri tome su karakteristične *tri zone drobljenja* prikazane na *Slici br.1*.

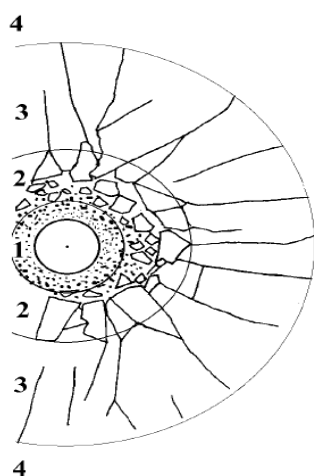
*Zona sprašivanja* je zona u kojoj pritisci izazvani eksplozijom prevazilaze 40-400 puta dinamičku pritisnu čvrstoću stene. U ovoj zoni se pojavljuje najintenzivnije usitnjavanje stene, od sitnog drobljenja sve do sprašivanja.

*Zona intenzivnog raspucavanja* je zona gde se fragmentacija stene može gradirati od krupnijeg drobljenja do raspucavanja na blokove različitih dimenzija. Razvoj pukotinskog sistema je intenzivan, javljaju se kako radijalne, tako i koncentrične pukotine ili njihova kombinacija. Pomenuti pukotinski sistemi su izazvani dejstvom kako udarnog talasa, tako i pritiskom gasova.

*Zona smanjenog raspucavanja* je zona u kojoj su naprezanja na pritisak manja od čvrstoće stene na pritisak, ali još uvek dovoljna da izazovu tangencijalne napone koji su veći

od zatezne čvrstoće stene. Posledica napred navedenog je ređi pukotinski sistem sa radijalnim pukotinama.

*Zona potresa* je izvan zone raspucavanja i karakterišu je elastične deformacije stenske mase. U ovoj zoni su i tangencijalni naponi manji od zatezne čvrstoće stene pa ne dolazi do stvaranja novih pukotina. Ovde seizmički talas svojim nailaskom izaziva elastične deformacije stene, čime se čestice masiva izbacuju iz stanja mirovanja. One po izbacivanju iz stanja mirovanja osciluju oko svog ravnotežnog položaja dok se oscilacije ne priguše, što se manifestuje kao potres ili vibracija tla [2].



*Slika br.1 Zone drobljenja u neograničenoj sredini: 1 – zona sprašivanja, 2 – zona intenzivnog raspucavanja, 3 – zona smanjenog raspucavanja, 4 – zona potresa [2]*

### 2.3. DROBLJENE STENSKE MASE U OGRANIČENOJ SREDINI

Ustanovljeno je da se prilikom miniranja u prisustvu slobodne površine gde su bušotine na dovoljno bliskom rastojanju, odnosno u ograničenoj sredini, zona drobljenja deformiše i usmerava ka slobodnoj površini. Postojanje slobodne površine uslovljava oslabljenje stenske mase i orijentiše dejstvo eksploziva u pravcu najmanjeg otpora stenske mase. Prilikom miniranja upotrebom brizantnih eksploziva ispoljava se dvojna priroda oslobođene energije nastala iniciranjem sa udarnom i gasnom komponentom. Postoje različite teorije koje su pokušale da daju objašnjenje drobljenja stenske mase u ograničenoj sredini. Neke teorije *udarnoj energiji* pripisuju primarnu ulogu u stvaranju pukotinskog sistema, a *gasnoj energiji* samo odbacivanje stenske mase. Druge teorije gasnoj energiji daju primarnu ulogu u drobljenju stenske mase, s obzirom na procenu učešća gasne energije od 85% u ukupnoj energiji eksploziva. Sam način primene eksploziva uslovljava dominantnu ulogu udarne ili gasne energije.



Upotreba bušotinskih punjenja u cilju drobljenja stenske mase je zasnovana na pojedinačnom ili kombinovanom delovanju sledećih efekta:

- pritisnim i zateznim naprezanjima pod dejstvom udarnog talasa,
- zateznim naprezanjima izazvanim reflektovanim talasom od slobodne površine,
- radijalnim pritiskom gasova,
- opterećenjem na savijanje, itd.

Prema načinu na koji se opisuje mehanizam drobljenja stenske mase, sve teorije drobljenja se svrstavaju u *tri grupe*.

*Talasnne teorije* primarnu ulogu drobljenja stenske mase daju udarnoj energiji. Po ovim teorijama stvaranje pukotinskog sistema je uslovljeno delovanjem primarnog udarnog talasa, delovanjem reflektovanog talasa od slobodne površine ili kombinovanim delovanjem istih. Najranija talasna teorija drobljenja je dominantnu ulogu pripisivala kompresionom dejstvu udarnog talasa. Zatim se pojavljuju refleksne teorije koje dominantnu ulogu pripisuju refleksnom talasu koji izaziva zatezna naprezanja stenske mase stvarajući koncentrične krugove od slobodne površine ka bušotini. Posle sedamdesetih godina pojavile su se talasne teorije koje drobljenje stenske mase tumače kombinovanim delovanjem primarnog udarnog talasa kroz kompresiono dejstvo i refleksionog talasa sa zateznim dejstvom.

*Gasne teorije* drobljenje stenske mase pripisuju dejstvu gasne energije. Polazna osnova ovih teorija je da udarni talas nema dovoljno snage da izvrši rušenje stenske mase, već svojim delovanjem izaziva mikro-prsline na zidovima bušotina i oko već postojećih diskontinuiteta u stenskoj masi. Tek nakon prolaska udarnog talasa ispoljava se dejstvo gasnog pritiska na zidove bušotina, slično sudovima pod pritiskom. Pod dejstvom radijalnog pritiska gasova u bušotini, u steni se javljaju tangencijalni naponi koji izazivaju formiranje radijalnih vertikalnih pukotina, a samim tim i prizmatičnih vertikalnih stubova stenske mase. U ovako formiranim pukotinama dolazi do prodora gasova koji u početku popunjavaju pukotine približno do 60% od ukupne dužine do čela etaže pre bilo kakvog pomeranja stenske mase. Pomeranje se dešava pri potpunom prodoru gasova u novoformirane subhorizontalne pukotine. Subhorizontalne pukotine su posledica dejstva zateznih sila u prizmatičnim vertikalnim stubovima stenske mase koji su opterećeni savijanjem.

*Kombinovana teorija* objašnjava drobljenje stenske mase kombinovanim dejstvom udarnog talasa i gasova pod pritiskom. Pri tom se stvaranje pukotina u blizini bušotine pripisuju dejstvu gasova pod pritiskom, dok se za stvaranje pukotinskog sistema blizu slobodne površine zasluga pripisuje reflektovanom udarnom talasu.

Samo drobljenje se odvija u *četiri faze*:

1. sprašivanje zidova bušotina dejstvom udarnog talasa,
2. formiranje radijalnog pukotinskog sistema oko bušotine dejstvom gasova pod pritiskom,
3. formiranje koncentričnog pukotinskog sistema u blizini slobodne površine pod dejstvom refleksionog talasa i
4. odbacivanje stenske mase gasovima pod pritiskom [2]

## 2.4. VRSTE SEIZMIČKIH TALASA

Seizmički talas se sastoji od više komponenti koje se u stenskoj masi kreću različitim brzinama i koje pri tome izazivaju različite deformacije. Postoje dve osnovne grupe komponenti seizmičkog talasa pa i pojedinačni talas-komponenta može pripadati zapreminskim ili površinskim talasima [1].

*Zapreminski talasi* su primarni talasi koji su direktna posledica impulsivnog poremećaja u stenskoj masi izazvanih detonacijom eksplozivnog punjenja. Zapreminski talasi se kroz stenu kreću u svim pravcima šireći se radijalno iz centra detonacije eksplozivnog punjenja u bušotini. Prilikom napredovanja izazivaju dva vida deformacija koji opredeljuju da li se radi o *longitudinalnim* ili *transverzalnim* talasima [1].

*Uzdužni (longitudinalni) talas* izaziva podužne dilatacije, odnosno oscilovanje čestica ima isti pravac kao i prostiranje talasa *Slika br.2*. Obzirom da se ovi talasi kreću najbrže od svih talasa, pri čemu se elastične deformacije prenose najkraćim putem, oni prvi dolaze do mernog mesta, pa se nazivaju *primarni talasi* i obeležavaju se sa P [1].

Uzdužni talasi se prostiru kroz čvrste, tečne i gasovite sredine, a njihova brzina se izračunava po *Formuli br.3* [3]:

$$V_u = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (\text{m/s}) \quad (3)$$

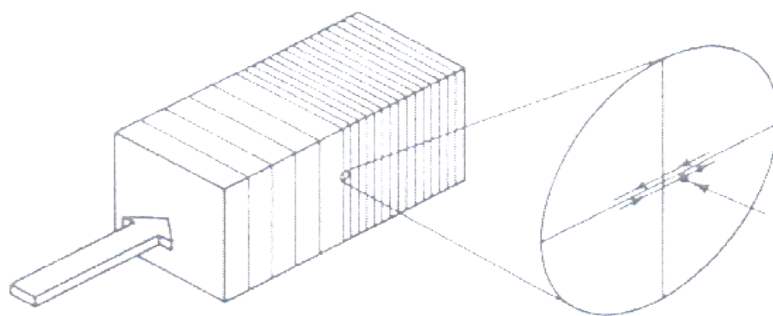
gde su:

$V_u$  – brzina uzdužnih talasa, (m/s)

$E$  – modul elastičnosti, (N/m<sup>2</sup>)

$\rho$  – gustina stene, (kg/m<sup>3</sup>)

$\mu$  – Poasonov koeficijent.



Slika br. 2 Prostiranje uzdužnih seizmičkih talasa i način oscilovanja čestica tla [4]

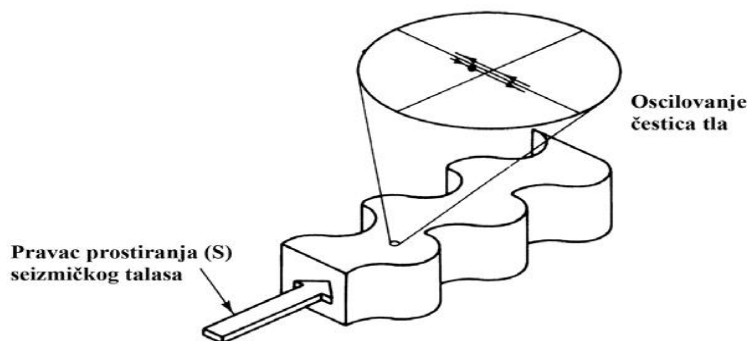
Poprečni (transverzalni) seizmički talasi nastaju kao posledica nailaska longitudinalnih primarnih talasa na diskontinuitete, kada se javlja refleksija ili refrakcija. Rezultat navedenog je pojava novih talasnih kretanja kod kojih materijalna čestica osciluje u ravni upravnoj na pravac prostiranja seizmičkog talasa, a koje izazivaju elastične deformacije i stensku masu opterećuju na smicanje. Oznaka im je S i imaju manju brzinu prostiranja od uzdužnih talasa. Dolaskom upadnog longitudinalnog talasa do diskontinuiteta, on se deli obrazujući novi talas pritiska predstavljen horizontalno polarizovanim  $S_H$  talasom i novi smičući talas predstavljen vertikalno polarizovanim  $S_V$  talasom. Istovremeno se i energija upadnog talasa deli na dva novonastala talasa. Poprečni talasi kasnije stižu do mernog mesta, pa se zovu i *sekundarni* talasi [1]. Poprečni talasi se prostiru samo u čvrstoj sredini, predstavljeni su na *Slici br. 3*, a brzina im se izračunava primenom *Formule br.4* [3]:

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{2 \cdot \rho \cdot (1 + \mu)}} \quad m/s \quad (4)$$

gde je:  $V_p$  – brzina poprečnih talasa, (m/s)

Odnos brzina uzdužnih i poprečnih seizmičkih talasa dat je *Formulom br. 5*.

$$V_u = \sqrt{3} \cdot V_p \quad (5)$$



Slika br. 3 Prostiranje poprečnih seizmičkih talasa i način oscilovanja čestica tla [4]

*Površinski talasi* nastaju nailaskom zapreminskih talasa na slobodnu površinu. Kreću se neposredno ispod površine i sa porastom dubine talasno kretanje opada [1]. Debljina tog sloja je 100–200 m i približno je jednaka talasnoj dužini ove vrste talasa. Već na dubini koja odgovara dvostrukoj talasnoj dužini, ova vrsta talasa nema manifestacije [2].

Po trajektoriji kretanja čestica izvršena je podela površinskih talasa na:

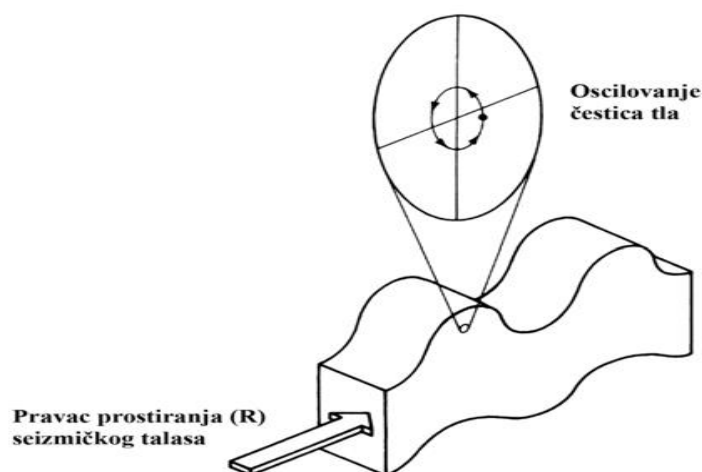
*Talasi tipa R (Rejli talasi)* kreću se uz slobodnu površinu izazivajući eliptična pomeranja čestica tla u vertikalnoj ravni [1], *Slika br. 4*. Brzina R talasa je najmanja u odnosu na sve ostale seizmičke talase a izračunava se po *Formuli br.6* [3]:

$$V_r = \frac{0.68 + 1.14 \cdot \mu}{1 + \mu} \quad m/s \quad (6)$$

gde je:  $V_r$  – brzina R talasa (m/s)

*Talasi tipa Q (Lav talasi)* su transverzalni, čisto smičući talasi. Kod ove vrste talasa oscilovanje materijalne čestice se odvija u horizontalnoj ravni, upravno na pravac prostiranja talasa i izazivaju horizontalna pomeranja čestica. Pojava im je ograničena za ispunjenje specifičnih geoloških uslova, i ako postoje javljaju se u površinskim slojevima slojevitih sredina ispod kojih su čvršće stenske mase. Brzine su im male i manje su od brzina S talasa [1].

*Talasi tipa C*, su oni kod kojih se oscilovanje materijalne čestice odvija se po dijagonalnoj putanji, pa su ovi talasi praktično kombinacija R i Q talasa [2].



*Slika br. 4* Prostiranje Rejli seizmičkih talasa i način oscilovanja čestica tla [4]

## 2.5. SEIZMIČKI EFEKAT MINIRANJA

Kada seizmički talas naiđe na neku tačku terena, odnosno tla, on tom prilikom česticu tla izbacuje iz ravnotežnog položaja. Čestica zatim osciluje oko svog ravnotežnog položaja određeno vreme dok se potpuno ne smiri. Ovo oscilovanje čestice stenske mase se manifestuje kao potres, odnosno vibracija tla. Pobuđene čestice osciluju brzinama reda mm/s - cm/s, dok se ne priguše, odnosno, dok se stenska masa ne smiri. Potres ili vibracija tla je štetan efekat miniranja koji pored izazivanja neprijatnog osećaja i straha kod ljudi, izaziva i oštećenja na objektima i instalacijama.

Za ocenu intenziteta potresa značajna su tri parametra koji se nazivaju *parametri potresa* i definišu se kao:

- *pomeranje* – rastojanje na kome se čestica udaljava od svog ravnotežnog položaja tokom oscilovanja i iskazuje se u milimetrima ili u delovima milimetra;
- *brzina* – brzina čestice tokom oscilovanja iskazuje se u cm/s i mm/s;
- *ubrzanje* – pokazuje stepen promene brzine oscilovanja, tj. kretanja čestice i iskazuje se u delovima od g-ubrzanja zemljine teže koje iznosi  $9,81 \text{ m/s}^2$ .

Merenje potresa tla vrši se instrumentima koji se nazivaju *seizmografi* [2].

## 2.6. RASPODELA ENERGIJE EKSPLOZIVA PRILIKOM MINIRANJA

Energija eksploziva predstavlja potencionalnu energiju hemijskih veza unutar molekula koji grade eksplozivni materijal. Ova energija se u velikoj meri predaje stenskoj masi prilikom detonacije eksplozivnog punjenja u bušotini. Deo predate energije stenskoj masi se troši na njeno usitnjavanje i odbacivanje, što je željeni efekat, pa se definiše kao *korisna energija*. Nosioći korisne enerije su udarni talas i širenje gasovitih produkata detonacije. Ostatak energije se troši na neželjene efekte miniranja, koji ne vrše koristan rad, pa se mogu smatrati nekorisnom energijom. Neželjeni efekti su predstavljeni kroz zagrevanje stenske mase, vazdušne udare, svetlosne efekte i seizmičke talase [1].

Smatra se da od ukupne energije prenete stenskom masivu, 15% prenesene energije pripada udarnoj energiji, koja se javlja u formi udarnog talasa, dok 85% prenesene energije pripada gasnoj energiji (energija pritiska gasova), koja se javlja u formi bušotinskog pritiska [2].

*Berta* [5] je na osnovu istraživanja dao sledeću raspodelu energije prenete na stenu.

U raspodelu su uključeni kako korisni tako i štetni efekti miniranja. Raspodela energije predstavljena je u *Tabeli br.1*.

*Tabela br.1 Raspodela energije po Berti [5]*

<b>Formiranje pukotine oko bušotine</b>	<b>1 %</b>
<b>Drobljenje stene</b>	<b>15 %</b>
<b>Odbacivanje izminirane stenske mase</b>	<b>4 %</b>
<b>Sprašivanje stene u blizini bušotine</b>	<b>1,5 - 2 %</b>
<b>Deformacija stene iza minskog polja</b>	<b>&lt; 1 %</b>
<b>Razletanje komada</b>	<b>&lt; 1 %</b>
<b>Vibracija tla</b>	<b>40 %</b>
<b>Vazdušni udar</b>	<b>38 – 39 %</b>

### 3. EMPIRIJSKI MODELI ZA PROGNOZU BRZINE OSCILOVANJA TLA PRI IZVOĐENJU MINIRANJA

Štetne posledice izazvane miniranjima u prošlosti su rezultirale pokušajima formiranja modela koji je u mogućnosti da predvidi jačinu potresa i njihov uticaj na objekte u blizini. U nastavku su navedeni autori i njihovi radovi koji su na različite načine odnosno kroz različite matematičke modele formulisali zakon oscilovanja tla.

*Morris* [6] je 1950. godine formirao *statistički model za predviđanje intenziteta potresa*, a predstavljen je *Formulom br.7*. Model je dao zavisnost između maksimalnog pomeraja čestica tla kao karakteristike potresa i dva parametra seizmičkih potresa, mase eksplozivnog punjenja i rastojanja minske serije do mernog mesta u obliku:

$$A = K \frac{\sqrt{Q}}{R} \quad (\text{mm}) \quad (7)$$

Gde su:

A – maksimalni pomeraj čestica tla, (mm)

Q – masa eksplozivnog punjenja, (kg)

R – rastojanje minskog polja do mesta merenja, (m)

K – koeficijent koji zavisi od karakteristika radne sredine i iznosi 0,57 za tvrde stene do 3,4 za nevezano tlo.

*Leconte* je 1967. predložio vrlo bitnu promenu u odnosu na *Morrisov* matematički model. Promena se sastoji u zameni maksimalnog pomeraja čestice kao opisa vibracije tla, sa rezultujućom vrednosti tri komponente brzine oscilovanja čestica tla. *Lekontov* matematički model je predstavljen *Formulom br.8*:

$$V = K \frac{\sqrt{Q}}{R} \quad (\text{mm/s}) \quad (8)$$

*Duvall i Petkof* [7] su 1959. godine doneli promenu u sagledavanju predviđanja vibracija uz pretpostavku da je eksplozivno punjenje sfera. Zaključili su da linearnu dimenziju treba korigovati trećim korenom mase eksplozivnog punjenja.

*Ambraseys i Hendron* [8] 1968. godine dobili su slične rezultate.

Potvrdu ovog modela je dao i *Dowding* [9].

Koristeći brzinu oscilovanja čestica tla kao parametar opisa vibracije tla, ovaj model je predstavljen *Formulom br. 9*:

$$V = k \left( \frac{R}{\sqrt[3]{Q_i}} \right)^{-n} \quad (\text{mm/s}) \quad (9)$$

gde su:

$V$  – maksimalna brzina oscilovanja čestica tla, (mm/s)

$Q_i$  – maksimalna masa eksplozivnog punjenja po intervalu usporenja, (kg)

$R$  – rastojanje od minskog polja do mesta merenja, ( m)

$k, n$  – empirijski koeficijenti

*Devine i Duvall* [10] su dali najšire primenjivani model za prognoziranje potresa izazvanog miniranjem za cilindrične bušotine. Zaključili su da rastojanja treba da budu korigovana deljenjem sa kvadratnim korenom mase eksploziva po intervalu usporenja.

Model je predstavljen *Formulom br. 10*:

$$V = k \left( \frac{R}{\sqrt{Q_i}} \right)^{-n} \quad (\text{mm/s}) \quad (10)$$

Švedski autori *Langefors, Kilhstrom i Gustafsson* su predstavili odnos rastojanja, mase eksploziva i brzine oscilovanja *Formulom br. 11* [11]:

$$V = k \left( \frac{Q}{\sqrt{R}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{mm/s}) \quad (11)$$

*Američki Biro za rudarstvo* je utvrdio model predviđanja brzine oscilovanja tla dat *Formulom br. 12* [2]. Veliki broj merenja potresa pri etažnom miniranju na različitim terenima je bila osnova za formiranje ovog modela.

$$V = 750 \left( \frac{R}{\sqrt{Q_i}} \right)^{-1.67} \quad (\text{mm/s}) \quad (12)$$

*Siskind* je sistematizovao više modela predviđanja intenziteta potresa za različite stenske sredine koji su predstavljeni u *Tabeli br. 2* [12].



Tabela br. 2 Modeli predviđanja intenziteta potresa [12]

Vrsta miniranja	Jednačina	Literatura
Tipično proizvodno miniranje na kopovima građevinsko-tehničkog kamena	$V=182 \cdot (R/Q_i^{1/2})^{-1,82}$	Bulletin 656 (Nicholls et al., 1971)
Merenja na 11 kopova krečnjaka	$V=52,2 \cdot (R/Q_i^{1/2})^{-1,38}$	PADER Report (Crum et al., 1995b)
Kopovi uglja, maksimalna horizontalna komponenta	$V=133 \cdot (R/Q_i^{1/2})^{-1,50}$	RI 8507 (Siskind et al., 1980b)
Kopovi uglja za $r/Q^{1/2} < 300$	$V=1.240 \cdot (R/Q_i^{1/2})^{-1,78}$	RI 8507 (Siskind et al., 1980b)
Nisko frekventni kopovi uglja	$V=138 \cdot (R/Q_i^{1/2})^{-1,31}$	RI 9226 (Siskind et al., 1989)
Nisko frekventne sredine za $r/Q^{1/2} < 118$	$V=187 \cdot (R/Q_i^{1/2})^{-1,18}$	RI 9226 (Siskind et al., 1989)

gde su:

$V$  – maksimalna brzina oscilovanja čestica tla, (in/s)

$R$  – rastojanje između minskog polja i mesta merenja, (ft)

$Q_i$  – masa eksploziva po intervalu usporenja, (lb)

Rajan Kumar, Deepankar Choundhury, Kapilesh Bhargava [13] su pokušali da nađu generalizovani empirijski model za predviđanje brzine oscilovanja tla uzimajući u obzir geološke i fizičko-mehaničke parametere stenske mase. Parametri su predstavljeni kroz zapreminsku težinu ( $\gamma$ ), indeks kvaliteta stenske mase ( $RQD$ ), indeks geološke čvrstoće ( $GSI$ ) i jednoosnu pritisnu čvrstoću ( $UCS$ ). Ustanovili su dve empirijske veze, jedna između  $RQD$  i  $UCS$  i druga između  $GSI$  i  $UCS$  predstavljene kroz *Formule br.13, br.14 i br.15*, u kojima  $d$  predstavlja prečnik minskih bušotina. Predloženi empirijski modeli mogu značajno pomoći kod nedostataka drugih modela predviđanja brzine oscilovanja tla, na primer u nekim ranijim fazama eksploatacije ležišta.

Za  $RQD \leq 75$ :

$$v = \frac{(0,59476 \cdot RQD + 0,00895 \cdot RQD^2)^{0,642} \cdot d^{-1,463}}{\gamma} \quad (13)$$

Za  $RQD > 75$ :

$$v = \frac{(-7,91562 \cdot RQD + 0,12152 \cdot RQD^2)^{0,642} \cdot d^{-1,463}}{\gamma} \quad (14)$$

Za  $GSI$ :

$$v = \frac{(0,3396 \cdot 1,02^{GSI} \cdot GSI^{1,13})^{0,642} \cdot d^{-1,463}}{\gamma} \quad (15)$$

Generalno, koeficijent  $k$  i izložilac  $n$  se određuju eksperimentalnim miniranjima. U nedostatku podataka o miniranjima na terenu, empirijski modeli su korišćeni za procenu vrednosti brzine oscilovanja tla.

Postoje različiti empirijski modeli koji su razvili pojedini istraživači za različite lokacije rudnika. Rezime 17 empirijskih modela predviđanja intenziteta vibracije tla izazvanih miniranjima, koji su dostupni u literaturi, navedeni su u *Tabeli br. 3*. Ove empirijske jednačine su specifične za pojedine lokacije i ne mogu se generalizovati.

*Tabela br. 3. Pregled empirijskih modela za predviđanje brzine oscilovanja tla [13]*

<b>R.b.</b>	<b>Autori</b>	<b>Empirijski model</b>
1	Duval i Petkof (1959)	$V = k (R/Q^{1/2})^{-n}$
2	Langefors i Kihlstrom (1963)	$V = k (Q/R^{2/3})^{n/2}$
3	Ambraseys i Hendron (1968)	$V = k (R/Q^{1/3})^{-n}$
4	Nicholls i ostali (1971)	$V = 0,362D^{-1,63}$
5	IS 6922 (1973)	$V = k (Q^{2/3}/R)^{1,25}$
6	Siskind i ostali (1980)	$V = 0,828D^{-1,32}$
7	Ghosh i Daemen (1983)	$V = k (R/Q^{1/2})^{-n} e^{-\alpha R}$
8	Ghosh i Daemen (1983)	$V = k (R/Q^{1/3})^{-n} e^{-\alpha R}$
9	Pal Roy (1991)	$V = n + k (R/Q^{1/2})^{-1}$
10	Pal Roy (1991)	$V = n + k (R/Q^{1/3})^{-1}$
11	CMRI (1993)	$V = n + k (R/Q^{1/2})^{-1}$
12	Kahriman (2002)	$V = 1,91D^{-1,13}$
13	Kahriman (2004)	$V = 0,34D^{-1,79}$
14	Kahriman i ostali (2006)	$V = 0,561D^{-1,432}$
15	Rai i Singh (2004)	$V = k R^{-b} Q_{\max} e^{-\alpha}$
16	Nicholson (2005)	$V = 0,438D^{-1,52}$
17	Rai i ostali (2005)	$Q_{\max} = k (VD^2)^n$

## **4. FAKTORI KOJI UTIČU NA KARAKTERISTIKE SEIZMIČKIH POTRESA UZROKOVANIH MINIRANJIMA**

Parametri seizmičkih potresa na površinskim kopovima imaju manji ili veći uticaj na intenzitet seizmičkog talasa. Uticaj nekih od njih je zanemarljiv dok je uticaj nekih parametara toliki da se njihovim izmenama može, u većoj ili manjoj meri kontrolisati seizmički uticaj miniranja [1].

### **Masa eksplozivnog punjenja**

S obzirom na poznatu činjenicu da intenzitet seizmičkog talasa zavisi od početne energije eksploziva predate steni, lako se zaključuje da je masa eksplozivnog punjenja najuticajniji faktor na intenzitet seizmičkog talasa. Prilikom miniranja, referentna masa eksploziva je ona masa eksploziva koja utiče na intenzitet seizmičkog potresa izmerenog na mernom mestu, a uključuje masu svih eksplozivnih punjenja koja se jednovremeno iniciraju [1].

### **Prečnik minskih bušotina**

Prečnik minske bušotine ima posredni uticaj na intenzitet seizmičkih talasa. Uticaj se ogleda u tome što veličina prečnika bušotine za datu dužinu bušotine definiše mase eksploziva smeštenih u bušotini.

Značajno je pomenuti odnos prečnika bušotine i prečnika eksplozivnog punjenja. Postojanje zazora između njih dovodi do toga da je energija eksploziva koja je predata steni manja u poređenju sa predatom energijom kada nema zazora [1].

### **Dužina bušotine**

Za usvojeni prečnik bušotine, dužina bušotine određuje masu eksploziva, koja se može smestiti u nju, pa na taj način ima posredni uticaj na intenzitet seizmičkog talasa. Takođe, dužina bušotine određuje i dubinu na kojoj je eksplozivno punjenje smešteno, pa tako direktno utiče na intenzitet seizmičkog talasa. Dublja punjenja, po pravilu, izazivaju seizmičke talase većeg intenziteta [1].

## **Dužina minskog čepa**

Dužina čepa ima relativno mali uticaj na intenzitet seizmičkog talasa. Njegova uloga je da definiše minimalnu dubinu eksplozivnog punjenja i rastojanje do slobodne površine na etažnoj ravni.

Takođe, minski čep ima i ulogu da održi kontinuitet bušotinskog pritiska nastalog širenjem gasova, čime se povećava iskorišćenje energije eksploziva. Efikasnost čepa zavisi prvenstveno od njegove dužine, ali i od vrste materijala od koga je formiran [14].

## **Dužina nabušenja**

Deo eksplozivnog punjenja koje pripada nabušenju svoju energiju predaje steni koja uslovno nema slobodnu površinu. Usled povećanog otpora sredine razaranju, energija eksploziva se u većoj meri troši na izazivanje seizmičkih potresa [1].

Aktivirani deo eksplozivnog punjenja u prevelikom nabušenju ispod nivoa radne etaže nepotrebno usložnjava bušenje niže etaže. S druge strane, nedovoljno nabušenje daje neravnu površinu etaže sa pojavom žolova, što dodatno komplikuje proces utovara [14].

## **Linija najmanjeg otpora**

Linija najmanjeg otpora određuje rastojanje eksplozivnog punjenja smeštenog u bušotini od slobodne površine. Dosadašnja praksa je pokazala da povećanje linije najmanjeg otpora, odnosno rastojanja do slobodne površine, kao posledicu ima i povećanje intenziteta seizmičkih talasa [1].

Veličina linije najmanjeg otpora direktno opredeljuje da li je miniranje u stešnjenjnoj sredini ili ne. Ukoliko je linija najmanjeg otpora prevelika, ona uzrokuje da gasovi imaju prevelik otpor da izvrše drobljenje stene i da je pomere na odgovarajuće rastojanje. U ovakvim uslovima veći deo energije se transformiše u seizmičku energiju koja povećava intenzitet seizmičkih talasa.

S druge strane, premala linija najmanjeg otpora omogućava pojave razletanja komada i dodatno pojačanje vazдушnih udara. Ovo se dešava jer su otpori stenske mase mali, pa gasovi prevelikom brzinom stižu do slobodne površine dajući dodatni impuls komadima izminiranog materijala [14].

## **Rastojanje između minskih bušotina**

Rastojanje između bušotina takođe određuje udaljenost eksplozivnog punjenja od slobodne površine [1]. Zbog toga kod proizvodnog miniranja gde su serije sa velikom geometrijom, primenjena usporenja moraju da omoguće stvaranje slobodne površine kako bi izbegli miniranje u stešnjenjnoj sredini [14].

## **Nagib minske bušotine**

Nagib bušotine definiše liniju najmanjeg otpora podnog eksplozivnog punjenja. Kod nagnutih bušotina, koje prate ugao radne kosine etaže, linija najmanjeg otpora je svuda ista što omogućava ravnomernu raspodelu energije eksploziva. U slučaju vertikalnih bušotina, podni deo punjenja detonira sa većom linjom najmanjeg otpora u uslovno stešnjenjnoj sredini, pa je pojava seizmičkih talasa većeg intenziteta izvesnija [1].

## **Broj bušotina u minskoj seriji**

Broj bušotina u minskoj seriji nema uticaj na intenzitet seizmičkog talasa, ali može uticati na njegovo ukupno trajanje. Na taj način utiče i na ukupnu količinu energije predate stenskoj masi ili ugroženim objektima [1].

## **Način iniciranja**

Bez obzira na to da li se radi o neelektričnim ili električnim sistemima iniciranja, način iniciranja eksplozivnih punjenja u minskoj seriji nema veliki uticaj na intenzitet seizmičkih potresa [1]. Kod *Nonel sistema* unutarbušotinska usporenja iznose 450-500 ms. Pri istoj preciznosti Nonel detonatora i električnih detonatora, mogućnost preklapanja intervala usporenja daleko je veća kod Nonela.

## **Broj i raspored usporenja u mreži**

Broj i raspored usporenja u mreži imaju jak uticaj na intenzitet seizmičkog talasa. Primenom usporenja u mreži se definiše broj eksplozivnih punjenja koji će se istovremeno inicirati, pa samim tim i masa eksploziva koja će istovremeno detonirati. Veličina usporenja

odnosno dužina intervala usporenja i kvalitet usporivača utiču na verovatnoću pojava nepoželjnih slaganja talasa poteklih iz različitih bušotina. Posledica napred navedenog je rezultujući talas pojačane amplitude [1].

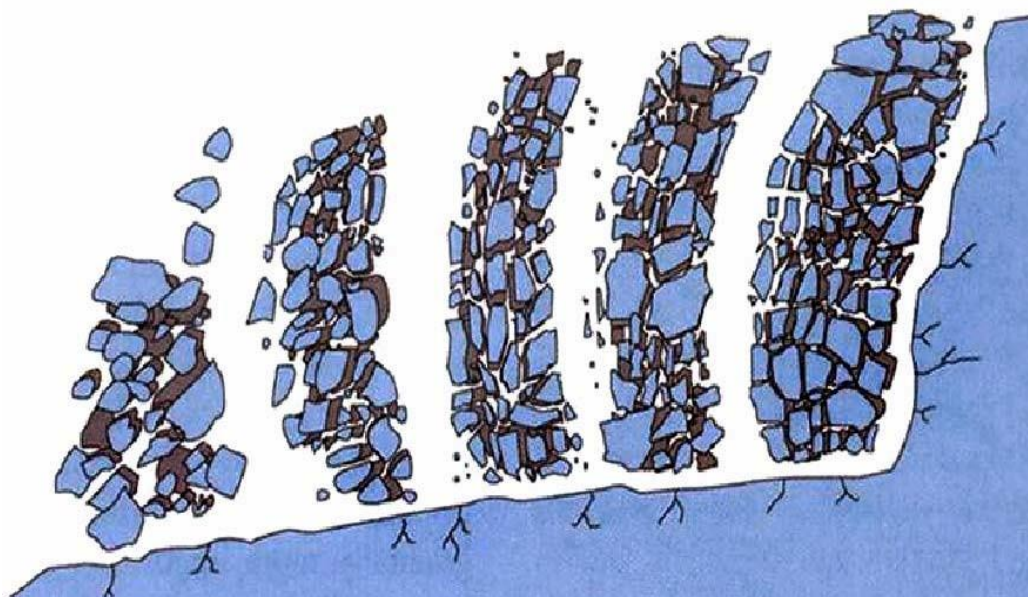
### **Redosled iniciranja**

Redosled iniciranja utiče dvojako na intenzitet seizmičkih potresa. Od redosleda iniciranja zavisi redosled rušenja stenske mase a samim tim i stvaranje novih slobodnih površina. Novonastale slobodne površine omogućuju efektivni utrošak energije svakog eksplozivnog punjenja u cilju razaranja stenske mase. U slučaju da se slobodne površine ne otvaraju pravilno, eksplozivna punjenja pojedinih bušotina detoniraju u stešnjenjnoj sredini pa je i intenzitet seizmičkog talasa pojačan.

Drugi aspekt uticaja ogleda se u mogućnosti pojave superpozicije talasa i pojačanja amplitude rezultujućeg seizmičkog talasa u smeru iniciranja [1].

Usporenje između redova omogućava formiranje slobodne površine za naredni red. To podrazumeva dovoljno vremena nakon iniciranja za formiranje pukotinskog sistema, prodor gasova u pukotinski sistem i pomeranje stenske mase na rastojanje koje daje stvarnu slobodnu površinu. Ukoliko nema dovoljno vremena, naredni red biće iniciran u stešnjenjnoj sredini, sa već pomenutim posledicama. Radi zaštite od prekomernog razletanja komada, dobro je i poželjno da izminirana masa prethodnog reda bude u vazduhu, kada se iniciranjem pokrenu mase narednog reda, kao što je prikazano na *Slici br. 5*. [14].

Stepen uticaja pojedinih faktora seizmičkih potresa na intenzitet seizmičkog potresa izazvanih miniranjima dat je u *Tabeli br. 4*.



Slika br. 5 Ilustracija uticaja vremena usporenja između redova na stvaranje slobodne površine narednim redovima [14]

Tabela br. 4 Stepen uticaja pojedinih faktora seizmičkih potresa na intenzitet seizmičkog potresa [1]

	Značajan	Umeren	Minimalan
Masa eksploziva	X	O	O
Prečnik bušotina	O	X	O
Dužina bušotina	O	O	X
Dužina čepa	O	O	X
Dužina nabušenja	O	X	O
Linija najmanjeg otpora	O	X	O
Rastojanje između bušotina	O	X	O
Nagib bušotina	O	O	X
Broj bušotina u seriji	O	O	X
Način iniciranja	O	O	X
Broj i raspored usporenja	X	O	O
Redosled iniciranja	O	X	O

## 5. PRIMENA VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA KOD REŠAVANJA PRAKTIČNIH PROBLEMA U RUDARSTVU

Programi na bazi ANN (veštačkih neuronskih mreža) služe za rešavanje složenijih problema koji uključuju brojne faktore od kojih zavisi ishod ili rezultat.

Mnogobrojni autori i istraživači su prepoznali prednosti koje pomenuti paketi pružaju.

U rudarskoj nauci primena ANN je bila usmerena na predviđanje rezultata pojedinih tehnoloških faza, pa tako i na fazi miniranja.

Predviđanje rezultata primenom ANN u rudarstvu bila su u funkciji podizanja bezbednosti ljudi i opreme, ali i u funkciji smanjenja troškova u pojedinim tehnološkim fazama. Teme vezane za prognozu pratećih štetnih pojava izazvanih miniranjem su takođe bile zastupljene u objavljenim naučnim radovima. Prethodno se odnosi na predviđanje brzine oscilovanja tla, daljine razletanja komada i jačine vazdušnog udara. Istraživači su kroz svoje radove dokazali superiornost ANN nad konvencionalnim statističkim metodama kad je u pitanju predviđanje brzine oscilovanja tla izazvane miniranjima. Postoje i istraživanja na bazi ANN koja su bila vezana za predviđanje granulometrijskog sastava izminiranog materijala. Cilj ovih istraživanja je bio dobijanje traženog granulometrijskog sastava izminiranog materijala koji garantuje smanjenje troškova u narednim fazama eksploatacije mineralnih sirovina.

### 5.1. MODELI PROGNOZE SEIZMIČKIH POTRESA NA BAZI ANN

U nastavku teksta su prezentovani neki od radova u kojima su primenjene veštačke neuronske mreže, kako bismo uključenjem više uticajnih faktora došli do modela, koji vernije opisuju i predviđaju potrese izazvane miniranjima na površinskim kopovima. Posebno su opisani radovi autora, koji su upotrebivši ANN za predviđanje potresa izazvanih miniranjima, različitim metodama utvrdili i uticaje pojedinačnih faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla [16], [17], [20].

*M. Khandelwal i T.N. Singh* [15] su u svom radu koristili BPNN (*Back-Propagation Neural Network*) – mreža sa propagacijom greške unazad za predviđanje frekvencije i intenziteta potresa tla. U obzir su uzeli uticajne parametre stenske mase, karakteristike eksploziva kao i parametre iz projekta miniranja. Ukupno je bilo 13 parametra u ulaznom skupu podataka. Parametri su bili prečnik minske bušotine, prosečna dubina bušotina, prosečna linija



najmanjeg otpora, prosečni razmak između bušotina i prosečna dužina punjenja. Takođe su u ulaznom skupu bili prosečna masa eksploziva po bušotini, udaljenost merne tačke od čela miniranja, indeks otpora prema miniranju, Jungov modul elastičnosti, Poasonov koeficijent, Brzina P-talasa, brzina detonacije eksploziva, i gustina eksploziva. Ovo je bio najraniji pokušaj upotrebe ANN kod predviđanja parametara koji opisuju fenomen vibracije tla izazvane miniranjima.

Svojim istraživanjem su dali dobru osnovu koju su ostali istraživači kasnije koristili u svojim radovima.

*M.Khandelwal i T.N. Singh* [16] su pomoću troslojne ANN mreže sa propagacijom greške unazad pokušali da predvide brzinu oscilovanja tla i frekvenciju oscilovanja tla. Konfiguracija mreže se sastojala od 10 ulaznih, 15 skrivenih i 2 izlazna neurona. Faktori seizmičkih potresa u ulaznom skupu podataka su bili dubina bušotina, linija najmanjeg otpora, razmak između bušotina, i maksimalna masa eksploziva po intervalu usporenja. Takođe su u ulaznom skupu bili rastojanje minskih serija do mernog mesta, čvrstoća na pritisak, Jungov modul elastičnosti, Poasonov koeficijent, brzina P-talasa i detonaciona brzina eksploziva.

Korišćen je skup podataka koji je sadržao 174 zapisa o potresima izazvanim miniranjima u Indijskom rudniku uglja „Jaiant“ prilikom eksploatacije jalovine. Od pomenutih 174 setova podataka, 154 je korišćeno za obuku ANN, a 20 za testiranje. Svi ulazni i izlazni parametri skalirani su između 0 i 1. Izvršena je obuka mreže, a verifikacija iste je izvršena sa 20 skupova podataka koji nisu učestvovali u obuci mreže. Merila performansi obučene mreže su predstavljena preko MAE (*Mean Absolute Error*) – srednje apsolutne greške, zatim preko  $R^2$  (*Coefficient of Determination*) – koeficijenta determinacije i položaja regresione linije u odnosu na pravu 1:1. Koeficijent determinacije je dobijen iz dijagrama zavisnosti izmerenih vrednosti i predviđenih vrednosti brzine oscilovanja tla. Kod predviđanja brzine oscilovanja tla obučenom ANN, vrednost MAE iznosi 0,196379 dok je vrednost  $R^2$  iznosila 0,9864. Istovremeno, kod predviđanja frekvencije mreža je imala vrednost MAE 0,24467, a vrednost  $R^2$  je bila 0,9080. Iz dobijenih vrednosti MAE i  $R^2$  prilikom predviđanja frekvencije se može zaključiti da je obučena ANN sa manjim uspehom predviđala vrednosti frekvencije u odnosu na predviđanje brzine oscilovanja tla.

Isti skup od 154 podatka koji je korišćen za obuku mreže upotrebljen je i za predviđanje brzine oscilovanja tla i frekvencije upotrebom MVRA (*Multivariate Regression Analysis*) – multivarijantne regresione analize. Korišćenjem jednačina dobijenih iz MVRA i 20 skupova podataka, predviđene su brzine oscilovanja tla i frekvencija koje su upoređivane sa izmerenim

vrednostima. I u ovom slučaju su MAE i  $R^2$  bile merilo uspešnosti predviđanja brzine oscilovanja tla.

Za predviđanje brzine oscilovanja tla vrednost MAE je 1,673981, a vrednost  $R^2$  je 0,358. Rezultati predviđanja frekvencije su veoma slabi ako uzmemo u obzir vrednost MAE od 176,826 i vrednost  $R^2$  0,098.

Takođe, u radu su korišćeni *konvencionalni prediktori* brzine oscilovanja tla predloženi od strane različitih istraživača. Za ove potrebe bilo je neophodno utvrditi konstante lokacija upotrebom višestruke regresione analize pomenutih 154 podataka. Svaki od upotrebljenih klasičnih prediktora je predvideo brzinu oscilovanja tla za 20 setova podataka koji su upoređeni sa izmerenim brzinama oscilovanja, a preko MAE i  $R^2$  je ocenjena njihova uspešnost predviđanja.

U cilju upoređivanja svih pomenutih modela predviđanja brzine oscilovanja tla, autori su formirali Tabelu br. 5 u kojoj su date vrednosti  $R^2$  i MAE.

Analizirajući rezultate iz *Tabele br. 5*, vidimo da model ANN ukazuje na vrlo blisku usaglašenost predviđene brzine oscilovanja tla sa izmerenim vrednostima na terenu. Takođe, ANN daju bolje rezultate predviđanja u poređenju sa konvencionalnim prediktorima i predviđanje primenom multivarijantne regresione analize (MVRA).

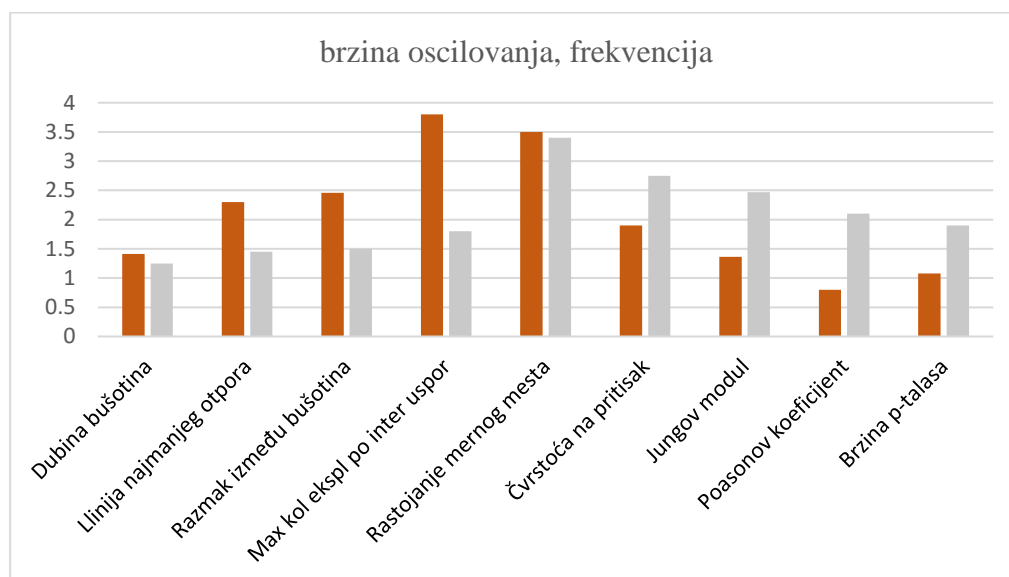
*Tabela br. 5 Vrednost  $R^2$  i MAE za različite modele predviđanja brzine oscilovanja tla na rudniku „Jaiant“ [16]*

<b>Model</b>	<b><math>R^2</math></b>	<b>MAE</b>
<b>ANN</b>	<b>0,9864</b>	<b>0,196379</b>
<b>MVRA</b>	<b>0,3508</b>	<b>1,673981</b>
<b>USBM</b>	<b>0,5409</b>	<b>0,600611</b>
<b>Lagefors i Kihlstrom</b>	<b>0,1306</b>	<b>1,43374</b>
<b>Ambresys i Hendron</b>	<b>0,2027</b>	<b>0,634349</b>
<b>Biro za Indijski standard</b>	<b>0,325</b>	<b>0,937706</b>
<b>Ghosh i Daemen</b>	<b>0,4781</b>	<b>1,511695</b>
<b>CMRI prediktori</b>	<b>0,5319</b>	<b>0,810048</b>

S obzirom na temu koju ova disertacija obrađuje, interesantan je i važan završni deo rada, u kome autori uz pomoć analize osetljivosti određuju relativni uticaj svakog faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla i frekvenciju. Postupak koji je primenjen podrazumeva održavanje svih faktora seizmičkih potresa konstantnim, osim jednog kome je menjana vrednost. Na taj način je omogućeno praćenje uticaja tog faktora na brzinu oscilovanja tla i frekvenciju.

Analiza osetljivosti posebno je rađena za brzinu oscilovanja tla, a posebno za frekvenciju. Rezultati analize osetljivosti su dati na *Slici br. 6*.

Stubići braon boje predstavljaju relativni uticaj faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla, dok stubići sive boje predstavljaju relativni uticaj faktora seizmičkih potresa na frekvenciju.



*Slika br. 6 Relativni uticaj faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla i frekvenciju na rudniku „Jaiant“ [16]*

Zaključeno je da maksimalna masa po intervalu usporenja i rastojanje minske serije do mernog mesta najviše utiču na brzinu oscilovanja tla, ali se ne mogu zanemariti ni uticaji ostalih faktora. Takođe, na frekvenciju najveći uticaj ima rastojanje minske serije do mernog mesta ali i faktori vezani za fizičko-mehaničke karakteristike stenske mase.

Osnovni nedostatak ovog istraživanja je skroman broj setova podataka ulazno-izlaznog skupa koji su učestvovali u obuci mreže ali i prilikom njene verifikacije. S druge strane dobro osmišljena koncepcija ovom radu daje mogućnost široke primene, naročito kod tema koje se

bave nekim vrstama upoređivanja. Međutim, ako se malo bolje analizira način određivanja uticaja faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla i frekvenciju, primetiće se odsustvo međusobnih odnosa faktora seizmičkih potresa prilikom promene samo jednog od njih. U tom slučaju mreža predviđa brzine oscilovanja tla i frekvencije za serije koje su nerealne i koje nisu učestvovala u obuci mreže. Poseban problem je kada faktor seizmičkih potresa koji se menja uzima vrednosti koje su blizu minimalnih ili maksimalnih vrednosti. Primer za napred navedeno je smanjenje ili povećanje mase eksploziva u bušotini. Promena mase eksploziva u bušotini na ovaj način može dovesti do minimalne ili maksimalne visine eksplozivnog punjenja u bušotini za isti prečnik bušotina, što se u stvarnim serijama događa retko ili nikada. Posledica napred navedenog su nerealna geometrija miniranja, poremećen koeficijent punjenja, potrebna dužina minskog čepa itd.

R. Lapčević i dr. [17] pokušali su tokom svog istraživanja da predvide brzinu oscilovanja tla primenom ANN i konvencionalnih prediktora u podzemnom rudniku bakra u Boru, Srbija. Izmerene su vibracije tokom miniranja 14 serija u rudnom telu „T“, uz primenu tri merne stanice. Merne stanice su zabeležile 42 podatka brzine oscilovanja tla. Tokom 14 miniranja izminirano je 612 bušotina pri čemu je masa eksploziva po intervalu usporenja bila od 12 do 26 kg. Broj bušotina u seriji se kretao od 20 do 80, pri čemu su po intervalu usporenja pripadale od 2 do 15 bušotina. Dobijeni set podataka od 42 izminirane serije je podeljen, pa je za obuku mreže iskorišćen 21 set podataka. Od preostalih setova podataka 8 je iskorišćeno za validaciju, a 13 za verifikaciju mreže.

Nakon analize nekoliko konfiguracija sa različitim brojem skrivenih neurona, odabrana je troslojna konfiguracija mreže sa 5 ulaznih neurona, 20 skrivenih i jedan izlazni neuron. Takođe je odabrana sigmoidna aktivaciona funkcija i pravilo obuke BPNN (*Back-Propagation Neural Network*) – propagacija greške unazad optimizovana algoritmom (BFGS) (*Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shannon*).

Kod ovog istraživanja članovi ulaznog skupa odnosno faktori seizmičkih potresa su ukupna masa eksploziva u minskoj seriji, masa eksploziva po intervalu usporenja, masa eksploziva po bušotini, vreme usporenja, rastojanje mernog mesta do minske serije. Izlazni parametar je brzina oscilovanja tla.

Svi ulazno izlazni parametri su skalirani između vrednosti 0 i 1, što je uslovljeno upotrebom sigmoidne prenosne funkcije.

Autori su odabrali različite statističke kriterijume u cilju ocene učinka predviđanja brzine oscilovanja tla od strane ANN i konvencionalnih prediktora. Ti kriterijumi su  $R^2$  – koeficijent determinacije (dobijen iz grafika izmerene brzine oscilovanja tla, predviđene brzine

oscilovanja tla), MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*) – srednja apsolutna procentualna greška, VARE (*Variance Absolute Relative Error*) – relativna apsolutna greška varijacije, MEDAE (*Median Absolute Error*) – srednja vrednost apsolutne greške i VAF (*Variance Account for*) – atributivna varijacija.

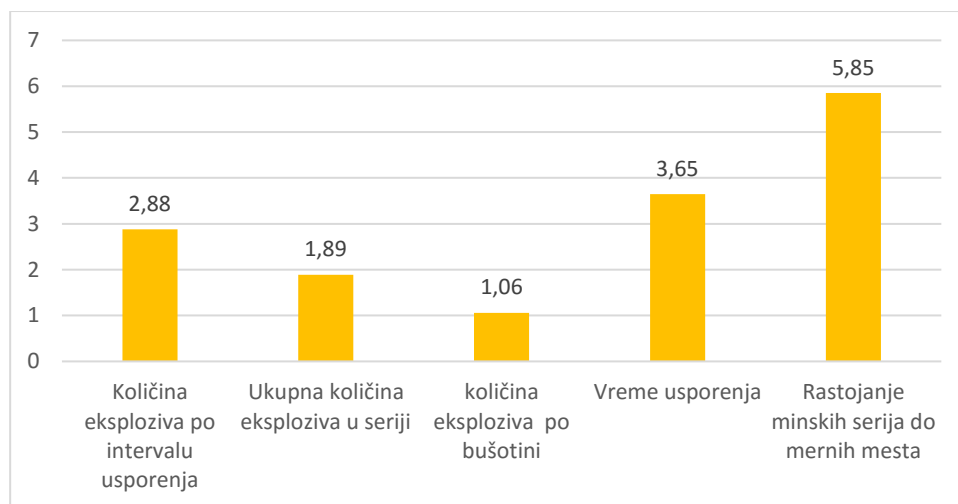
Rezultati učinka predviđanja brzine oscilovanja tla izazvanih miniranjima upotrebom različitih modela autori su prezentovali kroz *Tabelu br. 6*.

Na osnovu rezultata iz Tabele br. 6 zaključeno je da konvencionalne jednačine predviđanja brzine oscilovanja tla ne daju pouzdane rezultate kao ANN. Takođe je zaključeno da konvencionalne modele predviđanja brzine oscilovanja tla ne treba koristiti za uslove jamske eksploatacije. Razlog za to su male vrednosti koeficijenta determinacije  $R^2$ .

*Tabela br. 6 vrednosti  $R^2$ , MAPE, VARE, MEDAE i VAF za različite modele predviđanja brzine oscilovanja u podzemnom rudniku u Boru [17]*

<b>Model</b>	<b><math>R^2</math></b>	<b>MAPE</b>	<b>VARE</b>	<b>MEDAE</b>	<b>VAF</b>
<b>ANN</b>	<b>0,916</b>	<b>16,38</b>	<b>16,07</b>	<b>110,885</b>	<b>91,17</b>
<b>Duval i Petkof</b>	<b>0,26</b>	<b>64,29</b>	<b>57,07</b>	<b>314,22</b>	<b>68,42</b>
<b>Lagefors i Kihlstrom</b>	<b>0,13</b>	<b>63,18</b>	<b>56,50</b>	<b>345,88</b>	<b>70,19</b>
<b>Opšti prediktori</b>	<b>0,31</b>	<b>72,00</b>	<b>63,52</b>	<b>353,57</b>	<b>68,05</b>
<b>Ambresys i Hendron</b>	<b>0,28</b>	<b>64,46</b>	<b>57,19</b>	<b>326,00</b>	<b>68,57</b>
<b>CMRI prediktori</b>	<b>0,30</b>	<b>71,70</b>	<b>62,78</b>	<b>292,95</b>	<b>59,28</b>

U ovom istraživanju je predstavljena metoda analize osetljivosti koja nam omogućava da odredimo RSE (*Relative Strength of Effect*) – efekat relativnog značaja za svaki faktor seizmičkih potresa na konačnu vrednost brzine oscilovanja tla. Inače, sama metoda koristi hijerarhijsku analizu čija je osnova složen matematički aparat. Za slučaj ovog istraživanja efekat relativnog značaja za faktore koji su korišćeni dat je na *Slici br. 7*.



*Slika br. 7 RSE faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla u podzemnom rudniku bakra u Boru [17]*

Rezultati analize osetljivosti pokazuju da rastojanje minske serije do mernog mesta ima najveći uticaj na brzinu oscilovanja. Sledeći faktor seizmičkih potresa po uticaju je vreme usporenja, zatim sledi masa eksploziva po intervalu usporenja i ukupna masa eksploziva u minskoj seriji. Najmanji uticaj ima masa eksploziva po minskoj bušotini.

Kao i kod prethodnog istraživanja i ovde je broj setova ulazno-izlaznog skupa nedostatak. Međutim, tokom ovog istraživanja su upotrebljena dva poboljšanja koja doprinose boljim rezultatima predviđanja PPV-a. Prvo poboljšanje je usvajanje konfiguracije mreže koja je svojim performansama dokazala da najviše odgovara lokalnim uslovima. Drugo, ne manje važno poboljšanje je i pravilo obuke propagacije greške unazad optimizovano algoritmom (BFGS). Posebno treba istaći da je ovo istraživanje jedno od malobrojnih istraživanja koja su prezentovana u naučnoj javnosti, a koje se bavi predviđanjem brzine oscilovanja tla izazvanih miniranjima u podzemnoj eksploataciji.

*M. Saadat, M. Khandelwal i M. Monjezi* [18] upotrebili su ANN za predviđanje potresa tla uzrokovanih miniranjem u rudniku gvožđa u Iranu. Ulazno-izlazni skup podataka uključuje faktore seizmičkih potresa i izmerene brzine oscilovanja tla, a formiran je na bazi 69 izvršenih miniranja. Ulazni skup podataka sadržao je maksimalno punjenje po intervalu usporenja, udaljenost merne tačke od čela miniranja, dužina čepa i dužinu bušotine. Konfiguracija ANN sastojala se od ulaznog sloja neurona, dva skrivena sloja neurona i izlaznog sloja neurona. Arhitektura mreže je bila 4-11-5-1. Dobijeni rezultati predviđanja obučene mreže upoređivani su sa rezultatima četiri standardna empirijska modela i rezultatom višestruke linearne regresije.

Zaključeno je da upotreba ANN za predviđanje brzine oscilovanja ima prednost u odnosu na napred pomenute modele jer daje bolje rezultate. Rezultati dobijeni tradicionalnim empirijskim modelima pokazali su veća odstupanja od izmerenih vrednosti oscilovanja tla.

U napred navedenim radovima pokazuje se nadmoćnost upotrebe ANN kod predviđanja brzine oscilovanja tla izazvanih miniranjima u odnosu na konvencionalne modele. Međutim težnja ka još boljim modelima predviđanja brzine oscilovanja tla ide u pravcu kombinovanja ANN i drugih modela. Radovi novijeg datuma uključuju kombinovanje modela u cilju povećanja preciznosti predviđanja brzine oscilovanja.

Z. Zhongya i J. Xiaoguang [19] su kroz svoj rad predložili novu šemu zasnovanu na primeni kombinacije ANN i (FA-MIV) metode za predviđanje brzine oscilovanja tla izazvane miniranjem. FA (*Factor Analysis*) – faktorsku analizu su koristili u cilju optimizacije ulaznog skupa radi poboljšanja performansi obučene veštačke neuronske mreže. MIV (*Mean Impact Value*) – srednju vrednost uticaja u obliku indeksa su koristili za određivanje veličine efekta kojim ulazni neuron deluje na izlazni neuron. Ulazni skup podataka je sadržao devet faktora seizmičkih potresa, a brzina oscilovanja tla je izlazni parametar. Primenom (FA-MIV) su dobili manji broj faktora u ulaznom skupu koji su korišćeni za obuku mreže. Autori su iskoristili ulazni skup od 108 podataka, pri čemu je 98 korišćeno za obuku, a 10 za testiranje modela. Dobijene rezultate iz obučene mreže uz prethodnu primenu (FA-MIV) uporedili su sa obučenom mrežom bez upotrebe (FA-MIV).

Prilikom upoređivanja su zaključili da upotreba (FA-MIV) daje bolje rezultate predviđanja brzine oscilovanja tla. Takođe su zaključili da primena kombinovanog modela ANN i (FA-MIV) daje bolje rezultate od ostalih kombinovanih modela predviđanja brzine oscilovanja kod kojih je upotrebljen (FA-MIV).

Li i drugi [20] su kombinovali ANN sa dva stohastička metaheuristička algoritma: BBO (*Biogeography-Based Optimization*) – biogeografija i PSO (*Particle Swarm Optimization*) – optimizacija roja čestica. Takođe su kombinovali ANN i sa jednim DIRECT (*Deterministic Optimization Algorithms*) – determinističkim algoritmom za optimizaciju. Kombinovanje algoritama je rađeno zbog optimizacije ulaznog skupa podataka u cilju poboljšanja performansi veštačke neuronske mreže.

Podaci za istraživanje su prikupljeni na dva kamenoloma u oblasti brane na reci Shur, Indija. Skup je sadržao 80 setova ulazno-izlaznih podataka. Praćen je uticaj linije najmanjeg otpora, razmaka između bušotina, dužine čepa, specifične potrošnje eksploziva, maksimalne i mase eksploziva po intervalu usporenja. Takođe su praćeni ocena stenskog masiva i rastojanja minskih serija do mernog mesta na brzinu oscilovanja tla izazvanih miniranjima.

Algoritam za predviđanje brzine oscilovanja tla razvijen je uz pomoć MATLAB potprograma. Nasumično je odabrano 56 setova podataka koji su korišćeni za razvoj modela, a razvijeni model je testiran na preostala 24 seta podataka.

U ovoj studiji konstruisani su različiti ANN modeli koristeći od 2 do 12 neurona u skrivenom sloju. Prema rezultatima najbolje performanse bile su za arhitekturu sedam ulaznih neurona, jedan skriveni sloj sa pet neurona i jedan neuron u izlaznom sloju. Koeficijent determinacije  $R^2$  za odabranu arhitekturu mreže je imao vrednost 0.931. Funkcija sigmoidne aktivacije je takođe korišćena u ANN modeliranju.

U istraživanju su, u cilju dobijanja predviđenih brzina oscilovanja, korišćeni i modeli sa MPMR (*Minimax Probability Machine Regression*) – mašinskom regresijom minimaks verovatnoće, ELM (*Extreme Learning Machine*) – mašine za ekstremno učenje i tri dobro poznata empirijska modela *Indian Standard*, *USMB* i *Ambresys i Hendron*.

Radi upoređenja uspešnosti predviđanja brzine oscilovanja tla predloženim modelima korišćeni su  $R^2$  – koeficijent determinacije, MAE (*Mean Absolute Error*) – srednja apsolutna greška, RMSE (*Mean Square Error*) – srednja kvadratna reška, RSR – odnos RMSE i standardne devijacije  $\delta$  i D (*Degree of Agreement*) – stepen usaglašenosti.

Rezultati učinka predviđanja brzine oscilovanja tla izazvanih miniranjima upotrebom različitih modela u radu prezentovani su u *Tabeli br. 7*.

*Tabela br. 7 Vrednosti  $R^2$ , MAE, RMSE, RSR i D za različite modele predviđanja brzine oscilovanja tla na kamenolomima u Indiji [20]*

<b>Model</b>	<b><math>R^2</math></b>	<b>MAE</b>	<b>RMSE</b>	<b>RSR</b>	<b>D</b>
<b>BBO-ANN</b>	<b>0,988</b>	<b>0,022</b>	<b>0,026</b>	<b>0,109</b>	<b>0,992</b>
<b>PSO-ANN</b>	<b>0,972</b>	<b>0,034</b>	<b>0,041</b>	<b>0,174</b>	<b>0,991</b>
<b>MPMR</b>	<b>0,971</b>	<b>0,035</b>	<b>0,040</b>	<b>0,169</b>	<b>0,992</b>
<b>ELM</b>	<b>0,965</b>	<b>0,037</b>	<b>0,045</b>	<b>0,188</b>	<b>0,991</b>
<b>DIRECT-ANN</b>	<b>0,981</b>	<b>0,024</b>	<b>0,036</b>	<b>0,151</b>	<b>0,994</b>
<b>USMB</b>	<b>0,747</b>	<b>0,100</b>	<b>0,117</b>	<b>0,494</b>	<b>0,924</b>
<b>Indian Standard</b>	<b>0,799</b>	<b>0,087</b>	<b>0,105</b>	<b>0,444</b>	<b>0,943</b>
<b>Ambresys i Hendron</b>	<b>0,724</b>	<b>0,105</b>	<b>0,123</b>	<b>0,517</b>	<b>0,914</b>



Autori su zaključili da performanse statističkih modela (*Indijan Standard*, *USBM* i *Ambresys* i *Hendron*) nisu dovoljno dobre za predviđanje brzine oscilovanja tla na pomenutoj lokaciji. Modeli *ELM*, *MPMR* i *PSO-ANN* su bili sposobni da predvide brzinu oscilovanja tla sa prihvatljivim performansama za uslove na pomenutoj lokaciji. Modeli *BBO-ANN* i *DIRECT-ANN* su dali najbolje rezultate predviđanja brzine oscilovanja tla. Drugim rečima, potvrđena je efikasnost *BBO* i *DIRECT* modela za poboljšanje performansi ANN.

U studiji je takođe izvršena analiza osetljivosti za procenu uticaja faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla, primenom *Yang* i *Zang-ovog* hijerarhijskog analitičkog metoda zasnovnog na primeni neuronskih mreža. Metoda je predstavljena *Formulom br. 16*.

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n (y_{ik} y_{ok})}{\sqrt{\sum_{k=1}^n y_{ik}^2 \sum_{k=1}^n y_{ok}^2}} \quad (16)$$

gde su:

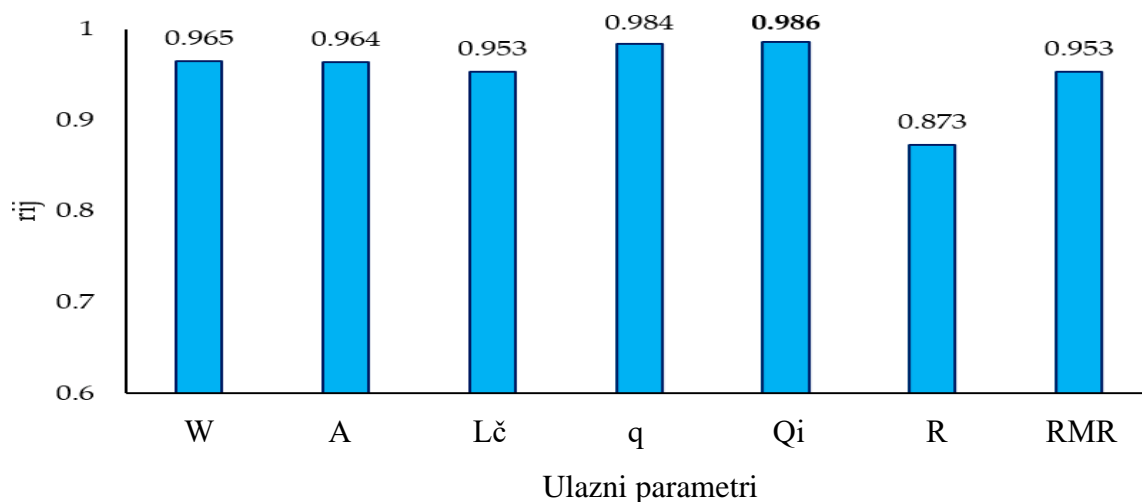
n – broj setova ulazno-izlaznih podataka,

$y_{ik}$  – vrednost faktora seizmičkih potresa,

$y_{ok}$  – vrednost brzine oscilovanja tla i

$r_{ij}$  – vrednost pojedinačnih uticaja faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla.

Upotrebom Formule br. 17 i 80 setova ulazno-izlaznih podataka dobijeni su uticaji faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla na pomenutim kamenolomima u Indiji, dati na *Slici br. 8*.



*Slika br. 8 Uticaj ulaznih parametara na brzinu oscilovanja tla na kamenolomima u Indiji [20]*

Najveće vrednosti *rij* pojedinih faktora označavaju i najveći uticaj na brzinu oscilovanja tla. Sa *Slike br. 8* se vidi da je maksimalna masa po intervalu usporenja sa  $rij=0.986$  bio glavni faktor seizmičkih potresa koji je uticao na brzinu oscilovanja tla. Slede specifična potrošnja eksploziva, linija najmanjeg otpora itd.

Mali broj podataka ulazno-izlaznog skupa u ovom istraživanju je nedostatak, ali se celokupno istraživanje može okarakterisati kao vrlo dobro. Kroz istraživanje je potvrđena potreba uvođenja kombinovanih modela koji ublažavaju već poznate nedostatke koje ANN imaju prilikom samostalne upotrebe u cilju predviđanja rezultata. Dokaz za to su dobijeni koeficijenti determinacije sa kombinovanim modelima koji su veći od koeficijenta determinacije modela samostalne upotrebe ANN. Takođe i saznanje o mogućnostima kombinovanja ANN sa naizgled nekompatibilnim modelima je od velikog značaja. Kritički se treba osvrnuti na rezultate uticaja faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla. Dobijene vrednosti *rij* su prilično ujednačene što se donekle razlikuje od rezultata istraživanja [16] i [17].

Pokušaj primene mekog računarstva radi predviđanja brzine oscilovanja tla je predstavljen kroz rad čiji su autori *C. K. Arthur, V. A. Temeng i Y.Y. Ziggah* [21]. Prvenstveni cilj rada je bio provera da li WNN (*Soft Neural Network*) – meke neuronske mreže mogu da budu korišćene kao alternativa drugih široko korišćenih tehnika. Upotrebljen je skup od 210 podataka dobijenih od rudarske kompanije iz Gane. Faktori seizmičkih potresa su bili broj bušotina, specifična potrošnja eksploziva, dubina bušotine, maksimalne mase eksploziva po intervalu usporenja i rastojanje minske serije do mernog mesta.

Rezultati dobijeni primenom WNN su upoređivani sa četiri empirijska modela predstavljena kroz *Indijski standard, Američki biro za rudarstvo, Ambrasey-Hendron i Langefors-Kilhstrom*, kao i sa četiri ANN modela. Modeli ANN, sa kojima je WNN upoređivana su BPNN (*Back-Propagation Neural Network*) – mreža s propagacijom unazad, RBFNN (*Radial Basis Function Neural Network*) – mreža sa radijalnom osovinom, GRNN (*Generalized Regression Neural Network*) – model sa primenjenom opštom regresijom kao i model sa metodom GMDH (*Group Method of Data Handling*) – grupne obrade podataka. Zaključili su da VNN mreža sa jednim skrivenim slojem neurona daje zadovoljavajuće i uporedive rezultate sa referentnim BPNN i RBFNN metodama. Analiza rezultata je čak potvrdila da je WNN mreža imala manje vrednosti grešaka u poređenju sa BPNN.

*D. J. Armaghani, S. V. Alavi i drugi* [22] su uporedili ANFIS (*Adaptive Neuro-fuzzy Inference System*) – adaptivni fazi sistem zaključivanja, ANN i USBM model za predviđanje brzine oscilovanja tla prilikom miniranja. Koristili su set od 109 podataka dobijenih na kamenolomu granita ISB Džohor, Malezija. Ulazni skup podataka sadržao je maksimalne mase

eksploziva po intervalu usporenja i rastojanje minske serije do mernog mesta, a izlaz je bila brzina oscilovanja tla. Bilo je više ANFIS i ANN sistema koji su korišćeni za predviđanje brzine oscilovanja tla. Njihov zaključak je da izabrani ANFIS sistem može da predvidi brzinu oscilovanja tla sa većom preciznošću u poređenju sa drugim modelima. Napomenuli su da u praksi svi predloženi modeli imaju primenu kod predviđanja brzine oscilovanja ali ih treba koristiti u zavisnosti od situacije.

*Tabela br. 8* pokazuje neke nedavne studije sa svojim performansama u predviđanju brzine oscilovanja tla izazvanih miniranjima.

Oznake u *tabeli br. 8* su: Linija najmanjeg otpora ( $W$ ); Rastojanje između bušotina ( $A$ ); Dužina čepa ( $L\check{c}$ ); Specifična potrošnja ( $q$ ); Indeks otpora prema miniranju ( $I$ ); Mašina za podršku vektorima ( $SVM$ ); Maksimalno punjenje po intervalu usporenja ( $Qi$ ); Zapreminska masa stena ( $\gamma$ ); Prečnik bušotine ( $d$ ); Dubina bušotine ( $Lb$ ); Rastojanje između redova ( $B$ ); Broj redova ( $N$ ); Optimizacija roja čestica ( $PSO$ ); Podbušenje ( $SD$ ); Rastojanje minskih serija do mernih mesta ( $R$ ); Ukupna masa eksploziva ( $Qbuk$ ); Indeks kvaliteta stenske mase ( $RQD$ ); Jungov modul elastičnosti ( $E$ ); Imperijalistički konkurentski algoritam ( $ICA$ ); Brzina p-talasa ( $Vp$ ); Adaptivni fazi sistem zaključivanja ( $ANFIS$ ); Fazi sistem zaključivanja ( $FIS$ ); Koeficijent determinacije ( $R^2$ ); Jednoosna čvrstoća na pritisak ( $UCS$ ); Zatezna čvrstoća ( $TS$ ); Rastojanje između pukotina ( $Js$ ); Odnos dubine bušotine i linije najmanjeg otpora ( $Lb/W$ ); Specifično punjenje ( $p$ ); Vreme usporenja između redova ( $DPR$ ).

Tabela br. 8 Noviji radovi na predviđanju brzine oscilovanja tla sa korišćenjem tehnike mekog računarstva [22]

Autor	Metod	Faktori miniranja	Broj pod.	R <sup>2</sup>
Iphar i ostali (2008)	ANFIS	R, Qi	44	0,98
Monjezi i ostali (2011)	ANN	Lb, Lč, R, Qi	182	0,95
Khandehval i ostali (2011)	ANN	R, Qi	130	0,92
Mohamed (2011)	ANN, FIS	R, Qi	162	ANN=0,94 FIS=0,90
Fisne i ostali (2011)	FIS	R, Qi	33	0,92
Li i ostali (2012)	SVM	R, Qi	32	0,89
Mohamednejad i ostali (2012)	SVM,ANN	R, Qi	37	SVM=0,89 ANN=0,85
Ghasemi i ostali (2013)	FIS	W, A, Lč, N, Qi,R	120	0,95
Monjezi i ostali (2013)	ANN	Qi, R, Qbuk	20	0,93
Jahed Armaghani i ost. (2014)	PSO-ANN	A, W, Lč, q, Qi, d, N, $\gamma$ , SD	44	0,94
Hajihassani i ostali (2015b)	ICA-ANN	B, Lč, q, Qi, R, Vp, E	95	0,98
Hasanipanah i ostali (2015)	SVM	R, Qi	80	0,96
Dindarlooo (2015b)	SVM	$\gamma$ , E, UCS, TS, Js, W, A, Lb/W, SC, Lč, d, DPR, R	100	0,99
Hajihassani i ostali (2015a)	PSO-ANN	B, Qi, Lb, Lč, SD, R, q, RQD	88	0,89
Jahed Armaghani i ost. (2015)	ANFIS	R, Qi	109	0,97

## 5.2. PRIMENA ANN KOD REŠAVANJA OSTALIH PROBLEMA U RUDARSTVU

ANN su korišćene za predviđanje i ostalih štetnih pojava izazvanih miniranjima. Primeri su radovi koji slede u kojima su predviđane daljine razletanja komada izazvanih miniranjem primenom ANN.

*M. Monjezi, A. Bahrami, A.Y. Varjani, A.R. Sayadi* [23] su pokušali da predvide i kontrolišu razletanje komada prilikom miniranja u rudniku gvožđa Sangan u Iranu. Za to su koristili BPN mrežu sa arhitekturom 9-13-1 koristeći 192 seta eksperimentalnih podataka dobijenih prilikom miniranja. Zaključili su da je upotreba ANN mreže sa pomenutom arhitekturom pokazala odlično preklapanje između predviđenih i izmerenih vrednosti razletanja komada. Primenom dobijenih rezultata značajno se može umanjiti razletanje komada stena sa 165 na 25 m.

*Stojadinović S.* [24] je upotrebio ANN preko programskog paketa „Peltarion Synapse“ za definisanje sigurnih rastojanja kod razletanja komada pri miniranju na površinskim kopovima. U istom radu verifikovao je pojedinačne module sprege, Klasifikatora, Prediktora i Numerike. Zatim je izvršio verifikaciju sprege kao sistema i dokazao njenu sposobnost da pouzdano i precizno odgovori na različita pitanja vezana za problem razletanja komada.

Primeri upotrebe ANN u rudarskoj nauci su zastupljeni i kroz radove pojedinih autora koji su obrađivali teme koje nisu direktno vezane za predviđanje štetnih uticaja izazvanih miniranjima.

*M. Monjezi, Z. Ahmadi, M. Khandelwal* [25] su u svom radu upotrebili ANN u cilju razvoja modela za predviđanje distribucije veličine fragmentacije stena usled miniranja u rudniku gvožđa Čadormalu u Iranu. Faktori seizmičkih potresa su jednoosna čvrstoća na pritisak, brzina bušenja, ovodnjenost bušotina, linija najmanjeg otpora, rastojanje minskih bušotina, koeficijent punjenja, prečnik bušotine, visina etaže, specifična potrošnja eksploziva i vreme usporenja. Bilo je 97 ulaznih setova podataka sa kojima je obučavana četvoroslojna mreža sa arhitekturom 10-7-5-1. Rezultati koji su dobijeni iz mreže su upoređivani sa rezultatima višestruke regresione analize. Mreža je ostvarila daleko bolje predviđanje fragmentacije stenske mase. Zaključeno je da ANN model može biti bolja zamena za višestruku regresionu analizu u cilju predviđanja fragmentacije stene usled miniranja na površinskim kopovima.

*M. Monjezi, F. Farzaneh, A. Asadi* [26] su u svom radu pokušali da nađu najpogodniju šemu miniranja, koja bi dala traženu fragmentaciju stenske mase uz minimalne neželjene efekte nastale kao posledica miniranja. U ovu svrhu su korišćene dve metode. U prvom koraku korišćen je metod DEA (*Data Envelopment Analysis*) za odabir efikasnih šema miniranja. U drugom koraku je korišćen metod TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) za prepoznavanje najpogodnije šeme među šemama odabranim DEA metodom. DEA metod je u prvom koraku odabrao 14 uslovno efikasnih šema miniranja iz 78 posmatranih šema. U drugom koraku, TOPSIS je odabrao 3 efikasne šeme. Izabrane šeme su ocenjene kao najpogodnije za miniranje u rudniku gvožđa Čadormalu.

*K. Muhammad i A. Shan* [27] su u svom radu opisali ispitivanje pukotinske sisteme i oslabljenja stenske mase iza poslednjeg reda u minskoj seriji. Koristili su ANN sa arhitekturom 12-2-1 koja je odabrana zbog najboljih rezultata u odnosu na ostale arhitekture koje su oprobane. Ulazni skup je sadržao 30 setova podataka faktora seizmičkih potresa i karakteristike eksploziva. Izlazni parametar je bila širina pukotinskog pojasa iza poslednjeg reda. Analiza osetljivosti ulaznih parametra na izlazni parametar je pokazala da specifična potrošnja eksploziva ima najveći uticaj, zatim nagib bušotine i linija najmanjeg otpora. Zaključeno je da se smanjenjem nagiba bušotine sa  $85^\circ$  na  $75^\circ$  i održavanjem odnosa 2/3 linije najmanjeg otpora i rastojanja između redova smanjuje i širina pukotinskog sistema sa 8 na 0,5 m.

## 6. OPIS LOKACIJE I PRIKUPLJANJE PODATAKA SA TERENA

Terenska istraživanja, čiji su rezultati korišćeni u okviru ove doktorske disertacije, izvršena su na površinskom kopu Veliki Krivelj, tokom 2018. i 2019. godine. Tom prilikom su prikupljeni podaci o parametrima izvedenih miniranja, položajima minskih serija i registrovanim seizmičkim povesima tla izazvanim miniranjima.

### 6.1. OSNOVNI PODACI O POVRŠINSKOM KOPU VELIKI KRIVELJ

Početak 20. veka počinje eksploatacija bogate zlatonosne rude bakra u Boru, da bi se posle Prvog svetskog rata intenzivirala, a posle Drugog svetskog rata nastavila uz stalno povećanje rudarskih i prerađivačkih kapaciteta. Otvaranjem površinskih kopova u Boru, Majdanpeku i Velikom Krivelju kod Bora, RTB Bor je postao rudarsko-metalurški gigant, a Bor i Majdanpek su se razvili kao urbanizovana naselja gradskog tipa i sedišta opština. Privredni napredak pratio je i razvoj saobraćajne infrastrukture, prvenstveno drumske i železničke, a delom su se poboljšali i uslovi za korišćenje Dunava kao značajne međunarodne saobraćajnice [28]. Od decembra 2018. godine površinski kop Veliki Krivelj postao je deo kompanije Serbia Zijin Copper D.O.O. nakon privatizacije RTB Bor grupe.

Ležište bakra Veliki Krivelj nalazi se, vazdušnom linijom, na oko 3 km severoistočno od Bora, u slivu Kriveljske reke, u neposrednoj blizini sela Veliki Krivelj. U okviru ležišta bakra Veliki Krivelj 1979. godine otvoren je površinski kop koji danas predstavlja oslonac proizvodnje u kompaniji Zijin. Regionalni put prolazi u neposrednoj blizini ovog površinskog kopa, a povezuje ga sa Borom i selom Krivelj. Lokacija rudnika Veliki Krivelj data je na *Slici br. 9*.

Ležište bakra Veliki Krivelj nosi sva obeležja koja su karakteristična za porfirna ležišta bakra. Obrazovano je u hidrotermalno promenjenim gornjokrednim hornblenda andezitima i njihovim piroklastitima (breče, aglomerati i tufovi). Manjim delom je obrazovano u samim intruzivnim stenama granodioritskog sastava („malih intruzija”, uglavnom kvarcioritporfiriti).

Andeziti su najrasprostranjeniji petrološki član kompleksa, holokristalastoporfirne strukture sa fenokristalima hornblende i biotita, u sitnozrnoj osnovi. Postmagmatskom vulkanskom aktivnošću su hidrotermalno izmenjeni i mineralizovani.

Hornblenda-andezit i hornblenda-andeziti sa biotitom i njihovi piroklastiti su najzastupljenija vrsta stene. U okviru samog ležišta oni su, najčešće, intenzivno hidrotermalno izmenjeni i orudnjeni dok su u obodnim delovima manje izmenjeni (hloritisani) sa prelazom u potpuno sveže hornblenda andezitske vulkanite [28].

Otkopavanje rude i jalovine se odvija klasičnim diskontinualnim načinom otkopavanja, sa kombinovanim transportom jalovine. Faze otkopavanja su:

- Bušenje i miniranje, upotrebom bušilica prečnika bušenja 150, 160, 180 i 250 mm.
- Utovar, upotrebom elektro-hidrauličnih bagera sa zapreminom kašike 15 i 22 m<sup>3</sup> kao i sa dizel-hidrauličnim bagerima čija je zapremina kašike 5 m<sup>3</sup>.
- Transport rude i jalovine do primarnih drobilica i spoljnih odlagališta koji se odvija upotrebom dizel elektro i mehaničkih kamiona nosivosti, 70, 136, 220, 240 i 260 t.
- Odlaganje jalovine se vrši na spoljna odlagališta i transportnim sistemom za jalovinu.



Slika br. 9 Saobraćajno - geografska karta područja severoistočne Srbije

Površinski kop je elipsastog oblika, sa transportnim komunikacijama serpentinskog tipa.

Projektovane geometrijske karakteristike kopa su date u *Tabeli br. 9*, a izgled kopa dat je na *Slici br. 10*.



Eksploataciju na površinskom kopu Veliki Krivelj karakteriše brzo napredovanje radova u prostoru i po dubini. Ovakva dinamika je posledica konstantnog rasta dnevnih iskopina, koje značajno doprinose promenama lokacija otkopavanja.

*Tabela br. 9 Geometrijske karakteristike površinskog kopa Veliki Krivelj [14]*

Geometrijske karakteristike površinskog kopa	Vrednost
Visina radne etaže	15 m
Ugao kosine radne etaže	70°
Generalni ugao kopa	32 - 39°
Širina transportnih puteva	15 - 20 m
Minimalna širina etažne ravni radne etaže	30 - 42 m
Minimalna završna širina etažne ravni	13 – 18,5 m
Minimalna širina useka otvaranja	34,5 m



*Slika br.10 Izgled površinskog kopa Veliki Krivelj*

## 6.2. TEHNOLOGIJA BUŠENJA I MINIRANJA

### Bušenje

Za bušenje vertikalnih minskih bušotina u cilju primarnog miniranja na površinskom kopu Veliki Krivelj koriste se rotacioni i udarni tip bušenja.

Za rotacioni tip bušenja koriste se rotacione bušilice na elektro pogon tipa BUCYRUS ERIE BE 45R, BUCYRUS ERIE BE 60R i Atlas Copco DML. Pomenute bušilice koriste trokonusne bušaće krune prečnika 250 mm uz odgovarajuće bušaće šipke i pribor za obradu zidova bušotina.

Za udarni tip bušenja koriste se bušilice na dizel pogon primenom dubinskih ronećih čekića proizvođača EPIROC. U upotrebi su tri tipa bušilica u zavisnosti od prečnika bušenja. Tipovi bušilica su EPIROC D55 sa prečnikom bušenja 150 mm, EPIROC D60 sa prečnikom bušenja 160 mm i EPIROC D65 sa prečnikom bušenja 180 mm.

### Miniranje

Posle transporta, miniranje je faza u eksploataciji mineralnih sirovina kojoj treba posvetiti posebnu pažnju, s obzirom na učešće u troškovima po toni iskopina. Takođe je značajan i uticaj miniranja na celokupan proces prerade rude u flotacijama, uzimajući troškove za usitnjavanje rude u obzir. Od kvaliteta izminiranog materijala, definisanog kroz granulometrijski sastav, zavise sve naredne faze usitnjavanja rude u procesima drobljenja i mlevenja. Kvalitetno izvedeno miniranje podrazumeva traženi granulometrijski sastav izminiranog materijala, a da su pri tome minimalni troškovi faze bušenja i miniranja uz minimalne štetne efekte izazvane miniranjem.

*Primarno miniranje* podrazumeva standardni postupak etažnog miniranja u cilju dobijanja rastresene mase radi utovara i dalje obrade u narednim tehnološkim fazama.

Za primarno miniranje na površinskom kopu koriste se eksplozivne smeše nižih energetskih sposobnosti i manjih brizantnosti, što je u skladu sa fizičko-mehaničkim karakteristikama stenskih masa koje su zastupljene na površinskom kopu. Kod suvih bušotina koriste se AN-FO eksplozivne smeše, a za ovodnjene bušotine SURRY eksplozivne smeše.

Za *sekundarna miniranja* na površinskom kopu i usitnjavanja negabarita, koristi se patronirani eksploziv AMONEX-1.

Karakteristike eksplozivnih smeša i eksploziva date su u *Tabeli br. 10*.

Tabela br. 10 Karakteristike eksploziva [28]

Karakteristike	AN- FO	SLURRY Majdanit 10	AMONEX- 1
Gustina, kg/l	0,90 – 0,95	1,06 – 1,25	1,05 – 1,10
Brzina detonacije, m/s	2 000 ÷ 2 500	3 700	4 100
Gasna zapremina, l/kg	890	1 085	955
Toplota eksplozije, kJ/kg	3 559	2 770	4 248
Kritičan prečnik, mm	50 ÷ 60	100	ispod 28
Inicijacija	80 g pentolit	360 g pentolit	DK- 8

Za iniciranje eksplozivnih punjenja u minskim bušotinama primenjuje se *Nonel sistem* koji pripada grupi neelektričnih sistema za iniciranje, tačnije koristi se Dual delay system. U sistemu za iniciranje eksplozivnog punjenja koristi se još i pojačnik (buster) težine 500 g.

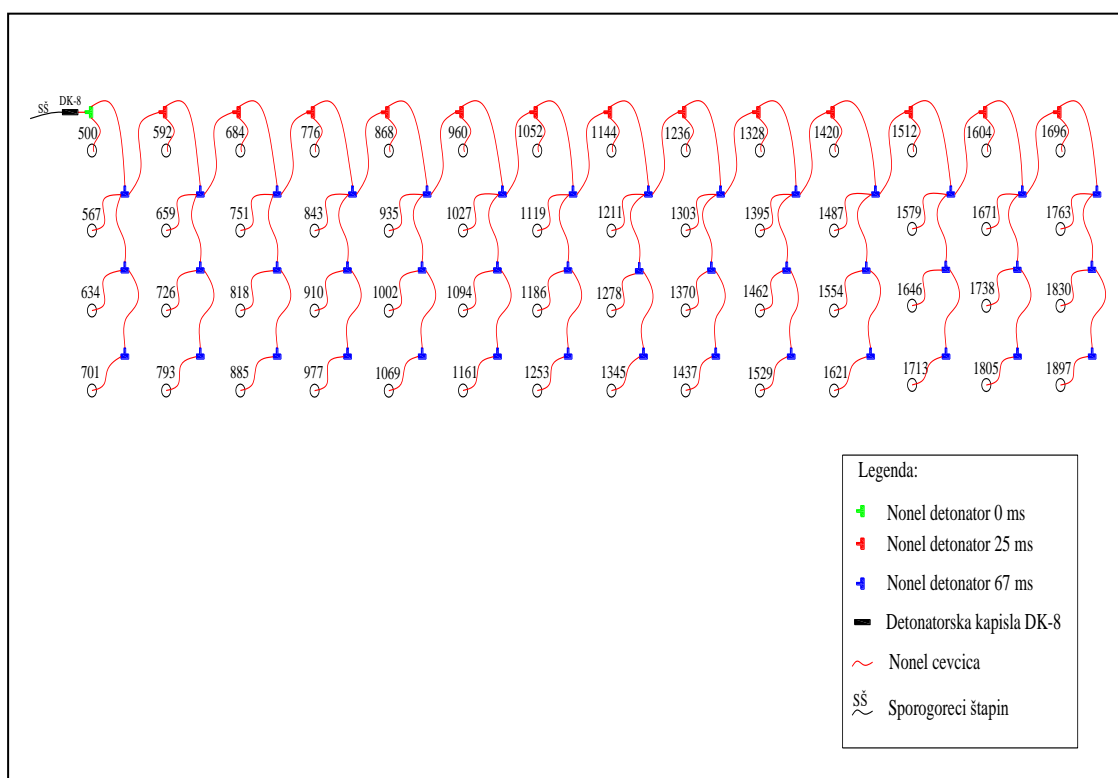
U Tabelama br. 11 i br. 12 mogu se videti projektovani parametri miniranja za prečnike bušotina 251mm, a na *Slici br. 11* je projektovana šema iniciranja.

Tabela br. 11 Projektovani parametri miniranja za prečnik 251 mm i eksploziv Slurry [28]

Specifična potrošnja eksploziva, kg/m <sup>3</sup>	0,49
Masa eksploziva po m', kg/m'	61,4
Masa eksploziva po bušotini, kg	694
Zapremina odminiranog materijala od jedne minske bušotine, m <sup>3</sup> /buš.	1 414
Masa odminiranog materijala od jedne minske bušotine, t/buš.	3 747
Rastojanje između bušotina u redu, m	10,0
Rastojanje između redova bušotina, m	9,4
Indeks ujednačenosti granulacije	1,0
Srednja veličina komada, mm	443

Tabela br. 12 Projektovani parametri miniranja za prečnik 251 mm i eksploziv ANFO [28]

Specifična potrošnja eksploziva, kg/m <sup>3</sup>	0,39
Masa eksploziva po m', kg/m'	44,2
Masa eksploziva po bušotini, kg	504
Zapremina odminiranog materijala od jedne minske bušotine, m <sup>3</sup> /buš.	1 295
Masa odminiranog materijala od jedne minske bušotine, t/buš.	3 443
Rastojanje između bušotina u redu, m	9,7
Rastojanje između redova bušotina, m	8,9
Indeks ujednačenosti granulacije	1,05
Srednja veličina komada, mm	545



Slika br. 11 Projektovana šema iniciranja sa 4 reda bušotina i 14 bušotina u redu [28]

### 6.3. PRIKUPLJANJE PODATAKA O MINIRANJIMA

Tokom perioda koji je uzet u razmatranje izminirano je 1158 serija. Svako izvedeno miniranje je predstavljeno u Dnevniku miniranja [30-33] u kome se nalaze relevantni podaci o faktorima miniranja koji su praćeni. U sastavu Dnevnika miniranja se, takođe, nalaze i geodetska skica serije formirana od strane geodetske službe Rudnika Bakra Bor.

Dnevnici izvršenih miniranja su bili izvor vrednosti parametara miniranja tokom celog perioda koji je obuhvaćen istraživanjem.

U dnevnicima miniranja su se nalazili sledeći podaci:

- prečnik minskih bušotina ( $d$ ), mm
- broj minskih bušotina ( $N_b$ ).
- mase pojedinačnih eksplozivnih punjenja ( $Q_b$ ), kg
- dubine pojedinačnih minskih bušotina ( $L_b$ ), m
- šema iniciranja
- primenjena vrsta eksploziva
- primenjena vremena usporenja, ms
- ukupna masa eksploziva ( $Q_{buk}$ ), kg
- ukupna dužina minskih bušotina ( $L_{buk}$ ), m.

Na osnovu navedenih parametara miniranja, izračunati su sledeći izvedeni parametri miniranja:

- prosečna masa eksploziva u minskim bušotinama ( $Q_{bsr}$ ) primenom *Formule br. 17*:

$$Q_{bsr} = \frac{Q_{buk}}{N_b}, \frac{kg}{m} \quad (17)$$

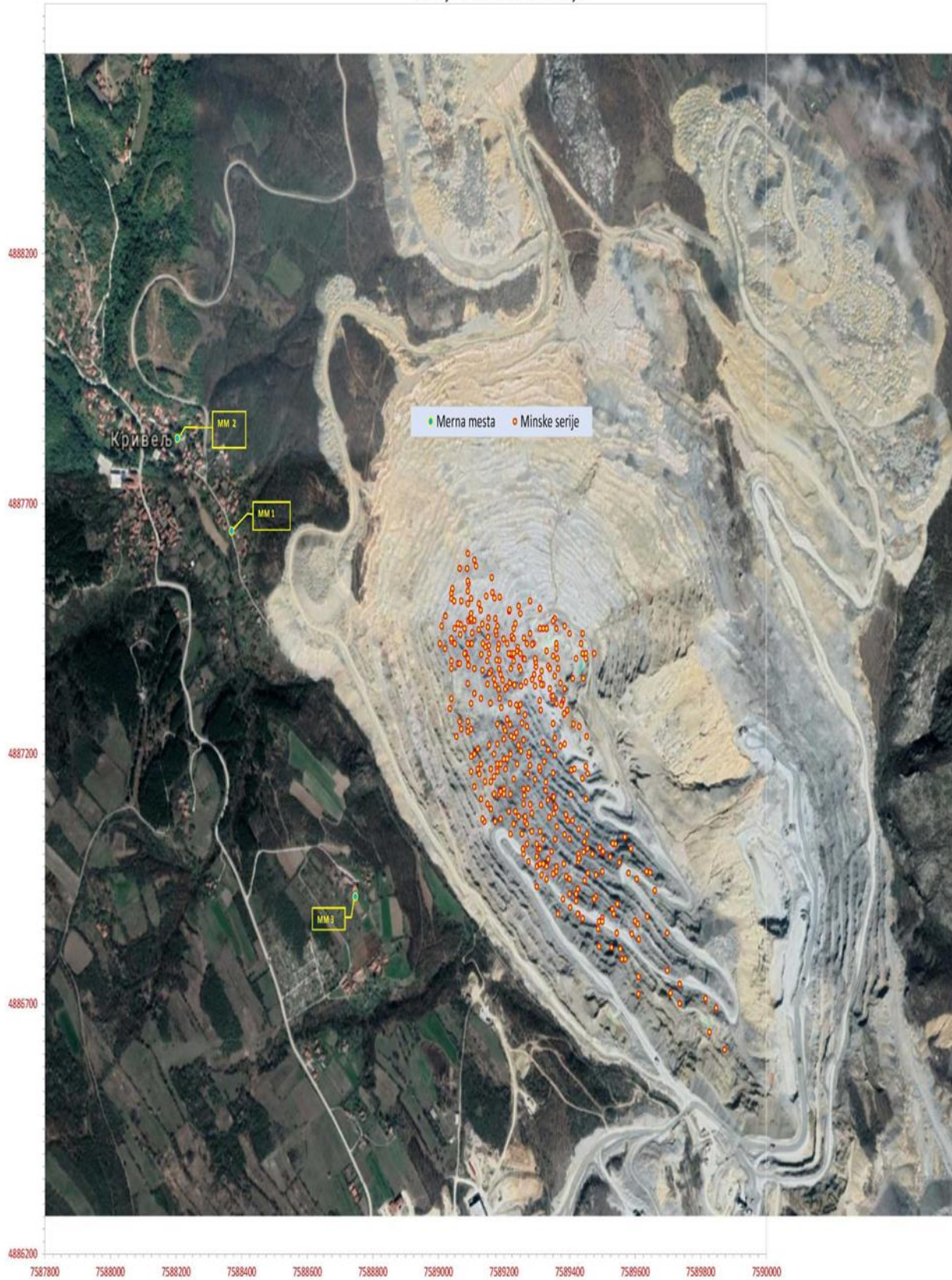
- i prosečni koeficijent punjenja ( $K_p$ ) primenom *Formule br. 18*:

$$K_p = \frac{\sum_{i=1}^{N_b} \frac{Q_{bi}}{L_{bi}^p}}{N_b}, \frac{kg}{m} \quad (18)$$

Na osnovu primenjenih vremena usporenja i analize primenjenih šema iniciranja određene su vrednosti sledećih parametara, koji se prema empirijskim metodama prognoziranja intenziteta seizmičkih potresa, smatraju merodavnim, i to:

- maksimalna masa eksploziva inicirana u jednom nominalnom vremenu iniciranja ( $Q_i$ ), kg
- maksimalna masa eksploziva inicirana u vremenskom intervalu od 8 ms, ( $Q_{8ms}$ ), kg

Položaj mernih mesta i minskih serija



Slika br. 12 Položaj minskih serija i mernih mesta sistema monitoringa

## 6.4. PRIKUPLJANJE PODATAKA O POLOŽAJIMA MINSKIH SERIJA

Važan činilac u formulama koje predstavljaju zakon oscilovanja tla izazvanih miniranjima je prostorno rastojanje od centra minske serije do mernog mesta. Podloge za određivanje rastojanja su bili koordinatni sistem državnog premera i baze podataka geodetske službe Rudnika bakra Bor. Geodetska služba je posedovala podatke o svakoj izminiranoj bušotini, koji je prostorno definišu, kao i prostorno definisano radno čelo na etaži u trenutku miniranja. Snimljeno i prostorno definisano stanje je predstavljeno skicom u Dnevniku miniranja. Na osnovu položaja (X, Y i Z koordinata) središta minskih serija i položaja (X, Y i Z koordinata) tri merna mesta (MM1, MM2 i MM3), utvrđena su rastojanja ( $R$ ) m između svake pojedinačne minske serije i mernih mesta.

Tokom vremenskog perioda koji je obuhvaćen istraživanjem, razvoj rudarskih radova na površinskom kopu Veliki Krivelj je karakterisala velika dinamičnost kako po prostoru tako i po dubini. Otkopavanje je vršeno skoro po celom obimu kopa i po celoj radnoj kosini od vrha do dna. Na *Slici br.12* su dati položaji minskih serija i mernih mesta sistema monitoringa.

## 6.5. PRIKUPLJANJE PODATAKA O BRZINAMA OSCILOVANJA TLA

Kompanija *RTB* je tokom februara 2017. godine nabavila i instalirala *sistem monitoringa seizmičkih potresa* na površinskom kopu Veliki Krivelj. Ovaj *Real-Time* sistem monitoringa, sa pragom osetljivosti 0.1mm/s, namenjen je za utvrđivanje intenziteta seizmičkih potresa. Instalirani monitoring sistem može kontinuirano, tokom 24 časa pratiti parametere seizmičkih potresa koji su predstavljeni brzinom oscilovanja, ubrzanjem, veličinom pomeraja čestice tla, kao i frekventnim spektrom vibracija.

Podaci dobijeni iz monitoringa obezbeđuju uspostavljanje veza parametara miniranja sa brzinama oscilovanja tla. Duža primena *Real-Time* monitoring sistema omogućava dobijanje jačih korelativnih veza ali i smernica za korigovanje parametara bušenja i miniranja u cilju smanjenja potresa.

Spoljašni deo sistema monitoringa se sastoji od hardvera i aplikacija koji su stacionirani na mernim mestima. Oznake i koordinate mernih mesta su date u *Tabeli br. 13*, a lokacije na *Slici br. 12*.

Tabela br. 13 Koordinate mernih mesta (prema podacima geodetske službe RBB) [30]

Merno mesto br.	MM1	MM2	MM3
objekat	Kuća Trujića	Crkva	Kuća Nikolića
Y	7588369,6	7588204,2	7588746,8
X	4887645,4	4887830,0	4886914,9
Z	326,9	324,0	372,1

Hardverski deo monitoring sistema u sebi sadrži akcelerometar i akvizicionu jedinicu. Akcelerometar registruje potrese i šalje podatke u akvizicionu jedinicu koja ih prikuplja i skladišti. Ovi podaci se softverski obrađuju kako bi se iz izmerenih vrednosti dobili parametri seizmičkog talasa.

Raspored instaliranih triaksijalnih akcelerometara tipa D110-T monitoring sistema po mernim mestima dat je u Tabeli br. 14.

Tabela br. 14 Raspored instaliranih triaksijalnih akcelerometara tipa D110-T monitoring sistema po mernim mestima [29-32]

MM	1			2			3		
Kanal broj	0	1	2	8	9	10	24	25	26
Serijski broj	301079			301079			301068		
Orijentacija	X - istok	Y - sever	Z - vertikalno	X - istok	Y - sever	Z - vertikalno	X - istok	Y - sever	Z - vertikalno

Za potrebe izrade doktorske disertacije podaci o izmerenim brzinama osilovanja tla izazvanih miniranjima na površinskom kopu Veliki Krivelj su dobijena sa mernih mesta MM1, MM2 i MM3.



Za svaku izminiranu seriju koristeći maksimalno izmerene vrednosti brzina oscilovanja tla, u tri međusobno upravna pravca ( $V_x$ ,  $V_y$  i  $V_z$ ), izabrana je merodavna maksimalna brzina oscilovanja tla ( $V_{\max}$ ) za svako merno mesto:

$$V_{\max,i} = \max_i(V_{x,i}, V_{y,i}, V_{z,i})$$

Ovako određene vrednosti maksimalnih brzina oscilovanja tla su pripale izlaznom skupu podataka.

## 6.6. FORMIRANJE ULAZNO-IZLAZNOG SKUPA PODATAKA

Na osnovu prethodno opisanih terenskih istraživanja prikupljeni su podaci o parametrima miniranja, položajima minskih serija i maksimalno izmerenim vrednostima brzina oscilovanja tla na mernim mestima MM1, MM2 i MM3, za 1158 minskih serija, koje su aktivirane tokom 2018. i 2019. godine.

Prikupljeni podaci su iskorišćeni za:

- naknadno izračunavanje vrednosti izvedenih parametara miniranja, koje se ne nalaze u dnevnicima miniranja,
- izračunavanje rastojanja između minskih serija i mernih mesta seizmičkih potresa i
- izbor maksimalne brzine oscilovanja tla po mernim mestima.

Na osnovu svih prethodno prikupljenih, izračunatih i određenih podataka, formiran je skup od 1158 setova ulazno-izlaznih podataka (skraćeno: *SUIP1158*). Svaki set sastojao se od 9 podataka, pri čemu 8 podataka pripadaju ulaznom delu a 1 podatak izlaznom delu *SUIP1158*.

Podaci koji su pripali ulaznom delu *SUIP1158*, predstavljali su vrednost sledećih faktora seizmičkih potresa:

1. *Maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom nominalnom vremenu iniciranja ( $Q_i$ ), kg*
2. *Maksimalne mase eksploziva inicirane u vremenskom intervalu od 8 ms, ( $Q_{8ms}$ ), kg*
3. *Srednje mase eksploziva po jednoj minskoj bušotini ( $Q_{bsr}$ ), kg*
4. *Ukupne mase eksploziva po minskim serijama ( $Q_{buk}$ ), kg*
5. *Broja minskih bušotina po minskim serijama ( $N_b$ )*
6. *Ukupne dužine minskih bušotina ( $L_{buk}$ ), m*
7. *Srednjeg koeficijenta punjenja ( $K_p$ ) i*
8. *Rastojanja minskih serija do mernih mesta ( $R$ ), m*

Podaci koji su pripali izlaznom delu *SUIP1158* predstavljali su vrednost *Maksimalno izmerene brzine oscilovanja tla ( $V_{\max} = V_{izmer}$ ) mm/s.*

## 7. UTVRĐIVANJE UTICAJA POJEDINAČNIH FAKTORA SEIZMIČKIH POTRESA NA BRZINU OSCILOVANJA TLA PRIMENOM STATISTIČKIH METODA

U ovom poglavlju prikazani su rezultati dobijeni primenom statističkih metoda u cilju utvrđivanja uticaja pojedinačnih faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla izazvanih miniranjima. Jačina uticaja je brojčano vrednovana kroz koeficijent uticaja  $SK_x$ . Za određivanje koeficijenta uticaja primenom statističkih metoda korišćen je *SUIP1158*.

Utvrđeni uticaj  $SK_x$  pojedinačnih faktora seizmičkih potresa kasnije je poslužio za upoređenje sa utvrđenim koeficijentima uticaja pojedinačnih faktora seizmičkih potresa upotrebom veštačkih neuronskih mreža.

### 7.1 METODOLOGIJA UTVRĐIVANJA UTICAJA FAKTORA SEIZMIČKIH POTRESA NA BRZINU OSCILOVANJA TLA PRIMENOM STATISTIČKIH METODA

Određivanja uticaja pojedinačnih faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla nema smisla ako ne postoje korelativne zavisnosti između njih. U tom cilju formirani su dijagrami zavisnosti između vrednosti pojedinačnog faktora seizmičkih potresa i maksimalne izmerene brzine oscilovanja tla. Preko jednačine regresione linije provereno je postojanje korelativne zavisnosti, a zatim i njena jačina preko vrednosti koeficijenta determinacije. Potvrđena korelativna zavisnost opravdavala je naredne korake utvrđivanja uticaja pojedinačnog faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla.

Sam postupak utvrđivanja uticaja odvijao se kroz sledeće korake:

**Prvi korak** je podrazumevao podelu celokupnog ulazno-izlaznog skupa *SUIP1158* po vrednostima pojedinačnog faktora seizmičkih potresa na podskupove. Podela je rađena sa određenim korakom, pri čemu su uzeti u obzir i broj podataka koji pripadaju dobijenim podskupovima. Iz svakog podskupa je određena srednja vrednost pojedinačnog faktora seizmičkih potresa i srednja vrednost brzine oscilovanja tla u cilju dobijanja uređenog para za formiranje dijagrama zavisnosti.

**Drugi korak** je podrazumevao formiranje dijagrama zavisnosti promena srednje vrednosti pojedinačnog faktora seizmičkih potresa i promena srednje vrednosti brzine oscilovanja tla. Dijagram zavisnosti je sadržao onoliko tačaka koliki je i broj podskupova.

**Treći korak** je podrazumevao određivanje koeficijenta uticaja pojedinačnog faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla  $SK_x$ . On je dobijen iz količnika maksimalne i minimalne vrednosti promena srednjih vrednosti brzina sa dijagrama promena srednjih vrednosti faktora seizmičkih potresa i promena srednjih vrednosti brzina. Na ovaj način je zaključeno koliko puta se promenila srednja brzina oscilovanja tla, usled promene srednje vrednosti faktora seizmičkih potresa. Napred opisani predlog određivanja koeficijenta uticaja je predstavljen *Formulom br. 19*. Drugim rečima *Formula br. 19* predstavlja matematičku formulaciju predloženog načina kako je vrednovan (određena brojčana vrednost) uticaja pojedinačnog faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla.

$$SK_x = VS_{max} / VS_{min} \quad (19)$$

gde su:

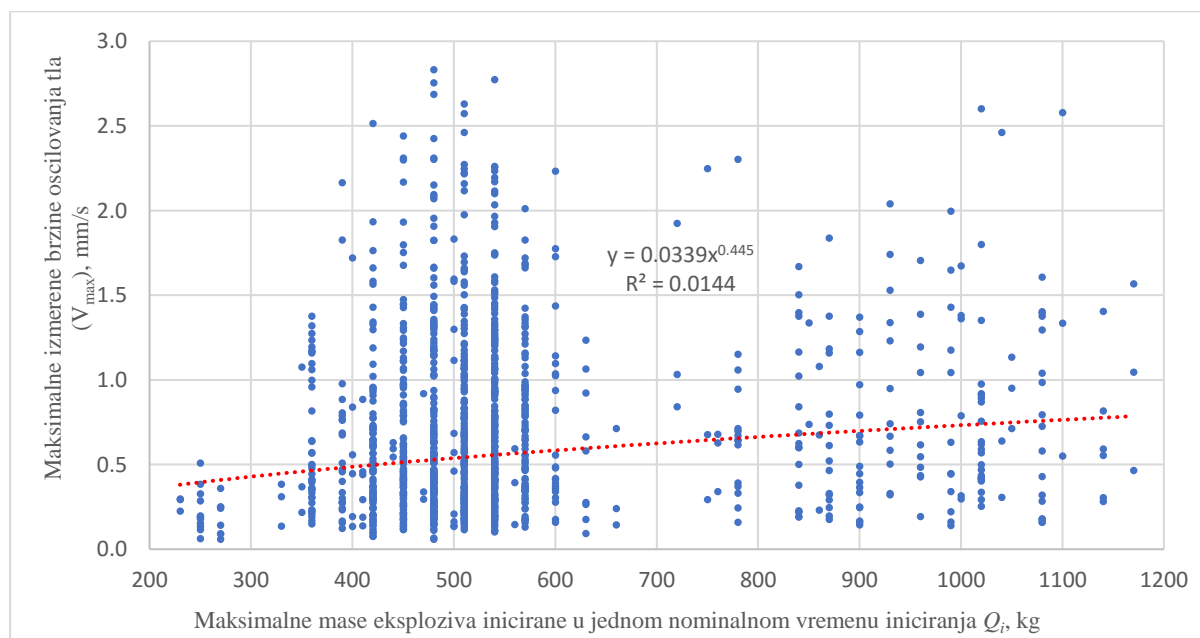
$VS_{max}$  – maksimalna vrednost srednjih brzina oscilovanja tla po grupama minskih serija i

$VS_{min}$  – minimalna vrednost srednjih brzina oscilovanja tla po grupama minskih serija.

U nastavku teksta u Tačkama od 7.1.1 do 7.1.8 utvrđene su korelativne zavisnosti i koeficijenti uticaja  $SK_x$  pojedinačnih faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla primenom statističkih metoda.

### 7.1.1 UTICAJ MAKSIMALNE MASE EKSPLOZIVA INICIRANE U JEDNOM NOMINALNOM VREMENU INICIRANJA NA BRZINU OSCILOVANJA TLA

Radi sagledavanja korelativne zavisnosti maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom nominalnom vremenu iniciranja i brzine oscilovanja tla, na dijagram na *Slici br. 13*, naneto je 1158 tačaka, odnosno 1158 uređenih parova: maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom nominalnom vremenu iniciranja i izmerene maksimalne brzine oscilovanja tla, iz *SUIP1158*. Na istoj slici, data je jednačina regresione zavisnosti između maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom nominalnom vremenu iniciranja i izmerenih maksimalnih brzina oscilovanja tla i odgovarajuća vrednost koeficijenta determinacije  $R^2$ .

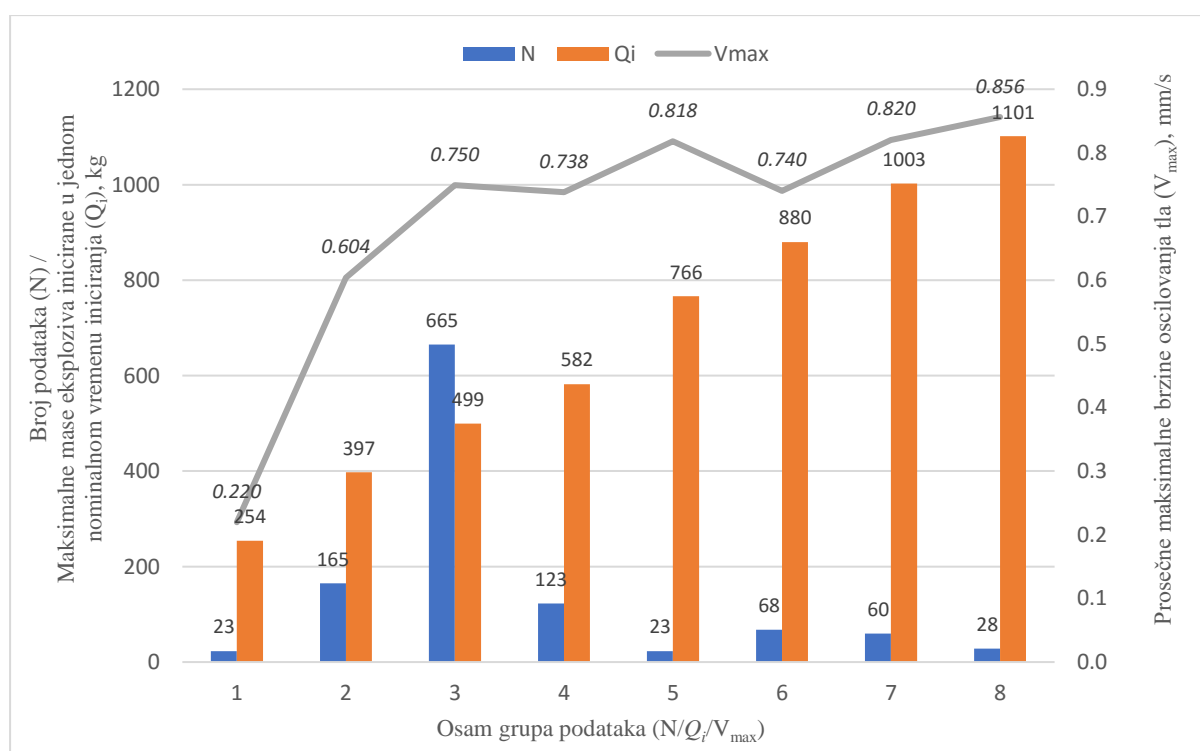


*Slika br. 13 Zavisnost maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom nominalnom vremenu iniciranja i maksimalno izmerene brzine oscilovanja*

U cilju utvrđivanja koeficijenta uticaja maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom nominalnom vremenu iniciranja na maksimalne brzine oscilovanja tla, prethodni skup od 1158 parova podataka (maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom nominalnom vremenu iniciranja – izmerene maksimalne brzine oscilovanja tla), podeljen je na osam grupa. Na dijagramu na *Slici br. 14* prikazana je raspodela broja podataka ( $N$ ), maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom nominalnom vremenu iniciranja ( $Q_i$ ) i srednjih maksimalnih brzina oscilovanja tla ( $V_{max}$ ), po grupama minskih serija. Promena maksimalnih brzina

oscilovanja tla u zavisnosti od maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom nominalnom vremenu iniciranja, po grupama minskih serija, prikazana je sivom linijom na slici. Vrednosti ( $Q_i$ ) su u dijapazonu od 254 do 1101 kg. Korak između opsega je 105,9 kg.

Sa *Slike br. 14* se vidi značajan rast brzine oscilovanja tla prilikom promene maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom nominalnom vremenu iniciranja od 254 kg do 499 kg. Za maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom nominalnom vremenu iniciranja čije su vrednosti između 499 kg i 1101 kg, primetno je oscilovanje brzine sa blagim trendom rasta. Najveće brzine oscilovanja tla se mogu očekivati ako su vrednosti maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom nominalnom vremenu iniciranja 1101 kg.



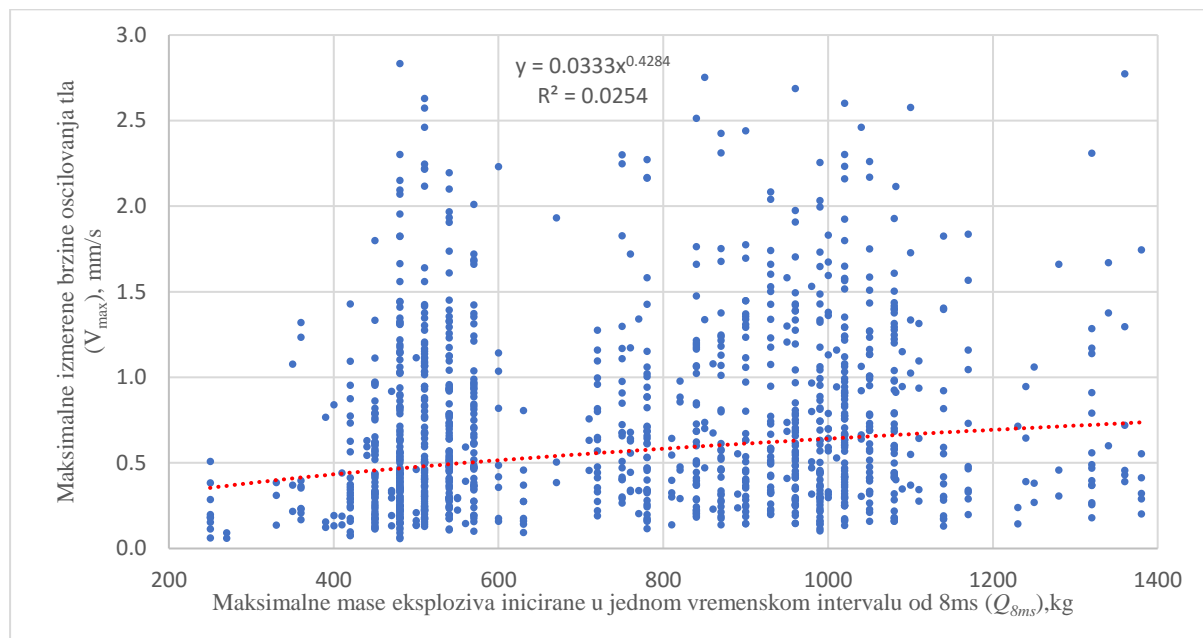
*Slika br. 14* Promena srednjih vrednosti maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom nominalnom vremenu iniciranja  $Q_i$  i promena srednjih vrednosti brzina za osam opsega

Sa dijagrama prikazanog na *Slici br. 14* vidi se da maksimalna vrednost srednje brzine oscilovanja tla ima vrednost 0,856 mm/s dok je minimalna vrednost 0,220. Koeficijent uticaja maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom nominalnom vremenu iniciranja na brzinu oscilovanja tla iznosi:

$$SK_{Q_i} = 0,856 / 0,220 = 3,891$$

### 7.1.2 UTICAJ MAKSIMALNE MASE EKSPLOZIVA INICIRANE U JEDNOM VREMENSKOM INTERVALU OD 8ms NA BRZINU OSCILOVANJA TLA

Radi sagledavanja korelativne zavisnosti maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom vremenskom intervalu od 8ms i brzine oscilovanja tla, na dijagram na *Slici br. 15*, naneto je 1158 tačaka, odnosno 1158 uređenih parova: maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom vremenskom intervalu od 8ms i izmerene maksimalne brzine oscilovanja tla, iz *SUIP1158*. Na istoj slici data je jednačina regresione zavisnosti između maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom vremenskom intervalu od 8ms i izmerenih maksimalnih brzina oscilovanja tla i odgovarajuća vrednost koeficijenta determinacije  $R^2$ .



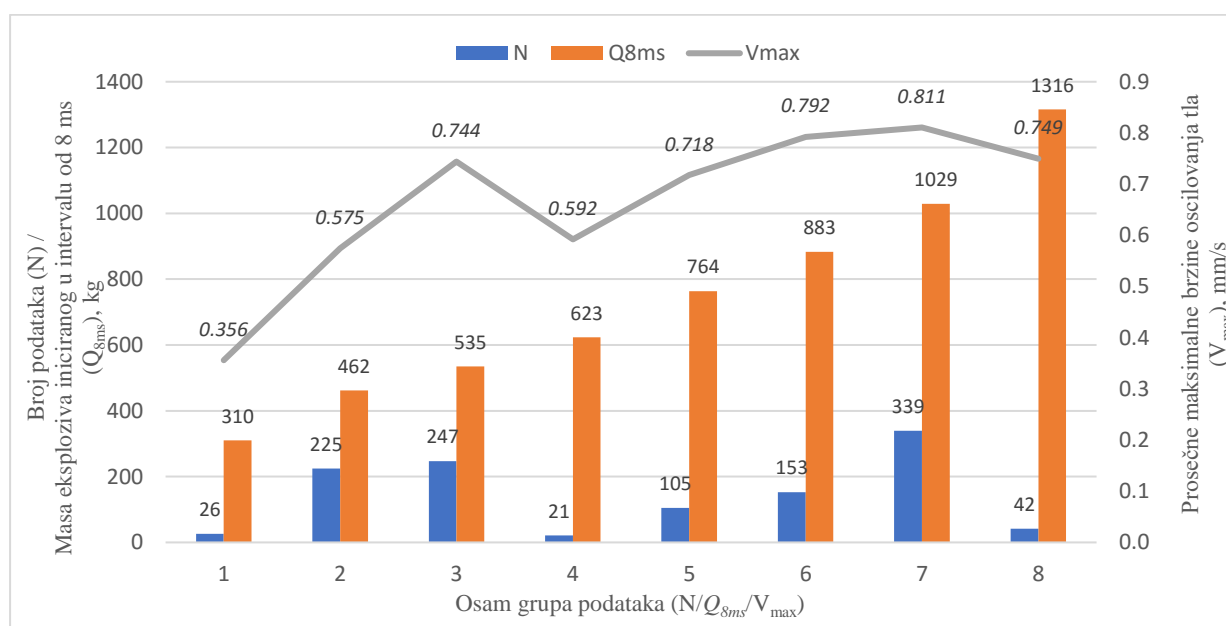
*Slika br. 15* Zavisnost maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom vremenskom intervalu od 8ms i maksimalno izmerene brzine oscilovanja

U cilju utvrđivanja koeficijenta uticaja maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom vremenskom intervalu od 8ms na maksimalne brzine oscilovanja tla, prethodni skup od 1158 parova podataka (maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom vremenskom intervalu od 8ms – izmerene maksimalne brzine oscilovanja tla), podeljen je na osam grupa.

Na dijagramu na *Slici br. 16* prikazana je raspodela broja podataka (N), maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom vremenskom intervalu od 8ms ( $Q_{8ms}$ ) i srednjih

maksimalnih brzina oscilovanja tla ( $V_{max}$ ), po grupama minskih serija. Promena maksimalnih brzina oscilovanja tla u zavisnosti od maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom vremenskom intervalu od 8ms, po grupama minskih serija, prikazana je sivom linijom na slici. Vrednosti ( $Q_{8ms}$ ) su u dijapazonu od 310 do 1316 kg. Korak između opsega je 125,8 kg.

Sa *Slike br. 16* se vidi značajan rast brzine oscilovanja tla prilikom promene maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom vremenskom intervalu od 8ms od 310 kg do 535 kg. Za maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom vremenskom intervalu od 8ms, čije su vrednosti između 535 kg i 623 kg brzina oscilovanja tla ima trend smanjenja. Veće maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom vremenskom intervalu od 8ms od 623 kg imaju blagi uticaj na brzinu oscilovanja tla, koja se ogleda kroz njen rast do maksimalno izmerenih brzina. Najveće brzine oscilovanja tla se mogu očekivati ako su maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom vremenskom intervalu od 8ms oko 1029 kg.



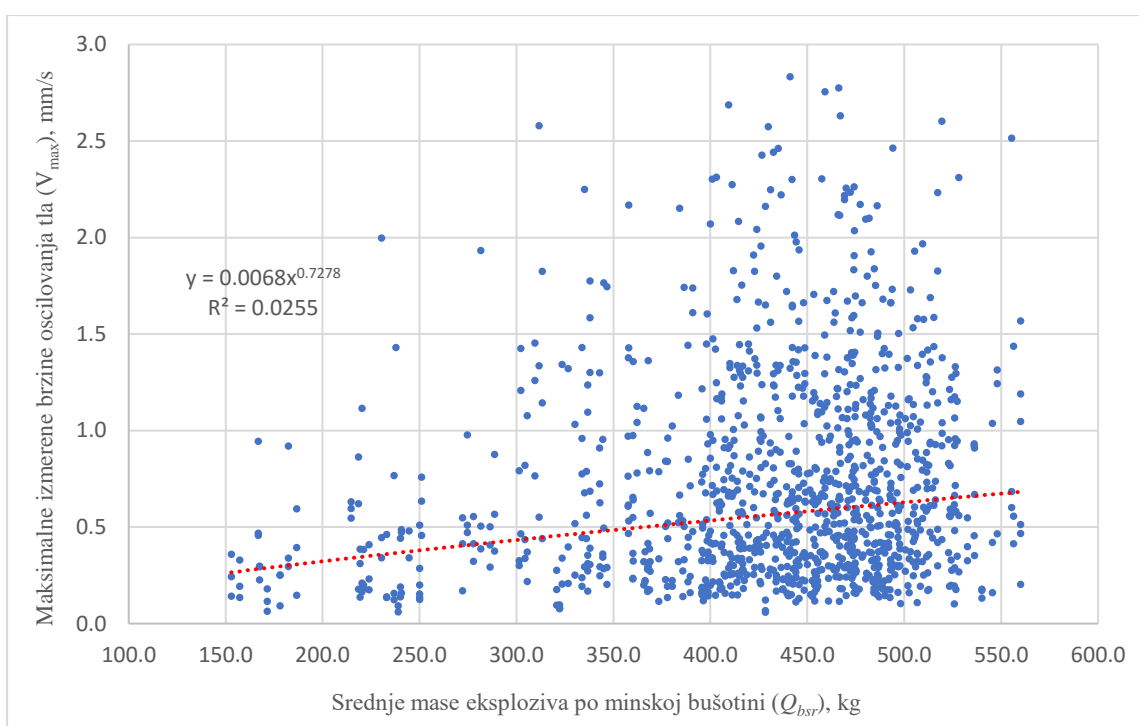
*Slika br. 16 Promena srednjih vrednosti maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom vremenskom intervalu od 8ms  $Q_{8ms}$  i promena srednjih vrednosti brzina za osam opsega*

Sa dijagrama prikazanog na *Slici br. 16* vidi se da maksimalna vrednost srednje brzine oscilovanja tla ima vrednost 0,811 mm/s dok je minimalna vrednost 0,356. Koeficijent uticaja maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom vremenskom intervalu od 8ms na brzinu oscilovanja tla iznosi:

$$SK_{Q_{8ms}} = 0,811 / 0,356 = 2,278$$

### 7.1.3. UTICAJ SREDNJIH MASA EKSPLOZIVA PO MINSKOJ BUŠOTINI NA BRZINU OSCILOVANJA TLA

Radi sagledavanja korelativne zavisnosti srednje mase eksploziva po minskoj bušotini i brzine oscilovanja tla, na dijagram na *Slici br. 17*, naneto je 1158 tačaka, odnosno 1158 uređenih parova: srednje mase eksploziva po minskoj bušotini i izmerene maksimalne brzine oscilovanja tla, iz *SUIP1158*. Na istoj slici data je jednačina regresione zavisnosti između srednje mase eksploziva po minskoj bušotini i izmerenih maksimalnih brzina oscilovanja tla i odgovarajuća vrednost koeficijenta determinacije  $R^2$ .



*Slika br. 17 Zavisnost srednje mase eksploziva po minskoj bušotini i maksimalno izmerene brzine oscilovanja*

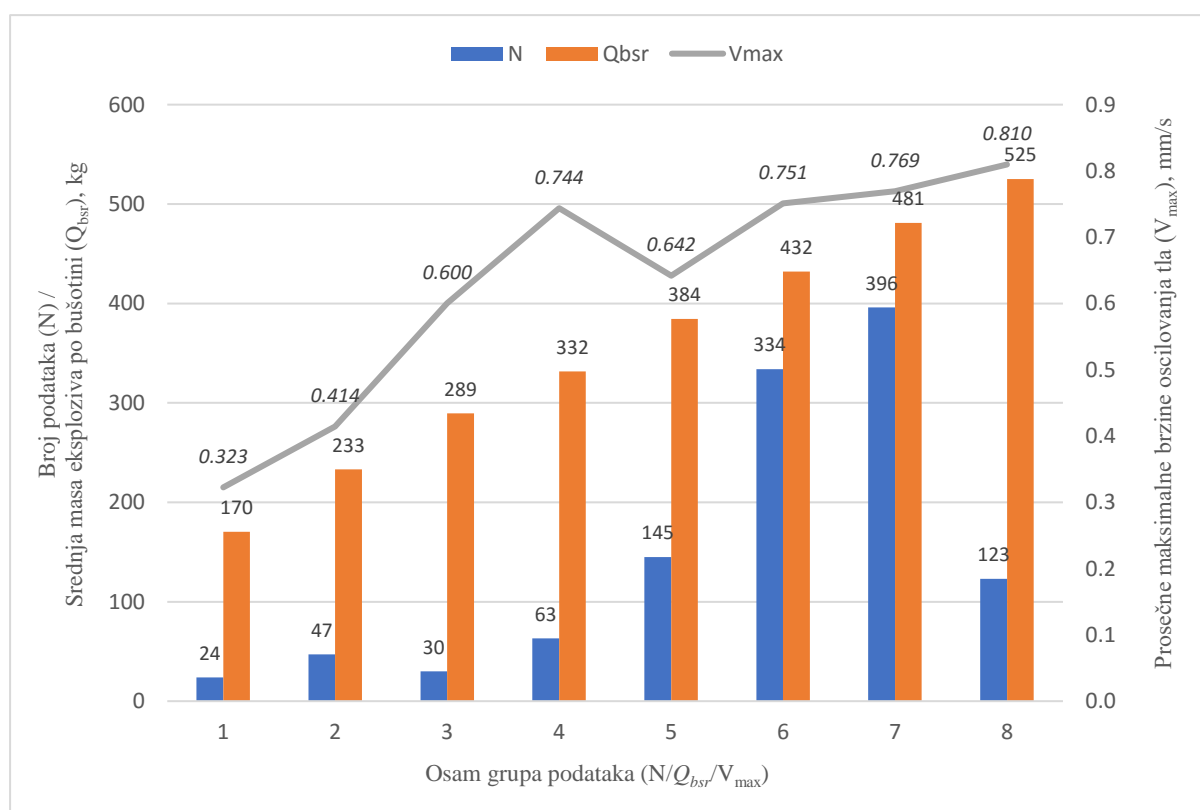
U cilju utvrđivanja koeficijenta uticaja srednje mase eksploziva po bušotini na maksimalne brzine oscilovanja tla, prethodni skup od 1158 parova podataka (srednje mase eksploziva po minskoj bušotini – izmerene maksimalne brzine oscilovanja tla), podeljen je na osam grupa.

Na dijagramu na *Slici br. 18* prikazana je raspodela broja podataka ( $N$ ), srednje mase eksploziva po minskoj bušotini ( $Q_{bsr}$ ) i srednjih maksimalnih brzina oscilovanja tla ( $V_{max}$ ), po



grupama minskih serija. Promena maksimalnih brzina oscilovanja tla u zavisnosti od srednje mase eksploziva po minskoj bušotini, po grupama minskih serija, prikazana je sivom linijom na slici. Vrednosti ( $Q_{bsr}$ ) su u dijapazonu od 170 do 525 kg. Korak između opsega je 44,3 kg

Sa *Slike br. 18* vidi se da, prilikom promene srednje mase eksploziva po minskoj bušotini od 170 kg do 332 kg, postoji značajniji rast brzine oscilovanja tla pa je i uticaj veliki. Za vrednosti srednje mase eksploziva po minskoj bušotini od 332 kg do 525 kg ne uočava se veliki uticaj na brzinu oscilovanja tla. U tom dijapazonu vrednosti za ( $Q_{bsr}$ ) ima i blagog smanjenja brzine između vrednosti 332kg i 384 kg. Najveće brzine oscilovanja tla se mogu očekivati ako su srednje mase eksploziva po minskoj bušotini oko 525 kg.



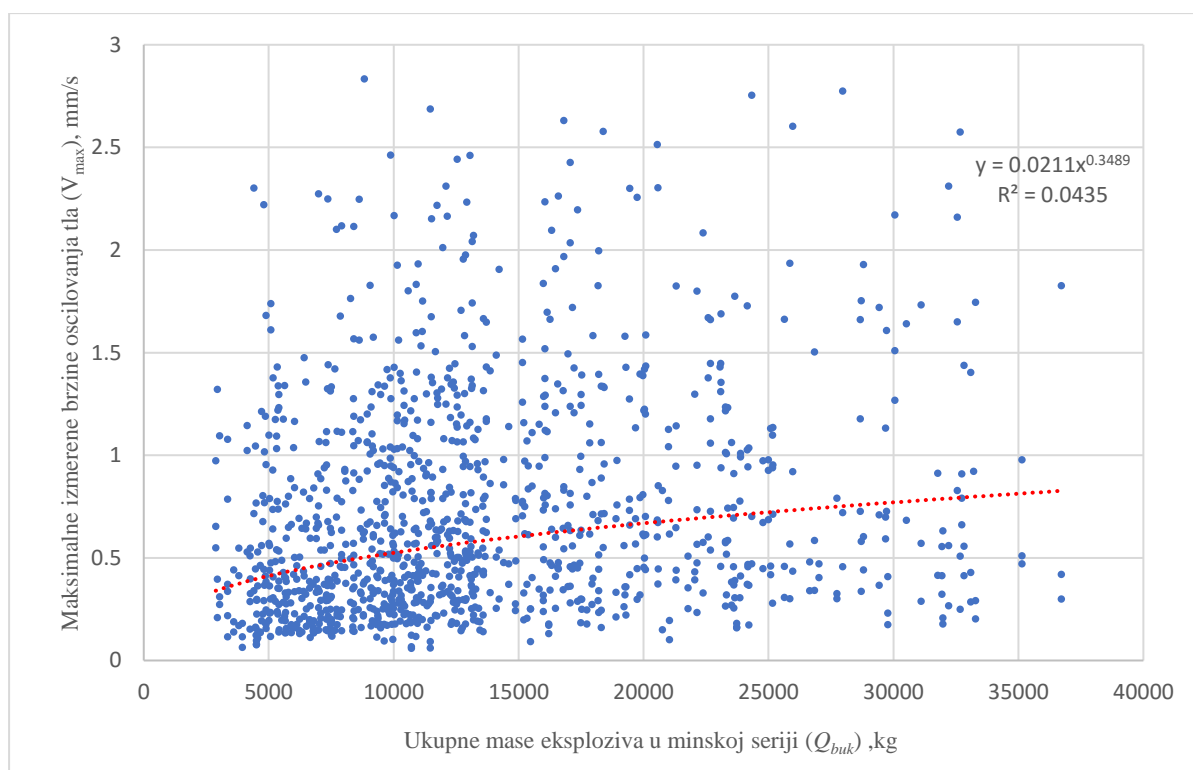
*Slika br. 18 Promena srednjih vrednosti srednje mase eksploziva po bušotini  $Q_{bsr}$  i promena srednjih vrednosti brzina za osam opsega*

Sa dijagrama prikazanog na *Slici br. 18* vidi se da maksimalna vrednost srednje brzine oscilovanja tla ima vrednost 0,810 mm/s, dok je minimalna vrednost 0,323. Koeficijent uticaja srednje mase eksploziva po minskoj bušotini iznosi:

$$SK_{Q_{bsr}} = 0,810 / 0,323 = 2,507$$

#### 7.1.4. UTICAJ UKUPNIH MASA EKSPLOZIVA U MINSKOJ SERIJI NA BRZINU OSCILOVANJA TLA

Radi sagledavanja korelativne zavisnosti ukupnih masa eksploziva u minskoj seriji i brzine oscilovanja tla, na dijagram na *Slici br. 19*, naneto je 1158 tačaka, odnosno 1158 uređenih parova: ukupne mase eksploziva u minskoj seriji i izmerene maksimalne brzine oscilovanja tla, iz *SUIP1158*. Na istoj slici data je jednačina regresione zavisnosti između ukupnih masa eksploziva u minskoj seriji i izmerenih maksimalnih brzina oscilovanja tla i odgovarajuća vrednost koeficijenta determinacije  $R^2$ .



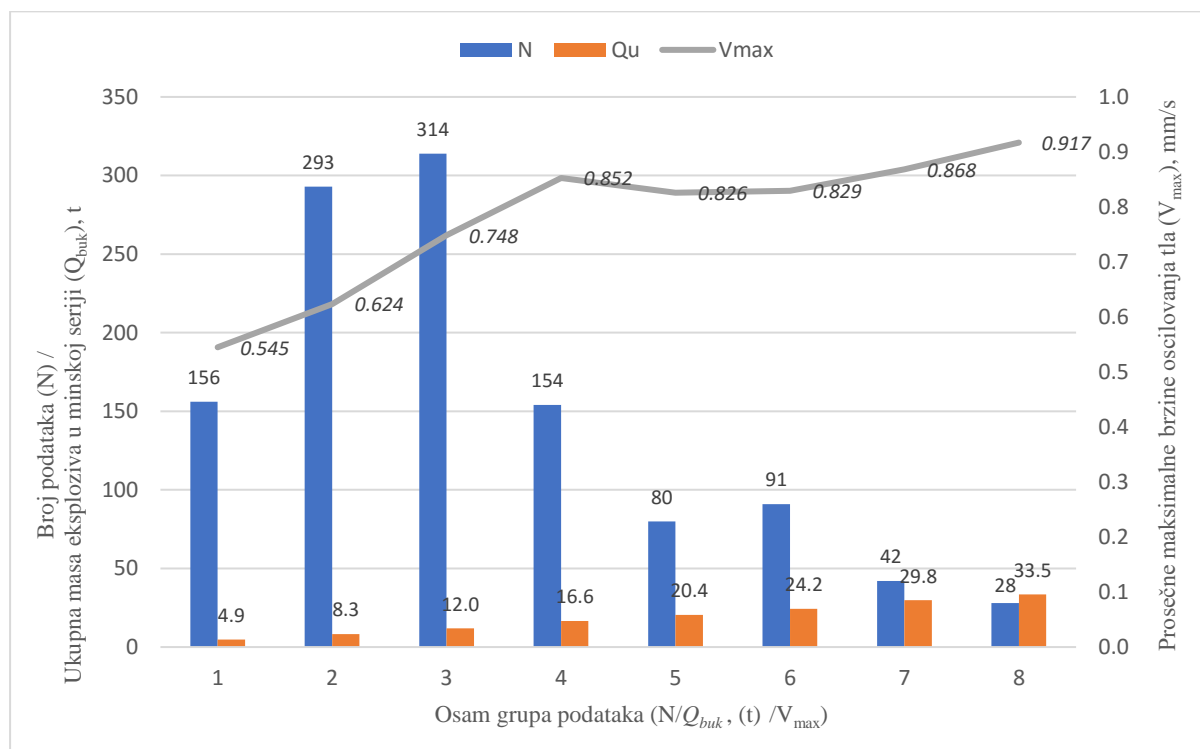
*Slika br. 19* Zavisnost ukupne mase eksploziva u minskoj seriji i maksimalno izmerene brzine oscilovanja

U cilju utvrđivanja koeficijenta uticaja ukupnih masa eksploziva u minskoj seriji na maksimalne brzine oscilovanja tla, prethodni skup od 1158 parova podataka (ukupne mase eksploziva u minskoj seriji – izmerene maksimalne brzine oscilovanja tla), podeljen je na osam grupa.

Na dijagramu na *Slici br. 20* prikazana je raspodela broja podataka ( $N$ ), ukupne mase eksploziva u minskoj seriji ( $Q_{buk}$ ) i srednjih maksimalnih brzina oscilovanja tla ( $V_{max}$ ), po

grupama minskih serija. Promena maksimalnih brzina oscilovanja tla u zavisnosti od ukupnih masa eksploziva u minskoj seriji, po grupama minskih serija, prikazana je sivom linijom na slici. Vrednosti ( $Q_{buk}$ ) su u dijapazonu od 4900 do 33500 kg. Korak između opsega je 3575 kg.

Sa Slike br. 20 se vidi da prilikom promene ukupnih masa eksploziva u minskoj seriji od 4900 kg do 16600 kg dolazi do značajnijeg rasta brzine oscilovanja tla, ali ne dostiže maksimalnu vrednost. Za taj dijapazon vrednosti ukupnih masa eksploziva u minskoj seriji možemo reći da ima veliki uticaj na brzinu oscilovanja tla. Za veće vrednosti ukupnih masa eksploziva u minskoj seriji od 16600 kg nema značajnije promene brzine oscilovanja tla, što ukazuje na mali uticaj. Najveće brzine oscilovanja tla se mogu očekivati ako su ukupne mase eksploziva u minskoj seriji oko 33500 kg.



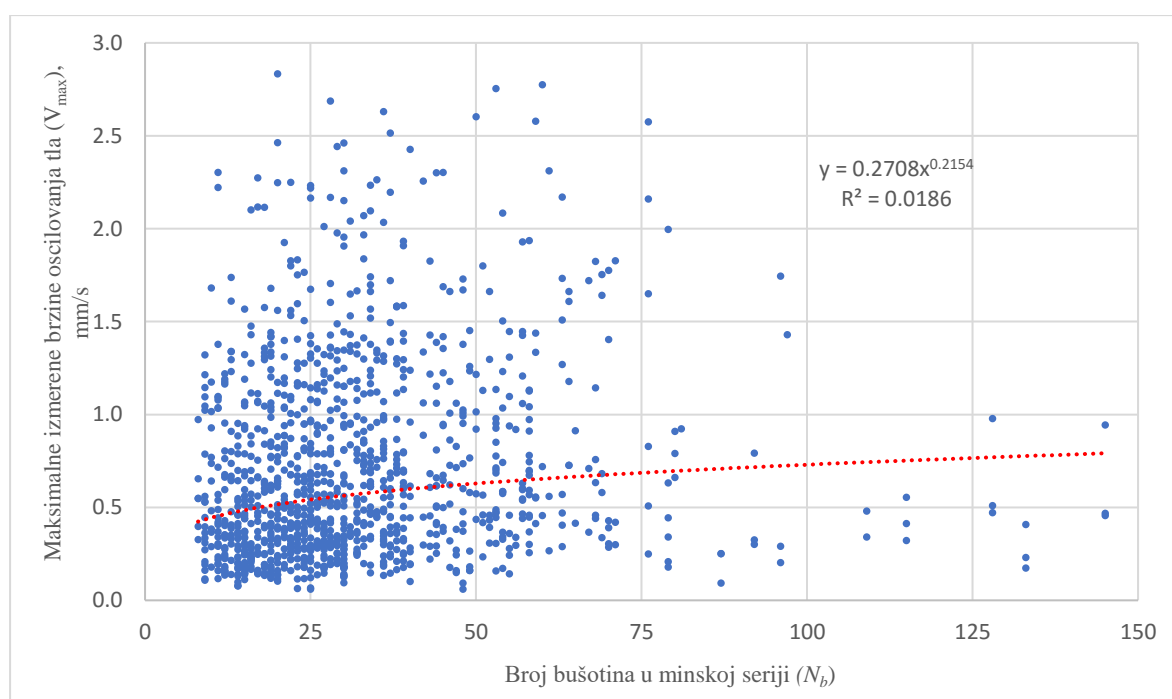
Slika br. 20 Promena srednjih vrednosti ukupne mase eksploziva u minskoj seriji  $Q_{buk}$  i promena srednjih vrednosti brzina za osam opsega

Sa dijagrama prikazanog na Slici br. 20 vidi se da maksimalna vrednost srednje brzine oscilovanja tla ima vrednost 0,917 mm/s, dok je minimalna vrednost 0,545 mm/s. Koeficijent uticaja ukupnih masa eksploziva u minskoj seriji iznosi:

$$SK_{Q_{buk}} = 0,917 / 0,545 = 1,682$$

### 7.1.5. UTICAJ BROJA BUŠOTINA U MINSKOJ SERIJI NA BRZINU OSCILOVANJA TLA

Radi sagledavanja korelativne zavisnosti broja bušotina u minskoj seriji i brzine oscilovanja tla, na dijagram na *Slici br. 21*, naneto je 1158 tačaka, odnosno 1158 uređenih parova: broj bušotina u minskoj seriji i izmerene maksimalne brzine oscilovanja tla, iz *SUIP1158*. Na istoj slici data je jednačina regresione zavisnosti između broja bušotina u minskoj seriji i izmerenih maksimalnih brzina oscilovanja tla i odgovarajuća vrednost koeficijenta determinacije  $R^2$ .



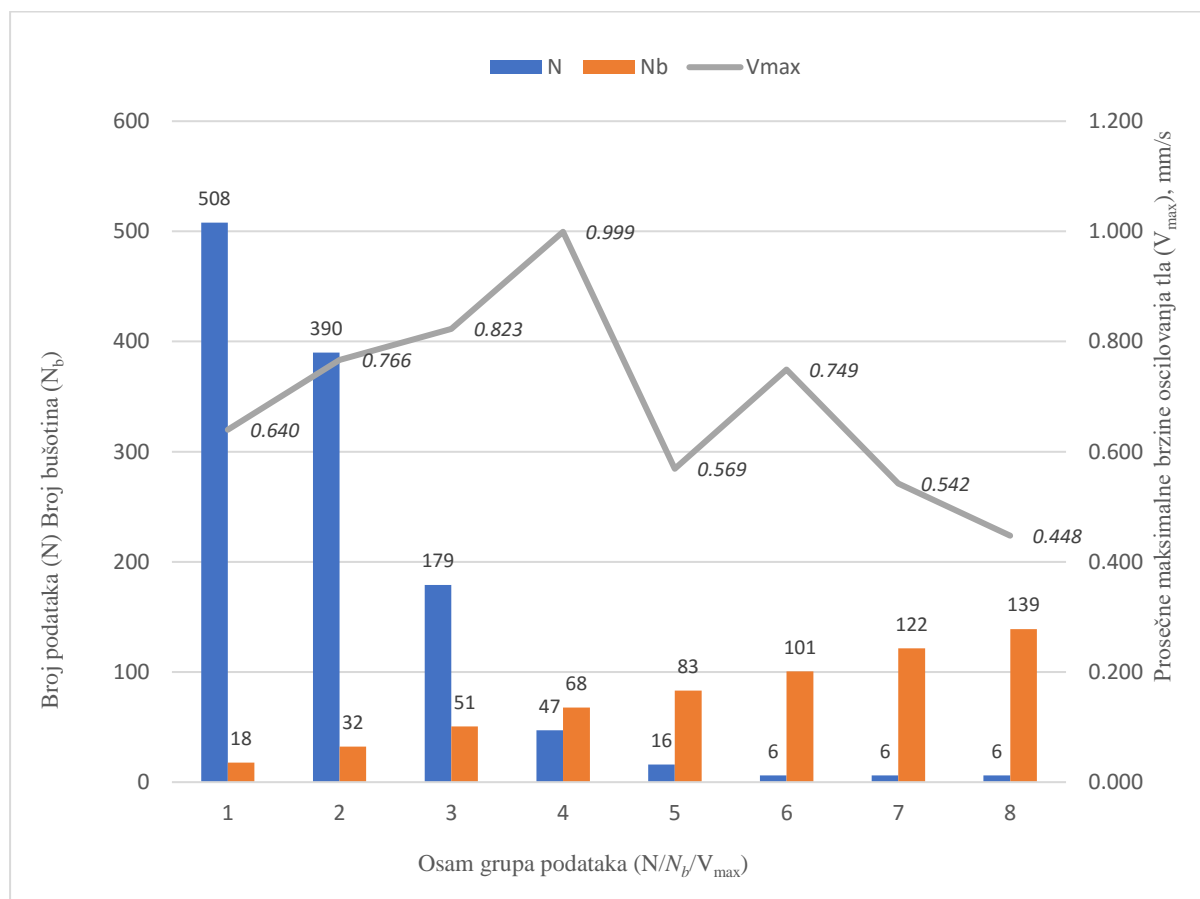
*Slika br. 21 Zavisnost broja bušotina u minskoj seriji i maksimalno izmerene brzine oscilovanja*

U cilju utvrđivanja koeficijenta uticaja broja bušotina u minskoj seriji na maksimalne brzine oscilovanja tla, prethodni skup od 1158 parova podataka (broj bušotina u minskoj seriji – izmerene maksimalne brzine oscilovanja tla), podeljen je na osam grupa.

Na dijagramu na *Slici br. 22* prikazana je raspodela broja podataka ( $N$ ), broja bušotina u minskoj seriji ( $N_b$ ) i srednjih maksimalnih brzina oscilovanja tla ( $V_{max}$ ), po grupama minskih serija. Promena maksimalnih brzina oscilovanja tla u zavisnosti od broja bušotina u minskoj

seriji, po grupama minskih serija, prikazana je sivom linijom na slici. Vrednosti ( $N_b$ ) su u dijapazonu od 18 do 139 bušotina. Korak između opsega je 15 bušotina.

Sa *Slike br. 22* vidi se da se najveće brzine oscilovanja tla mogu očekivati kada se minska serija minira sa 68 bušotina. Ispod 68 bušotina u minskoj seriji linija srednje vrednosti brzina oscilovanja tla raste. Za više od 68 bušotina u minskoj seriji, linija srednje vrednosti brzina oscilovanja tla opada.



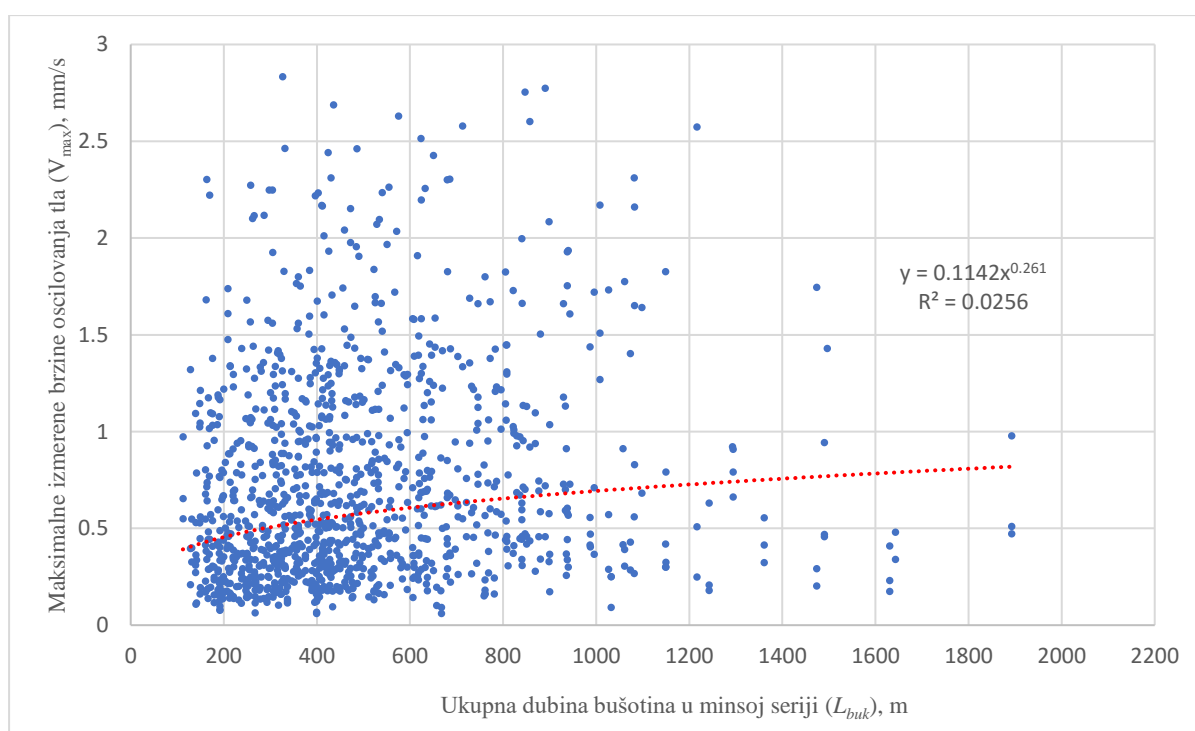
*Slika br. 22 Promena srednjih vrednosti broja bušotina u minskoj seriji  $N_b$  i promena srednjih vrednosti brzina za osam opsega*

Sa dijagrama prikazanog na *Slici br. 22* vidi se da maksimalna vrednost srednje brzine oscilovanja tla ima vrednost 0,999 mm/s, dok je minimalna vrednost 0,448 mm/s. Koeficijent uticaja broja bušotina u minskoj seriji iznosi:

$$SK_{N_b} = 0,999 / 0,448 = 2,230$$

### 7.1.6. UTICAJ UKUPNE DUŽINE BUŠOTINA U MINSKOJ SERIJI NA BRZINU OSCILOVANJA TLA

Radi sagledavanja korelativne zavisnosti ukupnih dužina bušotina u minskoj seriji i brzine oscilovanja tla, na dijagram na *Slici br. 23*, naneto je 1158 tačaka, odnosno 1158 uređenih parova: ukupne dužine bušotina u minskoj seriji i izmerene maksimalne brzine oscilovanja tla, iz *SUIP1158*. Na istoj slici data je jednačina regresione zavisnosti između ukupnih dužina bušotina u minskoj seriji i izmerenih maksimalnih brzina oscilovanja tla i odgovarajuća vrednost koeficijenta determinacije  $R^2$ .



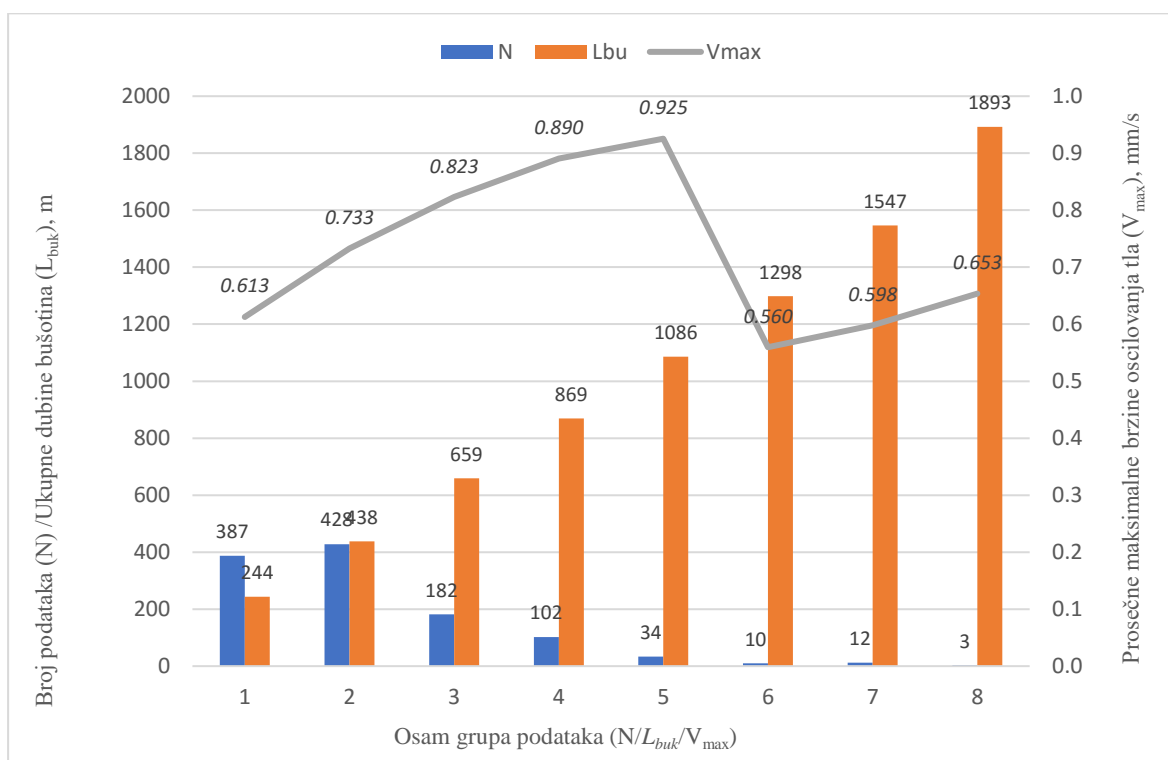
*Slika br. 23* Zavisnost ukupne dužine bušotina u minskoj seriji i maksimalno izmerene brzine oscilovanja

U cilju utvrđivanja koeficijenta uticaja ukupnih dužina bušotina u minskoj seriji na maksimalne brzine oscilovanja tla, prethodni skup od 1158 parova podataka (ukupne dužine bušotina u minskoj seriji – izmerene maksimalne brzine oscilovanja tla), podeljen je na osam grupa.

Na dijagramu na *Slici br. 24* prikazana je raspodela broja podataka ( $N$ ), ukupnih dužina bušotina u minskoj seriji ( $L_{buk}$ ) i srednjih maksimalnih brzina oscilovanja tla ( $V_{max}$ ), po

grupama minskih serija. Promena maksimalnih brzina oscilovanja tla u zavisnosti od ukupnih dužina bušotina u minskoj seriji, po grupama minskih serija, prikazana je sivom linijom na slici. Vrednosti ( $L_{buk}$ ) su u dijapazonu od 244 do 1893 m. Korak između opsega je 206 m.

Sa *Slike br. 24* vidi se da se najveće brzine oscilovanja tla mogu očekivati za ukupnu dužinu bušotina u minskoj seriji čija je vrednost 1086 m. Za vrednosti ukupne dužine bušotina u minskoj seriji koja je manja od 1086 m, linija srednje vrednosti brzina oscilovanja tla raste. Za veće vrednosti, ukupne dužine bušotina u minskoj seriji od 1086 m, linija srednje vrednosti brzina oscilovanja tla opada, pa zatim vrlo blago raste. Najveći uticaj ukupnih dužina bušotina u minskoj seriji je kada su njene vrednosti u dijapazonu od 1086 m do 1298 m, kada dolazi do značajnijeg pada brzine oscilovanja tla.



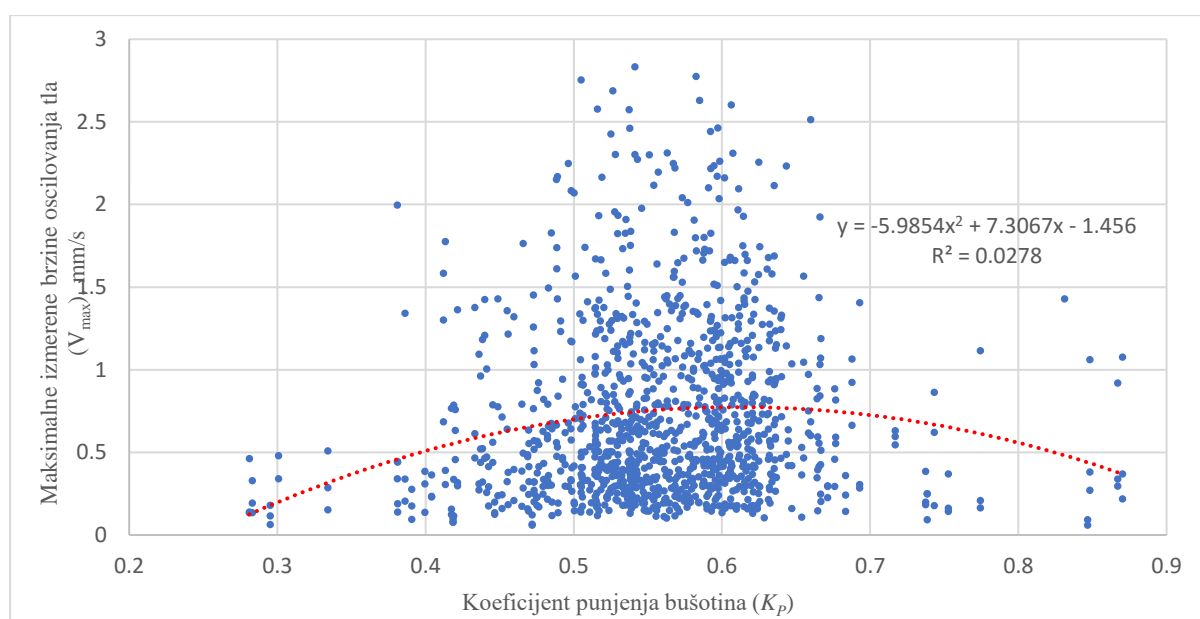
*Slika br. 24 Promena srednjih vrednosti ukupne dužine bušotina  $L_{buk}$  i promena srednjih vrednosti brzina za osam opsega*

Sa dijagrama prikazanog na *Slici br. 24* vidi se da maksimalna vrednost srednje brzine oscilovanja tla ima vrednost 0,925 mm/s, dok je minimalna vrednost 0,560 mm/s. Koeficijent uticaja ukupnih dužina bušotina u minskoj seriji iznosi:

$$SK_{L_{buk}} = 0,925 / 0,560 = 1,652$$

### 7.1.7. UTICAJ KOEFICIJENTA PUNJENJA BUŠOTINA NA BRZINU OSCILOVANJA TLA

Radi sagledavanja korelativne zavisnosti koeficijenta punjenja minskih bušotina i brzine oscilovanja tla, na dijagram na *Slici br. 25*, naneto je 1158 tačaka, odnosno 1158 uređenih parova: koeficijent punjenja minskih bušotina i izmerene maksimalne brzine oscilovanja tla, iz *SUIP1158*. Na istoj slici, data je jednačina regresione zavisnosti između koeficijenta punjenja minskih bušotina i izmerenih maksimalnih brzina oscilovanja tla i odgovarajuća vrednost koeficijenta determinacije  $R^2$ .



*Slika br. 25 Zavisnost koeficijenta punjenja minskih bušotina i maksimalno izmerene brzine oscilovanja*

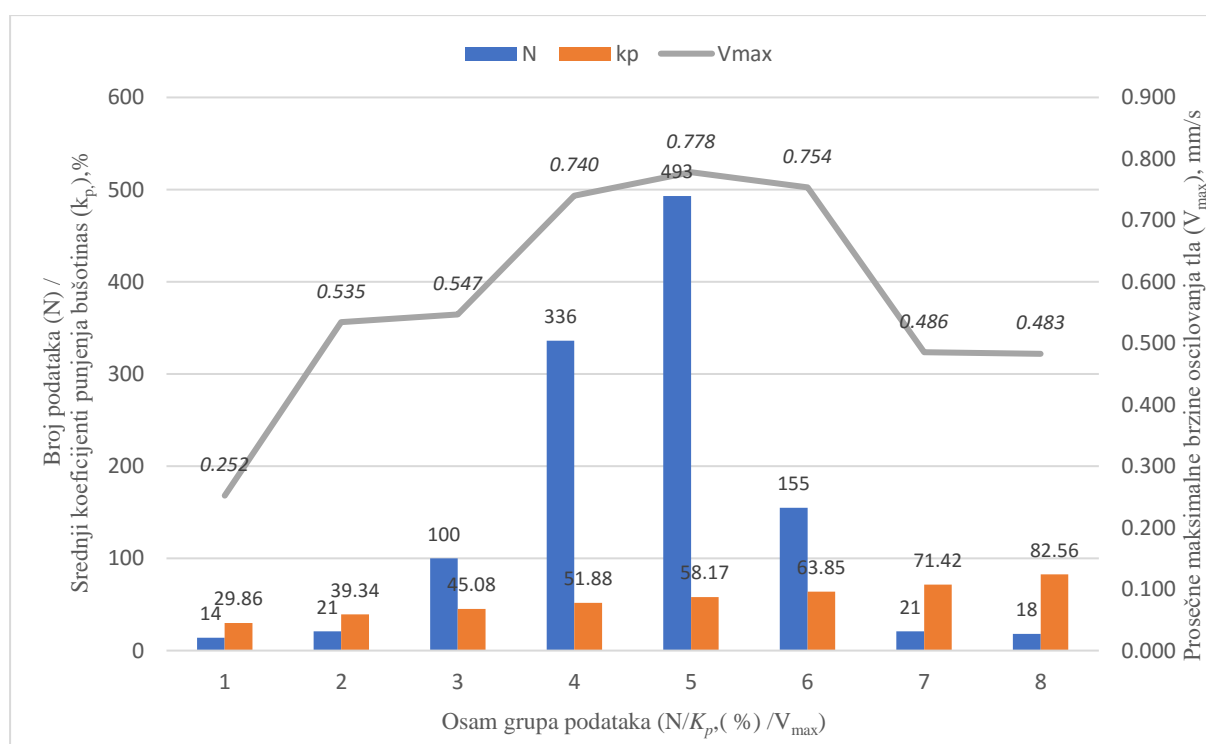
U cilju utvrđivanja uticaja koeficijenta punjenja minskih bušotina na maksimalne brzine oscilovanja tla, prethodni skup od 1158 parova podataka (koeficijent punjenja minskih bušotina – izmerene maksimalne brzine oscilovanja tla) podeljen je na osam grupa.

Na dijagramu na *Slici br. 26* prikazana je raspodela broja podataka ( $N$ ), koeficijenta punjenja minskih bušotina ( $K_p$ ) i srednjih maksimalnih brzina oscilovanja tla ( $V_{max}$ ), po grupama minskih serija. Promena maksimalnih brzina oscilovanja tla u zavisnosti od



koeficijenta punjenja minskih bušotina, po grupama minskih serija, prikazana je sivom linijom na slici. Vrednosti ( $K_p$ ) su u dijapazonu od 0,298 do 0,825. Korak između opsega je 0,065.

Sa *Slike br. 26* se vidi da prilikom promene vrednosti koeficijenta punjenja minskih bušotina postoje tri dijapazona njegove vrednosti kada značajno utiče na brzinu oscilovanja tla. U dva slučaja brzina oscilovanja tla značajno raste i to za vrednosti ( $K_p$ ) od 0,298 do 0,393 i za vrednosti ( $K_p$ ) od 0,450 do 0,518. S druge strane brzina oscilovanja tla značajano opada za vrednosti ( $K_p$ ) od 0,638 do 0,714. Najveće vrednosti brzine oscilovanja tla se mogu očekivati kada vrednosti koeficijenta punjenja minskih bušotina ( $K_p$ ) iznosi 0,581.



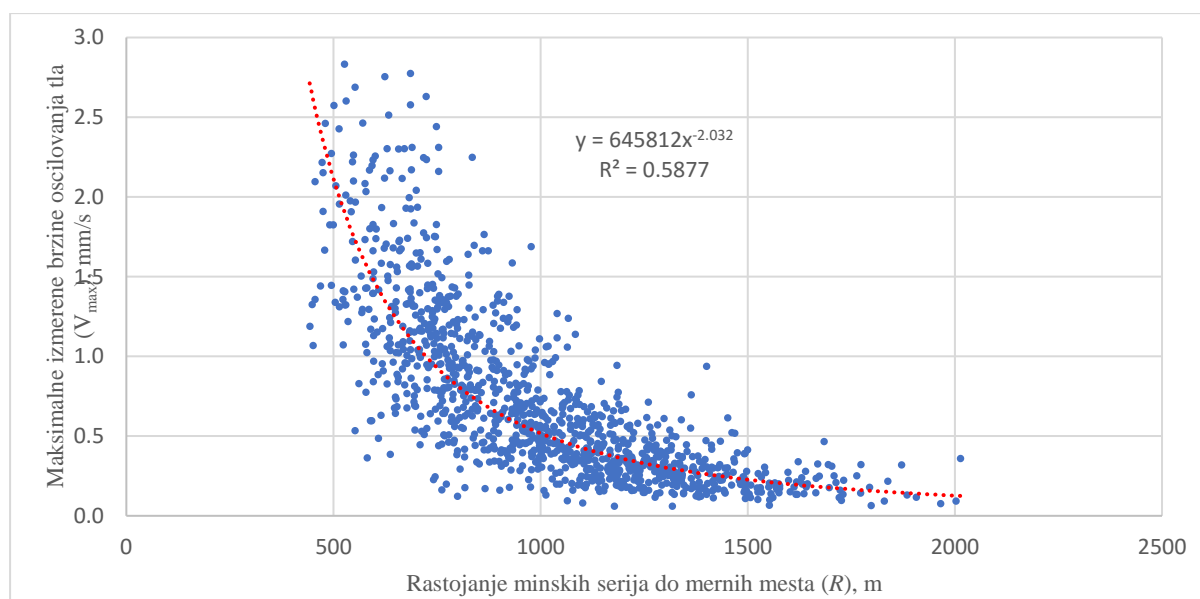
*Slika br. 26 Promena srednjih vrednosti koeficijenta punjenja bušotine i promena srednjih vrednosti brzina za osam opsega*

Sa dijagrama prikazanog na *Slici br. 26* vidi se da maksimalna vrednost srednje brzine oscilovanja tla ima vrednost 0,778 mm/s, dok je minimalna vrednost 0,252 mm/s. Koeficijent uticaja srednjih dubina bušotina u minskoj seriji iznosi:

$$SK_{K_p} = 0,778 / 0,252 = 3,087$$

### 7.1.8. UTICAJ RASTOJANJA MINSKE SERIJE DO MERNIH MESTA NA BRZINU OSCILOVANJA TLA

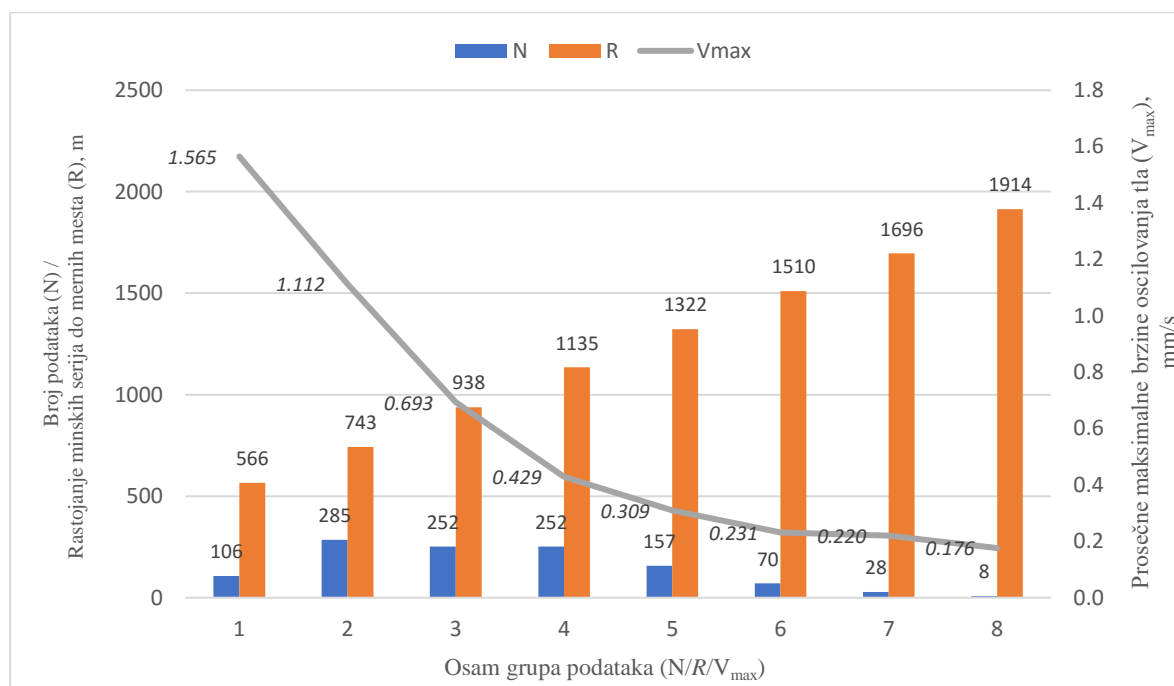
Radi sagledavanja korelativne zavisnosti rastojanja minskih serija do mernih mesta i brzine oscilovanja tla, na dijagram na *Slici br. 27* naneto je 1158 tačaka, odnosno 1158 uređenih parova: rastojanje minskih serija do mernih mesta i izmerene maksimalne brzine oscilovanja tla, iz *SUIP1158*. Na istoj slici data je jednačina regresione zavisnosti izmedju rastojanja minskih serija do mernih mesta i izmerenih maksimalnih brzina oscilovanja tla i odgovarajuća vrednost koeficijenta determinacije  $R^2$ .



*Slika br. 27 Zavisnost rastojanja minske serije do mernog mesta i maksimalno izmerene brzine oscilovanja*

U cilju utvrđivanja koeficijenta uticaja rastojanja minskih serija do mernih mesta na maksimalne brzine oscilovanja tla, prethodni skup od 1158 parova podataka (rastojanja minskih serija do mernih mesta – izmerene maksimalne brzine oscilovanja tla), podeljen je na osam grupa. Na dijagramu na *Slici br. 28* prikazana je raspodela broja podataka (N), rastojanja minske serije do mernih mesta ( $R$ ) i srednjih maksimalnih brzina oscilovanja tla ( $V_{max}$ ), po grupama minskih serija. Promena maksimalnih brzina oscilovanja tla u zavisnosti od rastojanja minskih serija do mernih mesta, po grupama minskih serija, prikazana je sivom linijom na slici. Vrednosti ( $R$ ) su u dijapazonu od 566 do 1914 m. Korak između opsega je 168,5 m.

Sa Slike br. 28 vidi se da se najveće brzine oscilovanja tla mogu očekivati za rastojanja minskih serija do mernih mesta čija je vrednost 566 m. Za veća rastojanja od 566 m vrednosti brzina oscilovanja tla se konstantno smanjuju. Takođe se sa dijagrama uočava da je uticaj rastojanja minskih serija do mernih mesta na brzinu oscilovanja tla izuzetno veliki.



*Slika br. 28 Promena srednjih vrednosti rastojanja mernog mesta do minske serije i promena srednjih vrednosti brzina za osam opsega*

Sa dijagrama prikazanog na Slici br. 28 vidi se da maksimalna vrednost srednje brzine oscilovanja tla ima vrednost 1,565 mm/s, dok je minimalna vrednost 0,176 mm/s. Koficijent uticaja rastojanja minskih serija do mernih mesta iznosi:

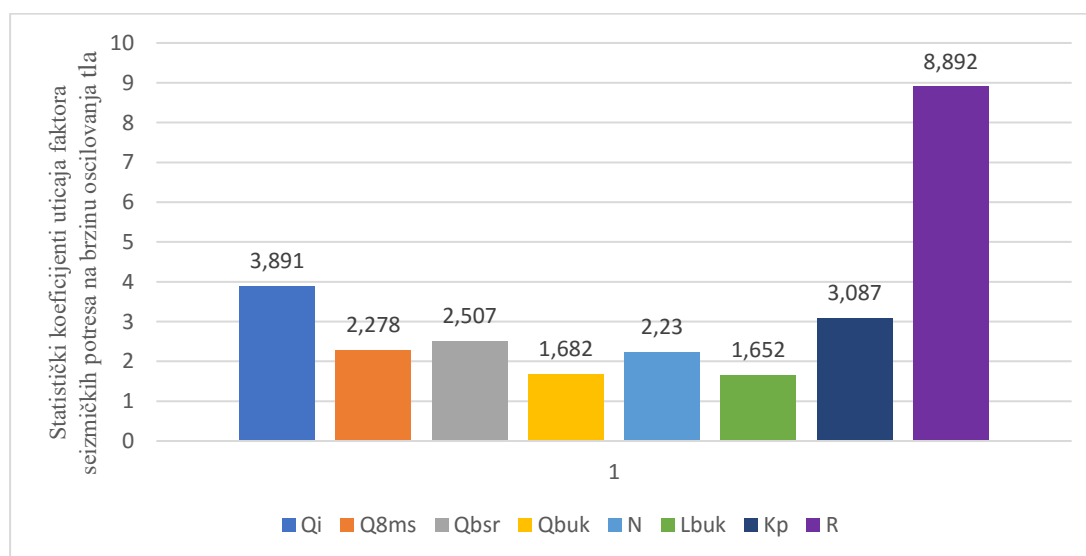
$$SK_R = 1,565 / 0,176 = 8,892$$

## 7.2. ANALIZA UTICAJA FAKTORA SEIZMIČKIH POTRESA NA BRZINU OSCILOVANJA TLA PRIMENOM STATISTIČKIH METODA

Na osnovu dobijenih koeficijenta uticaja pojedinih faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla primenom statističkih metoda formiran je dijagram dat na *Slici br. 29*.

Analizirajući dijagram dat na *Slici br. 29* može se zaključiti sledeće:

Za uslove na razmatranoj lokaciji sa specifičnim lokalnim uslovima, najveći uticaj na brzinu oscilovanja tla izazvanih miniranjima ima rastojanje minirane serije do mernih mesta ( $R$ ) čiji je koeficijent uticaja  $SK_R = 8,892$ . Drugi faktor seizmičkih potresa po uticaju je maksimalna masa eksploziva inicirana u jednom nominalnom vremenu iniciranja ( $Q_i$ ) čiji je koeficijent uticaja  $SK_{Q_i} = 3,891$ . Treći faktor seizmičkih potresa po uticaju je koeficijent punjenja minskih bušotina ( $K_p$ ) čiji je koeficijent uticaja  $SK_{K_p} = 3,087$ . Zatim slede uticaji srednje mase eksploziva po minskoj bušotini ( $Q_{bsr}$ ) sa koeficijentom uticaja  $SK_{Q_{bsr}} = 2,507$ , maksimalna masa eksploziva inicirana u vremenskom intervalu od 8 milisekundi ( $Q_{8ms}$ ) sa koeficijentom uticaja  $SK_{Q_{8ms}} = 2,278$  i broj bušotina u minskoj seriji ( $N$ ) sa koeficijentom uticaja  $SK_{N_b} = 2,23$ . Pretposlednji faktor seizmičkih potresa po uticaju je ukupna masa eksploziva u minskoj seriji ( $Q_{buk}$ ) čiji koeficijent uticaja iznosi  $SK_{Q_{buk}} = 1,682$ . Faktor seizmičkih potresa sa najmanjim uticajem na brzinu oscilovanja tla je ukupna dužina bušotina u minskoj seriji ( $L_{buk}$ ) sa koeficijentom uticaja  $SK_{L_{buk}} = 1,652$ .



*Slika br. 29* Dijagram uticaja faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla primenom statističkih metoda za uslove na površinskom kopu Veliki Krivelj

## 8. OSNOVE TEORIJE VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA

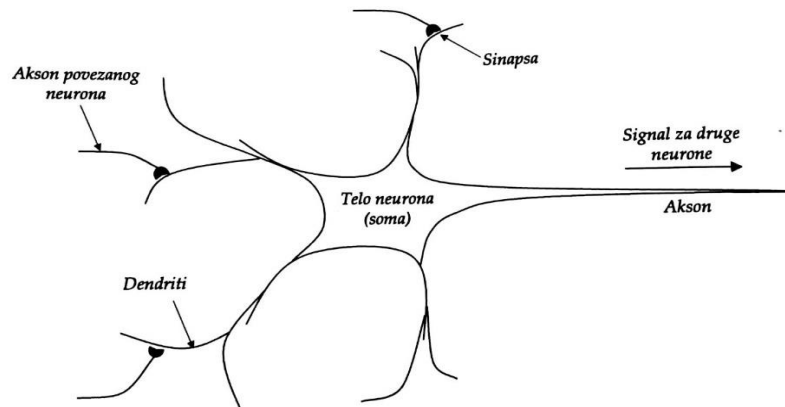
Veštačka neuronska mreža (engl. Artificial Neural Network - ANN), ili kraće neuronska mreža predstavlja skup međusobno povezanih jednostavnih procesirajućih elemenata, koji se nazivaju čvorovi ili neuroni, čiji se princip rada zasniva na radu biološkog neurona. Sposobnost procesiranja informacija neuronske mreže direktno zavisi od težinskih koeficijenta, odnosno „jačine“ veza kojima su povezani pojedini neuroni što, sa druge strane, zavisi od skupa podataka koji se koriste u procesu učenja neuronske mreže. Ovi mehanizmi sposobni su da funkcionišu nezavisno od tradicionalnih znanja i umeća programera, što predstavlja budućnost računarske tehnike uopšte [34].

Na primer, prepoznavanje ljudskog lica u gomili ljudi je jedan jednostavan primer problema koji je upotrebom klasičnog programiranja gotovo nemoguće rešiti, bez obzira na veliku brzinu procesiranja savremenih računara. Ljudski mozak, naprotiv, ovaj problem može rešiti za samo nekoliko milisekundi. Jedan od razloga je svakako u razlici između funkcionisanja procesora klasičnog računara, koji je jedinstven, komplikovan i radi na velikim brzinama i ljudskog mozga koji se odlikuje masovnom paralelnošću procesirajućih jedinica, koji ne rade toliko brzo i koje su veoma jednostavne. Osim toga, neuronske mreže, kao modeli ljudskog mozga, mogu da rade i u uslovima kada problem nije u potpunosti definisan, i kada ograničenja nisu jednoznačno definisana [34].

Radi samog razumevanja načina rada ANN neophodno je razumeti funkcionisanje ljudskog mozga, koji se sastoji od blizu sto milijardi međusobno povezanih neurona. Neuroni su svrstani u sto različitih klasa.

Neuron (nervna ćelija) je specijalizovana biološka ćelija koja ima mogućnost procesiranja informacija. Delovi neurona su telo *soma* i dva tipa vlaknastih razgranatih struktura (*akson* i *dendrit*). Svaki od pomenutih delova ima svoju funkciju. *Dendriti* primaju signale (impulse) od drugih neurona i prenose signal do tela neurona. U telu neurona se generiše signal koji se putem *aksona* šalje do narednog neurona. Krajevi pomenutih struktura se granaju sa završecima koji se nazivaju *sinapse*. *Sinapse* su elementarne strukture koje povezuju akson jednog neurona sa dendritom povezanog neurona. Svaki električni impuls u *sinapsi* izaziva lučenje male količine hemijske supstance (neurotransmitera). Neurotransmitter prolazi kroz sinapsičke šupljine i pri tome pospešuje ili zaustavlja tendenciju emitovanja električnog signala prijemnog neurona. Jednostavnije rečeno, kada neuron primi pobuđujući ulaz, koji je veći od njegovog inhibitornog ulaza, on šalje električni impuls duž svog *aksona*. Neuroni sa svojim

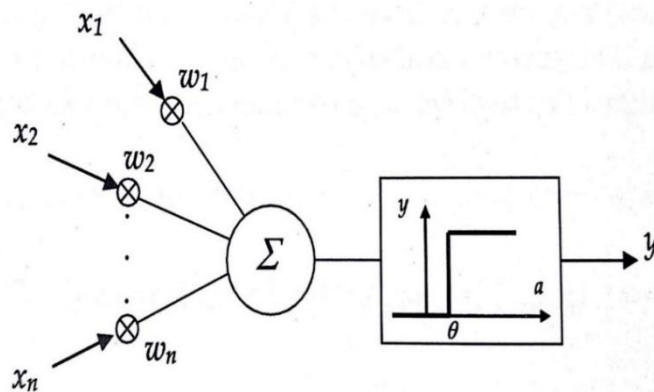
vezama funkcionišu nesinhronizovano i nestabilno, pa otud i nemogućnost komparacije sa savremenim računarskim sistemima. Neuroni nemaju mogućnost regeneracije, odnosno ne menjaju se tokom vremena, što objašnjava fenomen pamćenja kod živih bića. Biološki neuron je prikazan na *Slici br. 30* [34].



*Slika br. 30 Biološki neuron [34]*

Veštački neuroni primaju ulazne signale od okruženja ili drugih neurona preko sinapsi ili veza koje mogu biti eksitacione (pobuđivačke) ili inhibitorne. Svaki neuron poseduje sopstveni potencijal, koji, kada prevaziđe odgovarajući prag, uslovljava aktiviranje neurona pomoću aktivacionog potencijala – neuronskog impulsa, što se putem međusobnih veza prenosi i do ostalih neurona.

Osnove veštačkog neurona sa pragom (engl. *Threshold Logic Unit-TLU*) postavili su *McCulloch i Pitts* a njegov šematski prikaz je dat na *Slici br. 31*.



*Slika br. 31 Veštački neuron [34]*

Imajući u vidu analogiju sa biološkim neuronom, procesiranje podataka koje se izvodi u veštačkom neuronu moglo bi se predstaviti na sledeći način: efekat svakog signala aproksimira se množenjem signala nekim brojem (tzv. težinom) i na ovaj način predstavlja se jačina sinapse. Ukoliko je razmatrana težina pozitivna naziva se eksitacija, dok se negativna težina naziva inhibicija. Na ovaj način „otežani“ signali se sabiraju i formiraju ukupnu vrednost aktivacije. Ukoliko vrednost aktivacije premaši određeni prag (obično se vrednost praga obeležava sa  $\Theta$ ), procesirajuća jedinica proizvodi odgovarajući odziv.

Pretpostavka je da postoji  $n$  ulaza sa signalima  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  i težinama  $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$ . Signali mogu imati vrednost nula ili jedinica. Vrednost aktivacije –  $a$ , može da se izračuna korišćenjem *Formule br. 20*:

$$a = w_1 x_1 + w_2 x_2 + \dots + w_n x_n \quad (20)$$

odnosno

$$a = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (21)$$

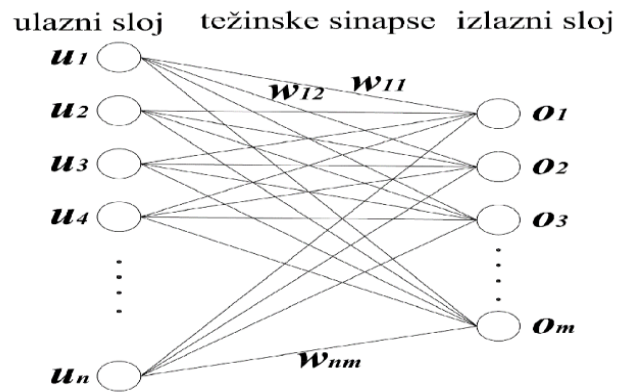
Izlazna veličina  $y$  zavisi od vrednosti aktivacije i od praga, pa je:

$$y = 1, \text{ za } a \geq \Theta \quad \text{ili} \quad y = 0, \text{ za } a < \Theta$$

S obzirom na to da izlaz iz neurona može biti 1 ili 0 aktivaciona funkcija zove se i koračna ili odskočna funkcija (engl. *Hard-limit*). Ukoliko bi se potražila analogija sa biološkim neuronima, prisustvo akcionog potencijala označavalo bi se kao binarna jedinica, a odsustvo kao binarna nula.

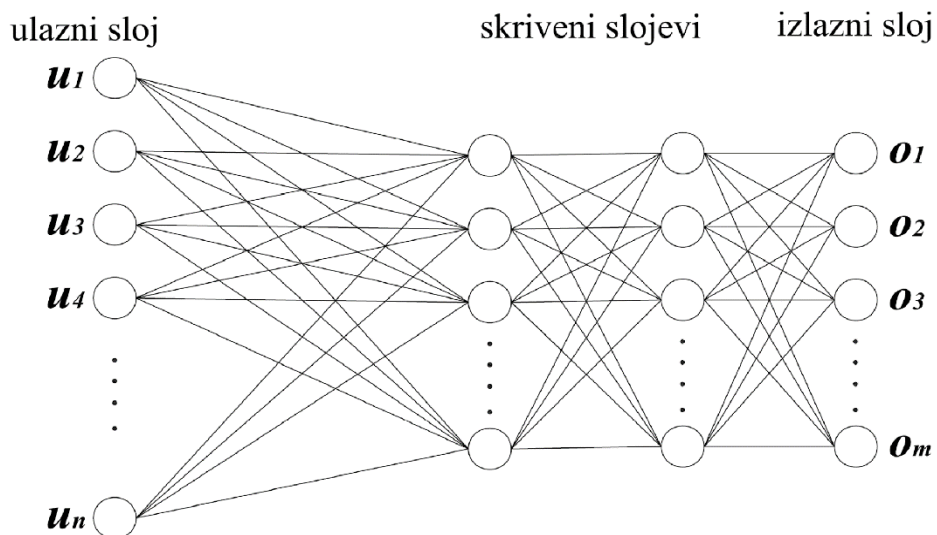
Ukratko svaki neuron izvodi veoma jednostavnu funkciju: prikuplja signale od neurona koji su u njegovom okruženju, odnosno od okoline, i nakon procesiranja proizvodi izlazni signal koji se prosleđuje okolnim neuronima sa kojima je povezan [34].

Kao što se biološki neuroni vezuju u nervni sistem tako se i veštački neuroni vezuju da formiraju veštačku neuronsku mrežu pri čemu su neuroni unutar mreže grupisani u slojeve čime se i definiše arhitektura mreže [24].



Slika br. 32 Jednoslojna arhitektura mreže [24]

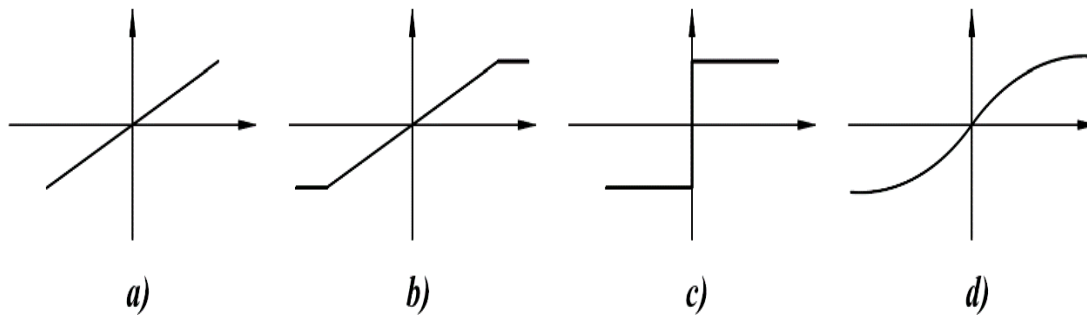
Ukoliko u mreži postoje samo jedan ulazni i jedan izlazni sloj govori se o jednoslojnoj mreži Slika br. 32, a ako se između ulaznog i izlaznog sloja nalazi jedan ili više skrivenih slojeva onda je takva mreža višeslojna Slika br. 33.



Slika br. 33 Višeslojna arhitektura mreže [24]

Procesorska moć neuronske mreže takođe zavisi i od aktivacionih funkcija neurona, što treba imati u vidu prilikom projektovanja neuronske mreže. Aktivacione funkcije se mogu razlikovati od nivoa do nivoa, što zavisi od toga za koju će svrhu mreža biti korišćena [34]. Na Slici br. 34 prikazani su neki od grafika aktivacionih funkcija





Slika br. 34 Grafički prikazi nekih od aktivacionih funkcija: a) linearna, b) semi-linearna, c) pragovska i d) sigmoidna [24]

Mreže kod kojih signali putuju samo u jednom smeru od ulaza ka izlazu su takozvane *feed forward* mreže, odnosno mreže sa propagacijom signala unapred. Mreže kod kojih se uvodi povratna sprega, to jest vraćanje izlaznog signala na ulaz su takozvane rekurentne mreže. Naravno, moguća je i kombinacija ova dva tipa mreže [24].

Veštačke neuronske mreže su adaptivni sistemi što znači da su samomodifikujući matematički modeli koji mogu da koriste spoljašnje (ulazne) podatke za podešavanja svojih parametara u cilju postizanja optimalnog izlaza odnosno definisanja kompleksnih „obrazaca“ ponašanja varijabli. Ova adaptivnost i podešavanje podataka ostvaruje se procesom „učenja“ mreže. Proces učenja u stvari predstavlja stalno menjanje težinskih sinapsi (i aktivacionih pragova) kako bi se postigle željene vrednosti izlaza. Postoje tri osnovna procesa ili paradigmi učenja, nadgledano (supervizorsko), nenadgledano (nesupervizorsko) i pojačano (kombinacija) [24].

Kod nadgledanog učenja postoji set ulaznih podataka kojima odgovara set poznatih izlaznih podataka sa tačnim vrednostima. Proces učenja se sastoji u definisanju težinskih koeficijenata tako da se pronađe funkcija koja preslikava skup ulaznih podataka u skup izlaznih podataka. Ulogu učitelja koji nadgleda proces učenja preuzima neki od metoda za minimizaciju greške preslikavanja (najčešće najmanja srednja kvadratna greška) [24]. Dobar primer za nadgledano učenje je *BPNN* (*Back-Propagation Neural Network*) – veštačka neuronska mreža sa propagacijom greške unazad.

Kod nenadgledanog učenja za set ulaznih podataka ne postoji set odgovarajućih izlaznih podataka. Pošto nema seta izlaznih podataka nemoguće je odrediti grešku kojom bi se ocenilo potencijalno rešenje. Kako nema nadzora, mreža sama pronalazi veze i

sličnosti između ulaznih parametara kako bi najbolje opisala obrasce ponašanja ulaznih varijabli.

Pojačano učenje predstavlja kombinaciju prethodna dva tipa učenja pri čemu svakom setu ulaznih podataka odgovara set izlaznih podataka. Međutim, umesto tačnih vrednosti kao kod nadgledanog učenja, kod pojačanog učenja mreža dobija samo informaciju da li je sračunata izlazna vrednost tačna ili ne, naravno uz nagradu ili kaznu [24].

***BPNN (Back-Propagation Neural Network)*** – veštačka neuronska mreža sa propagacijom greške unazad razvijena je u cilju rešavanja problema nelinearnih preslikavanja i prepoznavanja složenijih oblika [34].

*BPNN* se sastoji od jednog ulaznog, jednog izlaznog i jednog ili više skrivenih slojeva neurona. Efikasnost ovakvih mreža direktno zavisi od broja neurona i njihovih međusobnih veza.

Princip rada *BPNN* predstavljen je jednim prolazom unapred i jednim prolazom unazad. Prolaz unapred je ustvari dovođenje signala na ulazni nivo koji se odmah prosleđuje prvom skrivenom sloju neurona, zatim sledećem ukoliko postoji i tako do izlaznog sloja neurona. Izlazni sloj proizvodi signal koji se u principu razlikuje od tačne vrednosti. Izlazni signal se upoređuje sa tačnom vrednošću i dobija se greška. Greška se prosleđuje unazad svakom prethodnom neuronu u skrivenim slojevima i svako od njih dobija deo greške koji je proporcionalan njegovom učešću u formiranju izlaznog signala. Proces raspodele greške vrši se u prolazu unazad, a posledica je promena težinskih koeficijenata kojima su neuroni međusobno povezani. Promena težinskih koeficijenata dovodi do smanjenja ukupne greške. Adaptacija težinskih koeficijenata je u stvari učenje mreže [34]. Ovaj proces traje sve dok se greška ne približi nivou koji je prethodno definisan, a prati se preko MSE – srednje kvadratne greške.

Nakon što je faza obuke modela uspešno okončana, performanse obučenog modela moraju biti potvrđene korišćenjem nezavisnog skupa za testiranje. Nezadovoljavajući učinak mreže može da bude poboljšan ponovnom obukom, povećanjem broja neurona ili korišćenjem većeg skupa podataka za obuku. Nakon uspešne obuke, validacije i testiranja, neuronska mreža može da se koristi za predviđanje skupova izlaznih podataka na osnovu ulaznih podataka koristeći šablon obuke.

## **9. OBUKA I VALIDACIJA ANN U CILJU VREDNOVANJA UTICAJA FAKTORA INTENZITETA SEIZMIČKIH POTRESA**

Programi na bazi ANN (*veštačkih neuronskih mreža*) služe za rešavanje složenijih problema koji uključuju brojne faktore od kojih zavisi ishod ili rezultat. Primena pomenutih programa je zastupljena u svim naučnim oblastima. Rudarstvo, poljoprivreda, automobilska, naftna i gasna industrija, detekcija proizvodnih oštećenja i robotika su primeri uspešne primene. Vojna industrija je koristila programske pakete za potrebe vazduhoplovstva i prepoznavanje vojnih ciljeva. Bankarski sektor i sektor osiguranja su takođe na spisku uspešne primene.

Tokom ovog istraživanja korišćen je programski paket razvijen na komponentama za neuronske mreže i adaptivne sisteme „*PELTARION SYNAPSE*“. Tačnije, korišćena je opcija iz programskog paketa koja služi za modeliranje funkcija (*Function Modeling*).

### **9.1. UPOTREBA ANN U CILJU PREDVIĐANJA BRZINA OSCILOVANJA TLA ZA USLOVE MINIRANJA NA POVRŠINSKOM KOPU VELIKI KRIVELJ**

Pre bilo kakvog rada sa ANN neophodno je odrediti nivo potrebnih performansi mreže koji je prihvatljiv za konkretni slučaj. Srednja kvadratna greška MSE i standardna devijacija  $\delta$  su parametri mreže čije se vrednosti upoređuju sa unapred zadatim vrednostima. Ako je obučena mreža dala manje vrednosti MSE i  $\delta$  od zadatah, onda je prihvatljiva za dalju primenu. Radi dobijanja obučene mreže koja može da predvidi izlazni rezultat, koristeći ulazno-izlazni skup podataka za učenje, potrebno je pratiti gornji deo algoritma dat na *Slici br. 49* a koji podrazumeva sledeće korake:

*Prvi korak* je priprema za obuku mreže (*Preprocessing*). Priprema podrazumeva formiranje tabele ulazno-izlaznog skupa, faktor seizmičkih potresa i brzine oscilovanja tla za obuku mreže, kao i izbor podešavanja kojim će se mreža obučavati. Na osnovu veličine ulaznog skupa i kompleksnosti zadatka definsanog podešavanjima, određuje se potrebna arhitektura

mreže. Tabela je sa izvornim ili modifikovanim vrednostima faktora seizmičkih potresa i brzine oscilovanja tla, a koja je prevedena u format koji zahteva *Synapse*.

Izbor podešavanja je važan postupak kojim se donekle performanse mreže prilagođavaju težini zadatka, na koji mreža mora dati zadovoljavajući odgovor. Rezultat ili posledica podešavanja je arhitektura mreže koju sam program predlaže koristeći *Fuzzy logiku*, ili se arhitektura projektuje samostalno. Sam izbor podešavanja predstavlja odabir parametra podešavanja (broj podataka, obim uzorka, kompleksnost problema) koji za isti ulazno-izlazni skup podataka daje najbolje performanse mreže.

**Drugi korak** je obuka i validacija mreže za koju su u fazi *Preprocessinga* izvršena sva potrebna podešavanja. Obuka i validacija se vrše istovremeno tako što se nakon određenog broja iteracija izvršava i validacioni prohod sa setovima podatka iz validacionog skupa. Tokom ovog koraka nakon obuke, potrebno je analizirati rezultate, i donekle se uveriti da predloženo rešenje poseduje potencijal za naknadno testiranje i verifikaciju.

**Treći korak** je testiranje i verifikacija mreže sa nezavisnim skupom podataka radi dobijanja novih predviđenih brzina oscilovanja tla koje se upoređuju sa izmerenim vrednostima brzine i donosi zaključak o performansama mreže.

Tokom ovog istraživanja u cilju verifikacije mreže, vrednosti predviđenih i izmerenih brzina su se koristile za dobijanje njihove međuzavisnosti, i utvrđivanje odgovarajućeg koeficijenta determinacije  $R^2$  u odnosu na pravu  $V_{izmer} = V_{ANN}$ . Uslov za verifikaciju mreže je ispunjen ako je vrednost dobijenog koeficijenta determinacije  $R^2$  u odnosu na pravu  $V_{izmer} = V_{ANN}$ , veća od unapred zadate vrednosti koeficijenta determinacije  $R^2_{zadat}$  u odnosu na pravu koja predstavlja jednakost izmerenih i predviđenih brzina. Ukoliko zadati uslov nije ispunjen, pristupa se novoj obuci mreže sa drugačijim podešavanjima uz ponavljanje celog postupka.

Konkretno u ovom slučaju, prilikom usvajanja  $R^2_{zadat}$ , posebno je obraćena pažnja na to da se pred veštačku neuronsku mrežu postavi realan zadatak, s obzirom na složene uslove eksploatacije na površinskom kopu Veliki Krivelj. Takođe je obraćena pažnja na veličinu ulazno-izlaznog skupa podataka, kao i na široki opseg vrednosti faktora seizmičkih potresa i izmerenih brzina oscilovanja tla.

Prethodno rađena istraživanja tokom praćenja brzine oscilovanja tla izazvanih miniranjima na površinskom kopu Veliki Krivelj, pokazala su da se vrednost koeficijenta determinacije  $R^2$  u odnosu na pravu  $V_{izmer} = V_{zakon}$  dobijen primenom klasičnog zakona oscilovanja kreće oko vrednosti 0,65. Ovaj koeficijent je dobijen za ( $Q_{buk}$ ) ukupne mase eksploziva u minskoj seriji, kako je prikazano u Tačka 9.5. Vrednost ovog koeficijenta, a

naročito vrednost koeficijenta determinacije za ( $Q_i$ ) u odnosu na pravu  $V_{izmer} = V_{zakon}$  potvrda je pomenute složenosti lokalnih uslova u kojima se ovo istraživanje sprovodilo.

U prezentovanim istraživanjima [16], [17] i [20], u kojima je broj podataka u *SUIP*-u bio na vrlo skromnom nivou, mreže su uspešnije predviđale brzine oscilovanja tla u odnosu na primenjivane klasične prediktore. Dobijene vrednosti koeficijenta determinacije  $R^2$  iz mreža su bile veće najmanje 30% u odnosu na vrednosti koeficijenta determinacije  $R^2$  dobijene klasičnim prediktorima. Poznato je da se u ovom istraživanju koristio desetostruko veći *SUIP*, sa velikim rasipanjem vrednosti podataka, pa su očekivanja a samim tim i zahtevi prema mreži morali biti realni.

Prilikom određivanja vrednosti  $R^2_{zadat}$ , kao osnova je uzeta utvrđena vrednost najvećeg koeficijenta determinacije  $R^2 = 0,652$  u odnosu na pravu  $V_{izmer} = V_{zakon}$ . Uzeta su i saznanja iz prethodnih istraživanja kao okvir zahteva koji se očekivao od mreže, a specifičnosti lokalnih uslova i veličina *SUIP*-a su bili ključni otežavajući faktori. Na osnovu njih se došlo do donekle realne vrednosti zadanog koeficijenta determinacije  $R^2_{zadat}$  na sledeći način:

Koeficijent determinacije  $R^2_{zadat}$  u odnosu na pravu koja predstavlja jednakosti izmerenih i predviđenih brzina, mora biti najmanje 10 % veći od istog koeficijenta dobijenog primenom klasičnog zakona oscilovanja, odnosno  $R^2_{zadat} = 0,717$ , što je na prvi pogled delovalo realano i prihvatljivo.

## **9.2. ODREĐIVANJE DOZVOLJENE GREŠKE I VREDNOSTI STANDARDNE DEVIJACIJE ZA INTERVAL POVERENJA 95%**

Svaki adaptivni sistem proizvodi grešku koja predstavlja razliku u vrednostima predloženog podatka od strane sistema i stvarne vrednosti tog podatka. Ako je greška izlaza manja od neke unapred definisane vrednosti greške, mreža se može upotrebiti u sledećim koracima istraživanja. Iz tog razloga bilo je neophodno definisati vrednost dozvoljene greške MSE i dozvoljenu vrednost standardne devijacije  $\delta$  za interval poverenja 95% koje mreža mora da ispuni.

U toku razmatranog perioda istraživanja, posumnjalo se u kvalitet usporivača koji su korišćeni. Iz tog razloga je minerska služba u saradnji sa Tehničkim fakultetom Bor, dana 05.08.2020. izvršila merenja *Nonel* sistema iniciranja. Merenja su izvršena pomoću ultra brze kamere. Tom prilikom je urađen izveštaj, iz koga se videlo da su primenjivani usporivači od 500 ms imali grešku usporenja 12,6%. Iz istog izveštaja se videlo da su i primenjivani usporivači od 25 ms imali grešku usporenja od 5,6%. Bila je moguća pojava grešaka i u drugim ulaznim parametrima, ali je napred opisana greška kod usporivača dominantna sa egzaktnim

podacima. Vrednosti izvedenog faktora seizmičkih potresa ( $Q_i$ ) su dobijene na bazi primenjivanih usporenja u minskoj seriji, pa je iz tog razloga kod ovog faktora seizmičkog potresa postojao nivo greške od oko 12,6%. S obzirom na napred navedeno bilo je nelogično da se od mreže traži da njena srednja kvadratna greška MSE bude manja od utvrđene greške koja je postojala u ulaznom skupu podataka. Uključenjem prethodno utvrđenih činjenica u razmatranje, performanse obučene mreže su trebale da zadovolje sledeće zahteve:

Srednja kvadratna greška MSE nije smela da bude veća od 0,0911 mm/s, odnosno 12,6% prosečne brzine oscilovanja tla, koja je bila utvrđena na bazi podataka koje sadrži *SUIP1158*, a čija vrednost je iznosila 0,723 mm/s.

Prilikom donošenja odluke o maksimalno dozvoljenoj vrednosti standardne devijacije, pošlo se od pretpostavke stopostotnog učinka mreže, odnosno za vrednost koeficijenta determinacije  $R^2 = 1$  u odnosu na pravu  $V_{izmer} = V_{ANN}$ . U tom slučaju je vrednost standardne devijacije identična za podatke izmerenih brzina oscilovanja tla iz *SUIP*-a i za predviđene brzine oscilovanja tla dobijene iz veštačke neuronske mreže.

Iz tog razloga izračunata je vrednost standardne devijacije, za izmerene brzine oscilovanja tla za *SUIP1158*, koja je iznosila  $\delta = 0,5335$  mm/s. Na osnovu ovog egzaktnog podatka o vrednosti  $\delta$ , formulisana je maksimalna vrednost standardna devijacija  $\delta$  za interval poverenja 95% koju daje veštačka neuronska mreža kao  $V_{ANN} \pm 0,5335$  mm/s.

### 9.3. PRIPREMA MREŽE ZA OBUKU

Za rad sa mrežom korišćen je *SUIP1158* sa 1158 setova podataka minskih serija miniranih tokom razmatranog perioda. Metodom slučajnog uzorka iz celog skupa podataka izdvojeno je 115 setova podataka. Metoda slučajnog uzorka je podrazumevala izdvajanje svake desete serije iz skupa miniranih serija tokom razmatranog perioda.

Preostalih 1043 seta podataka miniranih serija predstavljali su *SUIP1043* dat u *Prilogu br. 1*, koji je korišćen za obuku mreže. *SUIP1043* je sadržao 1043 seta podataka ulaznih parametara faktora seizmičkih potresa ( $Q_i, Q_{8ms}, Q_{bsr}, Q_{buk}, N_b, L_{buk}, K_p$  i  $R$ ) i 1043 podatka izlaznog parametara brzine oscilovanja tla ( $V_{max} = V_{izmer}$ ) sa površinskog kopa Veliki Krivelj.

Izdvojenih 115 setova podataka formirali su *SUIP115* dat u *Prilogu br. 2*, koji je korišćen za verifikaciju mreže. *SUIP115* je sadržao 115 setova podataka ulaznih parametara faktora seizmičkih potresa ( $Q_i, Q_{8ms}, Q_{bsr}, Q_{buk}, N_b, L_{buk}, K_p$  i  $R$ ) i 115 podatka izlaznog parametara brzine oscilovanja tla ( $V_{max} = V_{izmer}$ ) sa površinskog kopa Veliki Krivelj.

Za potrebe ovog istraživanja izbor podešavanja je urađen obukom 30 veštačkih neuronskih mreža sa istim ulazno-izlaznim skupom podataka. Planirana podešavanja mreža na zadatom nivou kompleksnosti zadatka, izvršena su sa različitim kombinacijama broja *epoha*, broja setova podataka i perioda validacija.

Prilikom izbora broja *epoch-a*, odnosno određivanja broja prolaza mreže kroz čitav ulazno-izlazni skup podataka, težilo se minimalnoj vrednosti MSE.

Prilikom izbora *batch size*, odnosno broja setova podataka minskih serija, koji će istovremeno biti poslat kroz mrežu, vodilo se računa o kompromisu između stabilnog režima rada mreže uz odgovarajuću preciznost i nestabilnog rada mreže uz povećanu preciznost predviđenih rezultata.

Prilikom izbora validacionog perioda, odnosno opredeljenja nakon koliko prolaza mreža je upoređivala predviđene vrednosti i stvarne vrednosti izlaznog parametra, težilo se minimalnoj vrednosti MSE.

Obučene mreže su prikazale svoje performanse kroz vrednost srednje kvadratne greške MSE i vrednosti standardne devijacije  $\delta$ . Plan izbora podešavanja i rezultati za trideset obučanih mreža su dati u *Tabeli br. 15*.

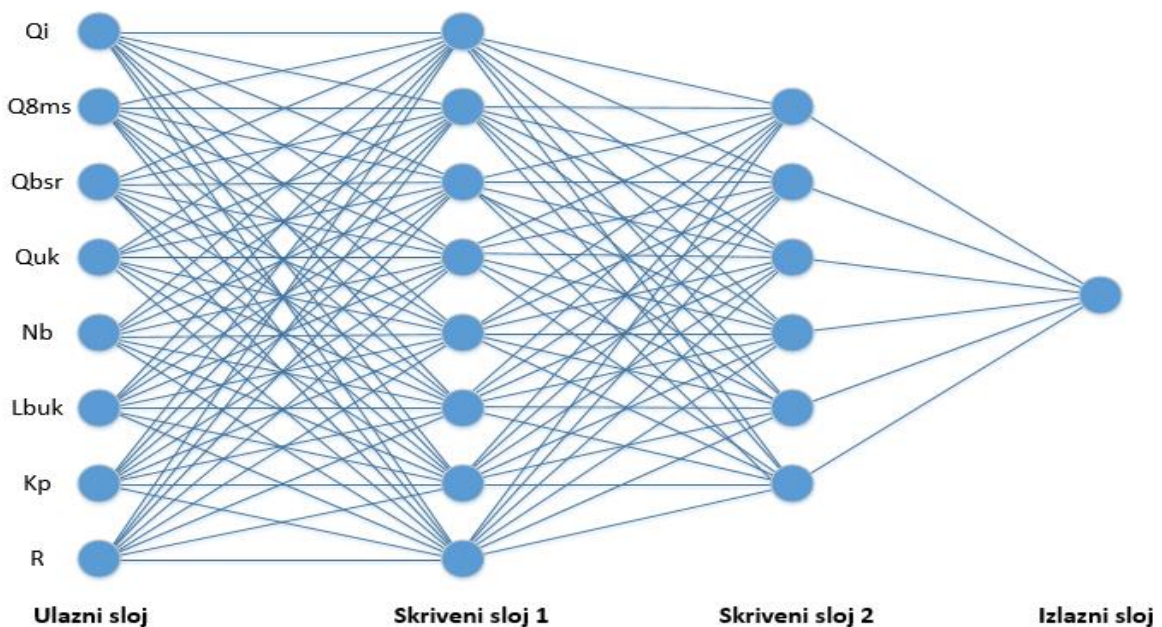
Podaci iz *Tabele br. 15* su pokazali da rast veličine seta podataka koja prolazi kroz mrežu i rast broja prolaza utiču na smanjenje vrednosti srednje kvadratne greške MSE. Podešavanje u kome je mreža obučavana sa 9000 prolaza, sa setom od 200 podataka i validacija nakon 5 prolaza kroz mrežu je pokazala najmanju vrednost srednje kvadratne greške MSE. Uz zanemarivanje preciznosti predviđanja ona je pokazala najbolje performanse. U cilju poboljšanja preciznosti predviđanja vrednosti brzine oscilovanja tla, pronađeno je rešenje kroz podešavanje koje je dato pod rednim brojem 10 u *Tabeli br. 15*. Zaključeno je da podešavanje sa 5000 prolaza, 50 setova podataka i validaciju nakon 5 prolaza ima nivo MSE koji je prihvatljiv, i odabrano je za sve naredne obuke mreža.

Vrednost MSE za odabrano podešavanje je 0,02156 i značajno je bilo ispod granice dozvoljene greške 0,0911.

Za obuku i validaciju mreže korišćen je skup ulazno-izlaznih podataka dobijen terenskim istraživanjima na površinskom kopu Veliki Krivelj. Dobijeni ulazno-izlazni skup podataka smatran je prihvatljivim i validnim. Sama validnost podataka je proistekla iz činjenice da je kop Veliki Krivelj tokom razmatranog perioda posedovao organizovanu minersku službu sa uredno vođenim dnevnicima miniranja. Takođe je posedovao i dobro organizovanu geodetsku službu koja je koristila najsavremeniju geodetsku opremu. Istovremeno i podaci

izmerenih brzina oscilovanja tla su smatrani dovoljno pouzdanim, uzimajući u obzir kvalitet instalirane opreme za monitoring.

Za potrebe validacije program je izdvojio 15% setova podataka iz ulazno-izlaznog skupa (*SUIP1043*), a ostatak je korišćen za obuku. Pri formiranju arhitekture mreže iskorišćena je mogućnost da program na bazi *Fuzzy logike* sam predloži arhitekturu. U ovom slučaju, na osnovu kvantiteta ulazno-izlaznog skupa podataka i zadanog nivoa kompleksnosti zadatka, program je odredio arhitekturu koja je prikazana na *Slici br. 35*. Arhitektura je višeslojna i pripada tipu *BPNN*. Osam ulaznih neurona, prvi skriveni nivo osam neurona, drugi skriveni nivo šest neurona i izlazni sloj sa jednim neuronom činili su arhitekturu mreže.



*Slika br.35. Arhitektura predložene mreže*

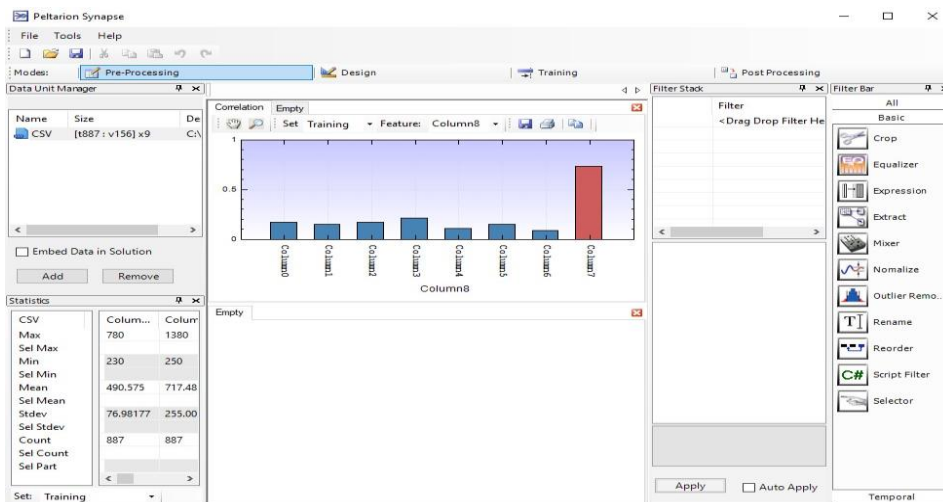


Tabela br. 15 Plan i rezultati izbora podešavanja

Red. br.	Broj epoha	Broj uzorka	Validacija	MSE mreže	$V_{\max}$ m/s	$\delta$
1	2000	5	5	0,02391	0,4340	0,5598
2	5000	5	5	0,02378	0,4185	0,5451
3	7000	5	5	0,02365	0,5253	0,5305
4	9000	5	5	0,02898	0,3036	0,5346
5	2000	20	5	0,02390	0,3213	0,4978
6	5000	20	5	0,01569	0,3667	0,5560
7	7000	20	5	0,02323	0,3582	0,6127
8	9000	20	5	0,02312	0,3297	0,4629
9	2000	50	5	0,02483	0,2433	0,4960
10	5000	50	5	0,02156	0,3161	0,5193
11	7000	50	5	0,02105	0,3417	0,5519
12	9000	50	5	0,02097	0,3117	0,6450
13	2000	100	5	0,02390	0,2966	0,4720
14	5000	100	5	0,02350	0,3299	0,4609
15	7000	100	5	0,02334	0,3279	0,4845
16	9000	100	5	0,02269	0,3093	0,7244
17	2000	200	5	0,02392	0,3273	0,5404
18	5000	200	5	0,01451	0,3847	0,5227
19	7000	200	5	0,02329	0,3065	0,5084
20	9000	200	5	0,01396	0,4866	0,8819
21	2000	500	5	0,01493	0,3422	0,5825
22	5000	500	5	0,02339	0,3566	0,5247
23	7000	500	5	0,02359	0,3291	0,7572
24	9000	500	5	0,02313	0,3240	0,5404
25	5000	5	10	0,00538	0,3461	0,8142
26	5000	20	10	0,00235	0,2878	0,9510
27	5000	200	10	0,02143	0,3725	0,5125
28	5000	5	20	0,02169	0,3464	0,7856
29	5000	20	20	0,02196	0,1052	0,7463
30	5000	200	20	0,02148	0,3266	0,5047

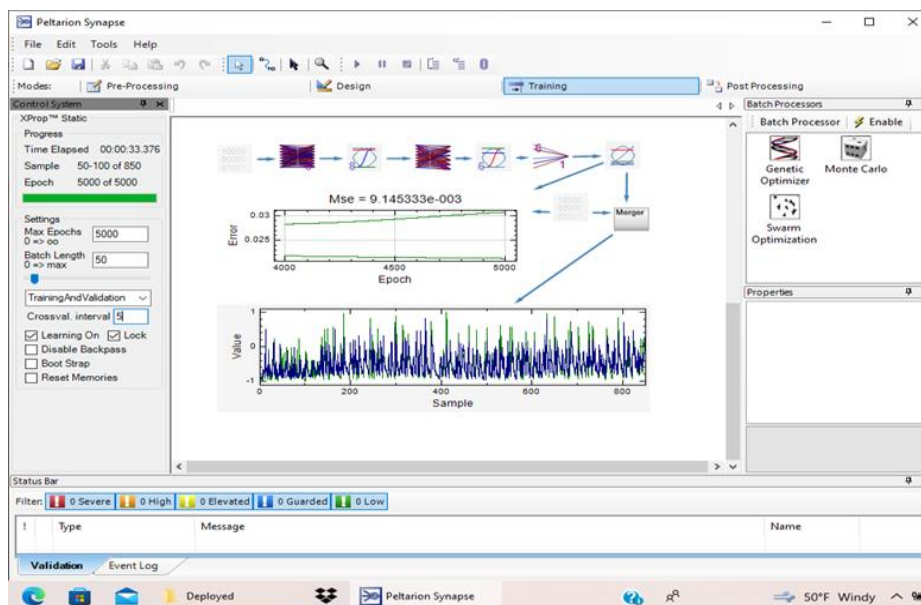
## 9.4. OBUKA MREŽE

Posle uvođenja *SUIP1043* u program, izvršenih podešavanja i obuke, dobijena je *obučena mreža*. Mreža je imala srednju kvadratnu grešku  $MSE = 0,0091453$  i standardnu devijaciju  $\delta = 0,496535$ , i njihove vrednosti su bile u okvirima dozvoljenih granica. Performanse obučene mreže date su na *Slikama od broja 36 do broja 41*.

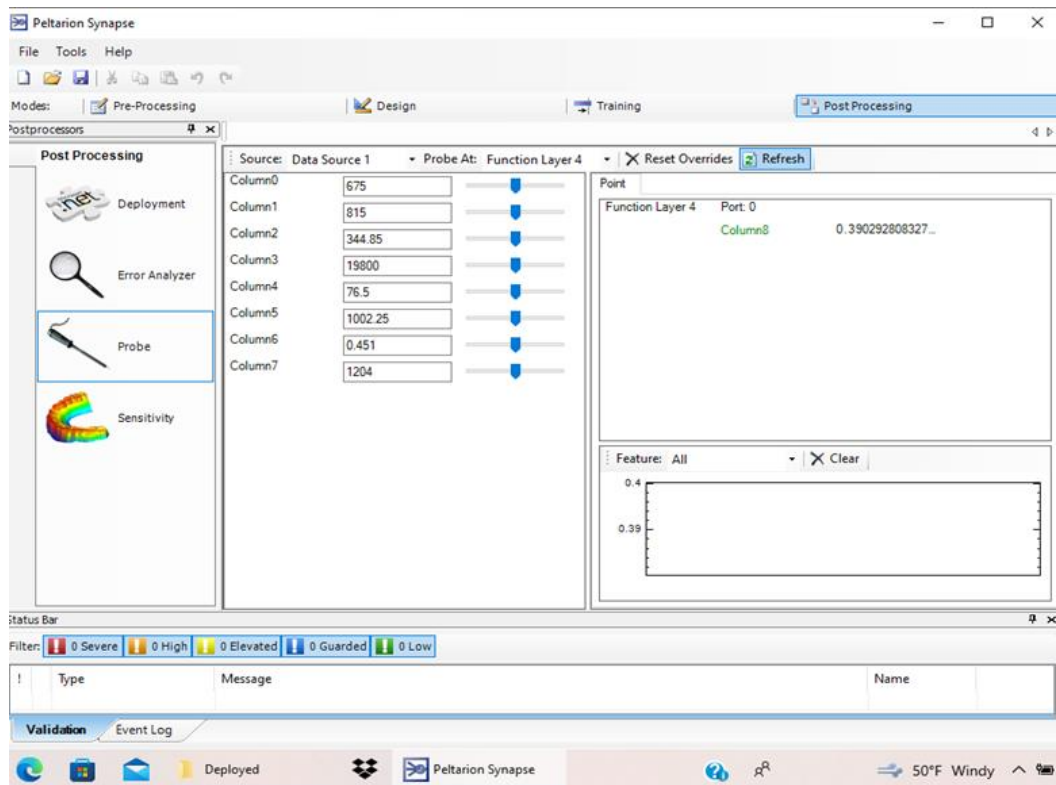


$Q_i \ Q_{8ms} \ Q_{bsr} \ Q_{buk} \ N_b \ L_{buk} \ k_p \ R$

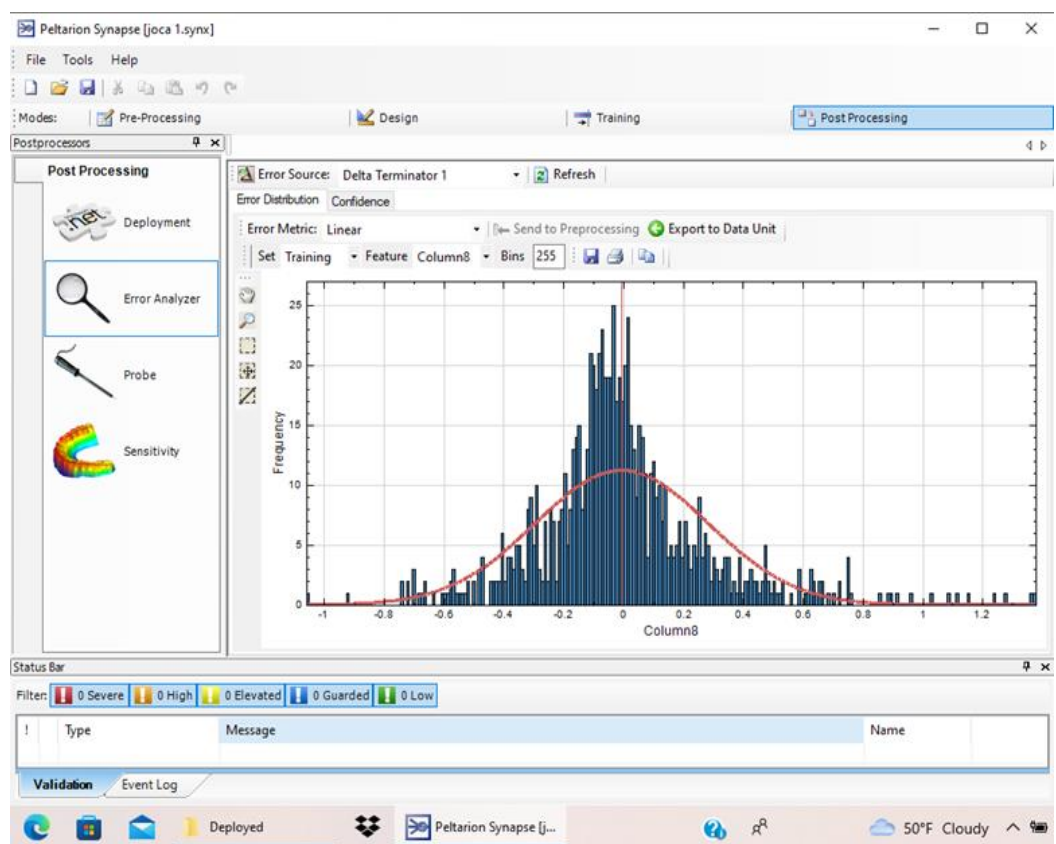
*Slika br. 36 Relativni uticaj faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla pre obuke mreže*



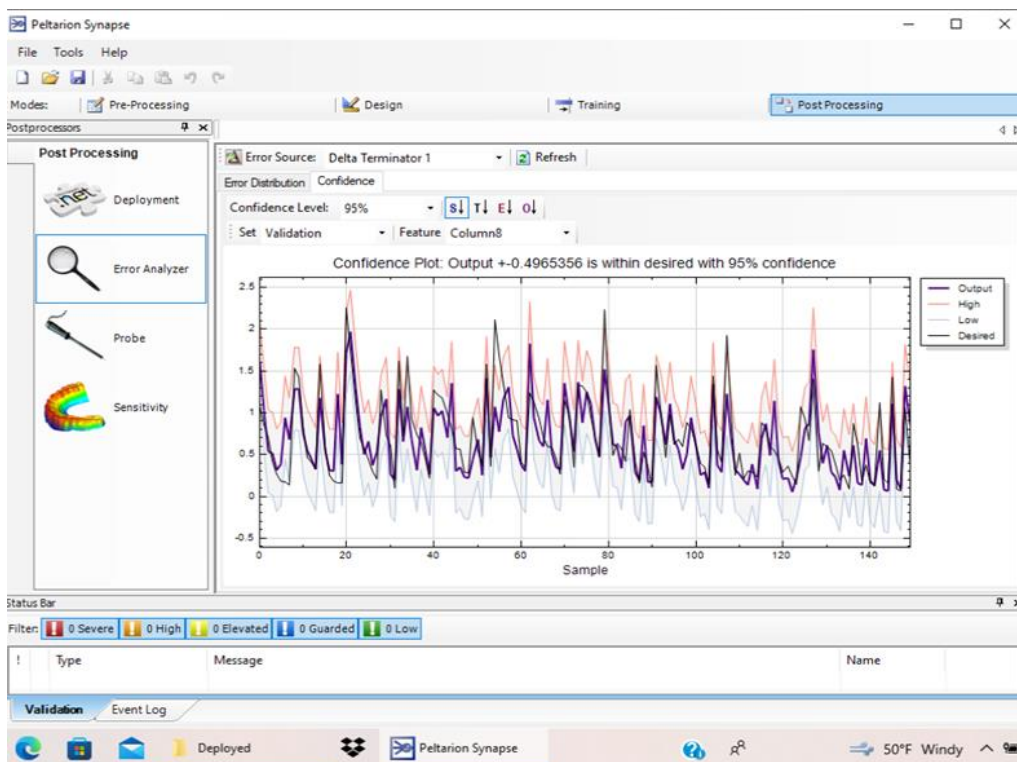
*Slika br. 37 Urađena podešavanja, arhitektura mreže i vrednost MSE*



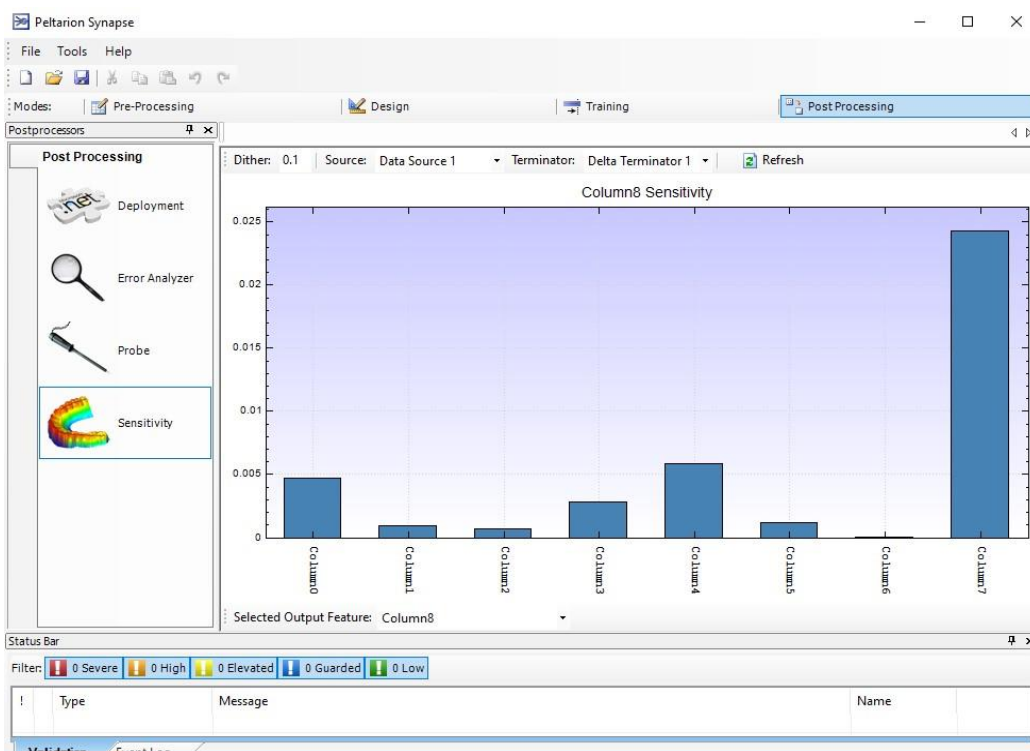
Slika br. 38 Opcija Probe za korišćenje u realnom vremenu



Slika br. 39 Dijagram raspodele greške



Slika br. 40 Standardna devijacija  $\delta$  za interval poverenja 95%

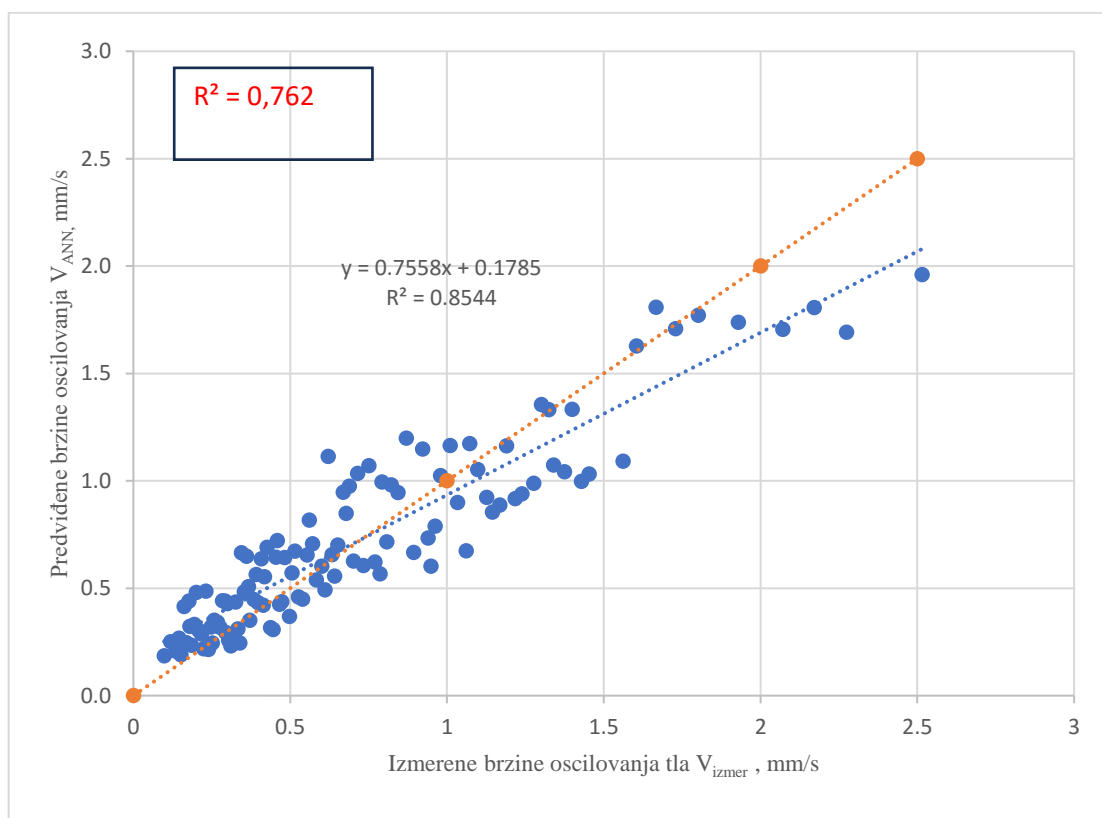


Slika br. 41 Relativni uticaj faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla nakon obuke mreže

## 9.5. VERIFIKACIJA MREŽE

Tokom obuke mreže istovremeno je izvršena i njena validacija, odnosno utvrđene su performanse sistema preko vrednosti srednje kvadratne greške MSE i standardne devijacije  $\delta$ . Međutim validacioni skup podataka je pripadao skupu podataka koji je korišćen za obuku mreže i postavlja se pitanje performansi mreže sa skupom podataka koji su nezavisni od podataka korišćenih tokom obuke i validacije. Za samu proveru performansi obučene mreže sa nezavisnim skupom podataka oformljen je *SUIP115* sa 115 setova podataka miskih serija za verifikaciju kako je opisano u Tački 9.3.

Upotrebljena je obučena mreža, koja je sa podacima iz *SUIP115* dala predviđene brzine oscilovanja tla  $V_{ANN}$ . Dobijene predviđene brzine oscilovanja tla  $V_{ANN}$  i izmerene brzine oscilovanja tla  $V_{izmer}$  su poslužile za formiranje dijagrama  $V_{izmer}, V_{ANN}$  prikazanog na *Slici br. 42*. Dobijeni Koeficijent determinacije regresione linije  $R^2 = 0,8544$  i izgled dijagrama su pokazivali prihvatljive performanse obučene mreže.



Slika br. 42 Dijagram  $V_{izmer}, V_{ANN}$  mreže za verifikaciju

Sledeći korak je bio izračunavanje vrednosti koeficijenta determinacije  $R^2$  u odnosu na pravu  $V_{izmer}=V_{ANN}$  s obzirom na zahtev dat u Tački 9.1.

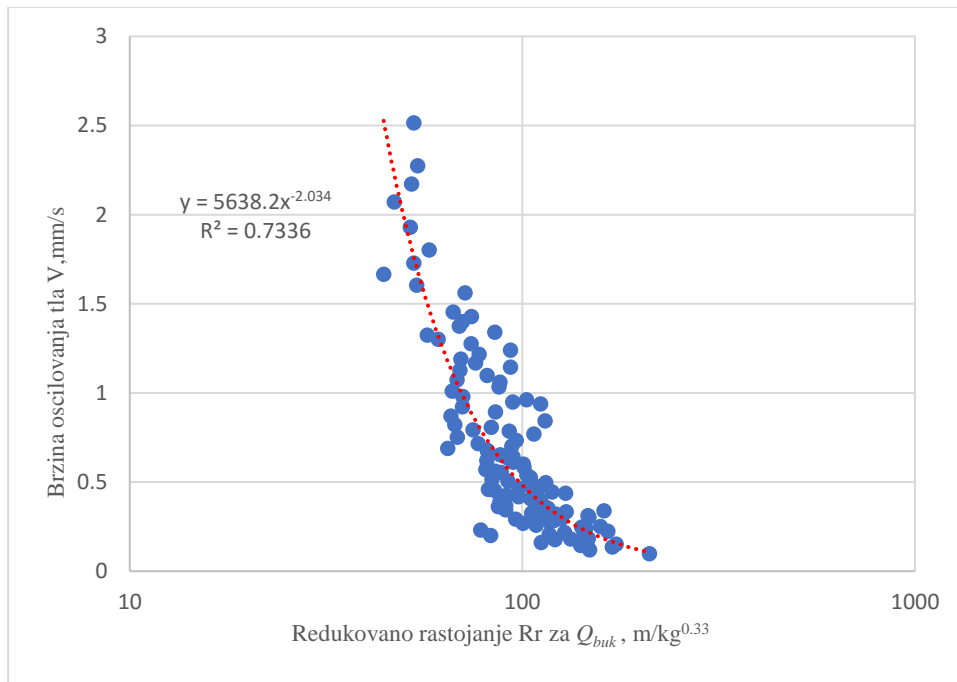
Primenjena je formulu za izračunavanja koeficijenta determinacije regresione krive u opštem obliku, koja je bila transformisana za karakterističan slučaj  $x = y$ , i dobijen je koeficijent determinacije u odnosu na pravu  $V_{izmer} = V_{ANN}$  koji ima vrednost  $R^2 = 0,762$

Izvršeno je upoređenje iz koga se videlo da je dobijeni koeficijent determinacije u odnosu na pravu  $V_{izmer} = V_{ANN}$  iz obučene mreže čija vrednost iznosi  $R^2 = 0,7621$ , veći od zadatog koeficijenta determinacije  $R^2_{zadat} = 0,717$  u odnosu na pravu koja predstavlja jednakost izmerenih i predviđenih brzina, kako je objašnjeno u Tački 9.1. Prethodno izrečeno je mrežu verifikovalo za dalje korake određivanja pojedinačnih uticaja faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla.

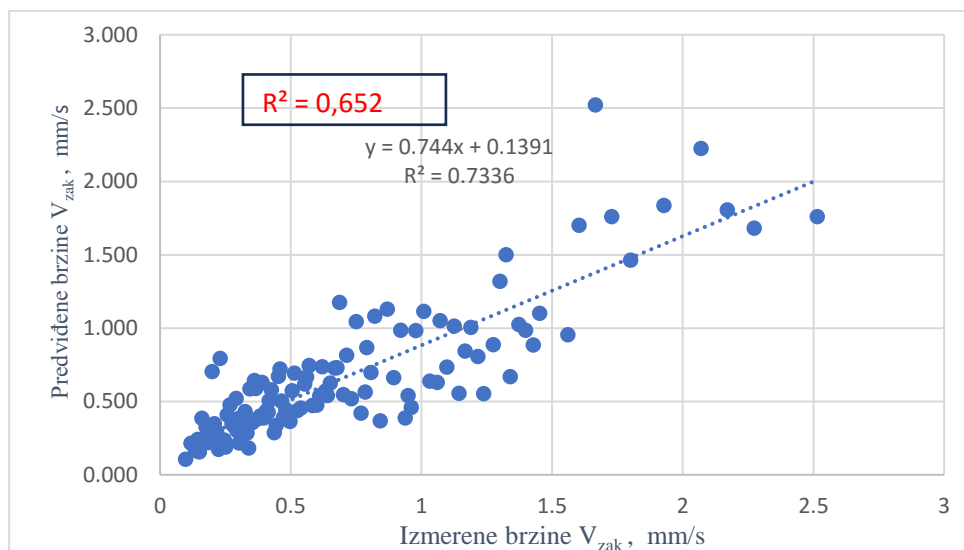
Radi same ocene dobijenih performansi obučene i verifikovane mreže izvršeno je upoređenje koeficijenta determinacije  $R^2$  u odnosu na pravu  $V_{izmer} = V_{ANN}$  dobijen mrežom i koeficijenta determinacije  $R^2$  u odnosu na pravu  $V_{izmer}=V_{zak}$  dobijen upotrebom klasičnog zakona oscilovanja tla.

Oznaka  $V_{zak}$  predstavlja predviđene brzine oscilovanja tla dobijene upotrebom klasičnog zakona oscilovanja tla izazvanih miniranjima. Ovim postupkom je provereno da li je mreža dala zadovoljavajući rezultat na zahtev koji je pred njom postavljen, a koji je definisan u Tački 9.1.

Uz korišćenje *SUIP115* sa 115 setova podataka maskih serija za verifikaciju oformljen je zakon oscilovanja tla za faktor miniranja ( $Q_{buk}$ ) dat na *Slici br. 43*. Dobijene vrednost predviđenih brzina iz zakona oscilovanja su sa izmerenim brzinama poslužile za formiranje dijagrama  $V_{izmer}, V_{zak}$  koji je dat na *Slici br. 44*. Koristeći podatke sa dijagrama izračunata je vrednost koeficijenta determinacije  $R^2$  u odnosu na pravu  $V_{izmer} = V_{zak}$  za faktor miniranja ( $Q_{buk}$ ) čija vrednost iznosi  $R^2 = 0,652$ .

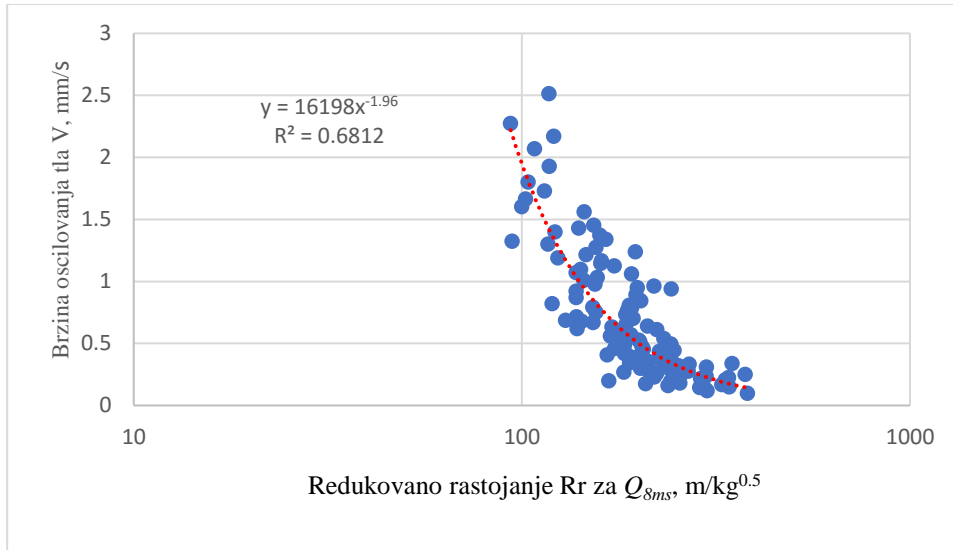


Slika br. 43 Zakon oscilovanja za faktor miniranja  $Q_{buk}$

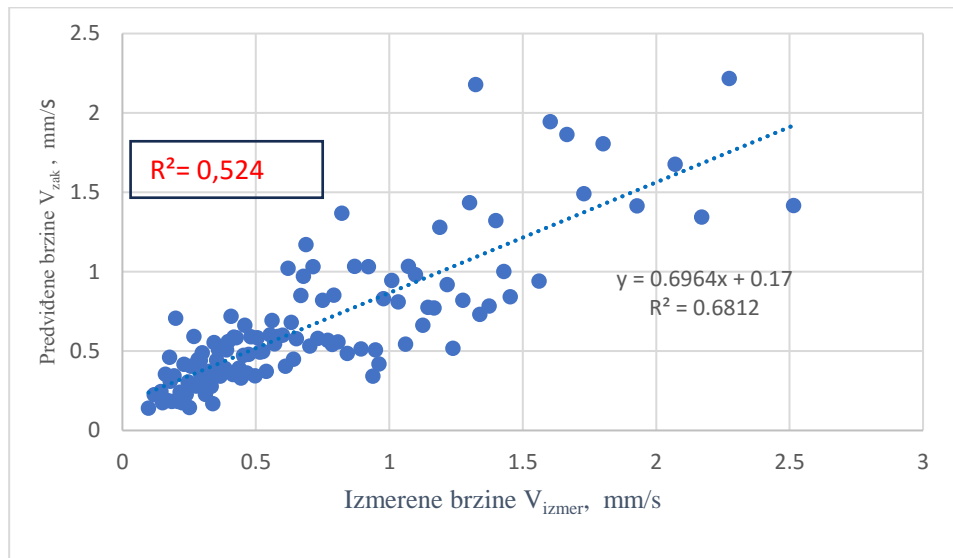


Slika br. 44 Dijagram  $V_{izmer}, V_{zak}$  za  $Q_{buk}$  na osnovu zakona oscilovanja

Identičan postupak je primenjen i za faktor miniranja ( $Q_{8ms}$ ). Zakon oscilovanja za faktor miniranja ( $Q_{8ms}$ ) je dat na Slici br. 45. Dijagram  $V_{izmer}, V_{zak}$  za faktor miniranja ( $Q_{8ms}$ ) prikazan je na Slici br. 46. Uz korišćenje podataka sa dijagrama izračunata je vrednost koeficijenta determinacije  $R^2$  u odnosu na pravu  $V_{izmer}=V_{zak}$  za faktor miniranja ( $Q_{8ms}$ ) i ona iznosi  $R^2= 0,524$ .



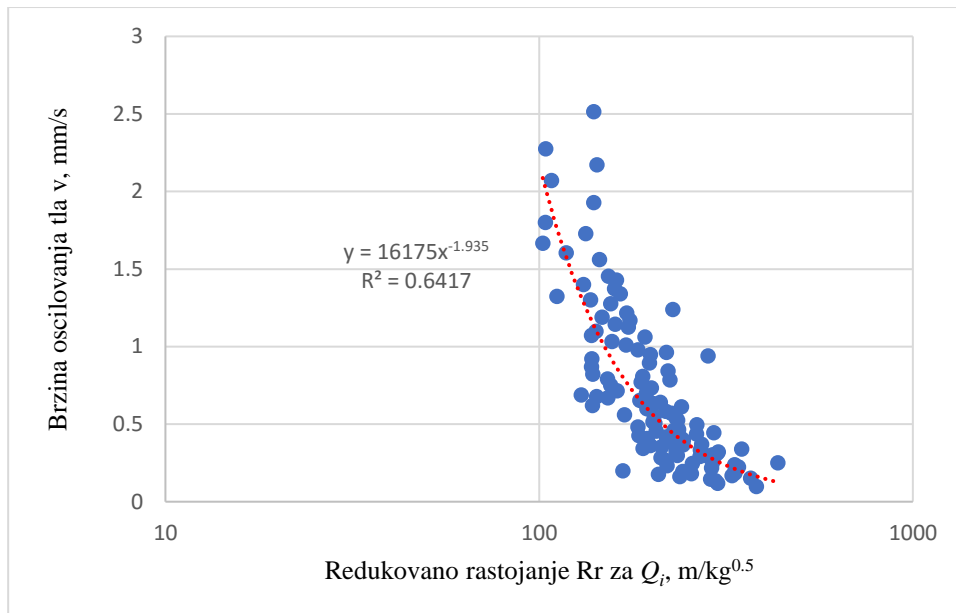
Slika br. 45 Zakona oscilovanja za faktor miniranja  $Q_{8ms}$



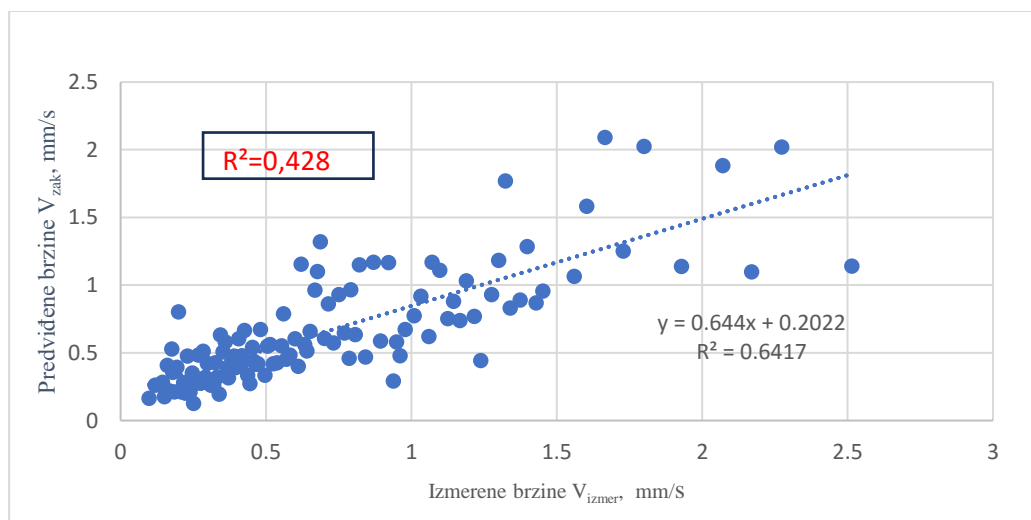
Slika br. 46 Dijagram  $V_{izmer}, V_{zak}$  za  $Q_{8ms}$  na osnovu zakona oscilovanja

Zakon oscilovanja za faktor miniranja ( $Q_i$ ) je dat na Slici br. 47. Dijagram  $V_{izmer}, V_{zak}$  za ovaj faktor miniranja je prikazan je na Slici br. 48. Uz korišćenje podataka sa dijagrama izračunata je vrednost koeficijenta determinacije  $R^2$  u odnosu na pravu  $V_{izmer} = V_{zak}$  za faktor miniranja ( $Q_i$ ) i ona iznosi  $R^2=0,428$





Slika br. 47 Zakona oscilovanja za faktor miniranja  $Q_i$



Slika br. 48 Dijagram  $V_{izmer}, V_{zak}$  za  $Q_i$  na osnovu zakona oscilovanja

Upoređenjem se videlo da je koeficijent determinacije u odnosu na pravu  $V_{izmer} = V_{ANN}$  dobijen upotrebom obučene neuronske mreže iznosio 0,762 i on je bio za 17% veći od najvećeg koeficijenta determinacije koji je imao vrednost 0,652 u odnosu na pravu  $V_{izmer} = V_{zak}$  i koji je dobijen iz zakona oscilovanja za ukupne mase eksploziva u minskoj seriji ( $Q_{buk}$ ). Ova konstatacija je ukazivala na to da su performanse obučene mreže ispunile sve prethodno postavljene zahteve, i pri tome je mreža davala bolje rezultate predviđanja brzine oscilovanja tla od klasičnog zakona oscilovanja.

## **10. VREDNOVANJE UTICAJA FAKTORA SEIZMIČKIH POTRESA NA BRZINU OSCILOVANJA TLA PRIMENOM VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA**

Utvrđivanje uticaja pojedinih faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla izvršeno je na osnovu analize:

- dosadašnjih metodologija prikazanih u radovima [16], [17] i [20];
- postojećih znanja u oblasti uticaja faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla;
- primenjene tehnologije miniranja na površinskom kopu Veliki Krivelj tokom razmatranog perioda.

### **10.1 METODOLOGIJA VREDNOVANJA UTICAJA FAKTORA SEIZMIČKIH POTRESA NA BRZINU OSCILOVANJA TLA**

Na osnovu analiza metodologija određivanja uticaja faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla, koje su prikazane u radovima [16], [17] i [20], zaključeno je da je samo u radu [16] obučena ANN bila direktno upotrebljena za određivanje pomenutih uticaja. U radu [17] primenjena je metoda hijerarhijske analize. U radu [20] metodologija je bila oslonjena na matematičku formulu, koja nije koristila predviđene brzine nastale kao rezultat rada ANN, u kombinaciji sa drugim modelima.

S obzirom na cilj doktorske disertacije, koji podrazumeva upotrebu ANN, metodologija predstavljena u radu [16] je bila dobra osnova na kojoj su bazirani dalji koraci u ovom istraživanju.

Ukratko, ova metodologija je koristila obučenu mrežu uz postupak koji je podrazumevao održavanje svih faktora seizmičkih potresa konstantnim, osim jednog kojem se menjala vrednost. Na taj način je bilo omogućeno praćenje uticaja tog faktora na brzinu oscilovanja tla.

Međutim, kod ove metodologije je postojao problem koji je definisan u Tački 5.1 i odnosio se na odsustvo međusobnih odnosa faktora seizmičkih potresa prilikom promene vrednosti samo jednog od njih. Nametnulo se pitanje kako zadržati međusobne odnose faktora seizmičkih potresa prilikom promene vrednosti samo jednog faktora.

Jedna od mogućnosti prevazilaženja ovog problema je bila podela ulazno-izlaznog skupa podataka na podskupove koji su u sebi sadržali ograničeni broj minskih serija, koje odgovaraju određenom opsegu vrednosti faktora seizmičkih potresa. Iz svakog podskupa je dobijena jedna reprezentativna minska serija, koju karakterišu usrednjene vrednosti svih faktora seizmičkih potresa i usrednjena vrednost brzine oscilovanja tla. Na ovaj način se međusobni odnosi faktora seizmičkih potresa zadržani. To je dalje značilo da su vrednosti faktora čiji je uticaj na brzinu oscilovanja tla proveravan, pratile i odgovarajuće usaglašene vrednosti ostalih faktora seizmičkih potresa. Praktično je ovo postignuto upotrebom ulazno-izlaznog skupa koji nije učestvovao u obuci veštačke neuronske mreže.

*SUIP115*, koji nije učestvovao u obuci mreže, obezbedio je dovoljan obim podataka za formiranje potrebnog broja podskupova minskih serija, u cilju formiranja dijagrama zavisnosti pojedinačnog faktora seizmičkih potresa i brzine oscilovanja tla.

Veličina podskupa je bila u funkciji obezbeđenja dovoljnog broja uređenih parova za formiranje dijagrama zavisnosti pojedinačnog faktora seizmičkih potresa i brzine oscilovanja tla. Iz minskih serija, koje su pripadale određenom podskupu, dobijena je reprezentativna serija koja je prolazom kroz obučenu veštačku neuronsku mrežu dala predviđenu brzinu oscilovanja tla za taj podskup. Dobijena predviđena brzina oscilovanja tla za određeni podskup, zajedno sa usrednjenom vrednošću jednog faktora seizmičkih potresa za taj podskup, činili su jedan uređeni par. Ovaj uređeni par, zajedno sa uređenim parovima iz drugih podskupova, poslužili su za formiranje dijagrama zavisnosti faktora seizmičkih potresa i brzine oscilovanja tla, a zatim i za utvrđivanje uticaja tog faktora na brzinu oscilovanja tla.

Sam postupak tokom dobijanja zavisnosti i uticaja jednog faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla odvijao se kroz sledeće korake.

**Prvi korak** je bio formiranje manjih podskupova setova podataka, za određeni broj minskih serija, iz *SUIP115* faktora seizmičkih potresa čiji se uticaj pratio.

**Drugi korak** je bio određivanje srednjih vrednosti svih faktora seizmičkih potresa i brzine oscilovanja tla za formirane podskupove. Na taj način su dobijeni setovi podataka za reprezentativne minske serije, za obuhvaćene dijapazone vrednosti faktora seizmičkih potresa, čiji se uticaj pratio.

**Treći korak** je bio dobijanje novih predviđenih brzina oscilovanja tla za reprezentativne minske serije, uz upotrebu obučene i verifikovane mreže, za faktor seizmičkih potresa čiji se uticaj pratio.

**Četvrti korak** je bio formiranje dijagrama zavisnosti faktora seizmičkih potresa i predviđene brzine oscilovanja tla. Uređeni par za formiranje pomenute zavisnosti bile su

usrednjena vrednost faktora seizmičkog potresa iz podskupa i odgovarajuća predviđena brzina oscilovanja tla za taj podskup. Za formiranje dijagrama zavisnosti koristili su se svi uređeni parovi, iz formiranih podskupova, pri čemu je broj tačaka na dijagramu odgovarao broju formiranih podskupova. Zavisnost je bila definisana jednačinom regresione linije uz odgovarajući koeficijent determinacije  $R^2$ .

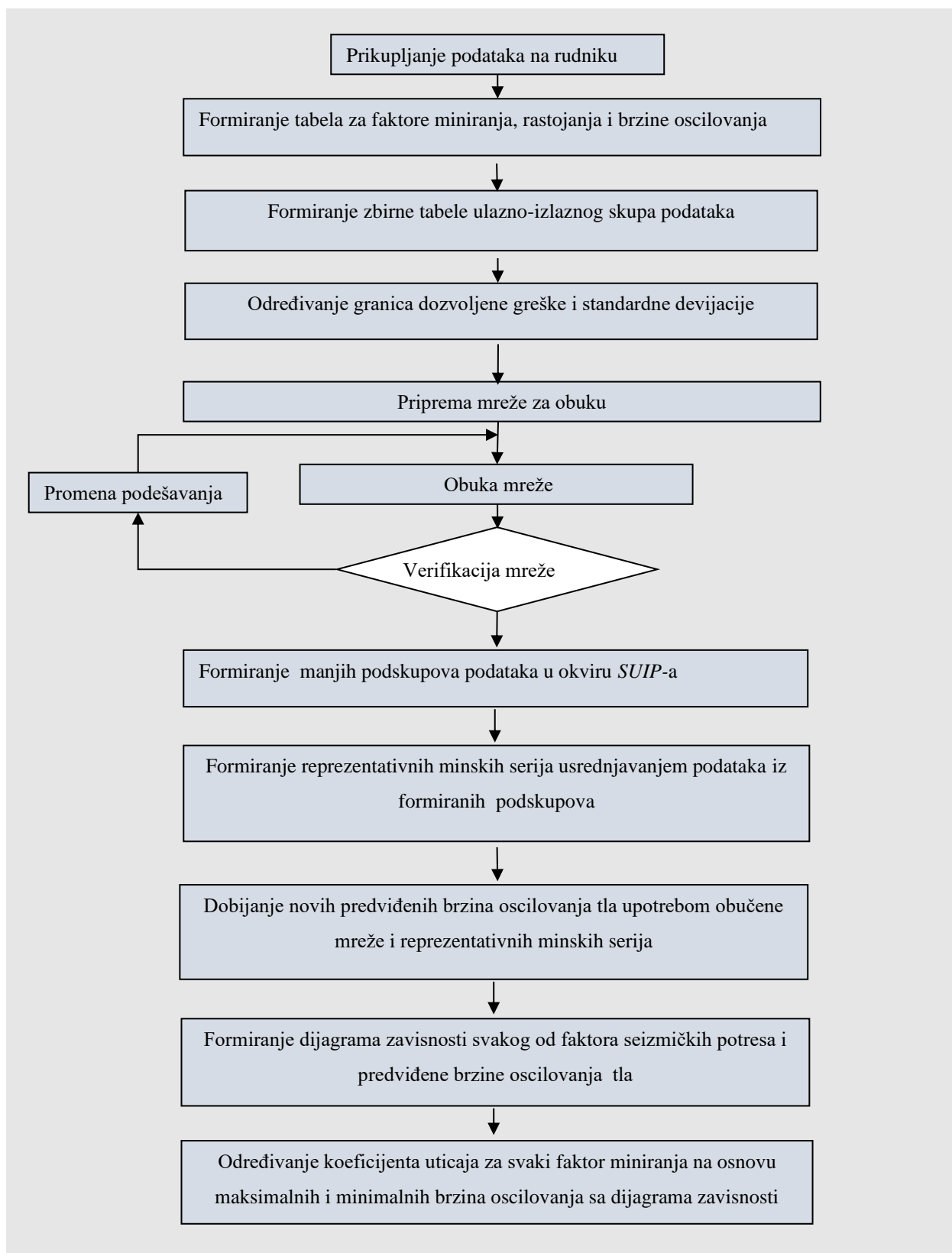
**Peti korak** je bio određivanje koeficijenta uticaja ( $K_x$ ) za faktor seizmičkih potresa na osnovu količnika maksimalne ( $V_{ANN.max}$ ) i minimalne ( $V_{ANN.min}$ ) predviđene brzine sa dijagrama zavisnosti. Koeficijet uticaja je pokazao koliko puta se promenila predviđena brzina oscilovanja tla, usled promene praćenog faktora seizmičkih potresa. Napred opisani predlog određivanja koeficijenta uticaja je predstavljen *Formulom br. 22*. Drugim rečima, *Formula br. 27* predstavlja matematičku formulaciju predloženog načina kako je vrednovan (određena brojčana vrednost) uticaj pojedinačnog faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla.

$$K_x = V_{ANN.max}/V_{ANN.min} \quad (22)$$

Metodologija utvrđivanja uticaja faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja, koja je bila primenjena i koja je opisana u prethodnom tekstu kroz pet koraka, predstvljena je kroz donji deo algoritma koji je dat na *Slici br. 49*.

Za napred opisanu metodologiju koristila se obučena i verifikovana mreža definisana u tački 9.5. i *SUIP115* sa 115 setova podataka za verifikaciju mreže.

U nastavku teksta u Tačkama od 10.2.1 do 10.2.8 utvrđene su korelativne zavisnosti i koeficijenti uticaja  $K_x$  pojedinačnih faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla primenom veštačkih neuronskih mreža.



Slika br. 49 Algoritam primenjene metodologije utvrđivanja uticaja faktora seizmičkih potresa na maksimalnu brzinu oscilovanja tla

## 10.2 POJEDINAČNI UTICAJ FAKTORA SEIZMIČKIH POTRESA NA BRZINU OSCILOVANJA TLA PRIMENOM VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA

Prateći metodologiju predstavljenu kroz Tačku 10.1. dobijene su sledeće zavisnosti uticajnih faktora seizmičkih potresa i maksimalne brzine oscilovanja tla na površinskom kopu Veliki Krivelj.

### 10.2.1 UTICAJ MAKSIMALNIH MASA EKSPLOZIVA INICIRANIH U JEDNOM NOMINALNOM VREMENU INICIRANJA NA BRZINU OSCILOVANJA TLA

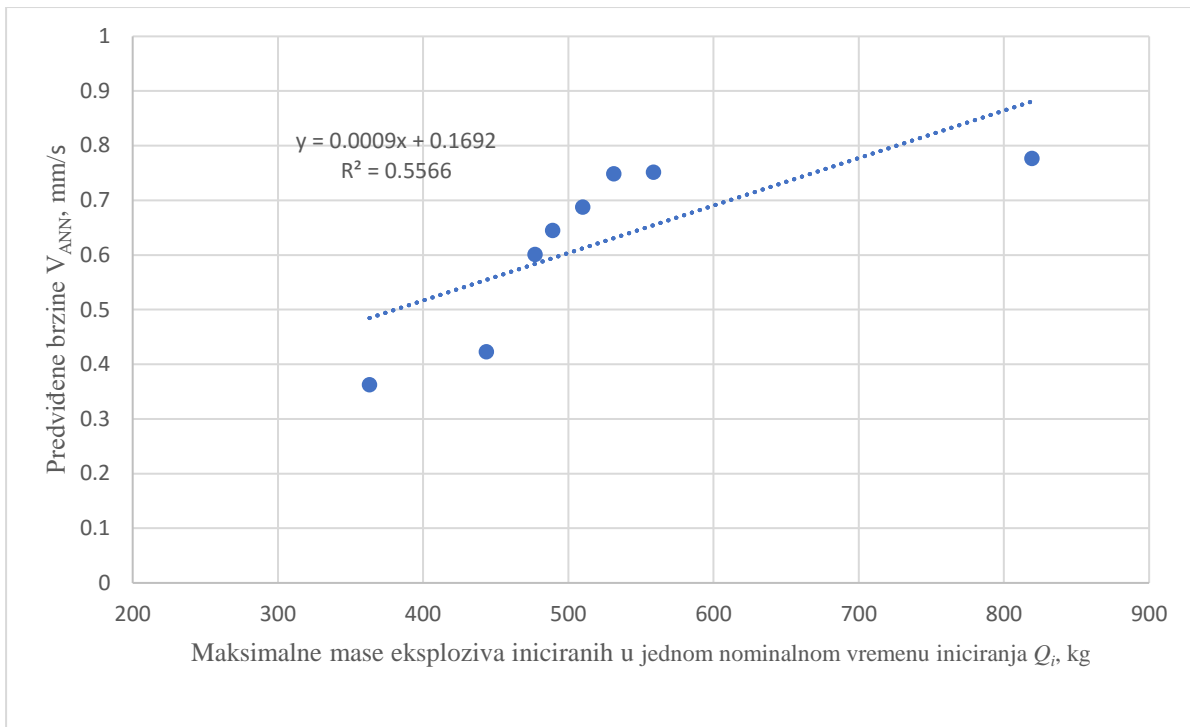
Radi utvrđivanja uticaja maksimalnih masa eksploziva iniciranih u jednom nominalnom vremenu iniciranja na maksimalnu brzinu oscilovanja tla, formirano je 8 manjih podskupova minskih serija iz *SUIP115* za verifikaciju mreže sa 115 setova podataka.

Po napred opisanom postupku datom u Tački 10.1, dobijene su vrednosti predviđenih brzina oscilovanja tla u zavisnosti od maksimalnih masa eksploziva iniciranih u jednom nominalnom vremenu iniciranja datih u *Tabeli br. 16*.

*Tabela br. 16 Vrednosti predviđenih brzina u zavisnosti od maksimalnih masa eksploziva iniciranih u jednom nominalnom vremenu iniciranja*

<b><math>Q_i</math>, kg</b>	<b>363</b>	<b>443,6</b>	<b>477,1</b>	<b>489,3</b>	<b>510</b>	<b>531,4</b>	<b>558,8</b>	<b>819,4</b>
<b><math>V_{ANN}</math>, mm/s</b>	<b>0,362</b>	<b>0,423</b>	<b>0,601</b>	<b>0,645</b>	<b>0,687</b>	<b>0,748</b>	<b>0,752</b>	<b>0,777</b>

Na osnovu vrednosti iz *Tabele br. 16* formiran je dijagram zavisnosti maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom nominalnom vremenu iniciranja i maksimalnih brzina oscilovanja, dat na *Slici br. 50*.



*Slika br. 50 Uticaj maksimalnih masa eksploziva iniciranih u jednom nominalnom vremenu iniciranja na brzinu oscilovanja tla za uslove na površinskom kopu Veliki Krivelj.*

Regresiona analiza između predviđene brzine oscilovanja i maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom nominalnom vremenu iniciranja izvršena je korišćenjem linearne funkcije, pri čemu je utvrđena korelativna zavisnost data *Formulom br. 23*, sa koeficijetom determinacije  $R^2 = 0,5566$ .

$$V_{ANN} = 0,0009 Q_i + 0,1692 \quad (\text{mm/s}) \quad (23)$$

Analiza uticaja zavisnosti maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom nominalnom vremenu iniciranja na brzinu oscilovanja tla izvršena je na osnovu grafičke interpretacije rezultata istraživanja, date na *Slici br. 50*, na osnovu koje se može zaključiti sledeće.

Sa povećanjem maksimalne mase eksploziva, inicirane u jednom nominalnom vremenu iniciranja počev od  $Q_i = 363$  kg do  $Q_i = 443,6$  kg, dolazi do blagog rasta predviđene brzine oscilovanja tla. Za ovaj opseg vrednosti ( $Q_i$ ) uočava se relativno mali uticaj na brzinu oscilovanja tla.

Veći uticaj ovog faktora se uočava kada se vrednosti maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom nominalnom vremenu iniciranja kreću od  $Q_i = 443,6$  kg do  $Q_i = 559$  kg, kada dolazi do značajnijeg porasta predviđene brzine oscilovanja tla od vrednosti  $V_{ANN} = 0,423$

mm/s do  $V_{ANN} = 0,752$  mm/s. Za veće vrednost ( $Q_i$ ) od 559 kg brzina oscilovanja nastavlja da raste do maksimalne vrednosti  $V_{ANN} = 0,777$  mm/s za  $Q_i = 819,4$  kg.

Minimalna predviđena brzina oscilovanja iznosi  $V_{ANN} = 0,362$  mm/s, a maksimalna  $V_{ANN} = 0,777$  mm/s, na osnovu čega se može zaključiti da se prognozna brzina oscilovanja tla, usled promene maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom nominalnom vremenu iniciranja, promenila  $0,777 / 0,362 = 2,146$  puta.

**Broj 2,146** je usvojen kao mera uticaja maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom nominalnom vremenu iniciranja na brzinu oscilovanja tla, odnosno koeficijent uticaja maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom nominalnom vremenu iniciranja  $K_{Q_i} = 2,146$ .

### 10.2.2 UTICAJ MAKSIMALNIH MASA EKSPLOZIVA INICIRANIH U JEDNOM VREMENSKOM INTERVALU OD 8MS NA BRZINU OSCILOVANJA TLA

Radi utvrđivanja uticaja maksimalnih masa eksploziva iniciranih u jednom vremenskom intervalu od 8ms na maksimalnu brzinu oscilovanja tla formirano je 8 manjih podskupova minskih serija iz *SUIP115* za verifikaciju mreže sa 115 setova podataka.

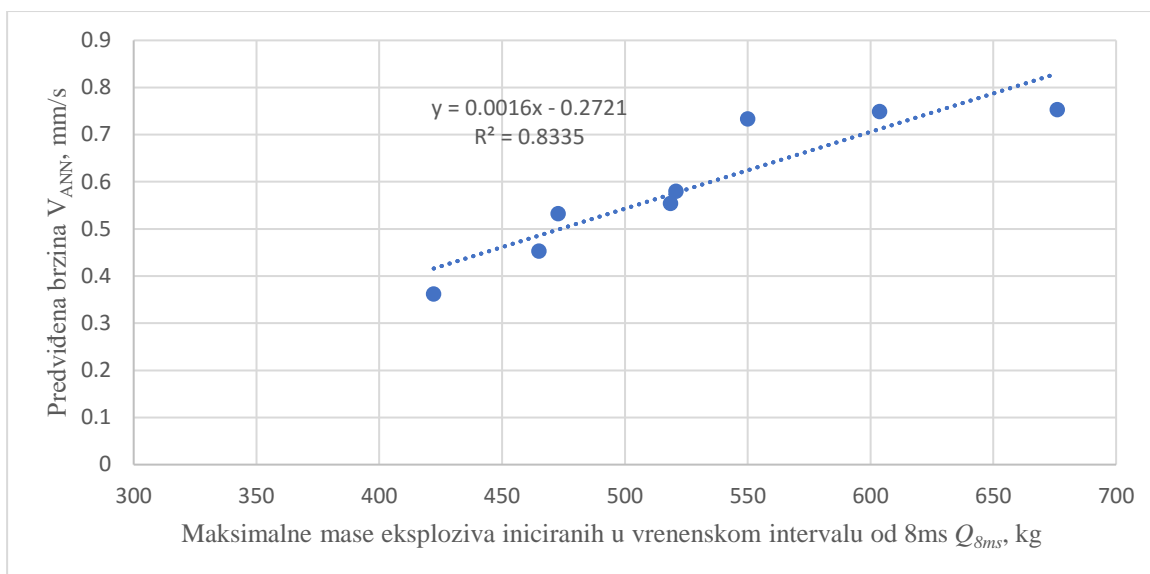
Po napred opisanom postupku datom u Tački 10.1. dobijene su vrednosti predviđenih brzina oscilovanja tla u zavisnosti od maksimalnih masa eksploziva iniciranih u jednom vremenskom intervalu od 8ms datih u *Tabeli br. 17*.

*Tabela br. 17 Vrednosti predviđenih brzina u zavisnosti od maksimalnih masa eksploziva iniciranih u jednom vremenskom intervalu od 8ms*

$Q_{8ms}, \text{kg}$	422,1	465	472,9	518,6	520,7	550	603,8	676
$V_{ANN}, \text{mm/s}$	0,362	0,453	0,533	0,554	0,580	0,733	0,749	0,753

Na osnovu vrednosti iz *Tabele br. 17* formiran je dijagram zavisnosti maksimalnih masa eksploziva iniciranih u jednom vremenskom intervalu od 8ms i maksimalnih brzina oscilovanja, dat na *Slici br. 51*.





Slika br. 51 Uticaj maksimalnih masa eksploziva iniciranih u jednom vremenskom intervalu od 8ms na brzinu oscilovanja tla za uslove na površinskom kopu Veliki Krivelj

Regresiona analiza između predviđene brzine oscilovanja i maksimalnih masa eksploziva iniciranih u jednom vremenskom intervalu od 8ms izvršena je korišćenjem linearne funkcije, pri čemu je utvrđena korelativna zavisnost data *Formulom br. 24*, sa koeficijetom determinacije  $R^2 = 0,8335$ .

$$V_{ANN} = 0,0016 Q_{8ms} - 0,2721 \quad (\text{mm/s}) \quad (24)$$

Analiza uticaja zavisnosti maksimalnih masa eksploziva iniciranih u jednom vremenskom intervalu od 8ms na brzinu oscilovanja tla izvršena je na osnovu grafičke interpretacije rezultata istraživanja, na *Slici br. 51*, sa koje se može zaključiti sledeće.

Sa povećanjem maksimalnih masa eksploziva iniciranih u jednom vremenskom intervalu od 8ms počev od  $Q_{8ms} = 422,1$  kg do  $Q_{8ms} = 520,7$  kg dolazi do blagog povećanja predviđene brzine oscilovanja tla od vrednosti  $V_{ANN} = 0,362$  mm/s na  $V_{ANN} = 0,580$  mm/s.

Sa povećanjem maksimalnih masa eksploziva iniciranih u jednom vremenskom intervalu od 8ms preko  $Q_{8ms} = 520,7$  kg, dolazi do značajnijeg povećanja brzine oscilovanja tla, na  $V_{ANN} = 0,733$  mm/s, za vrednost  $Q_{8ms} = 550$  kg, uz znatno veći uticaj ovog faktora seizmičkih potresa. Za veće vrednosti ( $Q_{8ms}$ ) od 550 kg brzina oscilovanja tla nastavlja blagi rast do maksimalne  $V_{ANN} = 0,753$  mm/s kada je vrednost  $Q_{8ms} = 676$  kg.

Minimalna predviđena brzina oscilovanja iznosi  $V_{ANN} = 0,362$  mm/s, a maksimalna  $V_{ANN} = 0,753$  mm/s, na osnovu čega se može zaključiti da se prognozna brzina oscilovanja tla, usled promene maksimalnih masa eksploziva iniciranih u jednom vremenskom intervalu od 8ms promenila  $0,753 / 0,362 = 2,080$  puta.

**Broj 2,080** je usvojen kao *mera uticaja maksimalnih masa eksploziva iniciranih u jednom vremenskom intervalu od 8ms na brzinu oscilovanja tla*, odnosno koeficijent uticaja *maksimalnih masa eksploziva iniciranih u jednom vremenskom intervalu od 8ms*  $K_{Q8ms} = 2,080$ .

### 10.2.3 UTICAJ SREDNJE MASE EKSPLOZIVA PO BUŠOTINI NA BRZINU OSCILOVANJA TLA

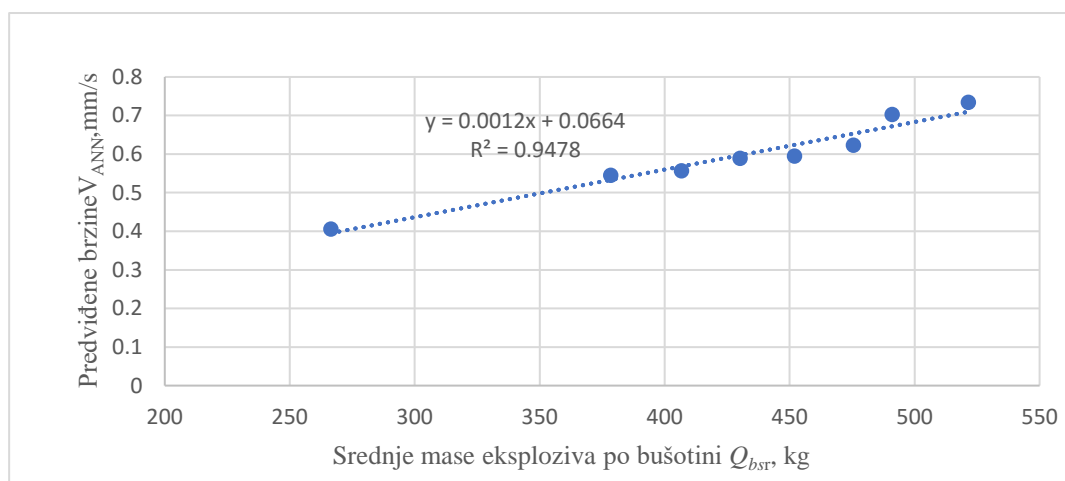
Radi utvrđivanja uticaja srednje mase eksploziva po bušotini na maksimalnu brzinu oscilovanja tla, formirano je 8 manjih podskupova miskih serija iz *SUIP115* za verifikaciju mreže sa 115 setova podataka.

Po napred opisanom postupku datom u Tački 10.1, dobijene su vrednosti predviđenih brzina oscilovanja tla u zavisnosti od srednje mase eksploziva po bušotini, datih u *Tabeli br.18*.

*Tabela br. 18 Vrednosti predviđenih brzina u zavisnosti od srednje mase eksploziva po bušotini*

$Q_{bsr}$ , kg	266,5	378,5	406,8	430,3	452	475,6	491,1	521,6
$V_{ANN}$ , mm/s	0,406	0,545	0,557	0,589	0,595	0,623	0,703	0,735

Na osnovu vrednosti iz *Tabele br. 18* formiran je dijagram zavisnosti srednjih masa eksploziva po bušotini i maksimalnih brzina oscilovanja, dat na *Slici br. 52*.



*Slika br. 52 Uticaj srednje mase eksploziva po bušotini na brzinu oscilovanja tla za uslove na površinskom kopu Veliki Krivelj*

Regresiona analiza između predviđene brzine oscilovanja i srednje mase eksploziva po bušotini izvršena je korišćenjem linearne funkcije, pri čemu je utvrđena korelativna zavisnost data *Formulom br. 25*, sa koeficijetom determinacije  $R^2 = 0,9478$ .

$$V_{ANN} = 0,0012 Q_{bsr} + 0,0664 \quad (\text{mm/s}) \quad (25)$$

Analiza uticaja zavisnosti srednje mase eksploziva po bušotini na brzinu oscilovanja tla izvršena je na osnovu grafičke interpretacije rezultata istraživanja, date na *Slici br. 52*, sa koje se može zaključiti sledeće.

Sa povećanjem srednje mase eksploziva po bušotini počev od  $Q_{bsr} = 266,5$  kg do  $Q_{bsr} = 521,6$  kg postoji konstantno blago povećanje brzine oscilovanja tla. Na dijagramu se ne uočavaju veći skokovi brzine, što ukazuje na minimalni uticaj ovog faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla.

Minimalna predviđena brzina oscilovanja iznosi  $V_{ANN} = 0,406$  mm/s, a maksimalna  $V_{ANN} = 0,735$  mm/s, na osnovu čega se može zaključiti da se prognozna brzina oscilovanja tla, usled promene srednje masa eksploziva po bušotini, promenila  $0,735 / 0,406 = 1,810$  puta.

**Broj 1,810** je usvojen kao *mera uticaja srednje mase eksploziva po bušotini na brzinu oscilovanja tla*, odnosno koeficijent uticaja srednje mase eksploziva po bušotini  $K_{Q_{bsr}} = 1,810$ .

#### 10.2.4 UTICAJ UKUPNIH MASA EKSPLOZIVA U MINSKOJ SERIJI NA BRZINU OSCILOVANJA TLA

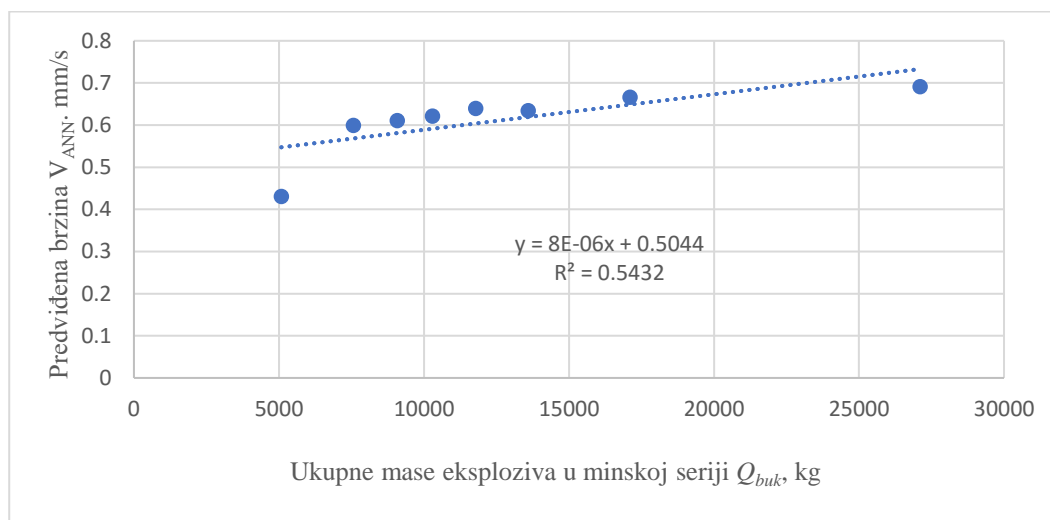
Radi utvrđivanja uticaja ukupnih masa eksploziva u minskoj seriji na maksimalnu brzinu oscilovanja tla, formirano je 8 manjih podskupova minskih serija iz *SUIP115* za verifikaciju mreže sa 115 setova podataka.

Po napred opisanom postupku datom u Tački 10.1, dobijene su vrednosti predviđenih brzina oscilovanja tla u zavisnosti od ukupnih masa eksploziva u minskoj seriji datih u *Tabeli br. 19*.

*Tabela br. 19 Vrednosti predviđenih brzina u zavisnosti od ukupnih masa eksploziva u minskoj seriji*

$Q_{buk}$ , kg	5080,7	7562,9	9079,3	10294,2	11785,7	13596,4	17104,4	27100
$V_{ANN}$ , mm/s	0,431	0,599	0,610	0,622	0,640	0,634	0,666	0,691

Na osnovu vrednosti iz *Tabele br. 19* formiran je dijagram zavisnosti ukupnih masa eksploziva u minskim serijama i maksimalnih brzina oscilovanja, dat na *Slici br. 53*.



*Slika br. 53* Uticaj ukupnih masa eksploziva u minskoj seriji na brzinu oscilovanja tla za uslove na površinskom kopu Veliki Krivelj

Regresiona analiza između predviđene brzine oscilovanja i ukupnih masa eksploziva izvršena je korišćenjem linearne funkcije, pri čemu je utvrđena korelativna zavisnost data *Formulom br. 26*, sa koeficijetom determinacije  $R^2 = 0,5432$ .

$$V_{ANN} = 8 \cdot 10^{-6} Q_{buk} + 0,5044 \quad (\text{mm/s}) \quad (26)$$

Analiza uticaja ukupne mase eksploziva na brzinu oscilovanja tla izvršena je na osnovu grafičke interpretacije rezultata istraživanja, na *Slici br. 53*, sa koje se može zaključiti sledeće.

Sa povećanjem ukupne mase eksploziva počev od  $Q_{buk} = 5080,7$  kg do  $Q_{buk} = 7562,9$  kg dolazi do povećanja predviđene brzine oscilovanja tla od vrednosti  $V_{ANN} = 0,431$  mm/s na  $V_{ANN} = 0,599$  mm/s, uz postojanje uticaja ovog faktora.

Sa povećanjem ukupne mase eksploziva preko  $Q_{buk} = 7562,9$  kg ne uočava se bitan uticaj ( $Q_{buk}$ ) na brzinu oscilovanja tla.

Minimalna predviđena brzina oscilovanja iznosi  $V_{ANN} = 0,431$  mm/s, a maksimalna  $V_{ANN} = 0,691$  mm/s, na osnovu čega se može zaključiti da se prognozirana brzina oscilovanja tla usled promene ukupne mase eksploziva, promenila  $0,691 / 0,431 = 1,603$  puta.

**Broj 1,603** je usvojen kao mera uticaja ukupnih masa eksploziva na brzinu oscilovanja tla, odnosno koeficijent uticaja ukupnih masa eksploziva  $K_{Q_{buk}} = 1,603$ .

## 10.2.5 UTICAJ BROJA BUŠOTINA U MINSKOJ SERIJI NA BRZINU OSCILOVANJA TLA

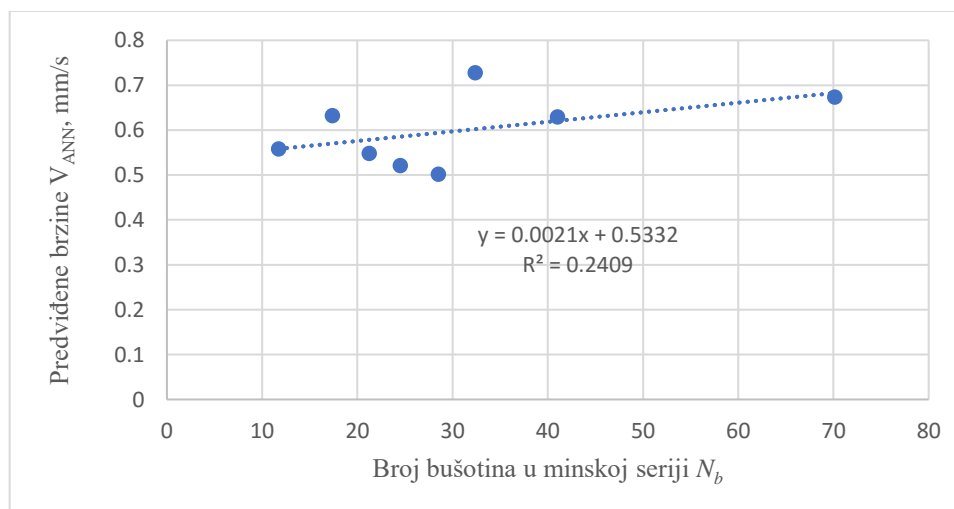
Radi utvrđivanja uticaja broja bušotina u minskoj seriji na maksimalnu brzinu oscilovanja tla, formirano je 8 manjih podskupova minskih serija iz *SUIP115* za verifikaciju mreže sa 115 setova podataka.

Po napred opisanom postupku datom u Tački 10.1, dobijene su vrednosti predviđenih brzina oscilovanja tla u zavisnosti od broja bušotina u minskoj seriji  $N_b$  datih u *Tabeli br. 20*.

*Tabela br. 20 Vrednosti predviđenih brzina u zavisnosti od broja bušotina u minskoj seriji*

$N_b$	12	17	21	25	29	32	41	70
$V_{ANN}$ , mm/s	0,558	0,632	0,548	0,521	0,501	0,728	0,629	0,673

Na osnovu vrednosti iz *Tabele br. 20* formiran je dijagram zavisnosti broja minskih bušotina i maksimalnih brzina oscilovanja, dat na *Slici br.54*.



*Slika br. 54 Uticaj broja bušotina u minskoj seriji na brzinu oscilovanja tla za uslove na površinskom kopu Veliki Krivelj*

Regresiona analiza između predviđene brzine oscilovanja i broja bušotina u minskoj seriji izvršena je korišćenjem linearne funkcije, pri čemu je utvrđena korelativna zavisnost data *Formulom br. 27*, sa koeficijetom determinacije  $R^2 = 0,2409$ .

$$V_{ANN} = 0,0021 N_b + 0,5332 \quad (\text{mm/s}) \quad (27)$$

Analiza uticaja broja bušotina u minskoj seriji na brzinu oscilovanja tla izvršena je na osnovu grafičke interpretacije rezultata istraživanja, date na *Slici br. 54*, na osnovu koje se može zaključiti sledeće.

Sa povećanjem broja bušotina u minskoj seriji od  $N_b = 12$  do  $N_b = 17$  dolazi do povećanja predviđene brzine oscilovanja tla od vrednosti  $V_{ANN} = 0,558$  mm/s na  $V_{ANN} = 0,632$  mm/s. Sa porastom broja bušotina u minskoj seriji uočava se pad brzine oscilovanja, a granica kada ponovo počinje rast brzine je 29 bušotina. Sa povećanjem broja bušotina raste i brzina.

Maksimalne brzine oscilovanja tla se mogu očekivati pri miniranju 32 bušotine u minskoj seriji.

Za veći broj bušotina u minskoj seriji od 32 bušotine brzina oscilovanja tla se vidno smanjuje a zatim blago raste, ali ne dostiže maksimalnu vrednost.

Minimalna predviđena brzina oscilovanja iznosi  $V_{ANN} = 0,501$  mm/s, a maksimalna  $V_{ANN} = 0,728$  mm/s, na osnovu čega se može zaključiti da se prognozna brzina oscilovanja tla, usled promene broja bušotina u minskoj seriji, promenila  $0,728 / 0,501 = 1,453$  puta.

**Broj 1,453** je usvojen kao *mera uticaja broja bušotina u minskoj seriji na brzinu oscilovanja tla*, odnosno *koeficijent uticaja broja bušotina u minskoj seriji*  $K_{Nb} = 1,453$ .

## 10.2.6 UTICAJ UKUPNIH DUŽINA BUŠOTINA U MINSKOJ SERIJI NA BRZINU OSCILOVANJA TLA

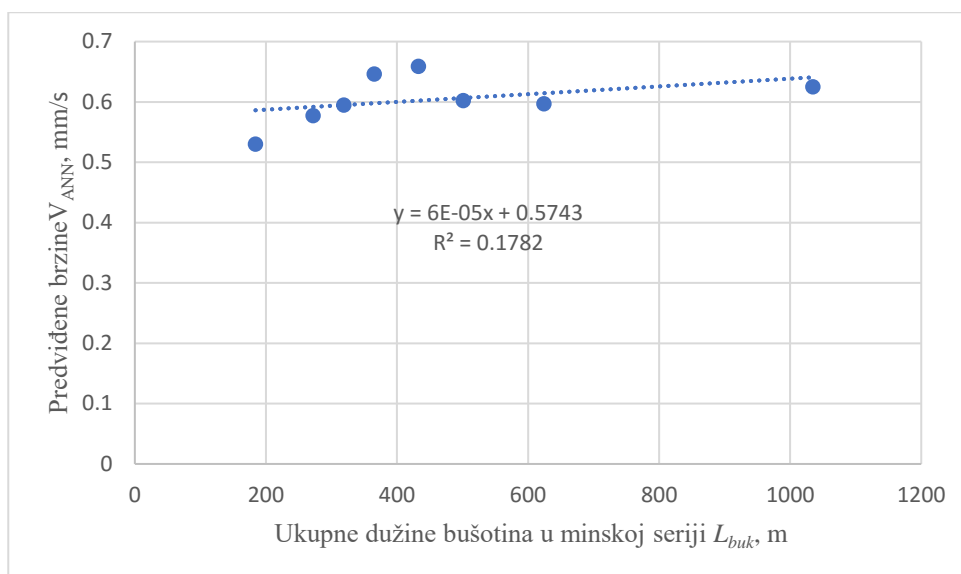
Radi utvrđivanja uticaja ukupnih dužina bušotina u minskoj seriji na maksimalnu brzinu oscilovanja tla, formirano je 8 manjih podskupova miskih serija iz *SUIP115* za verifikaciju mreže sa 115 setova podataka.

Po napred opisanom postupku datom u Tački 10.1, dobijene su vrednosti predviđenih brzina oscilovanja tla u zavisnosti od ukupnih dužina bušotina u minskoj seriji datih u *Tabeli br. 21*.

*Tabela br. 21 Vrednosti predviđenih brzina u zavisnosti od ukupnih dužina bušotina u minskoj seriji*

$L_{buk}, m$	184	272	319	365	433	501	624	1035
$V_{ANN}, mm/s$	0,530	0,578	0,595	0,646	0,659	0,603	0,597	0,625

Na osnovu vrednosti iz *Tabele br. 21* formiran je dijagram zavisnosti ukupnih dužina bušotina i maksimalnih brzina oscilovanja, dat na *Slici br. 55*.



Slika br. 55 Uticaj ukupnih dužina bušotina u minskoj seriji na brzinu oscilovanja tla za uslove na površinskom kopu Veliki Krivelj

Regresiona analiza između predviđene brzine oscilovanja i ukupnih dužina bušotina izvršena je korišćenjem linearne funkcije, pri čemu je utvrđena korelativna zavisnost data Formulom br. 28, sa koeficijetom determinacije  $R^2 = 0,1782$

$$V_{ANN} = 6 \cdot 10^{-5} L_{buk} + 0,5743 \quad (\text{mm/s}) \quad (28)$$

Analiza uticaja zavisnosti ukupnih dužina bušotina na brzinu oscilovanja tla izvršena je na osnovu grafičke interpretacije rezultata istraživanja, date na Slici br. 55, na osnovu koje se može zaključiti sledeće.

Sa povećanjem ukupnih dužina bušotina počev od  $L_{buk} = 184$  m do  $L_{buk} = 433$  m dolazi do povećanja vrednosti predviđene brzine oscilovanja tla, sa  $V_{ANN} = 0,530$  mm/s na  $V_{ANN} = 0,659$  mm/s, što je i maksimalna brzina. Posle smanjenja vrednosti brzine oscilovanja tla koje je vidljivo za dijapazon vrednosti ( $L_{buk}$ ) od 433 do 624 m, počinje blagi trend rasta. Na dijagramu kod ovog faktora seizmičkih potresa uočava se mali uticaj na brzinu oscilovanja tla.

Minimalna predviđena brzina oscilovanja iznosi  $V_{ANN} = 0,530$  mm/s, a maksimalna  $V_{ANN} = 0,659$  mm/s, na osnovu čega se može zaključiti da se prognozna brzina oscilovanja tla, usled promene ukupnih dužina bušotina, promenila  $0,659 / 0,530 = 1,243$  puta.

**Broj 1,243** je usvojen kao mera uticaja ukupnih dužina bušotina na brzinu oscilovanja tla, odnosno koeficijent uticaja ukupnih dužina bušotina  $K_{L_{buk}} = 1,243$ .

### 10.2.7 UTICAJ KOEFICIJENTA PUNJENJA MINSKIH BUŠOTINA NA BRZINU OSCILOVANJA TLA

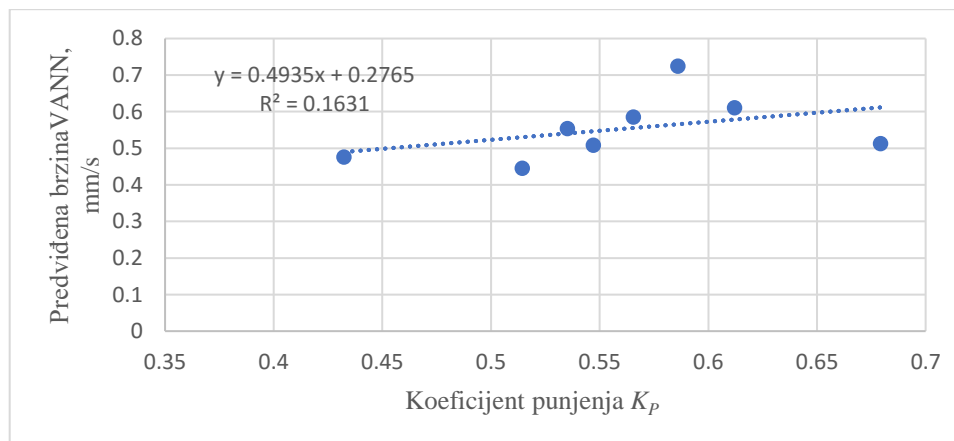
Radi utvrđivanja uticaja koeficijenta punjenja minskih bušotina na maksimalnu brzinu oscilovanja tla, formirano je 8 manjih podskupova minskih serija iz *SUIP115* za verifikaciju mreže sa 115 setova podataka.

Po napred opisanom postupku datom u Tački 10.1, dobijene su vrednosti predviđenih brzina oscilovanja tla u zavisnosti od koeficijenta punjenja minskih bušotina  $K_p$  datih u *Tabeli br. 22*.

*Tabela br. 22 Vrednosti predviđenih brzina u zavisnosti od koeficijenta punjenja minskih bušotina*

$K_p$	0,43	0,51	0,54	0,55	0,57	0,59	0,61	0,68
$V_{ANN}$ , mm/s	0,476	0,445	0,554	0,508	0,586	0,724	0,611	0,513

Na osnovu vrednosti iz *Tabele br. 22* formiran je dijagram zavisnosti koeficijenta punjenja minskih bušotina i maksimalnih brzina oscilovanja, dat na *Slici br. 56*.



*Slika br. 56 Uticaj koeficijenta punjenja minskih bušotina na brzinu oscilovanja tla za uslove na površinskom kopu Veliki Krivelj.*

Regresiona analiza između predviđene brzine oscilovanja i koeficijenta punjenja minskih bušotina izvršena je korišćenjem linearne funkcije, pri čemu je utvrđena korelativna zavisnost data *Formulom br. 29*, sa koeficijetom determinacije  $R^2 = 0,1631$ .

$$V_{ANN} = 0,4935 K_p + 0,2765 \quad (\text{mm/s}) \quad (29)$$



Analiza uticaja zavisnosti koeficijenta punjenja minskih bušotina na brzinu oscilovanja tla izvršena je na osnovu grafičke interpretacije rezultata istraživanja, date na *Slici br. 56*, na osnovu koje se može zaključiti sledeće.

Sa povećanjem koeficijenta punjenja minskih bušotina počev od  $K_p = 0,43$  do  $K_p = 0,51$  dolazi do blagog smanjenja predviđene brzine oscilovanja tla od vrednosti  $V_{ANN} = 0,476$  mm/s na  $V_{ANN} = 0,445$  mm/s. Sledi opseg vrednosti koeficijenta punjenja minskih bušotina od  $K_p = 0,51$  do  $K_p = 0,59$  u kome je značajan uticaj na brzinu oscilovanja tla, a koji se ogleda kroz veliki porast brzine. Na samom kraju ovog opsega, kada je vrednost  $K_p = 0,59$ , mogu se očekivati najveće brzine oscilovanja tla čija je vrednost  $V_{ANN} = 0,724$  mm/s. Zatim sledi smanjenje brzine oscilovanja, koje se približavaju minimalnoj vrednosti za vrednost  $K_p = 0,68$ . Sa dijagrama se takođe vidi da koeficijent punjenja minskih bušotina ima osrednji uticaj na predviđene brzine oscilovanja tla.

Minimalna predviđena brzina oscilovanja iznosi  $V_{ANN} = 0,445$  mm/s, a maksimalna  $V_{ANN} = 0,724$  mm/s, na osnovu čega se može zaključiti da se prognozna brzina oscilovanja tla, usled promene koeficijenta punjenja promenila  $0,724 / 0,445 = 1,627$  puta.

**Broj 1,627** je usvojen kao *mera uticaja koeficijenta punjenja na brzinu oscilovanja tla*, odnosno koeficijent uticaja koeficijenta punjenja  $K_{Kp} = 1,627$ .

### 10.2.8 UTICAJ RASTOJANJA MINSKIH SERIJA DO MERNIH MESTA NA BRZINU OSCILOVANJA TLA

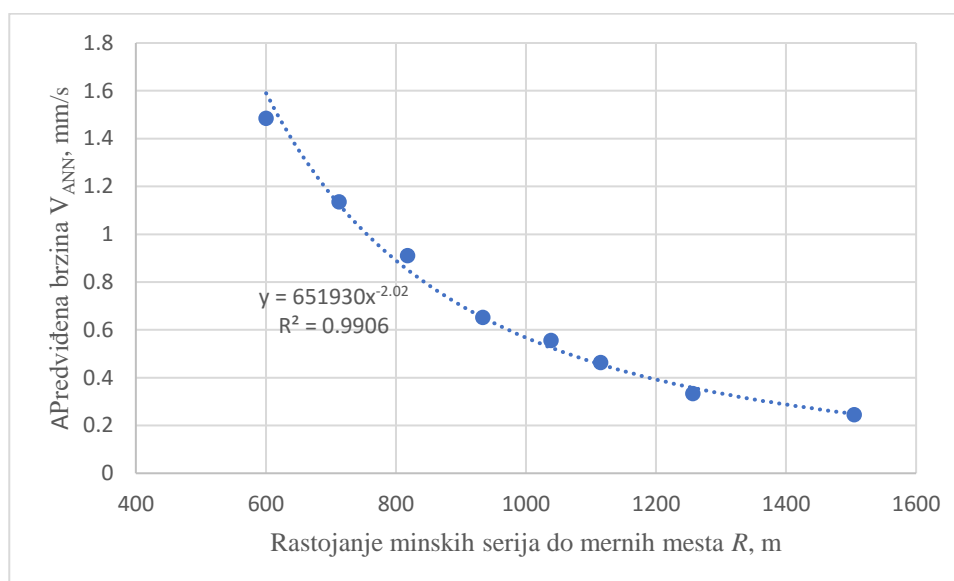
Radi utvrđivanja uticaja rastojanja minskih serija do mernih mesta na maksimalnu brzinu oscilovanja tla, formirano je 8 manjih podskupova minskih serija iz *SUIP115* za verifikaciju mreže sa 115 setova podataka.

Po napred opisanom postupku datom u Tački 10.1. dobijene su vrednosti predviđenih brzina oscilovanja tla u zavisnosti od rastojanja minski serija do mernih mesta datih u *Tabeli br. 23*.

*Tabela br. 23 Vrednosti predviđenih brzina u zavisnosti od rastojanja minski serija do mernih mesta*

<b>R, m</b>	<b>600</b>	<b>712,5</b>	<b>817,7</b>	<b>933,4</b>	<b>1038,5</b>	<b>1114,6</b>	<b>1256,5</b>	<b>1505</b>
<b>V<sub>ANN</sub>, mm/s</b>	<b>1,485</b>	<b>1,136</b>	<b>0,911</b>	<b>0,652</b>	<b>0,557</b>	<b>0,463</b>	<b>0,333</b>	<b>0,245</b>

Na osnovu vrednosti iz *Tabele br. 23* formiran je dijagram zavisnosti rastojanja minskih serija do mernih mesta i maksimalnih brzina oscilovanja, dat na *Slici br. 57*.



*Slika br. 57 Uticaj rastojanja minskih serija do mernih mesta na brzinu oscilovanja tla za uslove na površinskom kopu Veliki Krivelj*

Regresiona analiza između predviđene brzine oscilovanja i rastojanja izvršena je korišćenjem hiperbolične funkcije, pri čemu je utvrđena korelativna zavisnost data *Formulom br. 30* sa koeficijetom determinacije  $R^2 = 0,9906$ .

$$V_{ANN} = 65193 R^{-2.02} \quad (\text{mm/s}) \quad (30)$$

Analiza uticaja rastojanja na brzinu oscilovanja tla izvršena je na osnovu grafičke interpretacije rezultata istraživanja, date na *Slici br. 57*, na osnovu koje se može zaključiti sledeće.

Na rastojanjima od 600 m do 1505 m, predviđena brzina oscilovanja tla konstantno opada sa rastojanjem. Na dijagramu zavisnosti se uočava značajan uticaj rastojanja minskih serija do mernih mesta na brzinu oscilovanja tla.

Minimalna predviđena brzina oscilovanja iznosi  $V_{ANN} = 0,245$  mm/s, a maksimalna  $V_{ANN} = 1,485$  mm/s, na osnovu čega se može zaključiti da se prognozna brzina oscilovanja tla, usled promene rastojanja, promenila  $1,485 / 0,245 = 6,061$  puta.

**Broj 6,061** je usvojen kao *mera uticaja rastojanja minskih serija do mernih mesta na brzinu oscilovanja tla*, odnosno *koeficijent uticaja rastojanja minskih serija do mernih mesta*  $K_R=6,061$

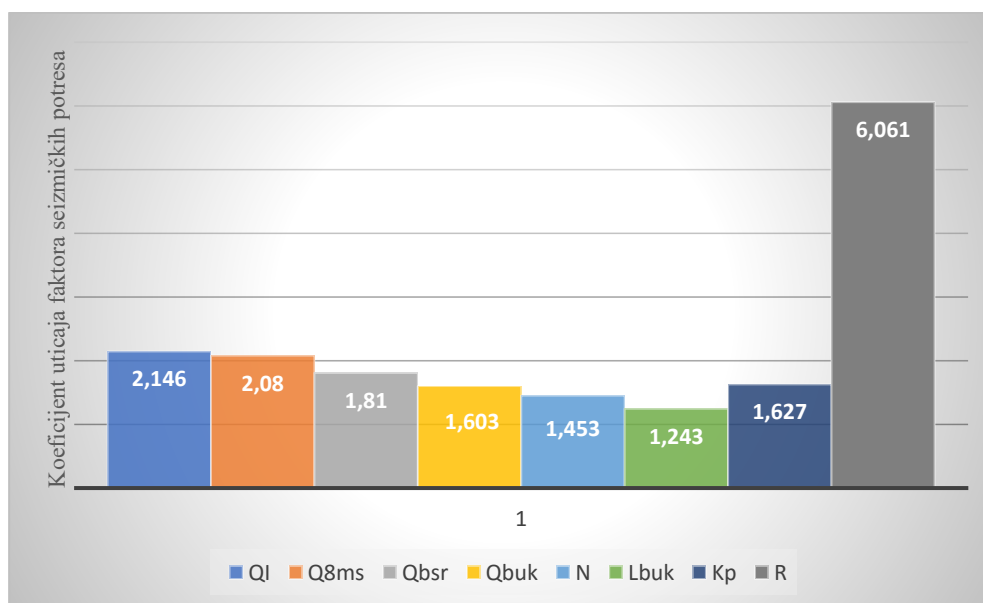
### 10.3 ANALIZA UTICAJA FAKTORA SEIZMIČKIH POTRESA NA BRZINU OSCILOVANJA TLA PRIMENOM VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA

Na osnovu dobijenih vrednosti koeficijenta uticaja pojedinačnih faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla formirana je *Tabela br. 24*. U tabeli su date vrednosti koeficijenta uticaja faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla, dobijeni upotrebom veštačkih neuronskih mreža, za uslove na površinskom kopu Veliki Krivelj.

*Tabela br. 24 Uticaj pojedinačnih faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja utvrđen primenom veštačkih neuronskih mreža*

Uticajni Faktori	$Q_i$	$Q_{8ms}$	$Q_{bsr}$	$Q_{buk}$	$N_b$	$L_{buk}$	$K_p$	$R$
Koeficijent uticaja	2,146	2,080	1,810	1,603	1,453	1,243	1,627	6,061

Podaci iz *Tabele br. 24* poslužili su za formiranje dijagrama uticaja faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla datog na *Slici br. 58*.



*Slika br. 58 Dijagram uticaja faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla za uslove na površinskom kopu Veliki Krivelj primenom veštačkih neuronskih mreža*

Analiziranjem *Tabele br. 24* i dijagrama datog na *Slici br. 58* zaključeno je sledeće.

Za uslove na razmatranoj lokaciji sa specifičnim lokalnim uslovima, najveći uticaj na brzinu oscilovanja tla izazvanu miniranjima ima rastojanje minske serije do mernog mesta ( $R$ ) čiji je koeficijent uticaja  $\mathbf{K}_R = 6,061$ .

Drugi faktor seizmičkih potresa po veličini uticaja su maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom nominalnom vremenu iniciranja ( $Q_i$ ) čiji je koeficijent uticaja  $\mathbf{K}_{Q_i} = 2,146$ .

Treći faktor po veličini uticaja su mase eksploziva inicirane u vremenskom intervalu od 8 milisekundi ( $Q_{8ms}$ ) sa koeficijentom uticaja  $\mathbf{K}_{Q_{8ms}} = 2,08$ .

Zatim slede uticaji srednje mase eksploziva po minskoj bušotini ( $Q_{bsr}$ ) sa koeficijentom uticaja  $\mathbf{K}_{Q_{bsr}} = 1,81$ , koeficijent punjenja minskih bušotina ( $K_p$ ) sa koeficijentom uticaja  $\mathbf{K}_{K_p} = 1,627$  i ukupna masa eksploziva u minskoj seriji ( $Q_{buk}$ ) čiji koeficijent uticaja iznosi  $\mathbf{K}_{Q_{buk}} = 1,603$ .

Pretposlednji faktor seizmičkih potresa po uticaju je broj bušotina u minskoj seriji ( $N_b$ ) sa koeficijentom uticaja  $\mathbf{K}_{N_b} = 1,453$ .

Faktor seizmičkih potresa sa najmanjim uticajem na brzinu oscilovanja tla je ukupna dužina bušotina u minskoj seriji ( $L_{buk}$ ) sa koeficijentom uticaja  $\mathbf{K}_{L_{buk}} = 1,243$ .

## 11. ANALIZA I DISKUSIJA REZULTATA ISTRAŽIVANJA

Istraživanja koja su sprovedena u okviru ove doktorske disertacije izdvajaju se od prethodnih istraživanja po velikom obimu ulazno-izlaznog skupa podataka.

*SUIP1043* sa 1043 seta podataka, koji je korišćen tokom obuke mreže u ovom istraživanju, približno je desetostruko veći od obima skupova ulazno-izlaznih podataka u prethodnim radovima koji su predstavljeni u *Tabeli br. 8*.

Formirani *SUIP1043* u sebi je sadržao širok dijapazon vrednosti kako faktora seizmičkih potresa tako i vrednosti izmerenih brzina oscilovanja tla, što je donekle otežavalo rad mreže.

Sa druge strane, široki dijapazon vrednosti u *SUIP1043* dao je neophodnu različitost tih podataka i oni su bili dobra osnova za određivanje uticaja faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla. Dijapazon vrednosti svakog od faktora seizmičkih potresa omogućio je predviđanje brzine oscilovanja tla za široki spektar vrednosti tog faktora. Time je dobijen neophodan broj uređenih parova za formiranja dijagrama uticaja. Formiranjem dijagrama uticaja sa uskim dijapazonom vrednosti faktora seizmičkih potresa i brzine oscilovanja tla ne bi se zadovoljila reprezentativnost rezultata utvrđenog uticaja pojedinačnog faktora na brzinu oscilovanja tla.

Izabrano podešavanje sa manjim brojem setova podataka koji su prolazili kroz mrežu dodatno je komplikovalo rad mreže. Zbog zahteva za većom preciznošću predviđanja brzina oscilovanja tla, izabrano podešavanje je uslovalo nestabilan rada mreže uz česte promene u sinaptičkim vezama tokom obuke.

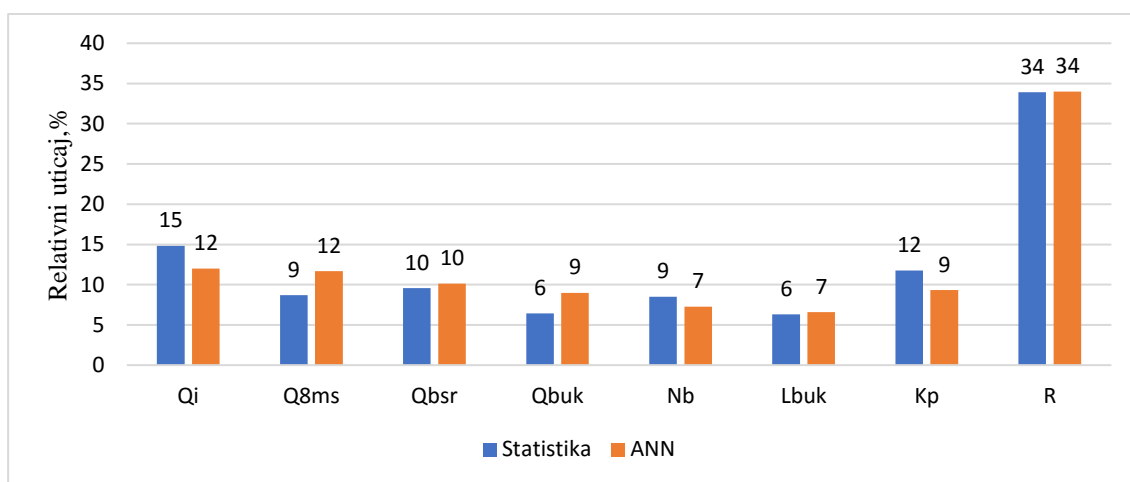
Bez obzira na pomenute otežavajuće okolnosti, mreža je predvidela brzine oscilovanja tla, koje su bile bolje od predviđenih brzina oscilovanja tla dobijenih iz zakona oscilovanja. To se, pre svega, vidi po dobijenim koeficijentima determinacije u odnosu na liniju jednakosti izmerenih i predviđenih brzina za jednu i drugu metodologiju. Takođe je i grupisanje tačaka oko linije jednakosti izmerenih i predviđenih brzina na dijagramima ukazivalo na prednosti metodologije koja koristi obučenu veštačku neuronsku mrežu. Bolji rezultati predviđanja brzine oscilovanja tla primenom veštačkih neuronskih mreža su samo potvrdili postavljene hipoteze doktorske disertacije kao i potrebu da se jedno takvo istraživanje radi.

Tokom ovog istraživanja, uz primenu veštačkih neuronskih mreža utvrđene su korelativne zavisnosti i koeficijenti uticaja pojedinačnih faktora seizmičkih potresa na brzinu

oscilovanja tla, što je i bio cilj. Takođe je utvrđen i njihov redosled uticaja na bazi dobijenih vrednosti koeficijenta uticaja datog na *Slici br. 58*.

U Poglavlju 7 su određene korelativne zavisnosti i uticaji pojedinačnih faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla primenom statističkih metoda. Vrednosti koeficijenta uticaja su predstavljene na dijagramu datom na *Slici br. 29*, odakle se video i redosled uticaja.

Relativni uticaji faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla, izraženi procentualno, predstavljeni su na *Slici br. 59*.



*Slika br. 59 Relativni uticaji faktora seizmičkih potresa izraženi u procentima*

Upoređenjem utvrđenih vrednosti koeficijenta uticaja i njihovog redosleda, koji su dobijeni primenom veštačkih neuronskih mreža, i vrednosti koeficijenta uticaja i njihovog redosleda, koji su dobijeni primenom statističkih metoda, uočeno je da se oni bitno ne razlikuju.

Prilikom utvrđivanja uticaja faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla primenom veštačkih neuronskih mreža, rastojanje minskih serija do mernih mesta ( $R$ ) ima najveći uticaj na brzinu oscilovanja tla. Iza njega su faktori seizmičkih potresa vezani za mase eksploziva: prvo maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom nominalnom vremenu iniciranja ( $Q_i$ ), a zatim mase eksploziva inicirane u jednom vremenskom intervalu od 8 milisekundi ( $Q_{8ms}$ ). Slede srednje mase eksploziva po bušotini ( $Q_{bsr}$ ), koeficijent punjenja minskih bušotina ( $K_p$ ), a zatim preostali faktor seizmičkih potresa vezanih za mase eksploziva, ukupna masa eksploziva u minskoj seriji ( $Q_{buk}$ ) itd.

Kod utvrđivanja uticaja primenom statističkih metoda dobijen je drugačiji redosled. I kod ove metodologije je rastojanja minskih serija do mernih mesta ( $R$ ) najuticajniji faktor.

Sledeći faktori po uticaju su maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom nominalnom vremenu iniciranja ( $Q_i$ ) i koeficijent punjenja minskih bušotina ( $K_p$ ). Posle njih slede faktori seizmičkih potresa vezani za masu eksploziva koja je predstavljena kroz srednje mase eksploziva po minskoj bušotini ( $Q_{bsr}$ ), i maksimalna masa eksploziva inicirana u vremenskom intervalu od 8 milisekundi ( $Q_{8ms}$ ). Uticaj faktora ukupnih masa eksploziva u minskoj seriji ( $Q_{buk}$ ) je najmanji u odnosu na sve faktore seizmičkih potresa čiji je uticaj analiziran i preposlednji je po uticaju. Pre njega po vrednosti koeficijenta je broj bušotina u minskoj seriji ( $N_b$ ). Poslednji faktor po vrednosti koeficijenta uticaja je ukupna dužina bušotina u minskoj seriji ( $L_{buk}$ ).

U Poglavlju 4 opisan je i tabelarno predstavljen (*Tabela br.4*) stepen uticaja pojedinačnih faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla.

Iz *Tabele br. 4* videlo se da mase eksploziva imaju direktan uticaj na brzinu oscilovanja tla, što je okarakterisano kao značajni uticaj.

Kod metodologije zasnovane na primeni statističkih metoda, treći uticajni faktor seizmičkih potresa nije faktor koji je vezan za mase eksploziva, već je to faktor koeficijenta punjenja minskih bušotina ( $K_p$ ), što nije u potpunoj saglasnosti sa prethodno utvrđenim naučnim saznanjima (*Tabela br. 4*). Prethodno izrečeno potvrđuje i relativno velika vrednost koeficijenta uticaja broja bušotina u minskoj seriji ( $N_b$ ), koja je veća od vrednosti faktora uticaja za ukupne mase eksploziva u minskoj seriji ( $Q_{buk}$ ).

Sa druge strane, kod metodologije primenom veštačkih neuronskih mreža, posle rastojanja minskih serija do mernih mesta, faktori vezani za mase eksploziva su drugi, treći i četvrti faktor uticaja na brzinu oscilovanja tla. Sa tom činjenicom se potvrđuje usaglašenost ove metodologije sa prethodno utvrđenim naučnim saznanjima.

Uzevši u obzir prethodnu analizu, moglo se zaključiti da su rezultati utvrđivanja uticaja faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla primenom veštačkih neuronskih mreža merodavniji od rezultata utvrđivanja uticaja istih faktora seizmičkih potresa dobijenih primenom statističkih metoda. Iz tog razloga, metodologija utvrđivanja uticaja faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla primenom veštačkih neuronskih mreža ima prednost primene nad statističkim metodama. Čak i prethodno izvedeni zaključak, koji nije prvi put izrečen, predstavlja minimalni naučni doprinos. Doprinos se ogleda u potvrđivanju već postojećih znanja jer je ta potvrda došla kroz istraživanje koje je zasnovano na realnom skupu ulazno-izlaznih podataka velikog obima i sa širokim dijapazonom vrednosti tih podataka.

Veći naučni doprinos predstavlja predložena metodologija koja je nastala kao rezultat istraživanja tokom izrade doktorske disertacije, uključujući i rezultate njene primene za uslove miniranja koji vladaju na površinskom kopu Veliki Krivelj. Postojanje kvantifikovanih uticaja pojedinačnih faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla dokazuju upotrebljivost predložene metodologije i oformljenog algoritma.

Doprinos predložene metodologije se pre svega ogleda kroz primenjeni način formiranja dijagrama zavisnosti faktora seizmičkih potresa i brzine oscilovanja tla, pri čemu su faktori seizmičkih potresa sačuvali međusobne odnose. Vrednosti podataka sa oformljenih dijagrama bili su osnova za definisanje korelativne zavisnosti i kvantifikaciju uticaja pojedinih faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla, što je i bio očekivani naučni doprinos. Od izuzetne je važnosti naglasiti, da predložena metodologija poseduje mogućnost kontinuiranog poboljšanja, uvođenjem novih setova ulazno-izlaznih podataka u adaptivni sistem, čime se obezbeđuju pouzdaniji rezultati predviđanja brzine oscilovanja tla. Pouzdaniji rezultati predviđanja brzine obezbeđuju i pouzdaniju kvantifikaciju uticaja pojedinih faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla. Korišćenje utvrđenih uticaja faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla, koji su nastali kao rezultat upotrebe predložene metodologije, pomoći će kod unapređenja i usavršavanja tehnologije miniranja na površinskim kopovima.

S druge strane, postojanje kvantifikovanih uticaja ne dokazuje i konačnost rešenja predstavljenog ovom metodologijom, već je treba smatrati konceptualnim rešenjem. Poboljšanja, kako metodologije, tako i algoritma, moguća su i treba da budu usmerena ka svakom od pomenutih koraka prezentovanih kroz disertaciju. Analiziranjem dobijenih rezultata uočene su i mogućnosti koje ovo istraživanje mogu podići na viši nivo.

Tokom istraživanja je predočena težina zadatka na koji je ANN morala da odgovori, a složenost lokalnih uslova je svakako uticala na performanse obučene mreže.

Iz tog razloga, od velikog značaja bi bilo poboljšanje koje podrazumeva separatan sagledavanje uticaja faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla, za svako merno mesto pojedinačno.

Sledeća mogućnosti je proširenje skupa ulaznih podataka, kako bi se obuhvatilo što više faktora seizmičkih potresa koji utiču na brzinu oscilovanja tla. Uključenje faktora koji karakterišu fizičko-mehaničke karakteristike stenske mase u ulazni skup, sigurno bi bilo značajno za buduća istraživanja. Pozitivan uticaj na kvalitet istraživanja imalo bi i uključenje faktora koji su u vezi sa šemom miniranja, na primer ukupno vreme trajanje minske serije. Isto važi i za hidrogeološke faktore, a naročito za ovodnjenost bušotina.



Ali, i ovde postoje ograničenja jer prevelik broj faktora seizmičkih potresa komplikuje rad mreže i dovodi u pitanje rezultat nakon obuke. Primena *FA-MIV* metode pripreme ulaznog skupa pre unosa u mrežu ovaj problem uspešno rešava. Napred rečeno definiše jedan od pravaca koji treba slediti, a to je kombinacija *FA-MIV* i ANN. Prethodno pomenuta kombinacija ne isključuje upotrebu i nekih drugih kombinovanih metoda koje imaju mogućnosti optimizacije ulaznog skupa u cilju poboljšanja performansi veštačke neuronske mreže.

Takođe, varijacije arhitekture mreža je sledeći pravac koji treba slediti. Poznato je da različiti broj neurona i različiti broj skrivenih slojeva neurona mogu pozitivno uticati na vrednost srednje kvadratne greške i standardne devijacije. Iz tog razloga u metodologiju rada treba uvesti analizu koja će od više ponuđenih arhitektura mreža izabrati onu koja najviše odgovara lokalnim uslovima. Ovakva analiza u disertaciji nije rađena, jer je usvojena arhitektura mreže koja je na osnovu *Fuzzy logike* predložena od strane programa.

Naravno i težnja ka povećanju kvaliteta ulazno-izlaznih podataka može dovesti do poboljšanja koja će pozitivno uticati na dobijene rezultate. Povećanje kvaliteta ulazno-izlaznih podataka se može bazirati na upotrebi merne opreme čija je proizvodnja savremenijeg datuma, a koja se koristi za merenje ulaznih i izlaznog parametra.

## 12. ZAKLJUČAK

U okviru ove doktorske disertacije određene su jačine korelativnih veza između pojedinačnih faktora seizmičkih potresa i brzine oscilovanja tla. Takođe su u doktorskoj disertaciji vrednovani uticaji pojedinačnih faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla. Dobijeni rezultati su dobra osnova koju je moguće koristiti u cilju kontrole minskih serija radi smanjenja intenziteta seizmičkih potresa, a samim tim i štetnih uticaja izazvanih miniranjima. Isti rezultati istraživanja ukazuju na koje faktore seizmičkih potresa treba posebno obratiti pažnju prilikom projektovanja, ali i prilikom samog izvođenja miniranja.

Osnov za pomenuta istraživanja bili su realni skup ulazno-izlaznih podataka nastalih terenskim istraživanjem na površinskom kopu Veliki Krivelj i upotreba veštačkih neuronskih mreža. Relativno velika pouzdanost ulazno-izlaznog skupa podataka i adaptivne sposobnosti ANN, koje su mogle mapirati skrivene zavisnosti uticajnih faktora seizmičkih potresa prilikom miniranja, pružile su mogućnost kvalitetnog rezultata istraživanja.

Uzimajući u obzir napred navedeno, ali i celokupan sadržaj rada, možemo izvesti sledeće zaključke.

1. Podaci za izradu disertacije su uzeti sa površinskog kopa Veliki Krivelj zbog postojanja velikog broja terenskih podataka koji su sastavni deo kako ulaznog tako i izlaznog skupa podataka.

2. Tokom obrade teme korišćen je realni ulazno-izlazni skup podataka, koji su sakupljeni na terenu tokom 2018. i 2019. godine prilikom izvođenja miniranja na površinskom kopu Veliki Krivelj. Parametri ulaznog skupa podataka i faktori seizmičkih potresa dobijeni su iz Dnevnika miniranja i geodetskih skica. Parametre izlaznog skupa činile su izmerene brzine oscilovanja tla koje su dobijene korišćenjem sistema seizmičkog monitoringa firme *Digitexx Data Systems* u realnom vremenu.

3. Ovako prikupljeni ulazno-izlazni skup podataka obezbedio je visok nivo verodostojosti dobijenih rezultata.

4. U ovoj disertaciji je iskorišćena nadmoćnost veštačkih neuronskih mreža u odnosu na klasične statističke prediktore. Nadmoćnost mreže se ogledala u tome da istovremeno procesira uticaj više faktora seizmičkih potresa iz ulaznog skupa podataka na brzinu oscilovanja tla. Programski paket „*PELTARION SYNAPSE*“ jedan je od programa koji u osnovi koristi veštačke neuronske mreže i korišćen je tokom izrade ove doktorske disertacije.

5. Radi formiranja što kvalitetnijeg ulazno-izlaznog skupa podataka izvršena je detaljna analiza kako bi se eliminisali mogući problemi tokom obuke mreže. Analizom i proverom

svakog Dnevnika miniranja i dijagrama brzine oscilovanja tla, eliminisane su sve minske serije koje su bile sa nepotpunim i nepouzdanim podacima.

6. Ulazni skup podataka sadržao je faktore seizmičkih potresa: ( $Q_i$ ,  $Q_{8ms}$ ,  $Q_{bsr}$ ,  $Q_{buk}$ ,  $N_b$ ,  $L_{buk}$ ,  $kp$  i  $R$ ).

7. Izlazni skup je sadržao samo maksimalno izmerenu brzinu oscilovanja tla  $V_{max}=V_{izmer}$ .

8. Pre obuke mreže utvrđene su vrednosti koeficijenta uticaja pojedinačnih faktora seizmičkih potresa primenom statističkih metoda, u cilju upoređenja sa vrednostima koeficijenta uticaja dobijenih na osnovu rezultata predviđenih brzina oscilovanja tla iz veštačke neuronske mreže.

9. Na osnovu kvantiteta ulazno-izlaznog skupa podataka i zadanog nivoa kompleksnosti zadatka, program je odredio arhitekturu mreže. Arhitektura mreže je višeslojna i odgovara BP mreži. Osam ulaznih neurona, prvi skriveni nivo osam neurona, drugi skriveni nivo šest neurona i izlazni sloj sa jednim neuronom čine arhitekturu mreže.

10. Obuka mreže je rađena sa unapred utvrđenim podešavanjem u *Preprocessing-u*.

11. Obučena mreža je verifikovana sa nezavisnim skupom podataka iz *SUIP115* za verifikaciju sa 115 setova podataka minskih serija, pri čemu je dobijen koeficijent determinacije  $R^2 = 0,854$  sa regresionom linijom i  $R^2 = 0,762$  u odnosu na pravu  $V_{izmer}=V_{ANN}$ .

12. Obučena neuronska mreža je iskorišćena za vrednovanje uticaja faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla na površinskom kopu Veliki Krivelj. Korelativna zavisnost je predstavljena jednačinama regresionih linija za svaki faktor miniranja uz odgovarajuću vrednost koeficijenta determinacije  $R^2$ .

13. Kroz rad je utvrđen uticaj svakog faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla, određivanjem vrednosti koeficijenta uticaja. Upoređenjem vrednosti koeficijenta uticaja pojedinih faktora seizmičkih potresa, dobijen je i njihov redosled uticaja na brzinu oscilovanja tla. Za uslove na razmatranoj lokaciji sa specifičnim lokalnim uslovima, najveći uticaj ima rastojanje minske serije do mernog mesta ( $R$ ). Zatim maksimalna masa eksploziva inicirana u jednom nominalnom vremenu iniciranja ( $Q_i$ ). Slede masa eksploziva inicirana u vremenskom intervalu od 8 milisekundi ( $Q_{8ms}$ ) i srednje mase eksploziva po bušotini ( $Q_{bsr}$ ) itd. Ovako utvrđeni redosled je merodavniji od utvrđenog redosleda koji je rezultat primene statističkih metoda za lokalne uslove istraživanja.

14. Radi sveopšte primenljivosti metodologije prikazane kroz rad, oformljen je algoritam koji definiše potrebne korake i postupke za vrednovanje uticaja faktora seizmičkih

potresa. Prateći algoritam, metodologija postaje primenjiva na površinskim kopovima, pri čemu upotrebu u podzemnim otkopima treba dodatno proveriti.

Doprinos predložene metodologije se pre svega ogleda kroz primenjeni način formiranja dijagrama zavisnosti faktora seizmičkih potresa i brzine oscilovanja tla, pri čemu su faktori seizmičkih potresa sačuvali međusobne odnose. Vrednosti podataka sa oformljenih dijagrama bili su osnova za definisanje korelativne zavisnosti i kvantifikaciju uticaja pojedinih faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla, što je i bio očekivani naučni doprinos

15. Prikazana metodologija ne dozvoljava korišćenje podataka ili obučenih mreža sa različitih lokacija, odnosno različitih kopova, jer rezultat koji mreža daje je oslonjen na podatke koji su izvorno nastali na toj lokaciji.

16. Obučena i verifikovana mreža korišćena tokom izrade rada, može se koristiti za predviđanje brzine oscilovanja tla izazvanih budućim miniranjima na površinskom kopu Veliki Krivelj.

17. Korišćenje utvrđenih uticaja faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla, koji su nastali kao rezultat upotrebe predložene metodologije, pomoći će kod unapređenja i usavršavanja tehnologije miniranja na površinskom kopu Veliki Krivelj.

Na osnovu prethodno izvedenih zaključaka možemo doneti i konačni zaključak koji glasi:

*Korišćenjem rezultata dobijenih kroz predloženu metodologiju, utvrđeno je da najveći uticaj na brzinu oscilovanja tla izazvanih miniranjima, ima rastojanje minske serije do mernog mesta ( $R$ ) čiji je koeficijent uticaja  $K_R = 6,061$ . Drugi faktor seizmičkih potresa po veličini uticaja su maksimalne mase eksploziva inicirane u jednom nominalnom vremenu iniciranja ( $Q_i$ ) čiji je koeficijent uticaja  $K_{Q_i} = 2,146$ . Treći faktor po veličini uticaja su mase eksploziva inicirane u vremenskom intervalu od 8 milisekundi ( $Q_{8ms}$ ) sa koeficijentom uticaja  $K_{Q_{8ms}} = 2,08$ . Zatim slede uticaji srednje mase eksploziva po minskoj bušotini ( $Q_{bsr}$ ) sa koeficijentom uticaja  $K_{Q_{bsr}} = 1,81$ ; koeficijent punjenja minskih bušotina ( $K_P$ ) sa koeficijentom uticaja  $K_{K_P} = 1,627$  i ukupna masa eksploziva u minskoj seriji ( $Q_{buk}$ ) čiji koeficijent uticaja iznosi  $K_{Q_{buk}} = 1,603$ . Pretposlednji faktor seizmičkih potresa po uticaju je broj bušotina u minskoj seriji ( $N_b$ ) sa koeficijentom uticaja  $K_{N_b} = 1,453$ . Faktor seizmičkih potresa sa najmanjim uticajem na brzinu oscilovanja tla je ukupna dužina bušotina u minskoj seriji ( $L_{buk}$ ) sa koeficijentom uticaja  $K_{L_{buk}} = 1,243$ .*

*Korišćenje rezultata dobijenih kroz predloženu metodologiju vrednovanja uticaja faktora seizmičkih potresa na brzinu oscilovanja tla primenom veštačkih neuronskih mreža, može značajno pomoći težnji ka smanjenju intenziteta seizmičkih potresa izazvanih miniranjima. Smanjenjem intenziteta seizmičkih potresa, povećava se bezbednost kako ljudi tako i opreme na samom površinskom kopu, ali i štetni uticaji nastali kao posledica izvršenih miniranja na okolne objekte u blizini površinskog kopa. Dobijeni rezultati se mogu koristiti kako prilikom projektovanja, tako i pri samom izvođenju miniranja. Iz tog razloga možemo reći, da metodologija dobijena tokom istraživanja kroz ovu doktorsku disertaciju, poseduje potencijal široke primene. Uz pomenuta unapređenja koja su data u Tački br. 11, predložena metodologija može postati univerzalna i široko primenljiva na površinskim kopovima, u cilju smanjenja intenziteta seizmičkih potresa izazvanih miniranjima.*

## 13. LITERATURA

1. S. Stojadinović, Seizmički efekti miniranja na površinskim kopovima i zaštita objekta od njihovog uticaja, Tehnički fakultet u Boru, Bor, (2009).
2. M. Savic, Miniranje na površinskim kopovima, Institut za bakar, Bor, (2000).
3. Persson, P., Holmerg, R. Lee, J. Rock blasting and explosive engineering, CRC Press, Inc, Distributed by International Society of Explosives Engineering, USA, 1994.
4. Dowding, C. H., Construction Vibrations, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA, 1996.
5. G. Berta , Explosives an engineering tool, Italesplosivi, Milano, Italy, (1990).
6. Morris, G., Vibration due to blasting and effects on building structure, Engineer,1950.
7. Duvall, W. I., Petkof, B., Spherical propagation of explosion-generated strain pulses in rock, USBM RI 5483, 1959.
8. Ambraseys, N. R., Hendron, A. J., Dynamic behaviour of rock mass, (eds. K. G. Stagg and O. C. Zienkiewics), Rock mechanics in engineering practices, London, John Wiley, 1968, 203-207.
9. Dowding, C. H., Response of Buildings to Ground Vibrations from Construction Blasting, Ph. D Thesis, University of Illinois, Urbana - Champaign, 1971.
10. Devine, J. F., Duvall, W. I., Effect of Charge Weight on Vibration Levels for Millisecond Delayed Quarry Blast, Earthquake Notes, Seismological Society of America, Vol.34, No 2., 1963.
11. Langefors, U., Kihlstrom, B., The modern techniques of rock blasting, New York, John Wiley, 1978, 1-438.
12. Siskind, D. E., Vibrations from Blasting, International Society of Explosives Engineers, Cleveland, OH, USA, 2000
13. R. Kumar, D. Choundhury, K. Bhargava, Determination of blast- induced ground vibration equations for rocks using mechanical and geological propertis (2016)
14. Negovanović M., Model predviđanja potresa na površinskim kopovima primenom simulacione metode Monte Karlo Fazi logike, Rudarsko-Geološki fakultet Beograd,(2015)
15. M. Khandelwal, T. N. Singh, Prediction of blast induced ground vibrations and frequency in opencast mine: a neural network approach, Journal of Sound and Vibration (2006).

**16.** M. Khandelwal, T. N. Singh, Prediction of blast- induced ground vibration using artificial neural network., International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 46(7), (2009).

**17.** R. Lapčević, S. Kostić, R. Pantović, N. Vasović, Prediction of blast-induced ground motion in a copper mine, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences ,vol 69, (2014)

**18.** M. Saadat, M. Khandelwal, M. Monjezi, An ANN - based approach to predict blast-induced ground vibration of Gol-E-Gohar iron ore mine, Iran , Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, vol 6, (2014)

**19.** Z. Zhongya, J. Xiaoguang, Prediction of peak velocity of blasting vibration based on artificial neural network optimized by dimensionality reduction of FA-MIV, Hindawi, (2018)

**20.** G. Li, D. Kumar, P. Samui, H. N. Rad, B. Roy, M. Hasanipanah, Developing a New Computational Intelligence Approach for Approximating the Blast-Induced Ground Vibration,

**21.** C. K. Arthur, V. A. Temeng, Y. Y. Ziggah, Soft computing-based technique as a predictive tool to estimate blast-induced ground vibration, (2019)

**22.** D. J. Armaghani, S. V. Alavi, E. Momeni, M. Khandelwal, Feasibility of ANFIS model for prediction of ground vibrations resulting from quarry blasting, (2015)

**23.** M. Monjezi, A. Bahrami, A. Y. Varjani, A. R. Sayadi, Forecasting and controlling of rock pieces flying during the blasting process by using the artificial neural network, (2009)

**24.** S. Stojadinović, Sprema neuronskih mreža i numeričkih modela za definisanje sigurnih rasojanja od razletanja komada pri miniranju., Univerzitet u Beogradu, Tehnički Fakultet Bor, (2013)

**25.** M. Monjezi, Z. Ahmadi, M. Khandelwal, Application of neural networks for the prediction of rock fragmentation in Chadormalu iron mine, (2012)

DOI:10.247/v10267-012-0051-0

**26.** M. Monjezi, F. Farzaneh, A. Asadi, Evaluation of blasting patterns using operational research models, (2013)

DOI:10.2478/amsc-2013-0061

**27.** K. Muhammad, A. Shan, Minimising backbreak at the Dewan cement limestone quarry using an artificial neural network, (2017)

DOI:10.1515/amsc-2017-0055

**28.** Dopunski Rudarski Projekat otkopavanja i prerade rude u ležištu „Veliki Krivelj“ za kapacitet  $10.6 \times 10^6$  tona vlažne rude godišnje, Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, (2011)

**29.** Studija uticaja miniranja na objekte u okruženju površinskog kopa „Veliki Krivelj“ RTB Bor, Rudarsko-geološki fakultet, (2010)

**30.** Analiza rezultata monitoringa seizmičkih efekata pri izvođenju miniranja na površinskom kopu „Veliki Krivelj“, Godišnji izveštaj za 2017, Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet Bor, (2018)

**31.** Elaborat o analizi rezultata monitoringa seizmičkih efekata pri izvođenju miniranja na površinskom kopu „Veliki Krivelj“, Godišnji izveštaj za 2018, Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet Bor, (2019)

**32.** Elaborat o analizi rezultata monitoringa seizmičkih efekata pri izvođenju miniranja na površinskom kopu „Veliki Krivelj“, Godišnji izveštaj za 2019, Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet Bor, (2020)

**33.** Elaborat o analizi rezultata monitoringa seizmičkih efekata pri izvođenju miniranja na površinskom kopu „Veliki Krivelj“, Godišnji izveštaj za 2020, Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet Bor, (2021)

**34.** D. Tanikić, Veštačke neuronske mreže, fazi logika i genetski algoritmi, Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet Bor, (2016)



## SPISAK OZNAKA

**ANN** – Veštačka neuronska mreža

**ADALINE** – Adaptivni linearni element

**BP** – Propagacija greške unazad

**BPNN** – Mreža sa propagacijom unazad

**d** – Prečnik minskih bušotina

**E** – Modul elastičnosti ( $\text{N/m}^2$ )

**FA** – Faktorska analiza

**GSI** – Indeks geološke čvrstoće

**k** – Koeficijent koji uglavnom zavisi od karakteristika stenske mase i tehnologije miniranja

**$K_p$**  – Koeficijent punjenja

**$L_{buk}$**  – Ukupna dužina bušotina u minskoj seriji (m)

**$L_{bsr}$**  – Srednja dužina bušotina (m)

**MSE** – Srednja kvadratna greška

**MIV** – Srednja vrednost uticaja

**m** – Izložilac iznad korena

**$N_b$**  – Broj bušotina u minskoj seriji

**n** – Eksponent koji definiše stepen prigušenja seizmičkih talasa a zavisi od karakteristika stenske mase

**PPV** – Brzina oscilovanja tla izazvana miniranjima (mm/s)

**$Q_x$**  – Inicirana masa eksploziva u minskoj seriji ( $Q_i, Q_{8ms}, Q_{buk}, Q_{bsr}$ ) (kg)

**$Q_i$**  – Maksimalna masa eksploziva inicirana u jednom nominalnom vremenu iniciranja (kg)

**$Q_{8ms}$**  – Maksimalna masa eksploziva inicirana u jednom vremenskom intervalu od 8ms (kg)

**$Q_{buk}$**  – Ukupna masa eksploziva po minskoj seriji (kg)

**$Q_{bsr}$**  – Srednja masa eksploziva po bušotini (kg/buš)

**R** – Prostornorno rastojanje mernog mesta od minske serije (m)

**Rr** – Redukovano rastojanje ( $\text{m/kg}^{0.5}$ )

**$R^2$**  – Koeficijent determinacije

**RQD** – Indeks kvaliteta stenske mase

**UCS** – Jednoosna pritiska čvrstoća

**USBM** – Model predviđanja brzine oscilovanja pedložen od strane Američkog biroa za rudarstvo.

$V$  – Brzina oscilovanja tla (mm/s)  
 $V_u$  – Brzina uzdužnih talasa (m/s)  
 $V_p$  – Brzina poprečnih talasa (m/s)  
 $V_r$  – Brzina R talasa (m/s)  
 $V_{izmer} = V_{max}$  – Maksimalno izmerena brzina na terenu po svim osama (mm/s)  
 $V_{ANN}$  – Predviđene brzine od strane ANN (mm/s).  
 $V_{zak}$  – Predviđene brzine dobijene iz zakona oscilovanja (mm/s)  
 $\gamma$  – Zapreminska težina (kN/m<sup>3</sup>)  
 $\sigma_p$  – Jednoosna otpornost na pritisak (MPa)  
 $\sigma_z$  – otpornost na zatezanje (MPa)  
 $\delta$  – Standardna devijacija  
 $\rho$  – Gustina stene (kg/m<sup>3</sup>)  
 $\mu$  – Poasonov koeficijent.  
 $\tau$  – Kohezija (MPa)

## **PRILOZI**

**PRILOG 1. TABELARNI PRIKAZ ULAZNO-IZLAZNIH PODATAKA  
ZA OBUKU MREŽE**

**PRILOG 2. TABELARNI PRIKAZ ULAZNO-IZLAZNIH PODATAKA  
ZA VERIFIKACIJU MREŽE**

## PRILOG BR. 1

Redni broj	$Q_i$	$Q_{8ms}$	$Q_{bsr}$	$Q_{buk}$	$N_b$	$L_{buk}$	$K_p$	$R$	$V_{max}$
1	480	480	441.0	8820	20	326	0.541	527	2.834
2	540	1360	466.2	27970	60	890	0.582	686	2.775
3	480	850	459.1	24330	53	847	0.505	623	2.755
4	480	960	409.3	11460	28	435.5	0.526	552	2.688
5	510	510	466.9	16810	36	575	0.585	723	2.631
6	1020	1020	519.4	25970	50	857	0.606	530	2.6031
7	1100	1100	311.5	18380	59	712.5	0.516	685	2.579
8	510	510	429.9	32670	76	1216	0.537	500	2.575
9	1040	1040	494.0	9880	20	331	0.597	570	2.463
10	510	510	435.0	13050	30	485.5	0.538	480	2.462
11	450	900	432.4	12540	29	423.5	0.592	748	2.442
12	480	870	426.5	17060	40	650	0.525	513	2.427
13	450	870	403.0	12090	30	429.5	0.563	753	2.312
14	480	1320	528.0	32210	61	1081	0.607	689	2.311
15	780	1020	457.3	20580	45	685	0.528	671	2.304
16	480	480	400.9	4410	11	163	0.541	629	2.303
17	450	750	442.0	19450	44	679.5	0.551	657	2.301
18	540	1050	474.0	16590	35	554.5	0.598	548	2.263
19	540	990	470.0	19740	42	632	0.625	601	2.257
20	750	750	335.0	7370	22	297	0.496	835	2.249
21	510	510	431.0	8620	20	304	0.567	717	2.248
22	540	1020	472.1	16050	34	540	0.594	724	2.235
23	600	600	517.2	12930	25	402	0.643	595	2.233
24	510	510	436.4	4800	11	169	0.568	546	2.222
25	510	510	469.2	11730	25	396	0.592	472	2.218
26	540	540	469.2	17360	37	623.5	0.557	593	2.197
27	450	780	357.9	10020	28	410	0.489	586	2.169
28	390	780	486.0	12150	25	411.5	0.519	636	2.165
29	510	1020	428.3	32550	76	1082	0.602	753	2.161
30	480	480	384.0	11520	30	472	0.488	475	2.152
31	510	510	465.9	7920	17	286	0.554	623	2.118
32	540	1082	466.7	8400	18	264.5	0.635	665	2.116
33	540	540	481.9	7710	16	261	0.591	548	2.101
34	480	480	480.0	16320	34	534	0.611	456	2.096
35	480	930	414.4	22380	54	898.5	0.498	576	2.084
36	930	930	423.9	13140	31	458.5	0.573	700	2.042
37	540	990	474.2	17070	36	571	0.598	578	2.035
38	570	570	443.3	11970	27	415	0.577	529	2.012
39	990	990	230.4	18200	79	840	0.381	683	1.997
40	510	960	444.1	12880	29	472	0.546	540	1.977
41	540	540	509.4	16810	33	550.5	0.611	553	1.968
42	480	480	426.0	12780	30	484.5	0.528	514	1.956
43	420	540	445.7	25850	58	939.5	0.530	703	1.936
44	450	670	281.5	10980	39	425	0.517	616	1.933
45	720	1020	482.9	10140	21	304.5	0.666	686	1.926
46	480	960	422.3	16470	39	615.5	0.535	474	1.909
47	540	540	474.0	14220	30	489.5	0.581	543	1.907
48	870	1170	484.5	15990	33	522	0.538	694	1.838

Redni broj	$Q_i$	$Q_{8ms}$	$Q_{bsr}$	$Q_{buk}$	$N_b$	$L_{buk}$	$K_p$	$R$	$V_{max}$
49	500	1000	473.9	10900	23	384	0.568	644	1.833
50	390	750	411.8	9060	22	328.5	0.485	595	1.828
51	570	1140	517.2	36720	71	1148.5	0.592	748	1.827
52	480	480	422.8	18180	43	680	0.535	490	1.826
53	480	480	313.2	21300	68	804.5	0.530	499	1.825
54	450	450	434.1	22140	51	761	0.582	603	1.8
55	600	900	337.9	23650	70	1060.5	0.413	717	1.776
56	420	840	345.0	8280	24	355.5	0.466	863	1.765
57	450	870	416.1	28710	69	937.5	0.538	743	1.754
58	540	1050	485.2	11160	23	363.5	0.614	746	1.752
59	540	1380	346.7	33280	96	1473.5	0.625	724	1.746
60	930	930	386.5	13140	34	455	0.508	678	1.742
61	540	540	390.8	5080	13	208	0.488	602	1.739
62	510	990	493.8	31110	63	1026	0.533	576	1.733
63	400	760	463.5	17150	37	566.5	0.583	658	1.721
64	570	570	439.3	29430	67	995	0.592	545	1.721
65	960	960	453.2	12690	28	432	0.588	626	1.706
66	510	900	474.7	16140	34	524.5	0.615	840	1.698
67	570	570	513.3	23100	45	727.5	0.635	977	1.689
68	570	570	489.0	4890	10	161.5	0.606	643	1.681
69	450	870	413.7	7860	19	249	0.631	622	1.679
70	1000	1000	460.0	11500	25	400.5	0.574	663	1.675
71	840	1340	470.6	22590	48	771.5	0.515	750	1.671
72	570	570	478.2	16260	34	537.5	0.605	595	1.663
73	420	1280	492.9	25630	52	840.5	0.587	659	1.663
74	480	930	448.1	28676	64	929.5	0.617	873	1.662
75	510	840	493.0	22680	46	745.5	0.608	860	1.662
76	510	1020	428.3	32550	76	1082	0.602	709	1.651
77	990	990	442.3	13710	31	481	0.570	699	1.649
78	510	510	442.2	30510	69	1097.5	0.556	824	1.641
79	540	540	390.8	5080	13	208	0.488	711	1.611
80	1080	1080	464.4	29720	64	943	0.630	779	1.609
81	500	1000	473.9	10900	23	384	0.568	773	1.597
82	540	1050	515.1	20090	39	653.5	0.615	931	1.587
83	420	780	472.9	17970	38	605.5	0.522	615	1.584
84	500	950	337.9	12840	38	623.5	0.412	727	1.584
85	510	1020	506.8	19260	38	608	0.634	688	1.58
86	540	1020	510.0	9180	18	294	0.624	636	1.576
87	1170	1170	560.0	8400	15	256.5	0.655	683	1.568
88	420	1020	445.6	15150	34	531.5	0.501	702	1.567
89	480	480	463.6	10200	22	359.5	0.567	652	1.561
90	540	980	504.5	11100	22	357	0.622	654	1.533
91	930	930	423.9	13140	31	458.5	0.573	597	1.531
92	540	1020	472.1	16050	34	540	0.594	752	1.519
93	540	1050	477.1	30060	63	1007.5	0.597	826	1.51
94	840	1080	486.3	11670	24	382.5	0.536	631	1.505
95	510	930	497.0	26840	54	880	0.610	566	1.504
96	480	960	458.9	16980	37	618	0.483	761	1.495
97	540	990	486.2	14100	29	472.5	0.524	595	1.488
98	450	840	401.3	6420	16	208	0.617	632	1.476

Redni broj	$Q_i$	$Q_{8ms}$	$Q_{bsr}$	$Q_{buk}$	$N_b$	$L_{buk}$	$K_p$	$R$	$V_{max}$
99	450	900	419.6	23080	55	807.5	0.572	727	1.448
100	450	900	397.9	22680	57	806	0.563	827	1.448
101	480	480	415.0	12450	30	464	0.537	495	1.446
102	480	480	388.4	7380	19	263	0.561	468	1.442
103	600	1080	556.3	32820	59	986.5	0.665	738	1.438
104	540	1050	515.1	20090	39	653.5	0.615	786	1.436
105	990	990	442.3	13710	31	481	0.570	652	1.431
106	420	420	333.8	5340	16	238	0.449	581	1.43
107	480	960	237.7	23060	97	1496	0.831	792	1.430
108	510	930	448.6	19290	43	686.5	0.562	577	1.429
109	510	510	302.1	17220	57	783	0.440	726	1.426
110	570	570	489.6	12240	25	393.5	0.622	684	1.425
111	480	960	402.6	7650	19	296	0.517	549	1.422
112	540	1080	445.3	20040	45	669	0.599	681	1.419
113	510	510	512.1	9730	19	316.5	0.615	609	1.418
114	480	480	420.0	13860	33	544.5	0.509	523	1.412
115	1140	1140	474.3	10910	23	315	0.693	527	1.406
116	1080	1080	472.7	33090	70	1073	0.542	684	1.404
117	1080	1080	509.2	19860	39	645.5	0.615	594	1.396
118	540	540	492.2	18210	37	617.5	0.590	596	1.395
119	510	960	473.5	17520	37	609	0.575	801	1.391
120	960	960	453.9	19970	44	702.5	0.569	899	1.389
121	1000	1000	460.0	11500	25	400.5	0.574	755	1.381
122	870	870	357.6	12160	34	493.5	0.433	924	1.378
123	840	1340	470.6	22590	48	771.5	0.515	896	1.378
124	360	510	470.9	5180	11	175	0.520	796	1.378
125	1080	1080	519.5	9870	19	323	0.611	782	1.378
126	900	900	422.9	13110	31	510	0.514	557	1.372
127	1000	1000	367.9	10300	28	429.5	0.421	687	1.363
128	480	900	442.5	12390	28	438	0.566	455	1.358
129	540	540	360.1	6482	18	285	0.455	523	1.358
130	570	570	513.3	23100	45	727.5	0.635	764	1.356
131	1020	1020	444.2	11550	26	398	0.580	745	1.354
132	480	480	473.1	16560	35	568.5	0.583	751	1.348
133	510	510	410.0	12300	30	442	0.557	895	1.347
134	420	770	323.4	9380	29	427	0.386	651	1.343
135	480	900	433.8	5640	13	213.5	0.528	504	1.34
136	850	850	413.8	5380	13	213.5	0.504	769	1.338
137	540	990	436.0	18310	42	627.5	0.584	766	1.337
138	570	960	506.8	9630	19	310	0.621	763	1.337
139	1100	1100	311.5	18380	59	712.5	0.516	772	1.336
140	450	450	416.7	7500	18	278	0.540	688	1.334
141	420	540	526.3	18420	35	575.5	0.640	680	1.331
142	540	540	496.8	12420	25	406	0.612	675	1.327
143	480	480	410.0	13120	32	496	0.529	448	1.326
144	480	480	441.1	11910	27	447.5	0.532	527	1.323
145	360	360	326.7	2940	9	128	0.459	885	1.321
146	570	1110	466.1	16780	36	557.5	0.602	696	1.316
147	540	1080	485.4	13590	28	448	0.607	691	1.316
148	570	570	547.9	10410	19	325.5	0.640	777	1.314

<b>Redni broj</b>	<b><math>Q_i</math></b>	<b><math>Q_{8ms}</math></b>	<b><math>Q_{bsr}</math></b>	<b><math>Q_{buk}</math></b>	<b><math>N_b</math></b>	<b><math>L_{buk}</math></b>	<b><math>K_p</math></b>	<b><math>R</math></b>	<b><math>V_{max}</math></b>
149	480	480	415.0	7470	18	280	0.534	640	1.313
150	480	480	434.8	9130	21	345	0.529	514	1.311
151	450	900	419.6	23080	55	807.5	0.572	751	1.31
152	510	510	469.2	11730	25	396	0.592	827	1.304
153	420	750	342.7	11310	33	447	0.506	728	1.299
154	480	1360	424.0	22050	52	807.5	0.526	750	1.298
155	540	1020	448.7	17500	39	594	0.518	768	1.296
156	1080	1080	526.7	9480	18	306	0.620	570	1.296
157	540	540	415.4	5400	13	220	0.491	585	1.296
158	540	1020	458.9	16060	35	586.5	0.548	861	1.294
159	450	900	432.4	12540	29	423.5	0.592	943	1.294
160	900	1320	444.4	16000	36	590	0.542	738	1.287
161	540	1080	511.3	11760	23	385	0.611	712	1.279
162	360	720	524.4	8390	16	265.5	0.632	649	1.276
163	480	960	416.5	10830	26	413.5	0.524	568	1.276
164	570	1050	511.6	19440	38	620	0.627	891	1.274
165	540	1050	477.1	30060	63	1007.5	0.597	1039	1.269
166	540	540	309.4	15160	49	641.5	0.473	698	1.259
167	450	870	403.0	12090	30	429.5	0.563	738	1.249
168	540	1080	511.3	11760	23	385	0.611	841	1.248
169	540	1020	448.7	17500	39	594	0.518	923	1.243
170	570	570	547.9	10410	19	325.5	0.640	635	1.243
171	540	1020	472.1	16050	34	540	0.594	910	1.239
172	360	360	336.7	9090	27	310	0.515	711	1.236
173	450	900	432.4	12540	29	423.5	0.592	744	1.236
174	630	1050	475.1	23280	49	732	0.636	598	1.235
175	930	930	432.8	23370	54	785.5	0.595	815	1.232
176	540	540	415.4	5400	13	220	0.491	799	1.232
177	540	1080	445.3	20040	45	669	0.599	799	1.225
178	480	480	447.5	5370	12	199.5	0.538	535	1.22
179	540	1020	465.3	20010	43	736	0.544	742	1.218
180	510	870	465.6	23280	50	795	0.515	920	1.217
181	570	570	523.3	4710	9	149	0.632	637	1.214
182	540	950	484.4	16470	34	531	0.620	720	1.208
183	510	510	302.1	17220	57	783	0.440	886	1.208
184	540	1080	514.6	20070	39	637	0.558	797	1.202
185	480	840	470.5	8940	19	300	0.596	732	1.202
186	360	510	482.9	10140	21	331.5	0.538	942	1.197
187	960	960	453.2	12690	28	432	0.588	779	1.197
188	480	480	405.8	4870	12	187	0.521	443	1.19
189	870	870	383.4	12270	32	492	0.438	934	1.184
190	990	990	442.3	13710	31	481	0.570	902	1.178
191	480	930	448.1	28676	64	929.5	0.617	709	1.178
192	510	840	493.0	22680	46	745.5	0.608	739	1.178
193	480	480	465.0	5580	12	188	0.594	799	1.177
194	540	540	526.0	5260	10	166.5	0.632	618	1.175
195	360	760	433.5	8670	20	306	0.498	728	1.174
196	480	1320	405.6	10950	27	411	0.533	590	1.172
197	450	750	453.9	10440	23	368	0.499	764	1.171
198	840	840	403.2	13710	34	500.5	0.548	707	1.166

<b>Redni broj</b>	<b><math>Q_i</math></b>	<b><math>Q_{8ms}</math></b>	<b><math>Q_{bsr}</math></b>	<b><math>Q_{buk}</math></b>	<b><math>N_b</math></b>	<b><math>L_{buk}</math></b>	<b><math>K_p</math></b>	<b><math>R</math></b>	<b><math>V_{max}</math></b>
199	900	1050	502.5	6030	12	191	0.555	729	1.165
200	360	720	478.8	11490	24	375	0.613	684	1.161
201	570	1010	501.9	13050	26	431	0.606	709	1.161
202	870	1170	524.1	15200	29	461.5	0.579	713	1.16
203	510	510	452.6	10410	23	376.5	0.553	605	1.154
204	780	780	405.7	17850	44	645	0.553	836	1.153
205	480	480	417.0	12510	30	468	0.535	694	1.153
206	570	1090	527.3	15820	30	497	0.637	683	1.152
207	480	480	313.2	21300	68	804.5	0.530	784	1.144
208	600	600	517.2	12930	25	402	0.643	766	1.144
209	540	1320	456.6	14610	32	483.5	0.604	792	1.141
210	510	510	482.3	12540	26	419	0.599	1084	1.138
211	1050	1050	474.9	25170	53	842.5	0.598	851	1.136
212	540	1050	504.6	19680	39	630	0.625	734	1.135
213	570	1000	511.7	29680	58	933.5	0.636	853	1.132
214	450	870	491.8	25080	51	850	0.590	596	1.131
215	540	540	495.6	13380	27	433.5	0.617	826	1.127
216	540	1020	458.9	16060	35	586.5	0.548	735	1.122
217	510	510	483.8	7740	16	268	0.578	634	1.117
218	510	900	474.7	16140	34	524.5	0.615	1039	1.116
219	500	500	220.3	8370	38	532	0.774	764	1.116
220	450	450	365.5	7310	20	309	0.473	750	1.115
221	510	510	465.9	7920	17	286	0.554	804	1.113
222	450	750	470.9	15540	33	518.5	0.527	997	1.111
223	480	480	434.8	9130	21	345	0.529	843	1.104
224	600	1110	457.5	25160	55	868.5	0.579	823	1.098
225	360	720	489.5	10770	22	350.5	0.540	720	1.097
226	420	420	336.7	3030	9	139	0.436	877	1.095
227	510	510	482.7	5310	11	175.5	0.605	668	1.093
228	510	510	455.2	13200	29	459.5	0.575	667	1.084
229	860	860	480.0	12000	25	410	0.514	742	1.081
230	570	1020	497.7	10950	22	355.5	0.616	636	1.081
231	350	350	305.5	3360	11	190	0.870	665	1.078
232	540	930	414.4	13260	32	427	0.621	577	1.077
233	510	870	474.5	12338	26	410	0.602	523	1.072
234	450	840	425.8	15330	36	557	0.530	724	1.07
235	510	510	468.0	7020	15	247	0.568	451	1.068
236	540	1020	426.0	12780	30	426.5	0.599	947	1.066
237	630	1040	525.9	8940	17	260	0.688	1017	1.065
238	510	510	482.3	12540	26	419	0.599	876	1.065
239	540	990	436.0	18310	42	627.5	0.584	784	1.063
240	480	840	470.5	8940	19	300	0.596	629	1.063
241	360	480	486.0	7290	15	254	0.504	840	1.062
242	540	1250	500.4	23520	47	768	0.848	757	1.062
243	450	900	397.9	22680	57	806	0.563	1064	1.059
244	1170	1170	560.0	8400	15	256.5	0.655	768	1.047
245	960	960	508.3	9150	18	294.5	0.546	669	1.045
246	990	990	496.7	4470	9	148.5	0.602	707	1.045
247	540	540	362.1	21000	58	745.5	0.563	686	1.043
248	1080	1080	519.5	9870	19	323	0.611	987	1.041



Redni broj	$Q_i$	$Q_{8ms}$	$Q_{bsr}$	$Q_{buk}$	$N_b$	$L_{buk}$	$K_p$	$R$	$V_{max}$
249	570	570	492.9	10350	21	349.5	0.592	703	1.04
250	600	600	545.5	6000	11	185.5	0.647	637	1.037
251	510	510	448.3	24210	54	899.5	0.538	758	1.036
252	720	1020	482.9	10140	21	304.5	0.666	928	1.033
253	480	480	330.0	9570	29	404.5	0.473	865	1.032
254	480	480	417.5	10020	24	383.5	0.523	887	1.03
255	600	1100	503.1	24150	48	821	0.588	789	1.026
256	480	480	460.0	4140	9	148	0.559	651	1.024
257	840	840	380.4	10650	28	389	0.548	580	1.024
258	420	780	483.2	9180	19	312.5	0.588	657	1.023
259	510	510	483.0	4830	10	168.5	0.573	707	1.017
260	510	870	465.6	23280	50	795	0.515	772	1.014
261	540	1050	506.7	23310	46	743	0.551	754	1.008
262	450	780	411.8	9060	22	361	0.441	677	1.006
263	360	720	470.9	10830	23	364	0.523	743	0.999
264	510	990	485.8	17490	36	593.5	0.589	709	0.995
265	540	1020	426.0	12780	30	426.5	0.599	795	0.995
266	540	1050	497.5	23880	48	822.5	0.581	1036	0.992
267	570	570	501.6	16050	32	508	0.632	986	0.99
268	1080	1080	519.5	9870	19	323	0.611	688	0.986
269	450	820	400.0	14400	36	532	0.521	967	0.98
270	390	750	274.5	35140	128	1892.5	0.514	776	0.978
271	1020	1020	498.2	18930	38	630.5	0.600	879	0.976
272	450	450	360.0	2880	8	112	0.514	813	0.974
273	900	900	427.2	24780	58	835.5	0.593	972	0.973
274	570	570	461.8	15240	33	463	0.658	811	0.972
275	450	450	357.5	12870	36	485	0.531	892	0.971
276	510	960	440.4	11010	25	397.5	0.554	597	0.97
277	570	980	487.5	13650	28	440	0.620	1029	0.969
278	570	570	456.0	11400	25	398.5	0.572	644	0.965
279	360	720	333.8	13350	40	476.5	0.560	672	0.96
280	420	540	526.3	18420	35	575.5	0.640	786	0.958
281	540	990	425.5	9360	22	309	0.606	677	0.956
282	420	420	344.5	10680	31	374.5	0.505	759	0.955
283	450	450	407.5	4890	12	178.5	0.548	617	0.955
284	1050	1050	474.9	25170	53	842.5	0.598	1019	0.953
285	570	570	522.9	7320	14	236	0.620	736	0.953
286	540	540	461.3	22140	48	767	0.577	1019	0.952
287	930	930	401.3	9630	24	362.5	0.531	756	0.95
288	510	510	496.5	15390	31	517.5	0.595	725	0.948
289	780	1240	473.1	21290	45	697	0.537	778	0.947
290	570	1090	527.3	15820	30	497	0.637	898	0.947
291	540	1020	426.0	12780	30	426.5	0.599	1184	0.945
292	570	1010	501.9	13050	26	431	0.606	810	0.945
293	420	780	166.8	24180	145	1490	0.492	816	0.944
294	540	540	475.7	9990	21	330.5	0.605	784	0.941
295	480	480	482.0	7230	15	228.5	0.633	981	0.94
296	570	570	513.3	23100	45	727.5	0.635	702	0.94
297	540	540	430.8	11200	26	375	0.597	789	0.936
298	420	570	513.2	17450	34	555	0.557	798	0.932

Redni broj	$Q_i$	$Q_{8ms}$	$Q_{bsr}$	$Q_{buk}$	$N_b$	$L_{buk}$	$K_p$	$R$	$V_{max}$
299	510	510	398.7	11960	30	448.5	0.533	882	0.932
300	540	540	536.0	8040	15	253	0.636	826	0.932
301	540	540	495.6	13380	27	433.5	0.617	729	0.93
302	540	540	516.0	5160	10	163.5	0.631	803	0.928
303	540	1080	471.5	24990	53	829	0.603	780	0.927
304	630	1040	525.9	8940	17	260	0.688	823	0.924
305	570	1140	410.0	33210	81	1292.5	0.476	977	0.923
306	1020	1020	519.4	25970	50	857	0.606	962	0.921
307	470	470	182.3	10210	56	579.5	0.867	885	0.92
308	540	1082	466.7	8400	18	264.5	0.635	846	0.914
309	1020	1020	488.8	31770	65	1057.5	0.601	910	0.913
310	450	1320	407.1	23610	58	935.5	0.505	894	0.912
311	570	570	536.2	6970	13	219.5	0.635	850	0.91
312	420	750	342.7	11310	33	447	0.506	620	0.91
313	540	1020	409.1	32730	80	1293.5	0.506	964	0.909
314	480	480	433.8	11280	26	428	0.527	828	0.901
315	1020	1020	444.2	11550	26	398	0.580	789	0.894
316	540	990	436.0	18310	42	627.5	0.584	959	0.889
317	570	570	466.7	9800	21	328	0.598	653	0.888
318	570	780	511.4	10740	21	323.5	0.664	1022	0.887
319	410	820	505.7	7080	14	209.5	0.676	795	0.886
320	390	780	367.5	5880	16	212.5	0.553	607	0.886
321	510	510	431.0	8620	20	304	0.567	915	0.883
322	420	420	288.6	8080	28	340	0.475	825	0.876
323	1020	1020	480.9	10580	22	360	0.588	823	0.872
324	510	990	472.1	17940	38	618	0.538	876	0.867
325	450	450	218.5	10050	46	665.5	0.743	687	0.864
326	480	480	420.0	13860	33	544.5	0.509	775	0.863
327	450	820	400.0	14400	36	532	0.521	768	0.857
328	570	960	506.8	9630	19	310	0.621	725	0.853
329	450	840	388.5	20590	53	679.5	0.537	774	0.852
330	450	750	470.9	15540	33	518.5	0.527	791	0.85
331	540	540	509.4	16810	33	550.5	0.611	911	0.847
332	570	570	489.6	12240	25	393.5	0.622	888	0.844
333	840	840	376.9	6030	16	203	0.522	655	0.842
334	400	400	377.8	6800	18	278	0.489	596	0.841
335	510	510	496.5	15390	31	517.5	0.595	860	0.837
336	510	510	466.9	16810	36	575	0.585	940	0.831
337	570	570	522.9	7320	14	236	0.620	792	0.831
338	510	1020	428.3	32550	76	1082	0.602	958	0.829
339	480	480	440.5	8370	19	305	0.549	561	0.829
340	480	480	441.7	20760	47	758.4	0.547	629	0.828
341	570	780	511.4	10740	21	323.5	0.664	792	0.825
342	600	600	512.5	12300	24	405	0.607	830	0.821
343	450	450	304.3	6390	21	266.5	0.480	925	0.821
344	480	480	410.4	11490	28	449	0.512	809	0.819
345	1140	1140	523.6	13090	25	387	0.676	949	0.818
346	360	720	478.8	11490	24	375	0.613	850	0.818
347	540	990	474.2	17070	36	571	0.598	970	0.815
348	570	570	501.6	16050	32	508	0.632	695	0.814

Redni broj	$Q_i$	$Q_{8ms}$	$Q_{bsr}$	$Q_{buk}$	$N_b$	$L_{buk}$	$K_p$	$R$	$V_{max}$
349	450	870	403.0	12090	30	429.5	0.563	944	0.811
350	960	960	453.9	19970	44	702.5	0.569	813	0.809
351	390	630	432.5	10380	24	352	0.518	778	0.807
352	510	510	397.5	4770	12	160	0.596	766	0.804
353	510	900	474.7	16140	34	524.5	0.615	775	0.804
354	420	720	445.4	5790	13	195	0.522	770	0.801
355	570	980	487.5	13650	28	440	0.620	831	0.801
356	870	870	454.6	17730	39	637	0.557	726	0.8
357	1080	1080	509.2	19860	39	645.5	0.615	844	0.795
358	900	1320	444.4	16000	36	590	0.542	900	0.793
359	450	450	301.4	27730	92	1149.5	0.482	816	0.792
360	540	1020	409.1	32730	80	1293.5	0.506	831	0.791
361	510	960	416.5	10830	26	389	0.557	993	0.79
362	1000	1000	460.0	11500	25	400.5	0.574	968	0.79
363	480	480	336.0	5040	15	199	0.445	806	0.789
364	390	540	464.7	14870	32	516	0.555	743	0.789
365	540	540	473.6	6630	14	227	0.584	807	0.789
366	570	570	443.3	11970	27	415	0.577	847	0.789
367	540	1080	485.4	13590	28	448	0.607	842	0.788
368	450	450	373.3	3360	9	141	0.419	751	0.787
369	510	960	451.2	14890	33	494	0.530	1063	0.78
370	540	540	362.1	21000	58	745.5	0.563	1048	0.78
371	540	1050	485.2	11160	23	363.5	0.614	762	0.779
372	540	1020	450.0	23850	53	810.5	0.589	944	0.777
373	420	1020	445.6	15150	34	531.5	0.501	936	0.776
374	540	540	491.1	9330	19	312	0.598	578	0.776
375	420	420	333.8	5340	16	238	0.449	1187	0.776
376	510	510	420.2	9665	23	356.5	0.542	759	0.774
377	510	930	396.0	7920	20	282.5	0.561	856	0.774
378	390	390	236.8	4500	19	189.5	0.417	677	0.768
379	540	540	309.4	15160	49	641.5	0.473	935	0.766
380	450	450	357.5	12870	36	485	0.531	816	0.764
381	390	510	473.0	5676	12	191	0.522	788	0.763
382	480	710	251.0	17070	68	720.5	0.420	1363	0.759
383	1020	1020	498.2	18930	38	630.5	0.600	1089	0.758
384	540	1020	458.9	16060	35	586.5	0.548	1069	0.758
385	450	450	411.2	6990	17	267	0.524	695	0.754
386	960	960	423.8	13560	32	460.5	0.589	814	0.753
387	540	990	474.0	9480	20	321.5	0.590	649	0.746
388	510	990	406.9	23600	58	876	0.539	1184	0.746
389	930	930	432.8	23370	54	785.5	0.595	935	0.743
390	540	950	484.4	16470	34	531	0.620	832	0.739
391	850	850	413.8	5380	13	213.5	0.504	989	0.738
392	480	960	458.3	13290	29	480	0.554	920	0.737
393	540	540	516.0	5160	10	163.5	0.631	1007	0.737
394	540	540	461.3	22140	48	767	0.577	848	0.735
395	420	420	395.5	8700	22	323	0.539	651	0.734
396	570	1050	511.6	19440	38	620	0.627	788	0.732
397	480	930	448.1	28676	64	929.5	0.617	1086	0.728
398	1080	1080	464.4	29720	64	943	0.630	1000	0.728

<b>Redni broj</b>	<b><math>Q_i</math></b>	<b><math>Q_{8ms}</math></b>	<b><math>Q_{bsr}</math></b>	<b><math>Q_{buk}</math></b>	<b><math>N_b</math></b>	<b><math>L_{buk}</math></b>	<b><math>K_p</math></b>	<b><math>R</math></b>	<b><math>V_{max}</math></b>
399	510	840	493.0	22680	46	745.5	0.608	1066	0.728
400	420	750	342.7	11310	33	447	0.506	940	0.725
401	540	1360	466.2	27970	60	890	0.582	978	0.721
402	540	540	430.8	11200	26	375	0.597	763	0.721
403	480	480	400.9	4410	11	163	0.541	694	0.716
404	420	540	526.3	18420	35	575.5	0.640	998	0.716
405	780	780	389.6	18310	47	780.5	0.452	942	0.715
406	1050	1050	474.9	25170	53	842.5	0.598	1260	0.714
407	420	780	472.9	17970	38	605.5	0.522	1057	0.711
408	510	510	420.2	9665	23	356.5	0.542	886	0.711
409	570	570	439.3	29430	67	995	0.592	951	0.71
410	420	1020	445.6	15150	34	531.5	0.501	1153	0.706
411	570	960	506.8	9630	19	310	0.621	966	0.706
412	480	850	459.1	24330	53	847	0.505	950	0.702
413	540	1080	514.6	20070	39	637	0.558	1188	0.702
414	570	1000	511.7	29680	58	933.5	0.636	1052	0.7
415	780	1000	492.9	6900	14	222.5	0.545	1084	0.699
416	540	540	481.9	7710	16	261	0.591	1093	0.699
417	510	990	406.9	23600	58	876	0.539	956	0.694
418	480	480	414.0	6210	15	220	0.565	695	0.693
419	510	960	451.2	14890	33	494	0.530	842	0.692
420	540	1050	484.6	18900	39	635	0.595	757	0.692
421	540	1050	504.6	19680	39	630	0.625	954	0.691
422	390	780	486.0	12150	25	411.5	0.519	979	0.688
423	500	950	337.9	12840	38	623.5	0.412	941	0.686
424	540	1080	471.5	24990	53	829	0.603	1122	0.686
425	420	840	555.4	20550	37	623	0.660	1104	0.685
426	420	780	476.7	12870	27	422	0.610	653	0.685
427	510	510	442.2	30510	69	1097.5	0.556	1053	0.683
428	480	480	422.8	18180	43	680	0.535	941	0.682
429	760	760	448.9	12570	28	407	0.618	813	0.681
430	480	960	409.3	11460	28	435.5	0.526	960	0.681
431	750	750	335.0	7370	22	297	0.496	1159	0.678
432	540	540	496.2	12900	26	416.5	0.619	647	0.677
433	860	860	480.0	12000	25	410	0.514	953	0.676
434	390	750	411.8	9060	22	328.5	0.485	1052	0.676
435	510	510	435.0	13050	30	485.5	0.538	913	0.675
436	780	1020	457.3	20580	45	685	0.528	1072	0.673
437	900	900	427.2	24780	58	835.5	0.593	848	0.673
438	900	1020	434.0	6510	15	198.5	0.576	835	0.67
439	510	510	452.6	10410	23	376.5	0.553	1205	0.67
440	930	930	401.3	9630	24	362.5	0.531	930	0.669
441	480	480	384.0	11520	30	472	0.488	990	0.666
442	630	1040	525.9	8940	17	260	0.688	799	0.665
443	540	1020	492.5	5910	12	197	0.600	771	0.664
444	540	1020	409.1	32730	80	1293.5	0.506	1195	0.662
445	450	750	442.0	19450	44	679.5	0.551	1175	0.66
446	510	780	411.2	6990	17	257.5	0.543	1025	0.66
447	480	960	458.9	16980	37	618	0.483	949	0.659
448	540	540	466.5	9330	20	336	0.555	847	0.659

<b>Redni broj</b>	<b><math>Q_i</math></b>	<b><math>Q_{8ms}</math></b>	<b><math>Q_{bsr}</math></b>	<b><math>Q_{buk}</math></b>	<b><math>N_b</math></b>	<b><math>L_{buk}</math></b>	<b><math>K_p</math></b>	<b><math>R</math></b>	<b><math>V_{max}</math></b>
449	450	450	360.0	2880	8	112	0.514	1113	0.654
450	420	720	445.4	5790	13	195	0.522	1003	0.65
451	780	1240	473.1	21290	45	697	0.537	1031	0.647
452	780	1000	492.9	6900	14	222.5	0.545	823	0.644
453	420	780	453.8	10890	24	394.5	0.485	649	0.644
454	420	810	486.9	6330	13	220.5	0.505	767	0.644
455	570	1110	466.1	16780	36	557.5	0.602	879	0.644
456	510	510	466.9	7470	16	276	0.541	764	0.644
457	360	760	433.5	8670	20	306	0.498	973	0.643
458	540	540	516.0	5160	10	163.5	0.631	733	0.642
459	1040	1040	494.0	9880	20	331	0.597	929	0.641
460	540	540	360.1	6482	18	285	0.455	940	0.641
461	480	480	480.0	16320	34	534	0.611	904	0.64
462	360	720	470.9	10830	23	364	0.523	984	0.638
463	1020	1020	487.5	11700	24	363	0.645	1053	0.637
464	540	1020	448.7	17500	39	594	0.518	1130	0.635
465	900	900	440.0	7920	18	296.5	0.469	889	0.635
466	480	710	251.0	17070	68	720.5	0.420	1143	0.634
467	480	900	442.5	12390	28	438	0.566	956	0.634
468	990	990	452.7	13580	30	475.5	0.571	614	0.632
469	480	480	404.8	31980	79	1242	0.515	896	0.632
470	440	440	214.6	12230	57	840	0.717	1007	0.631
471	760	760	448.9	12570	28	407	0.618	1004	0.629
472	420	420	343.0	10290	30	429.5	0.479	817	0.627
473	480	480	441.0	8820	20	326	0.541	834	0.627
474	840	840	403.2	13710	34	500.5	0.548	902	0.625
475	450	450	416.7	7500	18	278	0.540	710	0.625
476	450	450	218.5	10050	46	665.5	0.743	1149	0.622
477	450	450	439.6	10990	25	445	0.494	904	0.62
478	570	570	461.8	15240	33	463	0.658	1011	0.618
479	960	960	453.9	19970	44	702.5	0.569	1131	0.617
480	780	780	405.7	17850	44	645	0.553	1256	0.617
481	420	570	525.8	21030	40	657	0.563	804	0.616
482	870	870	357.6	12160	34	493.5	0.433	1451	0.614
483	540	1050	515.1	20090	39	653.5	0.615	1169	0.613
484	420	780	483.2	9180	19	312.5	0.588	863	0.613
485	510	510	496.5	15390	31	517.5	0.595	1069	0.613
486	540	990	498.0	9960	20	317	0.628	1298	0.61
487	540	1020	465.3	20010	43	736	0.544	899	0.608
488	450	450	357.5	12870	36	485	0.531	1119	0.608
489	540	1080	505.3	28800	57	937.5	0.614	921	0.604
490	540	1020	510.0	9180	18	294	0.624	944	0.603
491	450	450	404.5	11730	29	486.5	0.482	897	0.603
492	840	1340	470.6	22590	48	771.5	0.515	1103	0.602
493	420	840	555.4	20550	37	623	0.660	1339	0.602
494	480	960	422.3	16470	39	615.5	0.535	1017	0.601
495	480	480	444.0	6660	15	237.5	0.561	592	0.597
496	510	510	475.0	5700	12	187	0.610	589	0.597
497	440	440	214.6	12230	57	840	0.717	797	0.596
498	560	560	186.5	6900	37	511	0.664	752	0.595

<b>Redni broj</b>	<b><math>Q_i</math></b>	<b><math>Q_{8ms}</math></b>	<b><math>Q_{bsr}</math></b>	<b><math>Q_{buk}</math></b>	<b><math>N_b</math></b>	<b><math>L_{buk}</math></b>	<b><math>K_p</math></b>	<b><math>R</math></b>	<b><math>V_{max}</math></b>
499	1140	1140	523.6	13090	25	387	0.676	1193	0.593
500	570	1000	511.7	29680	58	933.5	0.636	784	0.593
501	1020	1020	462.6	8790	19	299.5	0.587	889	0.592
502	510	930	497.0	26840	54	880	0.610	976	0.586
503	930	930	432.8	23370	54	785.5	0.595	1177	0.586
504	450	450	404.5	11730	29	486.5	0.482	1101	0.583
505	1080	1080	526.7	9480	18	306	0.620	961	0.582
506	630	1050	475.1	23280	49	732	0.636	1180	0.581
507	450	870	416.1	28710	69	937.5	0.538	1234	0.58
508	480	930	414.4	22380	54	898.5	0.498	1089	0.576
509	510	870	465.6	23280	50	795	0.515	1126	0.574
510	360	720	524.4	8390	16	265.5	0.632	1138	0.572
511	450	450	368.9	9960	27	421	0.473	891	0.572
512	500	1000	473.9	10900	23	384	0.568	989	0.572
513	540	540	455.5	5010	11	171.5	0.584	965	0.571
514	1020	1020	487.5	11700	24	363	0.645	1282	0.57
515	360	480	459.1	10560	23	353	0.526	942	0.569
516	420	540	445.7	25850	58	939.5	0.530	1215	0.569
517	480	960	416.5	10830	26	413.5	0.524	1085	0.569
518	540	1050	504.6	19680	39	630	0.625	1168	0.569
519	420	420	288.6	8080	28	340	0.475	1132	0.567
520	450	450	434.1	22140	51	761	0.582	998	0.567
521	480	480	336.0	5040	15	199	0.445	1100	0.561
522	540	540	475.7	9990	21	330.5	0.605	1032	0.561
523	480	480	384.0	11520	30	472	0.488	1214	0.56
524	480	960	480.5	19220	40	703	0.547	1209	0.56
525	570	570	523.3	4710	9	149	0.632	956	0.56
526	480	1320	528.0	32210	61	1081	0.607	1012	0.560
527	400	760	463.5	17150	37	566.5	0.583	1033	0.559
528	600	1080	556.3	32820	59	986.5	0.665	1264	0.557
529	1140	1140	523.6	13090	25	387	0.676	809	0.555
530	480	1380	277.7	31940	115	1360.5	0.470	1001	0.555
531	1100	1100	311.5	18380	59	712.5	0.516	976	0.551
532	450	450	360.0	2880	8	112	0.514	1362	0.55
533	450	810	532.5	4260	8	130.5	0.579	813	0.548
534	960	960	423.8	13560	32	460.5	0.589	1010	0.548
535	450	450	272.1	3810	14	160	0.476	725	0.548
536	440	440	214.6	12230	57	840	0.717	1215	0.546
537	540	540	509.4	16810	33	550.5	0.611	1143	0.545
538	480	480	434.8	9130	21	345	0.529	1072	0.543
539	510	510	482.7	5310	11	175.5	0.605	956	0.54
540	450	900	397.9	22680	57	806	0.563	1311	0.539
541	510	930	442.5	7080	16	246.5	0.574	696	0.539
542	480	480	482.0	7230	15	228.5	0.633	855	0.538
543	450	870	385.7	5400	14	211.5	0.511	552	0.534
544	420	780	476.7	12870	27	422	0.610	887	0.534
545	450	780	357.9	10020	28	410	0.489	958	0.532
546	570	1010	501.9	13050	26	431	0.606	1019	0.531
547	540	540	506.7	4560	9	139.5	0.654	713	0.53
548	480	480	460.0	4140	9	148	0.559	963	0.529

Redni broj	$Q_i$	$Q_{8ms}$	$Q_{bsr}$	$Q_{buk}$	$N_b$	$L_{buk}$	$K_p$	$R$	$V_{max}$
549	540	540	495.6	13380	27	433.5	0.617	1032	0.524
550	870	870	383.4	12270	32	492	0.438	1462	0.523
551	450	450	378.0	9450	25	380	0.437	1224	0.522
552	510	510	469.2	11730	25	396	0.592	1044	0.522
553	570	570	466.7	9800	21	328	0.598	898	0.519
554	480	480	330.0	9570	29	404.5	0.473	1468	0.519
555	540	1050	506.7	23310	46	743	0.551	997	0.518
556	480	480	463.6	10200	22	359.5	0.567	1268	0.516
557	510	930	396.0	7920	20	282.5	0.561	1083	0.516
558	420	840	560.0	8400	15	252	0.667	1167	0.514
559	480	960	418.8	13400	32	520	0.515	1139	0.514
560	540	540	496.2	12900	26	416.5	0.619	840	0.513
561	250	250	250.0	4250	17	254.5	0.334	719	0.51
562	390	750	274.5	35140	128	1892.5	0.514	1174	0.510
563	480	900	495.0	21780	44	677.5	0.570	766	0.509
564	510	510	429.9	32670	76	1216	0.537	978	0.509
565	510	510	410.0	12300	30	442	0.557	1096	0.509
566	570	980	487.5	13650	28	440	0.620	778	0.508
567	540	990	486.2	14100	29	472.5	0.524	1052	0.505
568	510	510	445.7	6240	14	232	0.538	1018	0.505
569	930	930	386.5	13140	34	455	0.508	1104	0.504
570	360	480	459.1	10560	23	353	0.526	768	0.503
571	840	840	376.9	6030	16	203	0.522	875	0.503
572	540	540	286.4	12600	44	499	0.505	1094	0.502
573	510	510	482.3	12540	26	419	0.599	1317	0.502
574	540	1080	445.3	20040	45	669	0.599	1006	0.5
575	1020	1020	454.1	9990	22	360	0.555	1003	0.5
576	420	840	345.0	8280	24	355.5	0.466	1013	0.496
577	510	930	396.0	7920	20	282.5	0.561	1326	0.496
578	900	1320	444.4	16000	36	590	0.542	1109	0.492
579	540	540	501.8	5520	11	191	0.578	837	0.489
580	600	600	517.2	12930	25	402	0.643	982	0.488
581	570	570	240.6	12750	53	544	0.469	608	0.487
582	510	960	451.2	14890	33	494	0.530	1270	0.486
583	960	960	508.3	9150	18	294.5	0.546	1222	0.485
584	540	540	496.8	12420	25	406	0.612	993	0.484
585	600	1170	244.5	26650	109	1642.5	0.301	1002	0.481
586	360	720	470.9	10830	23	364	0.523	1199	0.479
587	450	820	400.0	14400	36	532	0.521	1177	0.478
588	540	1050	474.0	16590	35	554.5	0.598	1183	0.478
589	540	540	461.3	22140	48	767	0.577	1251	0.477
590	570	570	478.2	16260	34	537.5	0.605	940	0.477
591	540	540	390.8	5080	13	208	0.488	931	0.477
592	420	570	513.2	17450	34	555	0.557	1304	0.474
593	570	570	240.6	12750	53	544	0.469	791	0.474
594	480	480	439.4	7470	17	214.5	0.617	1010	0.473
595	540	980	504.5	11100	22	357	0.622	1006	0.473
596	480	850	459.1	24330	53	847	0.505	1177	0.472
597	390	750	274.5	35140	128	1892.5	0.514	1398	0.472
598	1020	1020	428.9	27020	63	987	0.548	1120	0.471

Redni broj	$Q_i$	$Q_{8ms}$	$Q_{bsr}$	$Q_{buk}$	$N_b$	$L_{buk}$	$K_p$	$R$	$V_{max}$
599	540	1320	456.6	14610	32	483.5	0.604	1036	0.471
600	420	780	166.8	24180	145	1490	0.492	1434	0.469
601	870	870	357.6	12160	34	493.5	0.433	1684	0.467
602	1170	1170	560.0	8400	15	256.5	0.655	973	0.467
603	570	570	547.9	10410	19	325.5	0.640	996	0.466
604	500	500	233.0	4660	20	291.5	0.281	862	0.463
605	480	480	480.0	16320	34	534	0.611	1120	0.463
606	540	540	437.1	6120	14	206	0.594	778	0.462
607	450	870	491.8	25080	51	850	0.590	1043	0.46
608	390	630	432.5	10380	24	352	0.518	1022	0.459
609	450	900	419.6	23080	55	807.5	0.572	948	0.459
610	450	870	413.7	7860	19	249	0.631	966	0.459
611	410	820	505.7	7080	14	209.5	0.676	957	0.459
612	480	710	251.0	17070	68	720.5	0.420	790	0.458
613	510	990	406.9	23600	58	876	0.539	858	0.458
614	540	1360	466.2	27970	60	890	0.582	1200	0.457
615	480	480	399.1	9180	23	316.5	0.580	1036	0.457
616	420	780	166.8	24180	145	1490	0.492	1210	0.457
617	540	1020	465.3	20010	43	736	0.544	1137	0.455
618	540	540	536.0	8040	15	253	0.636	1042	0.455
619	510	510	465.9	7920	17	286	0.554	1031	0.455
620	510	960	440.4	11010	25	397.5	0.554	1152	0.454
621	540	540	469.2	17360	37	623.5	0.557	761	0.451
622	900	900	427.2	24780	58	835.5	0.593	1210	0.448
623	540	990	470.0	19740	42	632	0.625	1074	0.448
624	450	840	388.5	20590	53	679.5	0.537	1352	0.447
625	400	760	463.5	17150	37	566.5	0.583	1261	0.447
626	540	1050	474.0	16590	35	554.5	0.598	949	0.447
627	990	990	496.7	4470	9	148.5	0.602	709	0.447
628	990	990	230.4	18200	79	840	0.381	1150	0.445
629	510	510	436.4	4800	11	169	0.568	933	0.445
630	540	1080	514.6	20070	39	637	0.558	1412	0.444
631	410	410	240.0	3600	15	166	0.381	842	0.442
632	540	1080	505.3	28800	57	937.5	0.614	1141	0.442
633	480	480	313.2	21300	68	804.5	0.530	997	0.441
634	450	450	378.0	9450	25	380	0.437	753	0.44
635	480	480	336.0	5040	15	199	0.445	1316	0.44
636	480	480	415.0	12450	30	464	0.537	886	0.44
637	480	480	433.8	11280	26	428	0.527	1050	0.437
638	960	960	453.2	12690	28	432	0.588	1004	0.437
639	480	480	424.7	13590	32	524.5	0.518	1144	0.436
640	1020	1020	519.4	25970	50	857	0.606	1188	0.436
641	450	450	304.3	6390	21	266.5	0.480	1149	0.435
642	480	1360	424.0	22050	52	807.5	0.526	1258	0.432
643	1080	1080	472.7	33090	70	1073	0.542	1135	0.43
644	480	480	465.0	5580	12	188	0.594	1066	0.43
645	480	930	398.2	11150	28	415	0.537	1143	0.429
646	960	960	423.8	13560	32	460.5	0.589	1256	0.428
647	450	450	439.6	10990	25	445	0.494	1110	0.426
648	1020	1020	444.2	11550	26	398	0.580	926	0.424



Redni broj	$Q_i$	$Q_{8ms}$	$Q_{bsr}$	$Q_{buk}$	$N_b$	$L_{buk}$	$K_p$	$R$	$V_{max}$
649	540	930	414.4	13260	32	427	0.621	1115	0.422
650	1020	1020	487.5	11700	24	363	0.645	889	0.421
651	570	1140	517.2	36720	71	1148.5	0.592	1187	0.420
652	600	600	545.5	6000	11	185.5	0.647	996	0.42
653	450	750	442.0	19450	44	679.5	0.551	1413	0.419
654	480	480	400.0	13200	33	528	0.500	816	0.419
655	450	870	491.8	25080	51	850	0.590	1278	0.419
656	1020	1020	480.9	10580	22	360	0.588	1054	0.418
657	1020	1020	488.8	31770	65	1057.5	0.601	1143	0.416
658	480	960	402.6	7650	19	296	0.517	1017	0.415
659	420	420	367.8	9930	27	449	0.442	872	0.415
660	540	1050	485.2	11160	23	363.5	0.614	932	0.415
661	360	720	489.5	10770	22	350.5	0.540	1257	0.414
662	600	1080	556.3	32820	59	986.5	0.665	1500	0.414
663	480	1380	277.7	31940	115	1360.5	0.470	863	0.414
664	480	960	416.5	10830	26	413.5	0.524	1314	0.414
665	450	450	272.1	3810	14	160	0.476	905	0.414
666	480	480	405.8	4870	12	187	0.521	984	0.413
667	450	840	401.3	6420	16	208	0.617	1005	0.413
668	540	540	491.1	9330	19	312	0.598	1167	0.412
669	540	1050	497.5	23880	48	822.5	0.581	1273	0.412
670	540	950	484.4	16470	34	531	0.620	1040	0.411
671	570	570	489.6	12240	25	393.5	0.622	1104	0.411
672	480	480	223.8	29770	133	1630	0.506	799	0.409
673	360	510	470.9	5180	11	175	0.520	1306	0.408
674	540	540	286.4	12600	44	499	0.505	914	0.408
675	450	750	453.9	10440	23	368	0.499	1289	0.406
676	1020	1020	428.9	27020	63	987	0.548	1353	0.405
677	540	990	425.5	9360	22	309	0.606	905	0.404
678	450	750	470.9	15540	33	518.5	0.527	1206	0.404
679	390	510	473.0	5676	12	191	0.522	1071	0.403
680	540	1082	466.7	8400	18	264.5	0.635	1063	0.403
681	420	780	472.9	17970	38	605.5	0.522	1291	0.401
682	450	810	532.5	4260	8	130.5	0.579	1120	0.399
683	480	480	388.4	7380	19	263	0.561	978	0.397
684	480	840	470.5	8940	19	300	0.596	956	0.397
685	360	360	326.7	2940	9	128	0.459	1474	0.397
686	900	900	422.9	13110	31	510	0.514	1294	0.397
687	540	540	437.1	6120	14	206	0.594	1001	0.396
688	540	1050	492.0	9840	20	345	0.570	903	0.396
689	560	560	186.5	6900	37	511	0.664	1033	0.395
690	780	1240	473.1	21290	45	697	0.537	1245	0.393
691	480	1360	424.0	22050	52	807.5	0.526	1493	0.393
692	480	480	415.0	7470	18	280	0.534	1213	0.392
693	510	510	420.2	9665	23	356.5	0.542	1122	0.391
694	480	480	417.5	10020	24	383.5	0.523	1491	0.391
695	570	1020	497.7	10950	22	355.5	0.616	919	0.388
696	450	450	368.6	7740	21	333	0.465	1282	0.388
697	540	540	415.4	5400	13	220	0.491	1025	0.388
698	450	670	281.5	10980	39	425	0.517	1168	0.387

<b>Redni broj</b>	<b><math>Q_i</math></b>	<b><math>Q_{8ms}</math></b>	<b><math>Q_{bsr}</math></b>	<b><math>Q_{buk}</math></b>	<b><math>N_b</math></b>	<b><math>L_{buk}</math></b>	<b><math>K_p</math></b>	<b><math>R</math></b>	<b><math>V_{max}</math></b>
699	330	330	219.2	5700	26	285.5	0.399	636	0.386
700	250	250	221.0	6630	30	442.5	0.737	798	0.385
701	570	570	489.0	4890	10	161.5	0.606	980	0.384
702	540	1250	500.4	23520	47	768	0.848	1104	0.382
703	840	1140	488.6	10260	21	319.5	0.564	1117	0.38
704	450	840	395.6	10680	27	412	0.456	1332	0.379
705	420	420	288.6	8080	28	340	0.475	1379	0.376
706	780	1020	457.3	20580	45	685	0.528	1302	0.373
707	510	990	472.1	17940	38	618	0.538	1366	0.373
708	480	480	366.3	8790	24	324	0.543	978	0.373
709	420	840	486.7	7300	15	240	0.539	1342	0.372
710	600	1100	503.1	24150	48	821	0.588	1004	0.372
711	480	480	482.0	7230	15	228.5	0.633	1219	0.371
712	540	1320	456.6	14610	32	483.5	0.604	1286	0.371
713	420	630	398.8	6780	17	249.5	0.753	816	0.371
714	350	350	305.5	3360	11	190	0.870	1107	0.371
715	540	540	475.7	9990	21	330.5	0.605	1279	0.37
716	450	1320	407.1	23610	58	935.5	0.505	1114	0.369
717	570	570	522.9	7320	14	236	0.620	996	0.368
718	510	510	448.3	24210	54	899.5	0.538	1341	0.367
719	510	510	483.0	4830	10	168.5	0.573	1105	0.367
720	900	900	422.9	13110	31	510	0.514	1060	0.367
721	570	570	443.3	11970	27	415	0.577	1079	0.367
722	510	990	490.0	7350	15	248	0.593	1062	0.366
723	450	450	396.3	7530	19	292	0.516	581	0.364
724	360	360	360.0	5040	14	249.5	0.404	922	0.364
725	540	540	506.7	4560	9	139.5	0.654	1256	0.364
726	540	990	474.2	17070	36	571	0.598	1203	0.362
727	480	960	458.9	16980	37	618	0.483	1159	0.361
728	420	420	344.5	10680	31	374.5	0.505	1051	0.361
729	480	480	441.1	11910	27	447.5	0.532	1221	0.36
730	510	1020	506.8	19260	38	608	0.634	1196	0.36
731	510	930	448.6	19290	43	686.5	0.562	1006	0.36
732	270	510	152.9	8410	55	606	0.683	2013	0.360
733	600	600	512.5	12300	24	405	0.607	1466	0.358
734	360	720	478.8	11490	24	375	0.613	1064	0.356
735	360	360	336.7	9090	27	310	0.515	1194	0.355
736	360	480	459.1	10560	23	353	0.526	1150	0.355
737	480	900	495.0	21780	44	677.5	0.570	1089	0.355
738	540	540	473.6	6630	14	227	0.584	1396	0.353
739	570	570	536.2	6970	13	219.5	0.635	1055	0.352
740	480	960	451.7	5420	12	195	0.556	1250	0.352
741	480	480	440.5	8370	19	305	0.549	1114	0.35
742	570	1090	527.3	15820	30	497	0.637	1116	0.349
743	480	960	458.3	13290	29	480	0.554	1131	0.349
744	570	780	511.4	10740	21	323.5	0.664	1271	0.346
745	570	1110	466.1	16780	36	557.5	0.602	1093	0.346
746	420	420	344.5	10680	31	374.5	0.505	1269	0.345
747	570	570	478.2	16260	34	537.5	0.605	1176	0.344
748	510	930	497.0	26840	54	880	0.610	1210	0.342

Redni broj	$Q_i$	$Q_{8ms}$	$Q_{bsr}$	$Q_{buk}$	$N_b$	$L_{buk}$	$K_p$	$R$	$V_{max}$
749	990	990	230.4	18200	79	840	0.381	1383	0.341
750	600	1170	244.5	26650	109	1642.5	0.301	1223	0.341
751	760	760	448.9	12570	28	407	0.618	1249	0.341
752	480	480	400.9	4410	11	163	0.541	899	0.341
753	420	770	323.4	9380	29	427	0.386	1072	0.34
754	480	480	414.0	6210	15	220	0.565	1300	0.34
755	510	780	411.2	6990	17	257.5	0.543	1249	0.34
756	450	870	416.1	28710	69	937.5	0.538	1467	0.338
757	450	450	304.3	6390	21	266.5	0.480	845	0.338
758	1020	1020	454.1	9990	22	360	0.555	876	0.338
759	450	450	373.3	3360	9	141	0.419	1271	0.337
760	510	510	468.0	7020	15	247	0.568	987	0.337
761	900	1050	502.5	6030	12	191	0.555	1209	0.336
762	390	780	486.0	12150	25	411.5	0.519	1207	0.336
763	360	760	433.5	8670	20	306	0.498	1189	0.335
764	540	1050	484.6	18900	39	635	0.595	1390	0.333
765	780	1000	492.9	6900	14	222.5	0.545	1296	0.332
766	420	720	445.4	5790	13	195	0.522	1215	0.332
767	480	480	420.0	13860	33	544.5	0.509	993	0.331
768	930	930	386.5	13140	34	455	0.508	1334	0.331
769	870	1170	524.1	15200	29	461.5	0.579	1186	0.33
770	480	930	414.4	22380	54	898.5	0.498	1323	0.329
771	250	470	157.2	5660	36	400	0.283	915	0.329
772	450	810	532.5	4260	8	130.5	0.579	1336	0.327
773	420	780	483.2	9180	19	312.5	0.588	1082	0.327
774	450	450	301.4	27730	92	1149.5	0.482	1668	0.326
775	420	420	395.5	8700	22	323	0.539	852	0.326
776	540	540	360.1	6482	18	285	0.455	1171	0.324
777	480	1380	277.7	31940	115	1360.5	0.470	1225	0.323
778	930	930	401.3	9630	24	362.5	0.531	1168	0.323
779	870	870	383.4	12270	32	492	0.438	1694	0.322
780	450	450	368.9	9960	27	421	0.473	1773	0.322
781	540	1050	506.7	23310	46	743	0.551	1211	0.321
782	1080	1080	509.2	19860	39	645.5	0.615	1076	0.321
783	510	990	455.4	11840	26	395	0.599	1181	0.321
784	450	450	365.5	7310	20	309	0.473	1334	0.321
785	540	980	504.5	11100	22	357	0.622	1233	0.32
786	570	890	444.2	15990	36	583	0.549	1871	0.319
787	1000	1000	367.9	10300	28	429.5	0.421	1135	0.317
788	510	510	455.2	13200	29	459.5	0.575	1248	0.315
789	510	870	474.5	12338	26	410	0.602	956	0.314
790	450	450	416.7	7500	18	278	0.540	905	0.312
791	420	420	336.7	3030	9	139	0.436	1703	0.311
792	420	1280	492.9	25630	52	840.5	0.587	1265	0.308
793	360	480	486.0	7290	15	254	0.504	1368	0.307
794	480	480	410.4	11490	28	449	0.512	1401	0.307
795	540	1020	450.0	23850	53	810.5	0.589	1166	0.307
796	1040	1040	494.0	9880	20	331	0.597	1162	0.307
797	360	510	470.9	5180	11	175	0.520	1540	0.306
798	600	900	337.9	23650	70	1060.5	0.413	1312	0.306

Redni broj	$Q_i$	$Q_{8ms}$	$Q_{bsr}$	$Q_{buk}$	$N_b$	$L_{buk}$	$K_p$	$R$	$V_{max}$
799	1140	1140	474.3	10910	23	315	0.693	1002	0.306
800	510	510	466.9	7470	16	276	0.541	1413	0.305
801	390	750	411.8	9060	22	328.5	0.485	1287	0.302
802	420	540	445.7	25850	58	939.5	0.530	1450	0.301
803	450	450	301.4	27730	92	1149.5	0.482	1427	0.301
804	540	540	496.2	12900	26	416.5	0.619	1059	0.301
805	570	1140	517.2	36720	71	1148.5	0.592	1416	0.300
806	540	540	474.0	14220	30	489.5	0.581	1347	0.3
807	510	990	485.8	17490	36	593.5	0.589	1341	0.3
808	510	990	460.9	5070	11	178.5	0.568	1025	0.3
809	540	990	470.0	19740	42	632	0.625	1310	0.299
810	510	960	473.5	17520	37	609	0.575	1445	0.299
811	1000	1000	367.9	10300	28	429.5	0.421	1367	0.298
812	230	550	167.4	4520	27	331.5	0.671	1214	0.298
813	450	450	439.6	10990	25	445	0.494	1341	0.297
814	480	480	426.0	12780	30	484.5	0.528	1116	0.297
815	470	470	182.3	10210	56	579.5	0.867	1390	0.297
816	540	540	496.8	12420	25	406	0.612	1216	0.295
817	1020	1020	462.6	8790	19	299.5	0.587	1121	0.295
818	750	750	335.0	7370	22	297	0.496	1407	0.294
819	420	420	343.0	10290	30	429.5	0.479	993	0.294
820	410	820	505.7	7080	14	209.5	0.676	1162	0.294
821	230	550	167.4	4520	27	331.5	0.671	805	0.294
822	540	540	286.4	12600	44	499	0.505	1316	0.293
823	870	1170	484.5	15990	33	522	0.538	1311	0.292
824	420	840	486.7	7300	15	240	0.539	1118	0.292
825	510	510	436.4	4800	11	169	0.568	1162	0.292
826	480	480	422.8	18180	43	680	0.535	1168	0.292
827	420	420	367.8	9930	27	449	0.442	1115	0.292
828	510	990	493.8	31110	63	1026	0.533	1310	0.289
829	540	540	469.2	17360	37	623.5	0.557	978	0.289
830	540	540	526.0	5260	10	166.5	0.632	1110	0.289
831	480	960	409.3	11460	28	435.5	0.526	1190	0.288
832	250	250	250.0	4250	17	254.5	0.334	928	0.287
833	1080	1080	472.7	33090	70	1073	0.542	1368	0.286
834	420	840	345.0	8280	24	355.5	0.466	1240	0.285
835	480	900	442.5	12390	28	438	0.566	1177	0.285
836	480	480	465.0	5580	12	188	0.594	1313	0.285
837	540	540	430.8	11200	26	375	0.597	950	0.283
838	480	870	426.5	17060	40	650	0.525	1291	0.282
839	510	960	416.5	10830	26	389	0.557	1216	0.282
840	390	780	367.5	5880	16	212.5	0.553	1190	0.282
841	480	480	463.6	10200	22	359.5	0.567	1497	0.2791
842	600	1110	457.5	25160	55	868.5	0.579	1639	0.279
843	570	570	492.9	10350	21	349.5	0.592	1164	0.278
844	630	630	320.7	9620	30	433	0.390	1275	0.277
845	390	630	432.5	10380	24	352	0.518	1234	0.276
846	360	720	524.4	8390	16	265.5	0.632	1374	0.276
847	510	510	475.0	5700	12	187	0.610	1172	0.276
848	570	570	456.0	11400	25	398.5	0.572	1131	0.276

<b>Redni broj</b>	<b><math>Q_i</math></b>	<b><math>Q_{8ms}</math></b>	<b><math>Q_{bsr}</math></b>	<b><math>Q_{buk}</math></b>	<b><math>N_b</math></b>	<b><math>L_{buk}</math></b>	<b><math>K_p</math></b>	<b><math>R</math></b>	<b><math>V_{max}</math></b>
849	480	480	417.0	12510	30	468	0.535	1323	0.275
850	510	990	472.1	17940	38	618	0.538	1596	0.274
851	450	870	385.7	5400	14	211.5	0.511	1047	0.274
852	420	420	336.7	3030	9	139	0.436	1464	0.273
853	450	450	368.9	9960	27	421	0.473	1542	0.272
854	540	1250	500.4	23520	47	768	0.848	1325	0.271
855	480	1320	528.0	32210	61	1081	0.607	1235	0.268
856	480	480	444.0	6660	15	237.5	0.561	1188	0.267
857	450	750	453.9	10440	23	368	0.499	1525	0.266
858	630	1050	475.1	23280	49	732	0.636	1407	0.266
859	510	510	512.1	9730	19	316.5	0.615	1130	0.264
860	480	960	480.5	19220	40	703	0.547	1450	0.262
861	540	930	414.4	13260	32	427	0.621	1341	0.261
862	450	780	411.8	9060	22	361	0.441	1309	0.258
863	450	450	411.2	6990	17	267	0.524	1292	0.258
864	540	990	486.2	14100	29	472.5	0.524	1287	0.255
865	480	960	422.3	16470	39	615.5	0.535	1238	0.255
866	480	960	418.8	13400	32	520	0.515	1379	0.254
867	1020	1020	454.1	9990	22	360	0.555	1232	0.254
868	480	900	495.0	21780	44	677.5	0.570	1308	0.253
869	480	480	410.0	13120	32	496	0.529	1146	0.253
870	540	1020	510.0	9180	18	294	0.624	1170	0.252
871	480	480	330.0	9570	29	404.5	0.473	1708	0.252
872	900	1020	434.0	6510	15	198.5	0.576	1337	0.251
873	270	480	177.9	15480	87	1032	0.738	1136	0.251
874	510	510	429.9	32670	76	1216	0.537	1205	0.25
875	510	960	473.5	17520	37	609	0.575	1672	0.25
876	480	480	415.0	7470	18	280	0.534	1443	0.25
877	540	540	481.9	7710	16	261	0.591	1319	0.25
878	510	510	504.7	8580	17	257.5	0.666	1098	0.249
879	420	420	343.0	10290	30	429.5	0.479	1228	0.248
880	900	900	440.0	7920	18	296.5	0.469	1430	0.247
881	870	870	454.6	17730	39	637	0.557	1296	0.247
882	480	480	415.0	12450	30	464	0.537	1111	0.247
883	420	840	486.7	7300	15	240	0.539	745	0.245
884	780	780	389.6	18310	47	780.5	0.452	1488	0.245
885	390	540	464.7	14870	32	516	0.555	1533	0.244
886	270	510	152.9	8410	55	606	0.683	1125	0.243
887	660	1230	470.0	12690	27	405	0.551	1341	0.241
888	570	570	466.7	9800	21	328	0.598	1119	0.241
889	540	540	466.5	9330	20	336	0.555	1490	0.241
890	420	420	333.8	5340	16	238	0.449	1421	0.239
891	540	540	492.2	18210	37	617.5	0.590	1208	0.235
892	360	360	360.0	5040	14	249.5	0.404	1364	0.235
893	510	990	460.9	5070	11	178.5	0.568	1665	0.235
894	450	450	434.1	22140	51	761	0.582	1235	0.235
895	390	510	473.0	5676	12	191	0.522	1286	0.235
896	510	930	442.5	7080	16	246.5	0.574	1325	0.232
897	860	860	480.0	12000	25	410	0.514	1166	0.232
898	480	480	437.5	10500	24	388.5	0.475	1135	0.231

<b>Redni broj</b>	<b><math>Q_i</math></b>	<b><math>Q_{8ms}</math></b>	<b><math>Q_{bsr}</math></b>	<b><math>Q_{buk}</math></b>	<b><math>N_b</math></b>	<b><math>L_{buk}</math></b>	<b><math>K_p</math></b>	<b><math>R</math></b>	<b><math>V_{max}</math></b>
899	360	360	360.0	5040	14	249.5	0.404	1135	0.231
900	540	1050	492.0	9840	20	345	0.570	1321	0.229
901	480	480	437.5	10500	24	388.5	0.475	741	0.228
902	840	840	376.9	6030	16	203	0.522	1094	0.228
903	510	510	483.8	7740	16	268	0.578	1181	0.228
904	510	510	397.5	4770	12	160	0.596	971	0.227
905	480	480	447.5	5370	12	199.5	0.538	1225	0.226
906	230	550	167.4	4520	27	331.5	0.671	1438	0.226
907	840	840	380.4	10650	28	389	0.548	1059	0.224
908	510	510	452.6	10410	23	376.5	0.553	1433	0.224
909	480	480	417.5	10020	24	383.5	0.523	1731	0.223
910	360	720	489.5	10770	22	350.5	0.540	1494	0.222
911	990	990	452.7	13580	30	475.5	0.571	1147	0.222
912	510	930	448.6	19290	43	686.5	0.562	1241	0.222
913	510	510	455.2	13200	29	459.5	0.575	1479	0.222
914	840	1080	486.3	11670	24	382.5	0.536	1277	0.22
915	540	990	425.5	9360	22	309	0.606	1124	0.219
916	350	350	305.5	3360	11	190	0.870	1339	0.219
917	480	480	366.3	8790	24	324	0.543	1838	0.218
918	510	510	483.8	7740	16	268	0.578	1415	0.217
919	480	480	388.4	7380	19	263	0.561	1199	0.216
920	480	900	433.8	5640	13	213.5	0.528	1140	0.216
921	450	840	401.3	6420	16	208	0.617	1235	0.216
922	450	870	413.7	7860	19	249	0.631	1194	0.215
923	540	1050	484.6	18900	39	635	0.595	1617	0.213
924	510	960	440.4	11010	25	397.5	0.554	1382	0.211
925	500	500	220.3	8370	38	532	0.774	1260	0.21
926	360	360	326.7	2940	9	128	0.459	1713	0.209
927	450	840	425.8	15330	36	557	0.530	1489	0.207
928	420	770	323.4	9380	29	427	0.386	1304	0.206
929	510	930	442.5	7080	16	246.5	0.574	1551	0.206
930	420	840	560.0	8400	15	252	0.667	1403	0.203
931	540	1380	346.7	33280	96	1473.5	0.625	1075	0.203
932	510	510	445.7	6240	14	232	0.538	1644	0.202
933	450	450	365.5	7310	20	309	0.473	1574	0.201
934	420	780	453.8	10890	24	394.5	0.485	1046	0.2
935	480	930	398.2	11150	28	415	0.537	1368	0.2
936	870	1170	524.1	15200	29	461.5	0.579	1419	0.199
937	480	480	400.0	13200	33	528	0.500	1038	0.199
938	540	540	473.6	6630	14	227	0.584	1632	0.199
939	250	250	221.0	6630	30	442.5	0.737	1111	0.199
940	540	540	501.8	5520	11	191	0.578	1482	0.197
941	420	570	525.8	21030	40	657	0.563	1319	0.196
942	540	540	455.5	5010	11	171.5	0.584	1187	0.196
943	480	480	410.4	11490	28	449	0.512	1640	0.195
944	960	960	508.3	9150	18	294.5	0.546	1461	0.194
945	250	470	157.2	5660	36	400	0.283	1492	0.194
946	400	400	377.8	6800	18	278	0.489	1090	0.194
947	840	1140	488.6	10260	21	319.5	0.564	1346	0.193
948	360	720	333.8	13350	40	476.5	0.560	1507	0.193

Redni broj	$Q_i$	$Q_{8ms}$	$Q_{bsr}$	$Q_{buk}$	$N_b$	$L_{buk}$	$K_p$	$R$	$V_{max}$
949	840	840	380.4	10650	28	389	0.548	1292	0.193
950	410	410	240.0	3600	15	166	0.381	1577	0.19
951	540	900	395.6	13450	34	476.5	0.500	1102	0.189
952	510	870	474.5	12338	26	410	0.602	1187	0.189
953	450	450	396.3	7530	19	292	0.516	1155	0.185
954	450	840	395.6	10680	27	412	0.456	1569	0.184
955	510	990	485.8	17490	36	593.5	0.589	1567	0.184
956	480	480	405.8	4870	12	187	0.521	1206	0.183
957	1080	1080	484.3	23730	49	761	0.624	1611	0.182
958	480	480	417.0	12510	30	468	0.535	1550	0.182
959	510	510	466.9	7470	16	276	0.541	1641	0.182
960	480	1320	405.6	10950	27	411	0.533	1369	0.181
961	250	250	171.3	3940	23	267	0.295	975	0.181
962	480	480	437.5	10500	24	388.5	0.475	924	0.18
963	480	480	404.8	31980	79	1242	0.515	1794	0.179
964	570	570	489.0	4890	10	161.5	0.606	1207	0.179
965	870	870	454.6	17730	39	637	0.557	1531	0.178
966	570	1140	540.0	16200	30	522	0.621	1241	0.178
967	420	780	476.7	12870	27	422	0.610	1107	0.178
968	450	450	218.5	10050	46	665.5	0.743	1381	0.178
969	630	630	320.7	9620	30	433	0.390	817	0.177
970	540	540	437.1	6120	14	206	0.594	1248	0.177
971	600	600	512.5	12300	24	405	0.607	1696	0.177
972	420	420	367.8	9930	27	449	0.442	1351	0.177
973	540	540	491.1	9330	19	312	0.598	1394	0.176
974	450	450	368.6	7740	21	333	0.465	1522	0.175
975	540	1020	492.5	5910	12	197	0.600	1390	0.175
976	480	480	223.8	29770	133	1630	0.506	1238	0.175
977	510	510	448.3	24210	54	899.5	0.538	1576	0.173
978	570	1140	540.0	16200	30	522	0.621	866	0.172
979	510	510	512.1	9730	19	316.5	0.615	1364	0.172
980	450	450	272.1	3810	14	160	0.476	1139	0.171
981	900	1020	434.0	6510	15	198.5	0.576	1569	0.168
982	390	780	367.5	5880	16	212.5	0.553	1418	0.167
983	500	500	220.3	8370	38	532	0.774	1493	0.165
984	1080	1080	484.3	23730	49	761	0.624	761	0.163
985	420	630	398.8	6780	17	249.5	0.753	1221	0.163
986	510	1020	453.6	11340	25	398	0.570	1261	0.162
987	990	990	496.7	4470	9	148.5	0.602	901	0.162
988	900	1050	502.5	6030	12	191	0.555	1442	0.161
989	780	780	389.6	18310	47	780.5	0.452	1723	0.161
990	600	600	545.5	6000	11	185.5	0.647	1225	0.161
991	540	990	474.0	9480	20	321.5	0.590	1496	0.16
992	1080	1080	484.3	23730	49	761	0.624	1382	0.16
993	480	480	439.4	7470	17	214.5	0.617	1219	0.159
994	570	570	240.6	12750	53	544	0.469	1008	0.159
995	390	390	236.8	4500	19	189.5	0.417	1152	0.157
996	450	450	407.5	4890	12	178.5	0.548	1414	0.157
997	510	510	475.0	5700	12	187	0.610	1399	0.157
998	250	250	250.0	4250	17	254.5	0.334	1142	0.154

<b>Redni broj</b>	<b><math>Q_i</math></b>	<b><math>Q_{8ms}</math></b>	<b><math>Q_{bsr}</math></b>	<b><math>Q_{buk}</math></b>	<b><math>N_b</math></b>	<b><math>L_{buk}</math></b>	<b><math>K_p</math></b>	<b><math>R</math></b>	<b><math>V_{max}</math></b>
999	480	480	441.7	20760	47	758.4	0.547	1444	0.151
1000	480	960	451.7	5420	12	195	0.556	1491	0.15
1001	450	450	411.2	6990	17	267	0.524	1524	0.149
1002	480	480	414.0	6210	15	220	0.565	1532	0.149
1003	540	900	395.6	13450	34	476.5	0.500	1317	0.148
1004	480	960	402.6	7650	19	296	0.517	1247	0.147
1005	560	560	186.5	6900	37	511	0.664	1251	0.147
1006	660	1230	470.0	12690	27	405	0.551	1575	0.146
1007	900	900	440.0	7920	18	296.5	0.469	1664	0.146
1008	510	990	490.0	7350	15	248	0.593	1288	0.145
1009	420	630	398.8	6780	17	249.5	0.753	1445	0.144
1010	270	510	152.9	8410	55	606	0.683	1772	0.143
1011	990	990	452.7	13580	30	475.5	0.571	1380	0.141
1012	450	870	385.7	5400	14	211.5	0.511	1280	0.14
1013	410	410	240.0	3600	15	166	0.381	1345	0.139
1014	500	500	233.0	4660	20	291.5	0.281	1635	0.139
1015	420	810	486.9	6330	13	220.5	0.505	1555	0.139
1016	330	330	219.2	5700	26	285.5	0.399	1503	0.138
1017	540	1020	492.5	5910	12	197	0.600	1619	0.136
1018	450	450	250.0	7500	30	336	0.446	1616	0.135
1019	250	470	157.2	5660	36	400	0.283	1729	0.135
1020	400	400	377.8	6800	18	278	0.489	1322	0.135
1021	570	1140	540.0	16200	30	522	0.621	1012	0.132
1022	510	510	445.7	6240	14	232	0.538	1884	0.131
1023	450	450	250.0	7500	30	336	0.446	1375	0.126
1024	390	390	236.8	4500	19	189.5	0.417	1386	0.124
1025	480	480	428.4	10710	25	399	0.472	799	0.123
1026	420	780	453.8	10890	24	394.5	0.485	1276	0.118
1027	510	990	460.9	5070	11	178.5	0.568	1906	0.117
1028	450	450	373.3	3360	9	141	0.419	1506	0.116
1029	250	250	171.3	3940	23	267	0.295	1560	0.116
1030	540	540	466.5	9330	20	336	0.555	1720	0.115
1031	480	480	444.0	6660	15	237.5	0.561	1417	0.113
1032	540	540	506.7	4560	9	139.5	0.654	1494	0.109
1033	540	990	498.0	9960	20	317	0.628	1524	0.104
1034	420	570	525.8	21030	40	657	0.563	1553	0.102
1035	630	630	320.7	9620	30	433	0.390	1064	0.095
1036	270	480	177.9	15480	87	1032	0.738	2002	0.093
1037	270	270	239.0	11470	48	667	0.847	1830	0.093
1038	420	420	322.1	4510	14	191	0.419	1101	0.080
1039	420	420	322.1	4510	14	191	0.419	1965	0.077
1040	480	480	428.4	10710	25	399	0.472	1552	0.067
1041	250	250	171.3	3940	23	267	0.295	1798	0.064
1042	270	270	239.0	11470	48	667	0.847	1178	0.061
1043	480	480	428.4	10710	25	399	0.472	1318	0.06



## PRILOG BR. 2

Redni broj	$Q_i$	$Q_{8ms}$	$Q_{bsr}$	$Q_{buk}$	$N_b$	$L_{buk}$	$K_p$	$R$	$V_{max}$
1	420	840	555.4	20550	37	623	0.660	633	2.515
2	510	780	411.2	6990	17	257.5	0.543	495	2.274
3	540	1050	477.1	30060	63	1007.5	0.597	688	2.171
4	480	480	400.0	13200	33	528	0.500	505	2.071
5	540	1080	505.3	28800	57	937.5	0.614	675	1.929
6	1020	1020	480.9	10580	22	360	0.588	587	1.801
7	600	1100	503.1	24150	48	821	0.588	660	1.729
8	480	480	424.7	13590	32	524.5	0.518	479	1.6661
9	480	930	398.2	11150	28	415	0.537	552	1.604
10	510	510	431.0	8620	20	304	0.567	688	1.561
11	540	540	309.4	15160	49	641.5	0.473	739	1.453
12	450	780	357.9	10020	28	410	0.489	741	1.429
13	840	1140	488.6	10260	21	319.5	0.564	708	1.399
14	570	570	501.6	16050	32	508	0.632	777	1.374
15	930	930	423.9	13140	31	458.5	0.573	910	1.34
16	510	990	490.0	7350	15	248	0.593	530	1.324
17	500	950	337.9	12840	38	623.5	0.412	649	1.301
18	510	510	412.1	9890	24	360	0.549	738	1.276
19	480	870	426.5	17060	40	650	0.525	1066	1.239
20	450	840	395.6	10680	27	412	0.456	789	1.217
21	420	840	560.0	8400	15	252	0.667	667	1.19
22	360	510	482.9	10140	21	331.5	0.538	762	1.168
23	480	480	460.0	4140	9	148	0.559	748	1.145
24	540	540	362.1	21000	58	745.5	0.563	835	1.126
25	540	540	455.5	5010	11	171.5	0.584	684	1.098
26	510	510	504.7	8580	17	257.5	0.666	656	1.072
27	780	780	405.7	17850	44	645	0.553	1013	1.061
28	510	510	482.7	5310	11	175.5	0.605	743	1.033
29	540	1050	497.5	23880	48	822.5	0.581	823	1.01
30	540	1080	471.5	24990	53	829	0.603	885	0.979
31	450	450	378.0	9450	25	380	0.437	1009	0.962
32	510	510	412.1	9890	24	360	0.549	943	0.949
33	600	1110	457.5	25160	55	868.5	0.579	1401	0.939
34	540	540	536.0	8040	15	253	0.636	666	0.922
35	480	480	424.7	13590	32	524.5	0.518	922	0.894
36	510	510	412.1	9890	24	360	0.549	656	0.87
37	720	1020	482.9	10140	21	304.5	0.666	1146	0.843
38	540	990	498.0	9960	20	317	0.628	671	0.822
39	480	480	426.0	12780	30	484.5	0.528	886	0.808
40	450	450	368.6	7740	21	333	0.465	702	0.792
41	570	1050	511.6	19440	38	620	0.627	1093	0.786
42	510	510	483.0	4830	10	168.5	0.573	891	0.77
43	570	570	461.8	15240	33	463	0.658	759	0.751
44	870	1170	484.5	15990	33	522	0.538	1084	0.733
45	660	1230	470.0	12690	27	405	0.551	819	0.715
46	570	570	492.9	10350	21	349.5	0.592	947	0.702
47	840	840	403.2	13710	34	500.5	0.548	698	0.688
48	510	510	397.5	4770	12	160	0.596	677	0.678

Redni broj	$Q_i$	$Q_{8ms}$	$Q_{bsr}$	$Q_{buk}$	$N_b$	$L_{buk}$	$K_p$	$R$	$V_{max}$
49	570	570	536.2	6970	13	219.5	0.635	746	0.669
50	570	570	456.0	11400	25	398.5	0.572	908	0.652
51	480	480	441.1	11910	27	447.5	0.532	988	0.641
52	510	990	455.4	11840	26	395	0.599	959	0.633
53	1020	1020	462.6	8790	19	299.5	0.587	785	0.621
54	420	570	513.2	17450	34	555	0.557	1088	0.611
55	840	1080	486.3	11670	24	382.5	0.536	1045	0.6
56	540	1080	511.3	11760	23	385	0.611	1051	0.583
57	510	990	493.8	31110	63	1026	0.533	1072	0.571
58	480	480	439.4	7470	17	214.5	0.617	792	0.561
59	570	890	444.2	15990	36	583	0.549	993	0.554
60	540	540	474.0	14220	30	489.5	0.581	1121	0.539
61	510	960	444.1	12880	29	472	0.546	1115	0.526
62	540	540	492.2	18210	37	617.5	0.590	971	0.515
63	450	670	281.5	10980	39	425	0.517	940	0.506
64	360	510	482.9	10140	21	331.5	0.538	1150	0.497
65	540	540	526.0	5260	10	166.5	0.632	886	0.482
66	450	780	411.8	9060	22	361	0.441	1080	0.473
67	510	510	302.1	17220	57	783	0.440	1121	0.466
68	420	1280	492.9	25630	52	840.5	0.587	1037	0.459
69	480	480	473.1	16560	35	568.5	0.583	963	0.454
70	360	720	333.8	13350	40	476.5	0.560	1278	0.445
71	540	990	474.0	9480	20	321.5	0.590	1270	0.437
72	510	510	504.7	8580	17	257.5	0.666	878	0.426
73	540	1080	485.4	13590	28	448	0.607	1055	0.418
74	510	510	435.0	13050	30	485.5	0.538	1135	0.414
75	480	900	433.8	5640	13	213.5	0.528	910	0.407
76	480	1320	405.6	10950	27	411	0.533	1138	0.397
77	600	900	337.9	23650	70	1060.5	0.413	1086	0.391
78	480	480	441.0	8820	20	326	0.541	1060	0.384
79	450	840	425.8	15330	36	557	0.530	1253	0.371
80	570	570	439.3	29430	67	995	0.592	1187	0.367
81	480	480	410.0	13120	32	496	0.529	928	0.361
82	480	480	447.5	5370	12	199.5	0.538	995	0.353
83	480	480	399.1	9180	23	316.5	0.580	888	0.344
84	470	470	182.3	10210	56	579.5	0.867	1621	0.339
85	480	480	399.1	9180	23	316.5	0.580	1264	0.333
86	510	510	398.7	11960	30	448.5	0.533	1104	0.326
87	510	1020	506.8	19260	38	608	0.634	1432	0.321
88	330	330	219.2	5700	26	285.5	0.399	1276	0.311
89	420	810	486.9	6330	13	220.5	0.505	1318	0.303
90	570	1020	497.7	10950	22	355.5	0.616	1144	0.299
91	510	960	444.1	12880	29	472	0.546	1339	0.294
92	540	1380	346.7	33280	96	1473.5	0.625	1298	0.292
93	1140	1140	474.3	10910	23	315	0.693	1230	0.284
94	390	540	464.7	14870	32	516	0.555	1295	0.276
95	510	1020	453.6	11340	25	398	0.570	1036	0.268
96	450	1320	407.1	23610	58	935.5	0.505	1342	0.257
97	270	480	177.9	15480	87	1032	0.738	1763	0.251
98	450	450	407.5	4890	12	178.5	0.548	1184	0.247

<b>Redni broj</b>	<b><i>Q<sub>i</sub></i></b>	<b><i>Q<sub>8ms</sub></i></b>	<b><i>Q<sub>bsr</sub></i></b>	<b><i>Q<sub>buk</sub></i></b>	<b><i>N<sub>b</sub></i></b>	<b><i>L<sub>buk</sub></i></b>	<b><i>K<sub>p</sub></i></b>	<b><i>R</i></b>	<b><i>V<sub>max</sub></i></b>
99	570	890	444.2	15990	36	583	0.549	1630	0.239
100	480	480	223.8	29770	133	1630	0.506	1028	0.231
101	480	480	366.3	8790	24	324	0.543	1598	0.224
102	450	450	404.5	11730	29	486.5	0.482	1332	0.217
103	480	480	404.8	31980	79	1242	0.515	1565	0.208
104	450	450	250.0	7500	30	336	0.446	772	0.2
105	570	570	523.3	4710	9	149	0.632	1183	0.194
106	250	250	221.0	6630	30	442.5	0.737	1328	0.185
107	510	510	468.0	7020	15	247	0.568	1214	0.18
108	1080	1080	526.7	9480	18	306	0.620	1194	0.177
109	360	360	336.7	9090	27	310	0.515	1428	0.169
110	420	420	395.5	8700	22	323	0.539	1077	0.161
111	360	480	486.0	7290	15	254	0.504	1602	0.151
112	480	480	440.5	8370	19	305	0.549	1345	0.145
113	500	500	233.0	4660	20	291.5	0.281	1401	0.136
114	450	450	396.3	7530	19	292	0.516	1382	0.119
115	420	420	322.1	4510	14	191	0.419	1726	0.098

