

UNIVERZITET U BANJOJ LUCI

RUDARSKI FAKULTET

Mr Ljubica Figun

**MODELIRANJE OSCILOVANJA STIJENSKE MASE PRI
MINIRANJU U FUNKCIJI ZAŠTITE OBJEKATA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Prijedor, 2022.



UNIVERZITET U BANJOJ LUCI
RUDARSKI FAKULTET



Mr Ljubica Figun

**MODELIRANJE OSCILOVANJA STIJENSKE MASE PRI
MINIRANJU U FUNKCIJI ZAŠTITE OBJEKATA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Prijedor, 2022.



UNIVERZITET U BANJOJ LUCI
RUDARSKI FAKULTET



MSc Ljubica Figun

**MODELING OF BLAST-INDUCED ROCK MASS
OSCILLATION IN FUNCTION OF PROTECTING
OBJECTS**

DOCTORAL DISSERTATION

Prijedor, 2022

INFORMACIJE O MENTORU I DOKTORSKOJ DISERTACIJI

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

Naslov doktorske disertacije: MODELIRANJE OSCILOVANJA STIJENSKE MASE PRI MINIRANJU U FUNKCIJI ZAŠTITE OBJEKATA

Rezime:

Predmet doktorske disertacije je istraživanje uticaja potresa od miniranja na građevinske objekte, u funkciji zaštite objekata. U disertaciji su formirani modeli koji omogućavaju preciznu procjenu sigurnosnih rastojanja od mjesta miniranja, za različite tipove građevinskih objekata, korišćenjem savremenih matematičkih metoda višestruke linearne regresije (MLR) i vještačkih neuronskih mreža (ANN), na primjerima površinskog kopa "Hardovac" - Ševarlije i lokaciji poslovno-stambene zgrade Skyline - Beograd. Modeli su razvijeni kao nelinearne funkcije karakteristika oscilovanja stijenske mase (brzine i frekvencije oscilovanja) od bušačkih i minerskih parametara: ukupne količine eksploziva, količine eksploziva po intervalu usporenja, broja bušotina, dužine bušotina, rastojanja između bušotina u redu, rastojanja između redova bušotina, rastojanja od mjernog mjesta do mjesta miniranja i sigurnosnih rastojanja. Sprovedena istraživanja u okviru disertacije bila su terenska mjerenja i prikupljanje podataka a zatim i matematička analiza rezultata. Dobijeni rezultati istraživanja u doktorskoj disertaciji ukazuju da i MLR i ANN pristup pružaju statistički značajne modele procjene, koji omogućavaju izračunavanje sigurnosnih rastojanja za različitu količinu eksploziva. Izvršena analiza ukazuje na postojanje statistički značajnih dvofaktorskih interakcija, između svih analiziranih ulaznih parametara. Rastojanje između bušotina u redu, dužine minskih bušotina i broj bušotina imaju značajan negativan nelinearni uticaj na frekvenciju oscilovanja, dok rastojanje od mjernog mjesta do mjesta miniranja i rastojanje između redova bušotina imaju mali nelinearni negativni uticaj na frekvenciju oscilovanja. S druge strane, ukupna količina eksploziva i količina eksploziva po intervalu usporenja imaju značajan pozitivan uticaj na frekvenciju oscilovanja. Istraživanja u gradskoj sredini pokazuju da sa povećanjem rastojanja od mjesta mjerenja do mjesta miniranja opada brzina oscilovanja stijenske mase, dok ista raste sa povećanjem količine eksploziva po intervalu

usporenja. Ukupna količina eksploziva nema statistički značajan uticaj u razmatranom rasponu na jačinu potresa od miniranja. Uspostavljena korelacija između maksimalne brzine i frekvencije oscilovanja, sigurnosnih rastojanja od objekta i ukupne količine eksploziva u zavisnosti od kategorije konstrukcije, a u funkciji zaštite građevinskih objekata predstavlja originalni naučni doprinos. Dobijeni rezultati imaju inženjerski doprinos jer mogu poslužiti kao smjernica za uspostavljanje slične korelacije za druge kamenolome krečnjaka i čvrstih stijena. Na ovaj način potreba za čestim mjerenjima vibracija izazvanih eksplozijom može se značajno smanjiti, dok bi sigurnost objekata u okviru određenog kamenoloma i u neposrednoj blizini miniranja bila znatno povećana.

Ključne riječi: miniranje, građevinski objekat, predviđanje potresa, sigurno rastojanje, model, višestruka linearna regresija, vještačke neuronske mreže

Naučna oblast: Inženjerstvo i tehnologija

Naučno polje: Inženjerstvo životne sredine

Klasifikaciona oznaka (CERIF): 340 Rudarstvo

UDK: 624.138.29:721(043.3)

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

INFORMATION ON MENTOR AND DOCTORAL DISSERTATION

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

Title of doctoral dissertation: MODELING OF BLAST-INDUCED ROCK MASS OSCILLATION IN FUNCTION OF PROTECTING OBJECTS

Summary:

The subject of the doctoral dissertation is the research of the impact of blast induced oscillation on construction objects, in function of protecting objects . In the dissertation, prognostic models are formed that enable accurate estimation of safety distances from the place of blasting for different types of constructions, using modern mathematical methods of multiple linear regression (MLR) and artificial neural networks (ANN), on examples of the limestone quarry “Hardovac” - Sevarlije and the location of the commercial and residential building Skyline - Belgrade. The models were developed as nonlinear functions of rock mass vibration characteristics (peak particle velocity and vibration frequency) on drilling and blasting parameters: total and immediately detonated amount of explosive, number of boreholes and their average depth, distances between the boreholes and between the arrays of boreholes and between the blasting and recording point. The conducted research within the dissertation consisted of field measurement and collection data and mathematical analysis of the results. The results obtained by the research in the doctoral dissertation indicate that both the MLR and ANN approach provide statistically significant estimation models, which enable the calculation of safety distances for different total amounts of explosives. The performed analysis indicates the existence of statistically significant two-factor interactions between all analyzed the examined input factors. The distances between the boreholes, the number of boreholes and their average depth have a strong negative nonlinear effect on the vibration frequency, while the distances from the blasting point to the blasting site and the distances between arrays have a weak nonlinear negative effect on the blasting frequency. On the other hand, the total amount of explosives and amount of explosive immediately detonated have a strong positive effect on the vibration frequency. Research in the urban environment shows that with increasing distance from the measurement site to the blasting site, the oscillation rate of the rock mass decreases, while it increases with the amount of explosives per deceleration interval.

The total amount of explosives does not have a statistically significant effect in the considered range on the strength of vibration from blasting. The established correlation between peak particle velocity and vibration frequency of oscillation, safety distances from the object and the total amount of explosives depending on the category of constructions, and in function of protecting objects represents an original scientific contribution. The obtained results have an engineering contribution because they can serve as a guideline for establishing a similar correlation for other limestone and solid rock quarries. In this way, the need for frequent measurements of vibrations caused by explosions can be significantly reduced, while the safety of facilities within the quarry and in the immediate vicinity of blasting would be significantly increased.

Key words: Blasting, construction object, prediction of vibrations, safe distance, model, multiple linear regression, artificial neural networks

Scientific area: Engineering and technology

Scientific field: Environmental engineering

Classification Code (CERIF): T 340 Mining

UDK: 624.138.29:721(043.3)

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

Mojoj porodici

Zahvaljujem se mentoru dr Srđanu Kostiću, vanrednom profesoru, kolegama Goranu Agbabi i Darku Klisari, dr Slobodanu Trajkoviću, redovnom profesoru u penziji, mojoj Lidi, porodici i prijateljima.

SADRAŽAJ

1	UVOD	1
1.1	Predmet i cilj istraživanja	5
1.2	Polazne hipoteze	8
1.3	Primjenjene metode istraživanja.....	8
1.4	Struktura disertacije	9
2	PREGLED REZULTATA PRETHODNIH ISTRAŽIVANJA	11
2.1	Primjena vještačkih neuronskih mreža za predikciju potresa od miniranja.....	15
3	OPŠTI DIO.....	22
3.1	Upotreba miniranja u rudarstvu	22
3.1.1	Efekti miniranja i nastanak seizmički talasa	23
3.1.2	Vrste i parametri seizmičkih talasa	26
3.1.3	Mjerenje potresa seizmografom	28
3.2	Pregled kamenoloma u Republici Srpskoj gdje se primjenjuje miniranje.....	29
3.3	Analiza uticaja potresa od miniranja na objekte	32
3.3.1	Parametri stijenske mase	32
3.3.2	Parametri miniranja	33
3.3.3	Karakterizacija objekata	34
3.3.4	Standardi koji se koriste za ocjenu uticaja miniranja na objekte	36
3.3.4.1	Propisi u Sjedinjenim Američkim Državama.....	36
3.3.4.2	Ruski standard	37
3.3.4.3	Kriterijum Akademije Nauka Rusije.....	38
3.3.4.4	Njemački standard.....	39
3.3.4.5	Standard u Velikoj Britaniji	40
3.3.4.6	Standard u Švajcarskoj	40
3.3.4.7	Australijski standard.....	41
3.4	Primjeri uticaja potresa od miniranja na objekte iz inženjerske prakse.....	41
3.4.1	Reakcija objekata na prolazak seizmičkih talasa	41
3.4.2	Uticaj seizmičkog talasa na objekte	42
3.4.2.1	Mehanizam nastanka oštećenja	43
3.4.2.2	Granična brzina oscilovanja	47
3.4.3	Ocjena stepena ugroženosti objekta	48
3.5	Predviđanje potresa od miniranja	49
3.5.1	Modeli za predviđanje potresa od miniranja	51
3.5.2	Kontrola potresa predviđanjem brzine oscilovanja pomoću regresionog modela	54
4	METODOLOGIJA OCJENE UTICAJA POTRESA OD MINIRANJA NA OBJEKTE	56
4.1	Opšte	56
4.2	Terenski dio istraživanja.....	57
4.2.1	Površinski kop “Hardovac” - Ševarlije	58
4.2.2	Poslovno-stambeni kompleks Skyline - Beograd.....	60
4.3	Analiza terenski prikupljenih podataka	62

4.3.1	Statistička analiza rezultata mjerenja	63
4.3.1.1	Regresiona analiza.....	63
4.3.1.2	Analiza varijance, ANOVA	66
4.3.2	Primjena metode neuronskih mreža	72
4.3.2.1	Osnovni nelinearni model vještačkog neurona	72
4.3.2.2	Arhitektura neuronskih mreža	74
4.3.2.3	Obučavanje vještačkih neuronskih mreža	75
4.3.2.4	Višeslojne vještačke neuronske mreže sa prostiranjem signala unaprijed	76
4.3.2.5	Levenberg-Markart algoritam obučavanja	80
5	REZULTATI ISTRAŽIVANJA	84
5.1	Rezultati mjerenja na terenu	84
5.1.1	Osnovni podaci za površinski kop “Hardovac” - Ševarlije.....	84
5.1.2	Osnovni podaci o lokaciji objekta Skyline.....	88
5.1.3	Rezultati terenskih istraživanja na PK “Hradovac“ - Ševarlije.....	91
5.1.3.1	Softver za prikaz podataka izmjernih potresa od miniranja	95
5.1.4	Rezultati terenskih istraživanja na lokaciji objekta Skyline - Beograd.....	100
5.2	Modelovanje	103
5.2.1	Analiza registrovanih podataka za PK “Hardovac“ – Ševarlije	105
5.2.1.1	Određivanje sigurnosnih rastojanja uslijed dejstva seizmičkih potresa	106
5.2.1.2	Modeli procjene kriterijuma	109
5.2.1.3	Modeli procjene frekvencije vibracija primjenom višestruke linearne regresije	111
5.2.2	Analiza snimljenih podataka za lokaciju objekta Skyline – Beograd	113
5.3	Formiranje modela predikcije uticaja potresa od miniranja na objekte.....	116
5.3.1	Primjena ANN za predviđanje potresa za PK “Hardovac“ - Ševarlije	117
5.3.1.1	Modeli za procjenu minimalnih sigurnosnih rastojanja	119
5.3.2	Primjena ANN za predviđanje potresa na lokaciji Skyline Beograd	125
6	DISKUSIJA I KOMENTARI ISTRAŽIVANJA	129
6.1	Ocjena uticaja miniranja na okolne objekte na površinskom kopu “Hardovac” - Doboj.....	129
6.2	Ocjena uticaja miniranja na objekte u gradskim uslovima lokacija Skyline - Beograd ...	130
7	ZAKLJUČAK	132
7.1	Opšti pregled.....	132
7.2	Naučni doprinos istraživanja	133
7.3	Mogućnost primjene formiranih modela u inženjerskoj praksi	134
7.4	Preporuke za buduća istraživanja	134
8	LITERATURA.....	136
9	PRILOZI.....	148

SPISAK SLIKA

Slika 1. 1 Kamenolomi TGK u Republici Srpskoj gdje se koristi miniranje [Malbašić 2021].....	4
Slika 1. 2 Izgled i pozicije karakterističnih oštećenja na objektima djelovanjem seizmičkih talasa pri miniranjima na površinskim kopovima [Stojadinović 2009]	6
Slika 1. 3 Vidljiva oštećenja na okolnim građevinskim objektima [Vasović 2016].....	6
Slika 1. 4 Karakterističan oštećenja od miniranja na različitim objektima [Oncu i dr. 2015]	7
Slika 3. 1 Način raspodjela energije eksploziva [Figun i dr. 2016]	24
Slika 3. 2 Transformacija impulsnog talasnog poremećaja pri udaljavanju od mjesta detonacije od udarnog talasa, preko talasa pritiska do elastičnog talasa [Stojadinović 2009]	25
Slika 3. 3 Regije dejstva eksplozije, 1-regija sprašivanja, 2,3- regija drobljenja (zona intenzivnog (2) i smanjenog razaranja (3), 4- regija potresa (zona elastičnih deformacija) [Savić 2000]	26
Slika 3. 4 Prostiranje seizmičkih talasa i oblik deformacije koje izazivaju: a) uzdužni (primarni P- talasa), b) poprečni (sekundarni S-talasa), c) površinski Rejljevi talasi, d) Loveovi talasi [Stojadinović 2009]	27
Slika 3. 5 Komponente oscilovanja [Konya i Walter 1990]	28
Slika 3. 6 Kamenolomi u Republici Srpskoj [Majstorović i dr 2015].....	30
Slika 3. 7 Granična brzina oscilovanja tla u funkciji frekvencije [Siskind i dr 1980]	37
Slika 3. 8 Grafički prikaz graničnih vrijednosti za standard DIN 4150-3 [DIN 4150 1999].....	39
Slika 3. 9 Vibraciona ili X pukotina [Konya i Walter 1990]	43
Slika 3. 10 Uticaj talasne dužine seizmičkih talasa na oštećenje objekata λ - talasna dužina, l_0 – dimenzija objekta [Tamrok 1984]	44
Slika 3. 11 Neka oštećenja karakteristična za uticaj seizmičkih talasa izazvanih miniranjima i njihove pozicije na objektima [Stojadinović 2009].....	45
Slika 3. 12 Otpor savijanja, dijagonalne pukotine i oštećenja uglova na zgradama od čerpića [Oncu i dr. 2015]	45
Slika 3. 13 Horizontalna, dijagonalna nepravilna oštećenja na zgradama od opeke i kamena [Oncu i dr. 2015]	45
Slika 3. 14 Oštećenja ispunjenih i nenosivih zidova u AB zgradama [Oncu i dr. 2015]	46

Slika 3. 15 Glavna upravna zgrada i štetni efekti vibracija tla na njene unutrašnje zidove, rudnik bakra Sungun [Faramarzi i dr. 2014]	46
Slika 3. 16 Tipična oštećenja na građevinskim objektima [Vasović 2016]	46
Slika 3. 17 Poređenje brzine i frekvencije oscilovanja tla sa oštećenjima objekata [Siskind i dr. 1980].....	47
Slika 4. 1 Seizmograf Mini SuperGraph, Nomis Seismographs [Nomis 2008].....	59
Slika 4. 2 Seizmograf Mini Supergraph u toku mjerenja, a) prikaz monitora u toku mjerenja b) postavljen seizmografa pri mjerenju [foto Lj. Figun]	60
Slika 4. 3 Način pričvršćivanja seizmografa na čvrstu podlogu a) beton, pomoću gipsa b) pločice, pomoću plastelina [foto Lj. Figun].....	61
Slika 4. 4 Postavljanje seizmografa u odnosu na izvor vibracija [ABEM 2010].....	61
Slika 4. 5 Uporedni prikaz realnog biološkog neurona (a) i vještačkog neurona (b) [Reed i dr. 1998].....	73
Slika 4. 6 Primjer višeslojne vještačke neuronske mreže sa prostiranjem signala unaprijed [Kostić 2014].....	77
Slika 4. 7 Postupak postupnog opadanja greške pri podešavanju jačine veza između ulaznih i skrivenih/izlaznih podataka u mreži (delta pravilo) [Krose i Smagt 1996]	78
Slika 4. 8 Postupno opadanje greške u prostoru jačina veza: (a) za nisku vrijednost brzine obučavanja; (b) za visoku vrijednost brzine obučavanja; (c) sa visokom vrijednošću brzine obučavanja i dodatim momentom [Krose i Smagt 1996].....	80
Slika 4. 9 Grafički prikaz metodologija istraživanja.....	83
Slika 5. 1 Lokacija kamenoloma “Hardovac“ [Kostić i Figun 2022]	85
Slika 5. 2 Površinski kop krečnjaka “Hardovac” i angažovana oprema u radu. 1-mobilno postrojenje za prosijavanje, 2-mobilna čeljusna drobilica, 3-hidraulični bager, 4-utovarač,5-kamion kiper, 6-stacionarno postrojenje za usitnjavanje i prosijavanje [Marinović 2020]	87
Slika 5. 3 Bušenje minskih bušotina udarno-rotacionom bušilicom Atlas Copco FlexiROC T35 na površinskom kopu “Hardovac” [foto Lj. Figun]	87
Slika 5. 4 Lokacija stambeno-poslovnog objekta Skyline Beograd [Trajković i Tomković 2019]	89

Slika 5. 5 Fotografski snimak lokacije minskih polja MP-1/I, MP-1/II i MP-2/I [Figun i dr. 2021]	90
Slika 5. 6 Učestalost pojavljivanja rastojanja između bušotina	93
Slika 5. 7 Učestalost pojavljivanja rastojanja između redova bušotina	93
Slika 5. 8 Učestalost pojavljivanja dubine bušotine	93
Slika 5. 9 Učestalost pojavljivanja broja bušotina	94
Slika 5. 10 Učestalost pojavljivanja količine eksploziva po intervalu usporenja	94
Slika 5. 11 Učestalost pojavljivanja ukupne količine eksploziva	94
Slika 5. 12 Učestalost pojavljivanja rastojanja od mjesta miniranja do mjesta mjerenja	95
Slika 5. 13 Učestalost pojavljivanja frekvencije	95
Slika 5. 14 Izgled odštampanog prikaza podataka izmjerenih potresa od miniranja (05.07.2013.god.) primjenom Mini SuperGraph seizmografa [Dnevnik miniranja Carmeus]	97
Slika 5. 15 Grafik standarda DIN 4150-3 za procjenu dejstava potresa od miniranja na okolne objekte za izmjerene podatke u 2012. godini	98
Slika 5. 16 Grafik standarda DIN 4150-3 za procjenu dejstava potresa od miniranja na okolne objekte za izmjerene podatke u 2013. godini	98
Slika 5. 17 Grafik standarda DIN 4150-3 za procjenu dejstava potresa od miniranja na okolne objekte za izmjerene podatke u 2014. godini	99
Slika 5. 18 Grafik standarda DIN 4150-3 za procjenu dejstava potresa od miniranja na okolne objekte za izmjerene podatke u 2015. godini	99
Slika 5. 19 Učestalost pojavljivanja količine eksploziva po intervalu usporenja	101
Slika 5. 20 Učestalost pojavljivanja ukupne količine eksploziva	102
Slika 5. 21 Učestalost pojavljivanja rastojanja od mjesta miniranja do mjesta mjerenja	103
Slika 5. 22 Učestalost pojavljivanja maksimalne brzine oscilovanja	103
Slika 5. 23 Sigurno rastojanje od minskog polja do objekata u funkciji dozvoljene količine eksploziva i frekvencije oscilovanja prema standardu DIN 4150 [Kostić i Figun 2022]	104
Slika 5. 24 a) Njemački DIN 4150 i b) američki standard za granične brzine oscilovanja čestica izazvanih miniranjem [Kostić i Figun 2022]	106
Slika 5. 25 Dijagram predloženog procesa obrade podataka [Kostić i Figun 2022]	106

Slika 5. 26 Odnosi između PVV i frekvencije prema DIN 4150 i američkom standardu za različite tipove objekata: a) DIN4150 industrijske zgrade i kancelarije, b) stambene kuće, c) spomenici i istorijske građevine, d) američki standard [Kostić i Figun 2022]	110
Slika 5. 27 Grafikon normalne raspodjele ostataka (a) i Kukova rastojanja, (b) za model (5.15) [Kostić i Figun 2022]	112
Slika 5. 28 Statistički značajne dvofaktorske interakcije iz jednačine (5.15): a) rastojanje između redova bušotina, D_a (m) i rastojanje između bušotina, D_b (m); b) količina eksploziva po intervalu usporenja, Q_i (kg) i rastojanje između bušotina, D_b (m); c) ukupna količina eksploziva, Q_{max} (kg) i rastojanje između bušotina, D_b (m); d) ukupna količina eksploziva, Q_{max} (kg) i dubina bušotine DR (m); e) ukupna količina eksploziva, Q_{max} (kg) i broj bušotina, N i f) ukupna količina eksploziva, Q_{max} (kg) i količina eksploziva po intervalu usporenja, Q_i (kg) [Kostić i Figun 2022]	113
Slika 5. 29 Uticaj pojedinih kontrolnih faktora na PPV [Figun i dr. 2021]	114
Slika 5. 30 Procjena maksimalne brzine oscilovanja korišćenjem konvencionalnog prediktora 5.16 [Figun i dr. 2021]	115
Slika 5. 31 Regresijski grafikoni za model (5.19) a) treniranje, b) validacija i c) testiranje (Kostić i Figun 2022)	118
Slika 5. 32 Distribucija grešaka za model (5.19). Crni binovi označavaju raspodjelu greške za trening set, tamnosivi binovi na raspodjelu greške za validacioni set, dok svjetlosivi binovi se odnose na raspodjelu greške za test set (Kostić i Figun 2022).....	119
Slika 5. 33 Izolinije minimalnih sigurnosnih rastojanja za industrijske zgrade i kancelarije prema MLR modelu (5.1) i DIN 4150, za različite ukupne količine eksploziva: $Q_{max} = 1000$ kg, $Q_{max} = 2500$ kg i $Q_{max} = 5000$ kg [Kostić i Figun 2022]	121
Slika 5. 34 Izolinije minimalnih sigurnosnih rastojanja za stambene zgrade prema MLR modelu (5.1) i DIN 4150, za različite ukupne količine eksploziva: $Q_{max} = 1000$ kg, $Q_{max} = 2500$ kg i $Q_{max} = 5000$ kg [Kostić i Figun 2022]	122
Slika 5. 35 Izolinije minimalnih sigurnosnih rastojanja za spomenike i istorijske građevine prema MLR modelu (5.1) i DIN 4150, za različite ukupne količine eksploziva: $Q_{max} = 1000$ kg, $Q_{max} = 2500$ kg i $Q_{max} = 5000$ kg [Kostić i Figun 2022]	123
Slika 5. 36 Poređenje realno osmatranih i procenjenih vrijednosti brzine oscilovanja stijenske mase za različite setove podataka pri formiranju modela (5.26) [Figun i dr. 2021]	126

Slika 5. 37 Analiza raspodjele grešaka modela (5.26). Svjetlosivi binovi se odnose na raspodjelu greške za trening set, tamnosivi binovi na raspodjelu greške za validacioni set, dok crni binovi označavaju raspodjelu greške za test set [Figun i dr. 2021].....126

Slika 5. 38 MSE (srednja kvadratna greška) u funkciji broja epoha za treniranje. Puna linija – trening set, tačkasta linija – validacioni set, isprekidana linija – test set [Figun i dr. 2021].....127

SPISAK TABELA

Tabela 2. 1 Maksimalne dozvoljene brzine oscilovanja tla zavisno od frekvencije [Siskind i dr. 1980].....	12
Tabela 2. 2 Modeli predviđanja potresa prilikom miniranja [Siskind i dr. 2000].....	13
Tabela 2. 3 Pregled konvencionalnih modela za procjenu PVV pri miniranju [Ragam i Nimaje 2018c].....	14
Tabela 3. 1 Raspodjela energije eksploziva predate stijeni [Berta 1990].....	24
Tabela 3. 2 Fizičko mehaničke karakteristike krečnjaka i dolomita [Majstorović i dr 2015].....	31
Tabela 3. 3 Dozvoljene brzine oscilovanja tla i intenziteta potresa za određene tipove i stanje objekata [Krsnik 1989].....	35
Tabela 3. 4 Granični nivoi potresa tla u funkciji rastojanja od mjesta miniranja [Savić 2000]....	36
Tabela 3. 5 Granične brzine oscilacija tla po klasama objekata [Trajković i dr. 2005].....	38
Tabela 3. 6 Seizmička skala za ocjenu potresa izazvanih eksplozijom na različitim tipovima konstrukcija [Purtić 1991].....	38
Tabela 3. 7 Granična vrijednost brzine oscilovanja za standard DIN 4150-3 [DIN 4150 1999]..	39
Tabela 3. 8 Granične brzine oscilovanja tla prema BS 7385-2 [BS 7385-2 1993].....	40
Tabela 3. 9 Standard SN 640312 [Purtić 1991]	40
Tabela 3. 10 Maksimalna brzina oscilovanja po Australijskom standardu [AS 2187-2 1993].....	41
Tabela 3. 11 Vrste oštećenja objekata za određene brzine oscilovanja [Medearis 1978].....	48
Tabela 4. 1 Karakteristike instrumenta Mini SuperGraph američkog proizvođača Nomis Seismographs [Nomis 2008].....	59
Tabela 4. 2 Karakteristike instrumenta Vibraloc švedske firme ABEM [ABEM 2010]	62
Tabela 4. 3 Podjela regresionih modela [Dizdar 2006].....	63
Tabela 4. 4 Tabelarno predstavljanje podataka <i>k</i> slučajnih uzoraka [Knežević 2017]	67
Tabela 4. 5 Jednofaktorska analiza varijance [Knežević 2017]	69
Tabela 4. 6 Tabelarni prikaz dvofaktorske probe [Knežević 2017]	70
Tabela 4. 7 Dvofaktorska analiza varijance [Knežević 2017].....	71

Tabela 4. 8 Najčešći tipovi aktivacionih funkcija [Reed i dr. 1998].....	73
Tabela 4. 9 Pravila podešavanja težina veza za različite algoritme obučavanja [Yu i Milamowski 2011]	83
Tabela 5. 1 Fizičko-mehaničke karakteristike stijena [Marinović 2020].....	86
Tabela 5. 2 Parametri bušenja i miniranja na PK “Hardovac” [Marinović 2020]	88
Tabela 5. 3 Fizičko-mehanička svojstva litogenetskih jedinica koje izgrađuju srednu u kojoj se vrši miniranje [Figun i dr. 2021]	90
Tabela 5. 4 Parametri bušenja i miniranje, po minskim poljima [Figun i dr. 2021]	91
Tabela 5. 5 Raspored mjernih mjesta za PK “Hardovac“	91
Tabela 5. 6 Pregled kontrolnih parametara korišćenih u analizi [Kostić i Figun 2022]	92
Tabela 5. 7 Standardni statistički pokazatelji analiziranih vrijednosti kontrolnih parametara	92
Tabela 5. 8 Raspored mjernih mjesta [Figun i dr 2021].....	100
Tabela 5. 9 Pregled kontrolnih parametara korišćenih u analizi [Figun i dr 2021].....	101
Tabela 5. 10 Standardni statistički pokazatelji analiziranih vrijednosti kontrolnih parametara .	101
Tabela 5. 11 Dozvoljene količine eksploziva i sigurnosna rastojanja [Figun i dr. 2016]	109
Tabela 5. 12 Rezultati ANOVA testa za model (5.15) [Kostić i Figun 2022]	111
Tabela 5. 13 Određivanje broja jedinica u skrivenom sloju [Kostić 2014].....	116
Tabela 5. 14 Pregled ulazno-izlaznih podataka za izvođenje modela procjene [Kostić i Figun 2022].....	117
Tabela 5. 15 Maksimalna i minimalna sigurnosna rastojanja za ulazne podatke registrovane na lokaciji kamenolom “Hadrovac“, tabela 5. 6 [Kostić i Figun 2022].....	120
Tabela 5. 16 Pregled ulazno-izlaznih podataka za formiranje modela [Figun i dr. 2021]	125

1 UVOD

Miniranje predstavlja tradicionalni postupak napredovanja radova u čvrstom stijenskom masivu, sa ciljem eksploatacije mineralnih sirovina na površinskim i u podzemnim kopovima, za potrebe otvaranja podzemnih prostorija, u građevinarstvu, pri izradi kanala i usjeka, pri rušenju starih objekata i sl. Uprkos razvoju moderne tehnologije, koja omogućava relativno lako napredovanje radova uz minimalne gubitke korisne mineralne sirovine, i uz povoljan odnos uloženo - dobijeno, u rudarskoj inženjerskoj praksi miniranje se i dalje koristi kao najčešća metoda napredovanja radova, kako u površinskoj tako i u podzemnoj eksploataciji. Iako primjena miniranja daje dobre rezultate u inženjerskoj praksi, negativna strana miniranja je u izazivanju potresa i vibracija koji mogu, da eventualno ugroze okolne građevinske objekte. Pojedini istraživači smatraju da se [Kuzu 2008] samo 20-30% energije nastale detonacijom utroši na fragmentaciju stijenske mase, a preostali dio energije prenosi se na zemljište i okolne građevinske objekte.

Povećanje broja stanovništva i industrijsko-privredni razvoj dovode do urbanizacije, sve širih prostora izgradnjom naselja, saobraćajnica i drugih objekata. Paralelno s tim, ubrzano širenje urbanih područja dovelo je do približavanja naselja površinskim kopovima i rudnicima, kao i do povećanja izloženosti postojećih konstrukcija i objekata uticaju od miniranja. Miniranja unutar i u blizini, urbanih područja su sve češća, a ograničenja za uticaj miniranja na okolinu sve strožija. Potrebno je precizno odredi i procijeniti negativno djelovanje miniranja na okolne objekte, prvenstveno, seizmičkih vibracija. Iz tog razloga, prije primjene minerskih radova, oni moraju biti svestrano sagledani i proučeni, posebno sa stanovišta seizmičkih vibracija, stručno i pažljivo projektovani i izvođeni na terenu.

Kako bi se smanjio obim minerskih radova povećavaju se minska punjenja i do nekoliko stotinama tona eksploziva što predstavlja stalan trend u povećanju obima korišćenja energije eksploziva na pojedinim rudnicima. Masovna miniranja na površinskim kopovima imaju za posljedicu i ekološke efekte, izazivajući uznemiravanje okoline, zbog negativnih efekata pri miniranju (velike količine gasova i prašine, potresi i vibracije, buka i razbacivanje komada na velike udaljenosti). Negativni efekti se ne mogu izbjeći, ali se mogu kontrolisati i pokušati svesti na najmanju moguću mjeru pravilnim projektovanjem bušačko-minerskih radova. U cilju ograničavanja negativnih uticaja primjene eksploziva pri miniranju, potrebno je pravilno uskladiti najuticajnije parametre koji mogu izazvati neželjene efekte.

Potresi su jedan od nepoželjnih efekata miniranja po okolinu, jer izazivaju vibracije tla i okolnih objekata različitog intenziteta, a u slučaju neadekvatne kontrole, mogu izazvati ozbiljna oštećenja građevinskih objekata. Pojava oštećenja zavisi od intenziteta seizmičkog talasa izraženog brzinom oscilovanja tla i karakteristika samih objekata, odnosno njihove otpornosti na potrese. Jedan od najvećih uzroka pojave vidljivih oštećenja na građevinskim objektima je, pored neadekvatne gradnje i neadekvatno projektovanje bušačko minerskih parametara za date uslove na terenu.

Prema saznanjima autora, za eventualna oštećenja na građevinskim objektima koja su registrovana, nije dokazana jednoznačna veza između potresa od miniranja i registrovanih oštećenja, s obzirom da na oštećenja objekata mogu uticati drugi parametri koji nisu povezani sa miniranjem. Neki od tih parametara su i kvalitet gradnje, kvalitet građevinskog materijala, vrsta, tip, stanje objekata, slijeganje terena, korišćenje, održavanje zgrada i starost konstrukcija koje su pod uticajem potresa od miniranja. Također, ne potiču sva oscilovanja tla i samih konstrukcija od miniranja u rudnicima. Nije isključeno da oscilovanje tla i samih konstrukcija, mogu nastati kao posljedica nekog prirodnog potresa (zemljotresa) registrovanog u bližoj ili široj okolini građevinskih objekata. U najvećem broju slučajeva, miniranja koja su izvedena u skladu sa vibracionim standardima nisu prouzrokovala vidljiva oštećenja na objektima koji se nalaze u blizini rudnika. Zbog toga je ova disertacija motivisana željom da se razvije metodologija predikcije uticaja potresa od miniranja na okolne građevinske objekte, kako bi se eventualna oštećenja građevinskih objekata sveli na najmanju moguću mjeru, pa i potpuno izbjegla.

U Republici Srpskoj još uvijek, ne postoje standardi kojima se reguliše nivo potresa nastalih pri miniranju i koji mogu da oštete objekte, a u zavisnosti od značaja, stanja i dinamičke otpornosti objekata. U našoj zemlji je u primjeni "Pravilnik o tehničkim normativima pri upotrebi eksplozivnih sredstava i miniranju u rudarstvu" [Sl. list SFRJ 1988] koji predviđa izradu standarda kojim bi se regulisala oblast seizmike miniranja. Međutim, takav standard, koji bi predstavljao nacionalni kriterijum graničnih brzina oscilovanja stijenske mase uslijed miniranja u odnosu na vrstu objekata, u Republici Srpskoj još uvijek nije definisan. U inostranstvu, postoje zakonske regulative i preporuke kojima se određuju uslovi vršenja miniranja na površinskim kopovima sa aspekta seizmike i zaštite objekata od seizmičkih efekata miniranja, posebno u dijelu definisanja maksimalno dozvoljenih brzina oscilovanja tla. Inostrani kriterijumi kao što su: DIN-4150, Ruske akademije nauke i američki standardi najčešće se koriste u našoj rudarskoj praksi. Činjenica da Republika Srpska nema standard kojim bi regulisala problematiku seizmike miniranja, ostavlja se otvoren prostor za razvoj novih metoda predikcije, a samim tim i formiranja kriterijuma minimalnog prihvatljivog nivoa brzina oscilovanja stijenske mase, uzimajući u obzir specifičnosti lokalnih uslova.

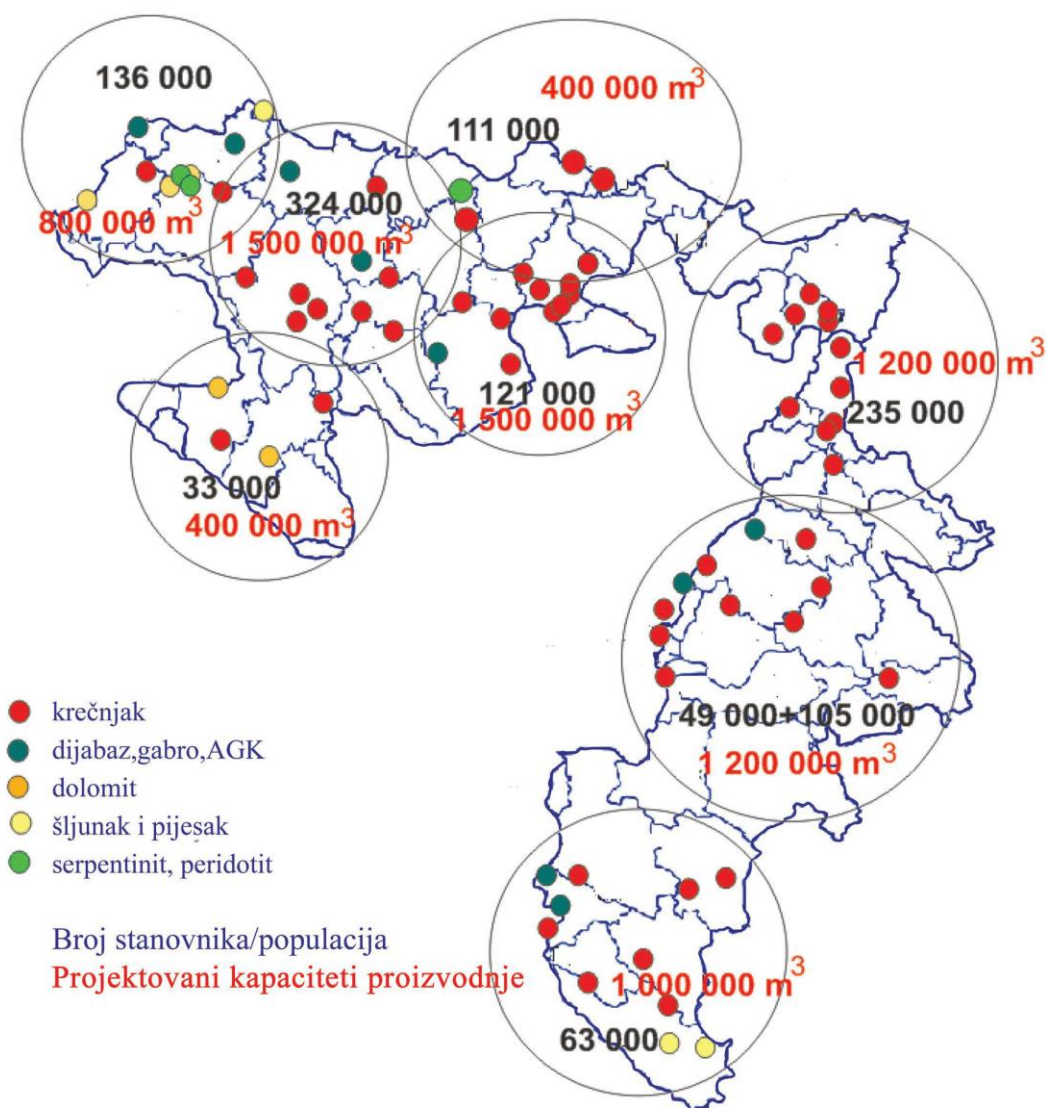
Opšte posmatrano, postoje dve osnovne grupe parametara koji utiču na oscilovanje stijenske mase od miniranja [Hudaverdi 2012]. Prva grupa parametara su tehničko-tehnološki faktori, uključujući: razmak između redova bušotina, razmak između bušotina u redu, količinu eksploziva po intervalu usporenja, dubinu bušotina, prečnik bušotina, dubinu eksplozivnog punjenja, dužinu čepa, i dr. Ovi parametri se definišu projektom miniranja, tako da se, njihova veličina, a samim tim, i jačina uticaja, mogu kontrolisati. S druge strane, fizičko-mehanička svojstva stijenske mase predstavljaju prirodan parametar, koji ne može da se kontroliše i čiji uticaj može da bude odlučujući u složenim inženjersko-geološkim uslovima sredine u kojoj se minira, uslijed višestrukog prelamanja i odbijanja seizmičkih talasa [Kim i Lee 2000]. Moguće su značajne varijacije u oscilovanju relativno homogene stijenske mase (litološki sastav), uslijed postojanja rasjeda i drugih mehaničkih diskontinuiteta u stijenskoj masi. Usklađenost parametara bušenja i miniranja sa uslovima radne sredine obezbjeđuje maksimalno iskorišćenje energije eksploziva uz minimalno ispoljavanje neželjenih efekata u vidu vibracija ili potresa.

Na području Republike Srpske je aktivno preko 70 kamenoloma na kojima se vrši površinska eksploatacija tehničkog građevinskog kamena i arhitektonskog građevinskog kamena – krečnjaka, dijabaza, dolomita, šljunka i pjeska, serpentinita i peridotita. Ako posmatramo po regijama rasprostranjenost i zastupljenost kamenoloma, tada imamo:

- Banja Luka i banjalučka regija: dese koncesija, od čega osam koncesija na krečnjak kao arhitektonsko-građevinski kamen i dve na dijabaz
- Doboj i Teslić: jedanaest koncesija od čega deset na krečnjak i jedna gabra kao arhitektonsko-građevinski kamen
- Grad Sarajevo: šest koncesija od čega pet na krečnjak i jedna na arhitektonsko-građevinski kamen
- istočni dio Republike Srpske: pet koncesija i svih pet na krečnjak
- Hercegovina: jedanaest koncesija od čega sedam za krečnjak i dve za šljunak i pijesak i dve na arhitektonsko-građevinski kamen
- sjeveroistok Republike Srpske - Bijeljina i Ugljevik: jedanaest koncesija od čega deset na krečnjak i jedna na kvarcni pijesak
- sjeverni dio - Posavina: četiri koncesije od čega tri na krečnjak i jedna na peridotit
- regija Prijedor: deset koncesija od čega su dve na krečnjak, dve na dijabaz, tri na dolomit, dve za serpentinit i jedna za šljunak i pijesak
- jugozapadni/zapadni dio Republike Srpske: četiri koncesije od čega dve za krečnjak i dve za dolomit [Malbašić 2021].

Eksploatacija tehničko-građevinskog kamena (TGK) vrši se na površinskim kopovima, uglavnom brdskog tipa, sa diskontinualnim sistemima eksploatacije i odgovarajućom tehnologijom [Popović 1984]. Na slici 1. 4 prikazani su kamenolomi TGK na području Republike Srpske na kojima se kao osnovni sistem eksploatacije koriste postupci bušenja i miniranja. Također je za određene regije prikazan broj stanovnika i projektovani kapacitet proizvodnje kamenoloma za svaku od regija.

Kada se posmatra površinska eksploatacija TGK na svim kamenolomima u Republici Srpskoj proces



Slika 1. 1 Kamenolomi TGK u Republici Srpskoj gdje se koristi miniranje [Malbašić 2021]

eksploatacije se zasniva na glavnom tehnološkom postupku otkopavanja koji podrazumjeva proces bušenja i miniranja za dobijanje korisne mineralne sirovine: krečnjaka, dijabaza, dolomita, serpentinita i peridotita. Za diskontinualni sistem eksploatacije tehničko-građevinskog kamena karakteristične su sljedeće tehnološke faze:

- skidanje otkrivke - jalovinskog materijala

- bušenje i miniranje
- utovar i transport odminiranog TGK do postrojenja za preradu
- pomoćne tehnološke faze.

Za pravilan razvoj površinskog kopa, tehnički sigurno i tehno-ekonomski racionalno dobijanje TGK primjenom tehnologije bušenja i miniranja moraju se definisati sljedeći parametri: prečnik minskih bušotina, vrsta eksploziva, dubina bušotina, nagib bušotina, linija najmanjeg otpora, rastojanje izmađu bušotina i redova bušotina, iniciranje eksplozivnog punjenja, način palenja minskih bušotina, specifična potrošnja eksploziva, konstrukcija minskog punjenja i dr.. Izboru optimalnih bušačko-minerskih parametara mora se posvetiti posebna pažnja, jer od pravilnog i preciznog projektovanja bušenja i miniranja i kombinacije uticajnih parametara umnogome zavisi i uticaj potresa i vibracija pri miniranju na okolne građevinske objekte.

1.1 Predmet i cilj istraživanja

Predmet doktorske disertacije je istraživanje uticaja potresa od miniranja na građevinske objekte, u funkciji zaštite istih. U rudarstvu i građevinarstvu, potresi nastali pri miniranju predstavljaju potencijalnu opasnost posebno za građevinske objekte koji se nalaze u blizini. Oscilovanje čestica tla prilikom miniranja, manifestuje se kao vibracija tla, odnosno potresi koji eventualno mogu izazvati oštećenja na okolnim građevinskim objektima, ukoliko intenzitet tih potresa pređe dozvoljene granice. Posebno treba voditi računa, kada se planira početak miniranja na novom kopu. Tada je neophodno predvidjeti intenzitet potresa od miniranja, za određene bušačko-minerske parametre, što nije jednostavan posao jer na intenzitet potresa pri miniranju utiče niz faktora.

Oštećenja nastala kao posljedica oscilovanja objekta pod dejstvom seizmičkih talasa izazvanih miniranjima na površinskim kopovima prikazana su na slikama 1. 2. do 1. 4. Pri istraživanjima [Vasović 2016] uticaja vibracija izazvanih eksplozijom u kamenolomu Drenovac (Srbija) na susjedne stambene zgrade, posmatrani su okolni objekti, zidane seoske kuće i pomoćni objekti jednostavne konstrukcije, u kojima su kao osnovni građevinski materijali korišćeni puna opeka i opekarski blok, nearmirani i armirani beton (slika 1. 2).



Oštećenje iz ugla otvora i odvajanje rama
vrata od zida



Dijagonalano oštećenje iz ugla prozora

Slika 1. 2 Izgled i pozicije karakterističnih oštećenja na objektima djelovanjem seizmičkih talasa pri miniranjima na površinskim kopovima [Stojadinović 2009]

Sprovedena analiza je pokazala da je upoređivanjem sa njemačkim standardom DIN 4150 i indijskim standardom DMGS, primjećeno da postoji nekoliko slučajeva izmjerenih brzina koje su iznad gornje granice za ovu kategoriju objekata. Detaljnim istraživanjima ustanovljeno je da prikazana oštećenja (slika 1. 3) ne potiču od vibracija izazvanih miniranjem na površinskim kopovima.



Oštećenja na pomoćnom objektu



Pukotine na objektu

Slika 1. 3 Vidljiva oštećenja na okolnim građevinskim objektima [Vasović 2016]

Studija rađena u Turskoj, [Oncu i dr. 2015] okrug Silvan, u selima koja se nalaze u blizini rudnika, bavila se ispitivanjem efekata miniranja na 67 jednospratnih i dvospratnih seoskih kuća, koje su oštećene uslijed uticaja seizmičkih talasa. Vibracije zemljišta koje je izazvalo miniranje u rudniku, ozbiljno je oštetilo objekte od čerpića (nepečene gline) i pune opeke ili opekarskih blokova, dok je na nekim armiranobetonskim (AB) građevinskim objektima došlo do oštećenje u vidu površinskih pukotina. Na slici 1. 4 prikazana su oštećenja na različitim građevinskim objektima koja su nastala pod uticajem vibracija tla.



Objekti od čerpića



Objekti od kamena



Zidovi u AB zgradama

Slika 1. 4 Karakterističan oštećenja od miniranja na različitim objektima [Oncu i dr. 2015]

Imajući u vidu broj i raznovrsnost faktora koji utiču na oscilovanje stijenske mase uslijed miniranja, ukazuje se potreba za formiranjem modela predikcije brzine oscilovanja koji su prvenstveno precizni, a istovremeno i dovoljno jednostavni za neposrednu primjenu u inženjerskoj praksi. Klasičan pristup podrazumjeva opisivanje oscilovanja stijenske mase empirijskim formulama koje procjenjuju maksimalne brzine oscilovanja u zavisnosti od količine eksploziva i udaljenosti mjesta mjerenja od minskog polja [Duvall i Petkof 1959; Ambraseys i Hendron 1968]. Postojeći empirijski obrasci izvedeni su na osnovu iskustava na različitim površinskim kopovima, i ne moraju dati zadovoljavajuće rezultate ukoliko se primjene na rezultate miniranja u različitim geološkim sredinama. S tim u vezi, smo i formirali posebne modele na osnovu registrovanih podataka na lokacijama površinskog kopa "Hardovac" i radilišta u gradskoj sredini Skyline, koji su prilagođeni i prirodnim uslovima i karakteristikama građevinskih objekata na tim lokacijama.

U okviru uticaja potresa od miniranja na građevinske objekte, na osnovu empirijskih formula odredili smo tzv. zone sigurnosti, u kojima imamo tačno određene, i za date radne uslove specifične, brzine oscilovanja stijenske mase, u zavisnosti od registrovanih dozvoljenih brzina i frekvencija, koristeći prethodno definisane modele predikcije. Utvrđivanje ovih zona praktično predstavlja formiranje "karata sigurnog građenja" određenih kategorija objekata u zavisnosti od veličine potresa pri miniranju, i ima veliki značaj u inženjerskoj praksi.

Na osnovu prethodnih zapažanja, jasno se nameće cilj istraživanja kroz potrebu za stalnim razvojem metodologije procjene oscilovanja stijenske mase uslijed miniranja, uključujući formulisanje novih modela i klasifikacija. Cilj istraživanja bio je da pokažemo da se maksimalna brzina oscilovanja i frekvencija stijenske mase može tačnije procjeniti modelima zasnovanim na vještačkim neuronskim mrežama. Predloženi postupak pretpostavlja širu analizu uticaja potresa od miniranja na građevinske objekte u odnosu na konvencionalne metode koje se zasnivaju na korišćenju vibracionih standarda.

Prema saznanju kandidata, opsežna studija registrovanih brzina oscilovanja stijenske mase od miniranja na površinskim kopovima, kao i njihova sinteza sa ciljem ispitivanja i određivanja zakonitosti oscilovanja stijenske mase, nije do sada vršena na teritoriji Republike Srpske. Shodno tome, osim naučnog doprinosa disertacije u pogledu formiranja novih modela i razrade metodologije ocjene uticaja miniranja na građevinske objekte, rezultati istraživanja imaju značaja i za inženjersku praksu. Rezultati sprovedenih istraživanja imaju praktičan značaj jer uspostavljaju korelaciju između zona dozvoljenih oscilacija i parametara miniranja (ukupna količina eksploziva, količina eksploziva po intervalu usporenja, rastojanje od mjernog mjesta do mjesta miniranja, dužine bušotine, broja bušotina, rastojanja između redova bušotina i rastojanja između bušotina u redu), tako da se mogu koristiti i u inženjerskoj praksi

1.2 Polazne hipoteze

Polazne hipoteze istraživanja sprovedenog u okviru predmetne disertacije su:

- uticaj potresa od miniranja na građevinske objekte može se ocjeniti na osnovu brzine i frekvencije oscilovanja stijenske mase i
- primjena modernih matematičkih metoda omogućava formiranje pouzdanih modela predviđanja veličine oscilovanja stijenske mase od miniranja, a time i sigurniju procjenu uticaja potresa od miniranja na građevinske objekte po određenim zonama sigurnosti, uzimajući u obzir klasifikaciju objekata prilagođenu strukturnim karakteristikama i vrsti konstrukcija objekata na određenoj lokaciji.

Ovim doktoratom smo opravdali početnu hipotezu istraživanja i uspjeli smo formirati nove modele brzine oscilovanja stijenske mase od miniranja primjenom konvencionalnog pristupa i vještačkih neuronskih mreža. Tako smo dobili preciznija predviđanja veličine potresa od miniranja i razradili metodologiju ocjene uticaja potresa od miniranja na građevinske objekte, koju smo prilagodili iskustvima na našim površinskim kopovima i dobili pouzdanije procjene brzine oscilovanja stijenske mase.

1.3 Primjenjene metode istraživanja

Metode primjenjene u doktorskoj disertaciji zasnivaju se na modelovanju i istraživanju ponašanja građevinskih objekata izloženih dejstvu potresa nastalih od miniranja na površinskim kopovima i građevinskim radilištima. Korišćene su opšte naučne metode, analitičke i statističke metode, kao i metode zasnovane na: dosadašnjim saznanjima iz oblasti miniranja i seizmičkog uticaja, prikupljenim i izmjerenim podacima sa terena, detaljnim razmatranjem parametara koji imaju najveći

uticaj na intenzitet potresa pri miniranju, analizi tako dobijenih podataka, primjeni metode višestruke linearne regresije i vještačkih neuronskim mreža i poređenjem dobijenih modela sa postojećim modelima dobijenim pomoću konvencionalnih prediktora. Opšte naučne metode koje smo koristili u disertaciji su: opservacija, analiza i sinteza prilikom obrade prethodnih istraživanja; matematičke metode za razvoj modela procjene potresa pri miniranju; statističke metode pri obradi podataka dobijenih prilikom mjerenja i analitičke metode pri matematičkom modeliranju.

Prvo su analizirani rezultati prethodnih istraživanja na predmetnom polju kod nas i u svijetu. Potom je na odabranim lokacijama izvršeno mjerenje brzine i frekvencije oscilovanja stijenske mase i prikupljanje podataka o bušačko-minerskim parametrima, građevinskim objektima kao i o karakteristikama sredine, u kojoj se vršilo miniranje. Nakon toga je izvršena statistička analiza registrovanih bušačko-minerskih parametara i izvršeno je modeliranje uticaja miniranja na građevinske objekte pomoću konvencionalnih modela i primjenom vještačkih neuronskih mreža. Zatim je izvršeno formiranje karata zona sigurnog građenja određenih kategorija građevinskih objekata u zavisnosti od veličine potresa od miniranja za razmatrane studije slučaja, korišćenjem terenski osmatranih podataka i podataka na osnovu formiranih modela.

1.4 Struktura disertacije

Doktorska disertacija je sastoji od 9 poglavlja, koja se sastoje od više potpoglavlja.

U poglavlju 1 definisana je tema i oblast istraživanja, predstavljen je cilj istraživanja i prikazane metode koje su se koristile u procesu istraživanja.

U poglavlju 2 se prikazuje pregled dosadašnjih istraživanja, u svijetu i kod nas, vezana za slučaj predikcije oscilovanja stijenske mase pri miniranju i njenog uticaj na okolne građevinske objekte.

U poglavlju 3 opisuje se upotreba miniranja u rudarstvu i negativni efekti koji ga prate sa analizom uticaj seizmičkih talasa nastalih pri miniranju na objekte. Prikazan je pregled kamenoloma u Republici Srpskoj na kojima se koristi miniranje. Analiziran je uticaj potresa od miniranja na okolne građevinske objekte, kroz uticajne parametre radne sredine i minerske parametre. Dat je pregled postojećih inostranih vibracionih standarda, kao i modela za predviđanje potresa od miniranja i primjeri uticaja potresa od miniranja na objekte.

U poglavlju 4 predstavljena je metodologija ocjene uticaja potresa od miniranja na objekte, opisom terenskog i numeričkog dijela istraživanja sa osvrtom na metode koje su korišćene u disertaciji.

U poglavlju 5 prikazani su rezultati istraživanja.

U poglavlju 6 predstavljena je diskusija i dati su komentari rezultata istraživanja.

U poglavlju 7 su predstavljeni zaključci i date smjernice za naredna istraživanja u predmetnoj oblasti.

U poglavlju 8 je dat pregled korišćene literature

U poglavlju 9 je spisak i prikaz priloga koji su bili od značaja pri izradi ove disertacije.

2 PREGLED REZULTATA PRETHODNIH ISTRAŽIVANJA

Mnogi istraživači koji su proučavali potrese tla pri miniranja razmatrali su različite modele za predviđanje maksimalne brzine oscilovanja tla primjenom statističkih metoda, što je detaljnije obrađeno u poglavlju 3.5 ove disertacije.

U Biltenu 656. [Nicholls i dr. 1971], po prvi put su sistematizovani dotadašnji rezultati istraživanja o uticaju efekata miniranja na okolne građevinske objekte. Uočeno je da oštećenja mogu biti slična i da zavise i od stanja objekata, slijeganja, izloženosti atmosferskim uticajima, starosti, i sl.. Temeljnomo analizom registrovanih oštećenja i dobijenih podataka, zaključeno je da se veza između pomjeraja i frekvencije oscilovanja najbolje opisuje linearnom opadajućom funkcijom. Predloženo je da se parametri količine eksploziva i rastojanje od mjesta mjerenja od mjesta miniranja uzmu kao opšti. Ostali minerski parametri su mnogo varirali od kopa do kopa i od minera do minera, tako da su svi objedinjeni u parametre svake lokacije pojedinačno. Njihov uticaj se određuje na licu mjesta, na osnovu probnih miniranja. Poseban značaj ovih istraživanja je u tome što je prvi put definisana upotreba maksimalne brzine oscilovanja tla ("Peak Particle Velocity, engl." - PPV) kao mjere za ograničavanje uticaja na građevinske objekte i sprečavanje oštećenja zgrada od potresa i vibracija izazvanih miniranjem.

U istraživanjima o odgovoru konstrukcija i oštećenjima objekata izazvanim vibracijama prilikom miniranja na površinskim kopovima, posmatrane su i karakteristike konstrukcija i materijala ugroženih zgrada. Dowding [1971] je ukazao na bitnu povezanost između frekvencija oscilovanja tla i objekata, kao i način uticaja parametara, koji opisuju potrese u tlu (brzina, ubrzanje i pomjeraj) na spektar odgovora objekata prilikom miniranja. Pomenutim istraživanjem je zaključeno da su dominantne frekvencije oscilovanja tla najčešće veće od najvećih frekvencija oscilovanja građevinskih objekata. Medearis [1976] je pokazao da je odgovor konstrukcije, kao i eventualna oštećenja, neposredno povezana sa frekvencijama oscilovanja usljed miniranja. Corser [1979] je pokazao da frekvencije oscilovanja tla pri miniranju u rasponu 5 - 10 Hz (blizinu sopstvenih perioda oscilovanja drvenih jednospratnih i dvospratnih objekata) izazivaju pomjeraj pet do šest puta veći od onih pri miniranju u rasponu 30 - 40 Hz.

Prilikom istraživanja mjereni su pomjeraji 76 različitih stambenih objekata, uglavnom jednospratnih i dvospratnih kuća, zbog potresa izazvanih miniranjem. Mjerenjima na građevinskim objektima ustanovljeno je da frekvencije oscilovanja ispod 10 Hz prouzrokuju velike deformacije i pomjeraje tla, istovremeno dejstvujući sa rezonantnim frekvencijama konstrukcija (za ispitane objekte između 4 i 12 Hz). Najveći intenzitet oscilovanja pokazivali su središnji nenosivi (pregradni) zidovi, a uglovi

su imali najveći stepen prigušenja. Predstavljeni su rezultati ispitivanja oštećenja materijala od kojih su izgrađeni građevinski objekti, koji su posmatrani. Na osnovu istraživanja u kojima su zidovi od različitih vrsta materijala testirani na terenu i u laboratoriji, na uticaje seizmičkih vibracija izazvanih miniranjem, date su preporuke za maksimalne vrijednosti dozvoljenih brzina oscilovanja tla. Po ovim smjernicama, kod zidova od opeke i blokova oštećenja se javljaju pri brzinama od 76 mm/s upravo na površinu zida, najčešće u vidu pucanje maltera u spojnica (koji je pokazao deset puta veću deformaciju od blokova). Masivni betonski zidovi nisu bili oštećeni do brzina od 254 mm/s, kada su se oštećenja javljala samo u uglovima oslonaca. Gips-kartonski zidovi su oštećeni pri brzinama od 127 - 254 mm/s.

Ograničavanjem maksimalne brzina oscilovanja tla kod potresa prilikom miniranja, na praktičan način moguće je ograničiti oštećenja građevinskih objekata. Na oštećenja objekata, pored brzine oscilovanja, utiče i frekvencija oscilovanja objekata. Jačina eksplozija sa niskim frekvencijama oscilovanja (<40 Hz) mnogo je veći od onih sa visokim frekvencijama, pa je preporuka da se maksimalne PVV smanje kod nižih frekvencije (tabela 2. 1).

Zaključeno je da stepen osjetljivosti na vibracije od miniranja zavisi od tipa, stanja i vrste konstrukcije objekta, a predloženi su pragovi oštećenja pojedinih dijelova konstrukcija građevinskih objekata u odnosu na vrstu materijala [Dowding i Corser 1981] od kojih su sagrađeni (beton, drvo, opeka, gips-karton, ...). Istraživanja su modifikovala prethodna ograničenja maksimalnih brzina oscilovanja za frekvencije ispod 40 Hz na 19 mm/s za drvene gips-kartonske kuće i na 12 mm/s za malter na potkonstrukciji. Za frekvencije iznad 40 Hz, prihvaćeno je da ostane granica od 51 mm/s za sve vrste objekata.

Tabela 2. 1 Maksimalne dozvoljene brzine oscilovanja tla zavisno od frekvencije [Siskind i dr. 1980]

Frekvencija potresa (Hz)	Granična brzina oscilovanja (mm/s)
1	5,0
2,5 – 10	12,7
12	15,6
14	19,5
16	21,3
18	23,4
20	25,4
30	34,2
40-100	51

U zadnje vrijeme, zbog sve intenzivnije primjene procesa miniranja u blizini gradskih područja, mnogi istraživači su u svojim istraživanjima izučavali uticaj potresa nastalih miniranjem na objekte [Luccioni i dr. 2004, Heath i dr. 2005, Dogan i dr. 2013, Karadogan i dr. 2014]. Detaljno su sistematizovana moguća oštećenja i predstavljeni rezultati sprovedenih numeričkih analiza. Najčešće, miniranja koja su usklađena sa vibracionim standardima i maksimalno dozvoljenom brzinom oscilovanja nisu proizvela vidljiva oštećenja [Vasović 2016].

Davies u svojim istraživanjima [Davies i dr. 1964], zatim švedski naučnici Holmberg i Persson [Holmberg i Persson 1979] kao i Shoop i Daemen [Shoop i Daemen 1983] prikazali su uopštenu jednačinu za predviđanje potresa. Oni su dali zavisnost između maksimalne brzine oscilovanja tla, količine eksploziva po intervalu usporenja i rastojanja od mjesta miniranja do mjernog mjesta u funkciji koeficijenata koji se računaju regresionom analizom i opisuju karakteristiku sredine u kojoj se vrši miniranje. Langefors i Kihlstrom su prikazali svoje tumačenje matematičke zavisnosti [Langefors i Kihlstrom 1978] između brzine oscilovanja čestica tla, količine eksploziva i rastojanja od mjesta miniranja do mjesta mjerenja. Matematičke zavisnosti između ova tri parametra predložili su i sljedeći naučnici: Ambraseys i Hendron [Ambraseys i Hendron 1968], Nicholls [Nicholls i dr. 1971], Lundborg 1977.god., Just i Free 1980. god. [Jimeno i dr. 1995], Ghosh i Daemen [Ghosh i Daemen 1983], Gupta, [Gupta i dr. 1987], Pal Roy [Roy 1991], Rai i Singh [Rai i Singh 2004]. U tabeli 2.3. prikazani su neki od najznačajnijih empirijskih obrazaca (konvencionalnih prediktora) i naučnici koji su istraživali brzine oscilovanja tla prilikom miniranja u rudarstvu.

Jedan od najznačajnijih autora Siskind, [Siskind 2000], navodi više modela predikcije za različite stijenske mase, gdje su terenskim mjerenjima određene vrijednosti koeficijenata, koji se obično daju u opštem obliku. Ovi modeli prikazani su u ranijim istraživanjima kao što je model Nichollsa [Nicholls i dr. 1971], kao i model koji su formirali Siskind i kolege [Siskind i dr. 1980]. Navodi se i model iz Izveštaja Biro za rudarstvo Sjedinjenih Američkih Država, (USBM - United States Bureau of Mines) USBM RI 9226 [Siskind i dr. 1989] koji je rad više autora, kao i studija autora Crum i Siskind koji je i koautor [Crum i dr. 1995]. U knjizi objavljenoj 2000. godine Siskind navodi više modela različitih autora za predviđanje potresa od miniranja, koji se najčešće koriste u praksi, a prikazani su u tabeli 2. 2. U izrazima u tabeli V predstavlja maksimalnu brzinu oscilovanja tla, (in/s), r je rastojanje između morskog polja i mjesta mjerenja, (ft) i Q je količina eksploziva po intervalu usporenja, (lb).

Tabela 2. 2 Modeli predviđanja potresa prilikom miniranja [Siskind i dr. 2000]

Vrsta miniranja	Model	Referenca
Miniranje na kamenolomima	$V=182 \cdot (r/Q^{1/2})^{-1,82}$	Bulletin 656 [Nicholls i dr. 1971]
Kopovi uglja, horizontalna komponenta	$V=133 \cdot (r/Q^{1/2})^{-1,50}$	RI 9226 [Siskind i dr. 1989]
Kopovi uglja za $r/Q^{1/2} < 300$	$V=1,240 \cdot (r/Q^{1/2})^{-1,78}$	
Nisko frekventni kopovi uglja	$V=138 \cdot (r/Q^{1/2})^{-1,31}$	
Nisko frekventne sredine za $r/Q^{1/2} < 118$	$V=187 \cdot (r/Q^{1/2})^{-1,18}$	
Nisko frekventne sredine za $r/Q^{1/2} > 118$	$V=40,940 \cdot (r/Q^{1/2})^{-2,31}$	RI 9226 [Siskind i dr. 1989]
Jedno minsko punjenje	$V=29,2 \cdot (r/Q^{1/2})^{-1,28}$	PADER Report [Crum i dr. 1995]
Mjerenja na 11 kopova krečnjaka	$V=52,2 \cdot (r/Q^{1/2})^{-1,38}$	

Brzina oscilovanja stijenske mase, vrjednovana je različitim empirijskim jednačinama konvencionalnih prediktora koje su predložili najznačajniji istraživači, iz ove oblasti prikazani u tabeli 2. 3. Predloženi modeli predviđaju da brzina oscilovanja stijenske mase zavisi od dva osnovna parametra, i to maksimalne količine eksploziva po intervalu usporenja i rastojanja od mjesta miniranja do mjesta mjerenja. Nedostatak ovog pristupa predviđanja je tačnost vrijednosti prediktora bezbjedne brzine oscilovanja stijenske mase, u odnosu na maksimalnu bezbjednu količinu eksploziva po usporenju za određenu lokaciju, kao i neupotrebljivost za druge lokacije. Prediktorski modeli uzimaju u obzir samo dva parametra miniranja, a na vibracije nastale pri miniranju utiče više parametara. Brzina oscilovanja stijenske mase je pod uticajem niz parametara i razlike u vrijednostima tih parametara (na različitim lokacijam) kao i komplikovanim njihovim međusobnim odnosom. Zbog toga, je vještačka inteligencija tehnika koja se sve češće primjenjuje prilikom istraživanja oscilovanja stijenske mase.

Tabela 2. 3 Pregled konvencionalnih modela za procjenu PVV pri miniranju [Ragam i Nimaje 2018c]

Konvencionalni prediktor	Jednačina	Referense
USBM	$V = K [D / \sqrt{Q_{max}}]^{-B}$	Duvall i Petkof [1959]
Langefors–Kihlstrom	$V = K \left[\sqrt{(Q_{max}/D^{2/3})} \right]^B$	Langefors i Kihlstrom [1963]
General predictor	$V = K D_{max}^{-B} Q^A$	Davies i dr. [1964]
Amraseys–Hendron	$V = K \left[(D/Q_{max}^{1/3}) \right]^{-B}$	Ambraseys i Hendron [1968]
Bureau of Indian Standard	$V = K [(D_{max}/D^{2/3})]^B$	IS 6922:19735 [1973]
Ghosh–Daemen 1	$V = K [D / \sqrt{Q_{max}}]^{-B} e^{-\alpha D}$	Ghosh i Daemen [1983]
Ghosh–Daemen 2	$V = K \left[(D/Q_{max}^{1/3}) \right]^{-B} e^{-\alpha D}$	
Gupta i dr.	$V = K D^{-B} Q_{max}^A e^{-\alpha D}$	Gupta i dr. [1987]
CMRI	$V = n + K [D / \sqrt{Q_{max}}]^{-1}$	Roy [1991]
Rai–Singh	$V = K \left[(D/Q_{max}^{1/3}) \right]^{-B} e^{-\alpha (\frac{D}{Q})}$	Rai i Singh [2004]

USBM: United States Bureau of Mines; CMRI: Central Mining Research Institute; V je maksimalna brzina čestica (mm/s); D je rastojanje između mjesta miniranja i mjesta mjerenja (m); Q je maksimalna količina

eksploziva po intervalu usporenja (kg); K , A , B , D , α i n su konstante, koje se dobiju višestrukom regresionom analizom.

Frekvencija i brzina oscilovanja stijenske mase su najčešće korišćeni parametri za procjenu oscilovanja (vibracija) tla i nastanka oštećenja na građevinskim objektima. Strukturni odziv bilo kojeg građevinskog objekta zavisi od frekvencije vibracija tla [Dowding 1985]. Na oscilovanje tla utiče veliki broj parametra, kao što su fizičko-mehanička svojstva stijenske mase, karakteristike eksploziva i način miniranja [Wiss i Linehan 1978]. Neophodno je znati uticaj ovih parametara na miniranje zbog efikasnog korišćenja energije eksploziva u datoj stijenskoj masi, a uz minimalne neželjene efekte koje izaziva miniranje. Parametri miniranja kao što su količina eksploziva po intervalu usporenju, broj i raspored usporenja, rastojanje između bušotina, dužina punjenja, dužina probušenja, šema miniranja i način iniciranja, značajno mjenjaju disperziju seizmičke energije [Roy 2005]. Karakteristike stijenske mase takođe često variraju od mjesta do mjesta u rudniku ili čak od jednog do drugog kraja istog morskog polja [Khandelwal i Singh 2006]. Potrebno je izvršiti optimizaciju bušačko-minerskih parametara i karakteristika eksploziva na osnovu osobina stijenske mase, npr. čvrstoće, gustine, poroznosti, brzina uzdužnih talasa, impedanse, prisustve pukotina i strukturnih osobina [Singh i Sastry 1986].

2.1 Primjena vještačkih neuronskih mreža za predikciju potresa od miniranja

Prethodno navedeni empirijski modeli za predikciju potresa od miniranja su uglavnom bazirani na ulaznim parametrima: maksimalnoj količini eksploziva po intervalu usporenja, rastojanja od mjesta miniranja do mjernog mjesta i karakteristika radne sredine. Metode vještačke inteligencije (artificial intelligence - AI) često se primjenjuju u takvim vrstama problema. Važno je tačno procijeniti i predvidjeti brzinu oscilovanja čestice tla. Zbog velikog broja parametara koji utiču na karakteristike i intenzitet potresa i njihove kompleksne međusobne zavisnosti, pojavljuju se sve više druge metode koje zamjenjuju konvencionalne, a to su metode zasnovane na vještačkoj inteligenciji. Mnogi naučnici i istraživači koriste metode mekog programiranja ("soft computing techniques, engl.") kao što su: vještačke neuronske mreže ("artificial neural network, engl." - ANN), metoda potpornih vektora ("support vector machine algorithm, engl." - SVM), genetski algoritmi ("genetic algorithm, engl." - GA), fazi logika ("Fuzzy inference system, engl." - FIS), Monte Karlo tehnika i druge tehnike vještačke inteligencije koje se koriste za predikciju i kontrolu vibracija nastalih eksplozijom prilikom miniranja.

Vještačke neuronske mreže predstavljaju jednu od najčešće korišćenih tehnika vještačke inteligencije. Prednosti koje nude ANN učinile su da one postanu nezaobilazne u rješavanju sve složenijih problema koji se javljaju u savremenom svijetu, a njihova primjena je širokog spektra.

Svjedoci smo napretka računarskih tehnologija i sve češće primjene vještačkih neuronskih mreža i mašine potpornih vektora u svim granama nauke pa i u rudarstvu [Kamali i Ataei 2011a, Khandelwal 2010]. Mogućnost vještačkih neuronskih mreža da kroz trening i proces obučavanja predviđaju ishode nelinearnih problema i mašina potpornih vektora da problem rješavaju u višedimenzionom prostoru u kojem je moguće uspostaviti linearne zavisnosti sve se više primjenjuje u rudarstvu [Monjezi i dr. 2010, 2011]. Počeci primjene ANN u rudarstvu bili su kod predviđanje brzina oscilovanja tla i intenziteta vazdušnih udara pri miniranju jer za ove probleme ne postoje razvijeni pouzdani modeli procjene. Tako je bilo moguće ocjeniti pouzdanost i preciznost primjene naprednih modela, uz određena ograničenja. Ograničenja se odnose na odluke istraživača po pitanju definisanja ulazno - izlaznih parametara. Iako primjena ANN omogućava gotovo neograničen broj ulaznih podataka, u većini prethodnih istraživanja je taj broj bio ograničen na ispod 10 parametara. Za efikasnu primjenu ANN potrebno je prikupiti što više kvalitetnih ulaznih podataka. Vještačke neuronske mreže su vođene podacima, tako da kvalitet modela ne zavisi samo od količine podataka, već i od kvalitetnog i pravilnog izbora određenih ulaznih parametara. Prilikom izbora ulaznih podataka treba se pravilno izvršiti selekcija uticajnih parametara, tako da se za ulazne podatke uzimaju samo oni parametri koji imaju najveći uticaj na brzinu oscilovanja tla pri miniranju [Stojadinović 2013]. Činjenica da ANN imaju potencijal da prerastu u opšti model predviđanja brzine oscilovanja tla nije iskorišćena. Međutim, činjenica je da primjena vještačkih neuronskih mreža u rudarstvu imaju potencijal koji treba maksimalno iskoristiti.

U posljednje vrijeme, mnogi istraživači su pokušali da razviju nove modele za predviđanje potresa usljed miniranja pomoću ANN u koje su uključili više ulaznih parametara koji značajno utiču na potrese od miniranja. Tako je, Kahrman (Turska), na osnovu podataka registrovanih potresa na jednom kamenolomu krečnjaka u okolini Istanbula, razvio empirijsku korelaciju za ocjenu vrijednosti maksimalne brzine oscilovanja stijenske mase (PPV) zasnovanu na redukovanom rastojanju, sa visokom vrijednošću koeficijenta korelacije ($R=0,92$) [Kahrman 2004]. Singh je [Singh i dr. 2004] predvidio brzinu P-talasa i anizotropna svojstva stijena pomoću ANN, a zatim su primijenili vještačku inteligenciju [Singh i Singh 2005] za predikciju i kontrolu vibraciju. Dva istraživača [Khandelwal i Singh 2005] su predvidjeli vazdušni pritisak zavisno od udaljenosti i nivou zvučnog pritiska koristeći ANN i uporedili podatke sa USBM prediktorom i jednačinom višestruke regresione analize (MVRA). Metoda ANN dala je bolje rezultate predviđanja u odnosu na USBM i MVRA konvencionalne prediktore.

Drugim istraživanjima na površinskom kopu sa 150 mjerenja pri miniranju, [Khandelwal i Singh 2006] su takođe proučavali vibracije i frekvenciju oscilovanja koristeći parametre stijenske mase,

karakteristike eksploziva i način miniranja uz pomoć ANN i uporedili svoje rezultate sa višestrukom regresionom analizom. Zatim su 2007. godine [Khandelwal i Singh 2007] vršili istraživanja u rudniku magnezita u Indiji. Predvidjeli su brzinu oscilovanja stijenske mase uz pomoći ANN, uzimajući u obzir dva parametra, količinu eksploziva po intervalu usporenja i rastojanje od mjesta miniranja do mjesta mjerenja. Oni su uporedili svoje rezultate sa uobičajeno korišćenim prediktorima vibracija i zaključili da rezultati predikcije, dobijeni pomoću ANN, su precizniji u poređenju sa konvencionalnim jednačinama predikcije vibracija. Poredeći dobijene podatke sa rezultatima primjene konvencionalnih modela, pokazali su značajno poklapanje izlaznih podataka neuronskih mreža sa realno mjerenim brzinama oscilovanja stijenske mase. Kesimal (Turska), sa saradnicima je analizirao uticaj oscilovanja stijenske mase uslijed miniranja na stabilnost kosina na kamenolomu krečnjaka “Arakli - Tasonu” [Kesimal i dr. 2008].

Afeni (Južna Afrika) i Osasan (Nigerija) izučavali su nivo buke od miniranja na kamenolomu krečnjaka “Evegoro”, kao i uticaj proizvedene buke na stambene objekte u naseljima u blizini površinskog kopa [Afeni i Osasan 2009]. Mohamed je primjenio ANN za predviđanje i kontrolu vibracija eksplozije [Mohamed 2009] u kamenolomu krečnjaka u Asjutu (Egipat) i zaključio da korišćenje više ulaznih podataka može poboljšati sposobnost vještačkih neuronskim mreža u predviđanju brzine oscilovanja stijenske mase. Istraživanja Khandelwal i Singh provedena na površinskom kopu u Indiji prikazuju primjenu vještačke neuronske mreže za predviđanje vibracija i frekvencije eksplozije, [Khandelwal i Singh 2009]. Model je formiran sa deset ulaznih parametara koji imaju uticaj na vibracije i frekvenciju eksplozije, koji su predstavljeni kao izlazni parametri. Razvili su neuronsku mrežu sa prostiranjem signala unaprijed, sa tri sloja, i sa pravilom obučavanja sa prostiranjem greške unazad, radi predviđanja vrijednosti maksimalne brzine oscilovanja stijenske mase. Rezultati dobijeni predviđanjem vibracija eksplozije primjenom ANN su upoređeni sa MVRA, kao i sa uobičajenim prediktorima vibracija. Autori su primjetili da rezultati dobijeni modelom ANN imaju veliku sličnost sa PPV i frekvencijom izmjenjenim na terenu, u odnosu na konvencionalne prediktore. Kao rezultat analize, dobili su veći koeficijent determinacije ($R^2=0,99$) u poređenju sa konvencionalnim modelima ($R^2=0,36-0,73$). Pomenuta istraživanja pokazuju da modeli neuronskih mreža imaju prednost u rješavanju složenih problema, u kojima mnogi kritični parametri utiču na proces i rezultate, kada proces i rezultati nisu u potpunosti razumljivi i gdje su dostupni iskustveni ili eksperimentalni podaci. Monjezi je sa saradnicima [Monjezi i dr. 2010] razvio različite neuronske mreže za procjenu PPV. Amnieh je sa kolegama koristeći model ANN [Amnieh i dr. 2010] izvršio procjenu vibracija tla izazvanih miniranjem uzimajući četiri ulazna parametra. Rezultati njihovih modela pružaju gotovo tačno predviđanje za PVV u odnosu na izmjerene vrijednosti prilikom miniranja u rudnika bakra.

Monjezi i saradnici razvili su ANN model za predviđanje PPV [Monjezi i dr. 2011] na površinskom kopu u Iranu, koristeći četiri ulazna parametra: količinu eksploziva po intervalu usporenja, rastojanje od mjesta miniranja do mjesta mjerenja, dubinu bušotine i začepljenje kao ulazne parametre i jedan izlazni parametar PPV, uporedivši njihove rezultate sa empirijskim modelima i višestrukoum regresionom analizom. Analizom je zaključeno da je rastojanje od mjesta miniranja do mjesta mjerenja najuticajnije, a začepljenje najmanje uticajan parametar na PPV. Oni su sačinili bazu podataka koja se sastoji od 182 zapisa mjerenja vibracija od miniranja i zaključili da rezultati razvijenog ANN modela daju bolje rezultate u poređenju sa empirijskim prediktorima i statističkim modelima za procjenu brzine oscilovanja stijenske mase. Tačnost predviđanja ANN model ($R^2=0.95$) bila je veća u poređenju sa modelom zasnovanim na višestrukoj regresiji ($R^2=0.38-0.80$). Khandelwal i saradnici konstruisali su troslojni model ANN [Khandelwal i dr. 2011] za procjenu vibracija tla izazvanih miniranjem u rudniku u Indiji. Razvili su povratnu propagaciju unazad sa 2-5-1 arhitekturom, model je obučen i testiran na 130 izvršenih miniranja. Njihov ANN model daje bolji koeficijent determinacije i manju srednju apsolutnu grešku u poređenju sa drugim modelima. Mohamed je sekvencijalno koristio ANN i Fuzzy model za procjenu predviđanja PPV. On je sproveo ispitivanje vibracija tla prilikom 162 miniranja u rudniku [Mohamed 2011]. Autor je primjetio da ANN model pruža veću vrijednost koeficijenta determinacije (R^2) u poređenju sa FIS modelom i empirijskim modelom.

Mohamad i saradnici su predložili rješenje za predviđanje PPV koristeći model ANN. Rezultati istraživanja su pokazali da se sa devet različitih ulaznih parametara [Mohamad i dr. 2012] i sa relativno malim brojem izmjerenih vibracija pri miniranju, dvanaest, može tačno predvidjeti PPV jer je model pokazao da je koeficijent regresije 0,98. Mohamednejad (Iran), sa saradnicima, primjenio je ANN i SVM za ocjenu vrijednosti PPV na primjeru dva kamenoloma krečnjaka, dobivši rezultate sa visokim koeficijentom korelacije ($R=0,97$) [Mohamadnejad i dr. 2012].

Monjezi je sa saradnicima [Monjezi i dr.2013], predložio rješenje zasnovano na ANN za predviđanje PPV pri miniranju na brani rijeke u Iranu. Razvio je vještačku neuronsku mrežu sa prostiranjem signala unaprijed, sa četiri ulazna podatka, dva skrivena sloja i jednim izlaznim podatkom, za potrebe predviđanja vrijednosti PPV. Tačnost predviđanja korišćenjem neuronskih mreža bila je mnogo veća ($R=0,97$) u poređenju sa konvencionalnim modelima ili rezultatima višestruke regresione analize ($R=0,62-0,89$). Rezultati predloženog modela ANN ukazuju na bitno tačnija predviđanja brzine oscilovanja stijenske mase u poređenju sa empirijskim modelima predviđanja. U Iranu, Saadat i saradnici koristili su ANN modele za predviđanje PPV. Prikupili su 69 podataka iz rudnika gvožđa [Saadat i dr. 2014]. Autori su uporedili svoje rezultate sa rezultatima tipičnih eksperimentalnih i

statističkih metoda analizom višestruke linearne regresije (MLR). Rezultati su pokazali da je model ANN pokazao veću tačnost u poređenju sa drugim modelom.

Hajihassani i saradnici su 2015. godine predstavili hibridni model ANN optimizovan dominantnim konkurentnim algoritmom (imperialist competitive algorithm ICA) za predviđanje PPV [Hajihassani i dr. 2015a]. Oni su istraživali vrijednosti vibracija uslijed miniranja na kamenolomu granita, Malezija. Autori su otkrili da ICA-ANN model pruža predviđanje visoke tačnosti u poređenju sa drugim korišćenim modelima. U 2015. godini, Hajihassani i dr. [2015a] razvili su novi hibridni model ANN unapređen dominantnim konkurentnim algoritmom za predviđanje maksimalne brzine oscilovanja (PPV) koja je rezultat 95 miniranja na lokaciji kamenoloma granita u Maleziji. Mjereni su sljedeći parametri miniranja: dužina bušotine, linija najmanjeg otpora, količina eksploziva po intervalu usporenja, Joungov modul, brzina P-talasa i rastojanje od mjesta miniranja do mjesta mjerenja. Dobijeni rezultati ukazuju da predloženi model zasnovan na ANN ima veliku tačnost predviđanja u poređenje sa konvencionalnim prediktorom koji su predložili Duvall i Fogelson [1962]. Dalje su Hajihassani i saradnici koristili hibridni model ANN-a i PSO algoritam za procjenu vibracija izazvanih miniranjem koristeći sedam ulaznih parametara. Izmjerali su 88 podataka PVV pri miniranju [Hajihassani i dr. 2015b] i trenirali sa optimizovanim PSO algoritmom. Autori su otkrili da predloženi PSO-ANN model daje predviđanje potresa visoke tačnosti u odnosu na ostale modele. Hasanipناه i saradnici [2017] razvili su model višestruke linearne regresije (MLR) za predviđanje vibracija tla izazvanih eksplozijom. Njihovi rezultati su pokazali da procjena zasnovana na pristupu MLR pruža tačnost predviđanja sa R^2 većim od 0,85.

Ragam i Nimaje razvili su neuronsku mrežu sa propagacijom unazad sa šest ulaznih parametara i pet skrivenih neurona za predviđanje vibracija tla [Ragam i Nimaje 2018a] izazvanih miniranjem u rudniku krečnjaka u Indiji, 2018. godine. Autori su otkrili da rezultati modela ANN mogu pružiti visoku tačnost u poređenju sa drugim korišćenim modelima. U 2018. godini Ragam i Nimaje su koristili model ANN za predviđanje PPV izazvane vibracijama tla pri miniranju. Autori su razvili model neuronskih mreža zajedno sa šest empirijskih jednačina konvencionalnog prediktora [Ragam i Nimaje 2018b] i statističkim modelom. Njihovi predloženi rezultati modela ANN mogu preciznije predvidjeti vibracije tla u poređenju s različitim konvencionalnim modelima predviđanja koji su dostupni. Zhongia i Ksiaoguang su formirali inteligentni model ANN optimizovan korišćenjem redukcije dimenzionalnosti faktorske analize i srednje vrijednosti udara [Zhongya i Xiaoguang 2018] za predviđanje i procjenu vibracija tla pri miniranju. Autori su usvojili devet ulaznih parametara sa 98 izmjerenih podataka pri miniranju. Predloženi model PVV bio je napredniji u poređenju sa drugim modelima. Prashanth i Nimaje razvili su tri tipa neuronskih mreža i SVM modele za predviđanje

brzine oscilovanja stijenske mase. Dobijeni rezultati pokazuju da model neuronskih mreža može preciznije predvidjeti PPV u poređenju sa drugim modelima [Prashanth i Nimaje 2018]. Ragam i Nimaje su 2018. godine predložili model zasnovan na neuronskim mrežama za procjenu vibracija tla izazvanih miniranjem [Ragam i Nimaje 2018c] za određivanje brzine oscilovanja stijenske mase. Autori su zaključili da model ANN pruža visok koeficijent determinacije i malu srednju kvadratnu grešku. Istraživanja [Garai i dr. 2018] u kojima su korišćena tri modela za predviđanje vibracija tla izazvanih miniranjem, došla su do rezultata da se modelom ANN predviđela najtačnija vrijednost sa najvišim koeficijentima korelacije ($R^2=0,96-0,98$). Dok je metoda Random Forest predviđela vrijednosti sa nižim koeficijentom korelacije od ANN, ali većim od metode zasnovane na redukovanom rastojanju. Analizirajući dobijene rezultate, istraživači su zaključili da se metoda ANN pokazala kao najpouzdanija (među tri korišćene metode) za predviđanje vibracija tla izazvanih eksplozijom pri miniranju.

U studiji Kumar i Choudhary [2019] su zaključili da se korišćenjem vještačkih neuronskih mreža, sa 6 ulaznih parametara od 34 miniranja, mogu predvidjeti vibracije tla koje su blizu stvarne tj. izmjerene vrijednosti. Metoda ANN je dala bolje rezultate predviđanja u poređenju sa empirijskim odnosom koji daje USBM ili CMRI metode koje su takođe bile predmet navedene studije. S druge strane, Hudaverdi i Akyildiz [2019] su pokazali da procjene zasnovane na ANN pružaju zadovoljavajuće rezultate za kratkoročna predviđanja ali su manje efikasne za dugoročna predviđanja.

Pored velikog broja istraživanja koja obuhvataju primjenu metodologije ANN, dio ovih istraživanja bavi se i uticajem vibracija, izazvanih miniranjem, na građevinske objekte. Ozcelik [2018] je izvršio analizu vibracija tla pri miniranju i njihov uticaj na nastanak pukotina u stambenim zgradama u Turskoj, koristeći podatke iz tri kamenoloma. Autor je utvrdio, da aktivnosti miniranja ne izazivaju nikakva konstruktivna oštećenja, jer brzine oscilovanja zabilježenih miniranja su bile u dozvoljenim granicama. Noren-Cosgriff i dr. [2020] su sprovedeli eksperiment miniranja na terenu i zaključili, da iako je nivo maksimalne brzine oscilovanja i naprezanja bio mnogo iznad graničnih vrijednosti, nisu pronađena vidljiva oštećenja ni u jednoj od dve posmatrane zgrade. Chiquito i saradnici [Chiquito i dr. 2019] testirali su tri različita sigurnosna rješenja koja imaju za cilj da poboljšaju čvrstoću zidova od opeke na uticaja eksplozije. Dobijeni rezultati pokazuju da ojačanje od staklenih vlakana postavljena na unutrašnju stranu zida pruža najveću zaštitu.

U istraživanjima na uticaj seizmičkih talasa nastalih miniranjem u blizini rudnika na okolne objekte, [Vasović 2016] sprovedena je dinamička analiza postojećih objekata na uticaj izmjerenih vremenskih zapisa. Rezultati su pokazali da su, čak i u slučajevima prekoračenih maksimalnih brzina oscilovanja

tla, naprezanja u prizemnim kućama bila daleko ispod dozvoljenih, tako da nije moglo doći do pojave oštećenja. Takođe, primjena metode dinamičke analize može pomoći istraživačima, i pokazati im na kojim mjestima su najveća naprezanja, i gdje će se pojaviti prva oštećenja. Ovaj postupak omogućava precizniji pregled objekata u potrazi za oštećenjima od miniranja, kao i mogućnost da se označe i iz razmatranja eliminišu oštećenja koja su proizvod nekih drugih dejstava.

Sumirajući pregled nekih od najuticajnije dosadašnjih naučnih istraživanja u oblasti predviđanja brzine oscilovanja stijenske mase i njihovih performansi predviđanja, u kojima su korišćene vještačke inteligentne tehnologije, možemo zaključiti da ova metoda predikcije daje pouzdanije i tačnije podatke predikcije. Pregledom dosadašnjih istraživanja zaključili smo da se broj ulaznih parametara za modele, koji najviše utiču na brzinu oscilovanja stijenske mase, kreće u rasponu od 2 do 12, i broj izmjerenih podataka tj. miniranja je različit i kreće se od 32 do 182, a koeficijent korelacije, R^2 je od 0,85 do 0,99.

3 OPŠTI DIO

3.1 Upotreba miniranja u rudarstvu

Miniranje je sastavni dio tehnologije eksploatacije čvrstih mineralnih sirovina. Bez primjene eksploziva, veliki broj rudarskih radova ne bi se mogli izvoditi ili ne bi bili ekonomski opravdani. Tehnologija miniranja na površinskim kopovima predstavlja drobljenje stijenske mase primarnim ili proizvodnim miniranjem korišćenjem osnovnih principa izbora parametara miniranja i projektovanja [Savić 2000]. Proučava se, primjena energije eksploziva za drobljenje stijene i kontrola sporednih efekata miniranja [Konya i Walter 1990].

Eksplozivi su jedinjenja ili smjese jedinjenja koja mogu da se u vrlo kratkom vremenskom periodu hemijski razlože uz oslobađanje velike količine energije i gasova pod visokim pritiskom i visokoj temperaturi. Proces razlaganja eksploziva ili detonacija traje vrlo kratko, skoro trenutno, i njegovo trajanje zavisi od brzine razlaganja eksploziva (detonacione brzine) i dužine stuba eksploziva.

Osnovni zadatak i cilj proizvodnih miniranja na površinskim kopovima je odvajanje stijenskog materijala od masiva, njegovo usitnjavanje do zahtjevane granulacije i odbacivanje do određenog rastojanja. Postupci proračuna i izvođenja miniranja u rudarstvu zavise od karakteristika radne sredine u kojoj se miniranje izvodi, a uspjehnost primjene energije eksploziva ocjenjuje se na bazi karakteristika minirane mase. Usklađivanjem parametara miniranja kao faktora na koje projektant i izvođač miniranja mogu da utiču, sa geološkim i fizičko-mehaničkim karakteristikama sredine koji su faktori na koje se ne može uticati, obezbjeđuje se maksimalno iskorišćenje energije eksploziva uz minimalno ispoljavanje negativnih efekata [Stojadinović 2009].

Da bi se smanjio obim minerskih radova povećavaju se eksplozivna punjenja u jednoj bušotini i istovremena miniranja sa desetinama, pa i stotinama tona eksploziva. Rudarska eksploatacija mineralnih sirovina vrši se na sve većim dubinama, a sa povećanjem dubine bitno se mijenjaju uslovi miniranja i povećavaju se seizmički efekti pri miniranju [Kovačević 2005]. Ovo znači da postoji stalan trend u povećanju obima korišćenja energije eksploziva u rudarstvu.

Tehnologija miniranja na kopovima susreće se uglavnom sa tri grupe zahtjeva: adekvatno drobljenje stijenske mase, očuvanje okoline i očuvanje stabilnosti kosina kopova [Savić 2000]. Masovna miniranja na površinskim kopovima praćena su i ekološkim uticajima, tj. izazivaju često neprihvatljivo uznemiravanje okoline (potresi, vazdušni udari, leteći komadi, prašina, gasovi). Zaštita okoline od potresa visokog intenziteta, se obezbjeđuje poštovanjem postojećih standarda i metoda kontrole miniranja i ograničenja pri izvođenju miniranja na površinskim kopovima.

Glavni zadatak pri eksploataciji mineralnih sirovina na površinskim kopovima je, da se u zavisnosti od rudarsko-geoloških i proizvodnih uslova izabere odgovarajuća metoda miniranja. Pravilan izbor metode miniranja u procesu otkopavanja zavisi od niza faktora. Tako da se tehnologija miniranja u rudarstvu može podijeliti na različite metodološke postupke ili vrste miniranja. U rudarskoj praksi se mogu izdvojiti sljedeći tehnološki postupci miniranja:

- miniranje kod izrade površinskih i podzemnih prostorija,
- primarno ili proizvodno miniranje,
- miniranje kod završavanja etaža (obodno miniranje),
- sekundarno miniranje,
- miniranje u cilju odsjecanja kompaktnih blokova i
- miniranje u cilju direktnog otkrivanja korisne sirovine, tj. premještanja stijenske mase

Tehnologija miniranja svodi se na primjenu jedne ili kombinaciju sljedećih minerskih tehnika: tehnika zaloma, miniranje bušotinskim punjenjima paralelnim bar jednoj slobodnoj površini (etažno miniranje) i tehnike konturnog miniranja.

Kod miniranja na površinskim kopovima bušotine su vertikalne ili kose orjentisane naniže. Prilikom izvođenja miniranja, moraju se poštovati određena ograničenja, odnosno okolni objekti se moraju štititi od potresa pri miniranju, od vazdušnih udara i letećih komada pri miniranju na kopovima. Osnovni zahtjev koji se kod primarnog miniranja postavlja je postizanje određenog stepena usitnjavanja odnosno granulacije odminirane mase, definisanjem veličine najvećeg komada i srednjeg prečnika odminirane mase. Postavlja se i zahtjev u pogledu položaja odminirane mase koji se odnosi na pravac i daljinu odbacivanja i visinu odminirane mase.

Kod svakog miniranja stijenske mase postoje dve grupe parametara:

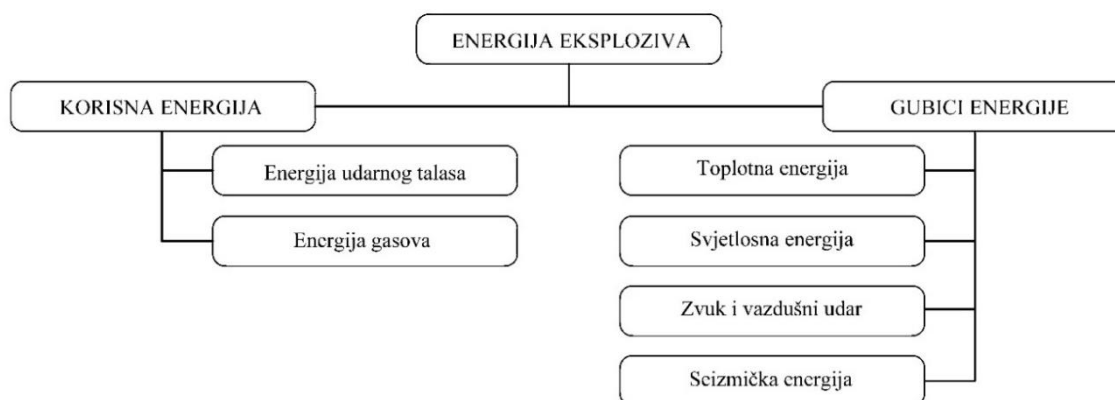
- parametri na koje miner nema uticaj i kojima mora da se prilagođava, kao što su: geološke karakteristike stijenske mase (vrste stijena i njihove osobine, raspucalost masiva, itd), udaljenost određenih objekata različite namjene i osjetljivosti na potrese, itd, i
- minerski parametri koji mogu da se mijenjaju i podešavaju da bi se ostvarili željeni efekti.

3.1.1 Efekti miniranja i nastanak seizmički talasa

Miniranje je delikatan i pažljivo primjenjen tehnički postupak kojim se energijom oslobođenom detonacijom eksploziva usitnjava stijenska masa u podzemnim i površinskim rudnicima, iskopima, usjecima i pri izgradnji objekata. Energija eksploziva, koja predstavlja potencijalnu energiju hemijskih veza između komponenti koje čine eksploziv, se pri detonaciji eksplozivnog punjenja u

bušotini predaje stijeni. Ova energija se u stijeni jednim dijelom troši na njeno usitnjavanje (drobljenje) i odbacivanje, što je i željeni efekat pa se tretira kao korisna energija (koristan rad). Prema nekim istraživanjima [Armaghani i dr. 2014; Khandelval i Monjezi 2013, Kuzu 2008] samo 20-30% energije eksplozije troši se na usitnjavanje i odbacivanje minirane stijene, dok se preostali dio prenosi na tlo i okruženje. U procesu usitnjavanja stijenske mase izdvajaju se četiri osnovne faze [Savić 2000], i to su: detonacija, prostiranje udarnog talasa, ekspanzija gasova pod pritiskom i odbacivanje stijenske mase.

Nosioci korisne energije su udarni talas i širenje gasovitih produkata eksplozije. Pretpostavlja se da udarna energija čini približno 15%, a gasna energija približno 85% ukupno predate energije eksplozije na stijenu. Ostatak energije se troši na prekomjerno drobljenje i usitnjavanje stijenske mase, razbacivanje komada, zagrijavanje stijenske mase, vazdušne udare, svjetlosne efekte i seizmičke talase [Ebrahimi i dr. 2015] što su negativni i neželjeni efekti miniranja na površinskim kopovima (slika 3. 1). Pošto ovaj dio energije ne vrši koristan rad može se smatrati izgubljenom energijom (štetan rad) [Konya i Walter 1990]. Ukupno predata energija eksplozije u oba oblika troši se kroz produktivne efekte miniranja i neželjene efekte.



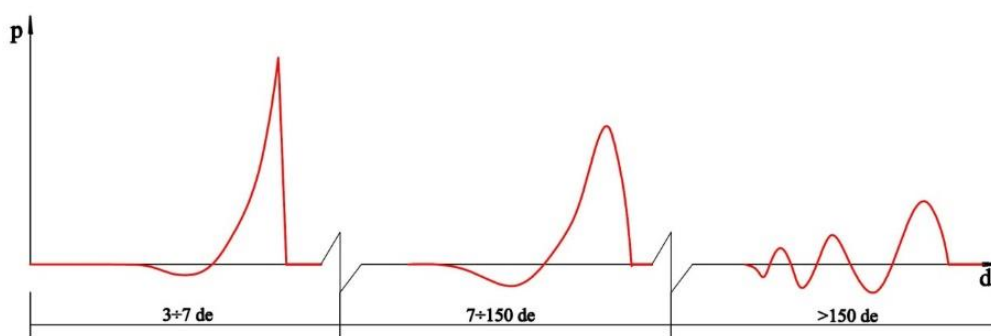
Slika 3. 1 Način raspodjela energije eksploziva [Figun i dr. 2016]

Na bazi ispitivanja Berta [Berta 1990] zaključuje se da energija predata stijeni, može se, približno raspodjeliti na sljedeće efekte, kao što je prikazane u tabeli 3. 1.

Tabela 3. 1 Raspodjela energije eksploziva predate stijeni [Berta 1990]

Efekat miniranja	Utrošak energije (%)
Seizmički efekti miniranja	48
Vazdušni udari	38
Drobljenje stijenske mase u masivu	15
Odbacivanje izdrobljene mase	4
Sprašivanje zidova bušotine	1,5÷2
Razlijetanje komada	>1,0
Drobljenje oko minskog polja	>1,0

Prilikom detonacije eksplozivnog punjenja u bušotini, formira se reakcioni front na čijem čelu se odvija proces razlaganja eksploziva. Ovaj front je front detonacionog talasa i kroz eksplozivno punjenje se kreće detonacionom brzinom [Persson i dr. 1994]. Uslijed velike brzine reakcije i naglog oslobađanja gasovitih produkata detonacije u samom punjenju, a na liniji fronta detonacionog talasa dolazi do naglog porasta pritiska (detonacionog pritisaka), koji zatim eksponencijalno opada. Zavisno od vida deformacija koje poremećaj izaziva u okolnoj stijeni, energije koju nosi to jest amplitude, brzine kojom se kreće, može se uočiti transformacija poremećaja od udarnog talasa, preko talasa pritiska do elastičnog P-talasa (slika 3. 2).



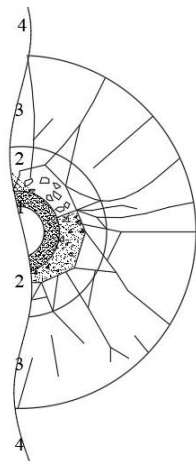
Slika 3. 2 Transformacija impulsnog talasnog poremećaja pri udaljavanju od mjesta detonacije od udarnog talasa, preko talasa pritiska do elastičnog talasa [Stojadinović 2009]

U zoni u samoj okolini bušotine, poremećaj se kreće brzinom koja je veća od brzine kretanja zvuka kroz tu sredinu i predstavlja udarni talas. Pritisak koji nastaje na čelu fronta udarnog talasa daleko prevazilazi pritisnu čvrstoću stijene i izaziva plastične deformacije. U ovoj zoni stijenska masa je smrvljena u prah i naziva se zona sprašivanja (mrvljenja) (slika 3. 3). Prostire se do rastojanja od $3\div 7$ prečnika eksplozivnog punjenja.

Povećanjem rastojanja, opada energija poremećaja, ali naprezanja su i dalje veća od jednoaksijalnih čvrstoća stijene pa dolazi do formiranja prslina i pukotina u stijenskoj masi. Ova zona je zona drobljenja (razaranja) i prostire se na rastojanju od $7\div 150$ prečnika eksplozivnog punjenja. Zona drobljenja se dijeli na dva dijela: zona intenzivnog razaranja i zona smanjenog razaranja, kao što se vidi na slici 3. 3 [Savić 2000].

Kako se poremećaj radijalno širi kroz stijensku masu, njegova energija brzo opada, i nastaju elastične deformacije. Na rastojanjima većim od 150 prečnika eksplozivnog punjenja javlja se zona potresa (seizmička zona) u kojoj nema daljeg drobljenja stijene. Poremećaj se kreće kroz stijensku masu brzinom zvuka kao elastični longitudinalni talas pritiska ili P-talas, a zatim se u stijenskoj sredini formira složeni seizmički talas koji se radijalno širi od mjesta detonacije eksplozivnog punjenja i koji

u stvari predstavlja seizmički talas, slika 3. 3. Treća zona u kojoj se vrši samo pomjeranje materijalnih čestica poznata je i kao seizmička zona koja može biti štetna u pogledu otpornosti objekata ili stabilnosti stijenskog materijala. Između pomenutih zona ne postoji oštra granica već postepen prelaz iz jedne u drugu.



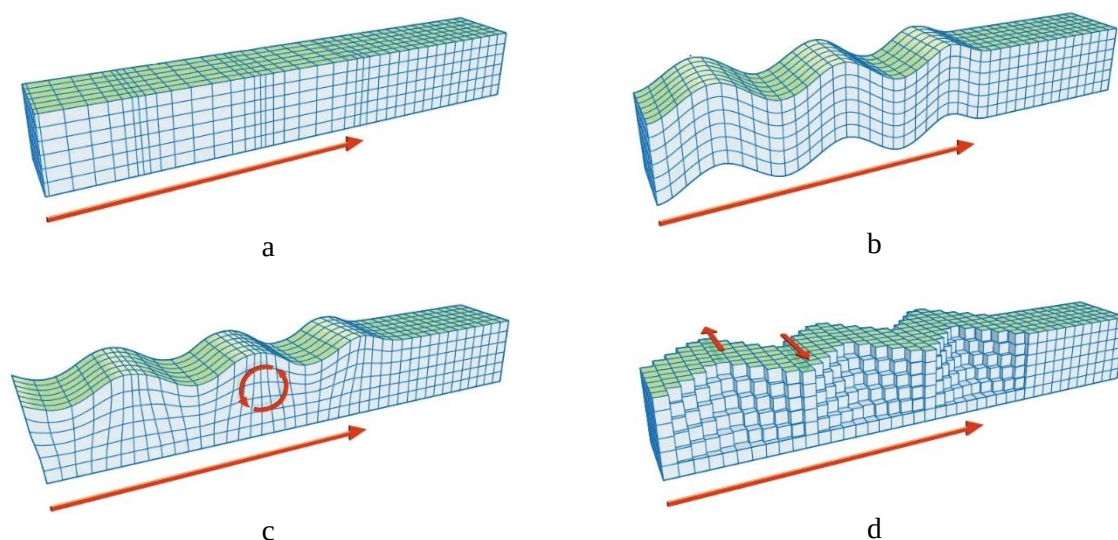
Slika 3. 3 Regije dejstva eksplozije, 1-regija sprašivanja, 2,3- regija drobljenja (zona intenzivnog (2) i smanjenog razaranja (3), 4- regija potresa (zona elastičnih deformacija) [Savić 2000]

Seizmički talasi se prostiru koncentrično od mejsta miniranja, i sa povećanjem rastojanja intenzitet seizmičkih talasa slabi, ali se potresi uzrokovani miniranjem mogu osjetiti na velikim rastojanjima [Persson i dr. 1994].

3.1.2 Vrste i parametri seizmičkih talasa

Prema načinu ponašanja i mjestu prostiranja seizmički talasi se dijele u dvije grupe: zapreminske (prostorne) i površinske talase. Zapreminski talasi napreduju kroz stijensku masu u svim pravcima i izazivaju dva vida deformacija pa se i razlikuju dva osnovna tipa. Prvi tip su uzdužni (longitudinalni) talasi pri kojima se čestice kreću u pravcu prostiranja talasa, slika 3. 4a. Kako se elastične deformacije prenose najkraćim putem i prvi stižu do mjernog mjesta, pa se ovi talasi nazivaju i primarni talasi ili P-talasi.

Kada longitudinalni talas naiđe na diskontinuitet u stijenskoj masi, uslijed refleksija i refrakcija dolazi do pojave drugog tipa talasnih kretanja koja izazivaju smičuće deformacije (promjenu oblika). Pod njihovim dejstvom čestice stijene osciluju u pravcu normalnom na pravac prostiranja talasa, to jest poprečno ili transversalno, slika 3. 4b. Kreću se sporije od longitudinalnih, kasnije stižu do mjernog mjesta, pa su zato nazvani sekundarni, S-talasi. U odnosu na ravan oscilovanja mogu biti horizontalno ili vertikalno polarizovani.



Slika 3. 4 Prostiranje seizmičkih talasa i oblik deformacije koje izazivaju: a) uzdužni (primarni P- talasa), b) poprečni (sekundarni S-talasa), c) površinski Rejljevi talasi, d) Loveovi talasi [Stojadinović 2009]

Površinski talasi su dobili ime po debljini sloja po kojem se prostiru, a ta debljina je približno jednaka njihovoj talasnoj dužini i obično iznosi 100 - 200 m. Ovi talasi se kreću neposredno ispod površine. Površinskih talasa ima više vrsta zavisno od putanje kretanja čestica sredine:

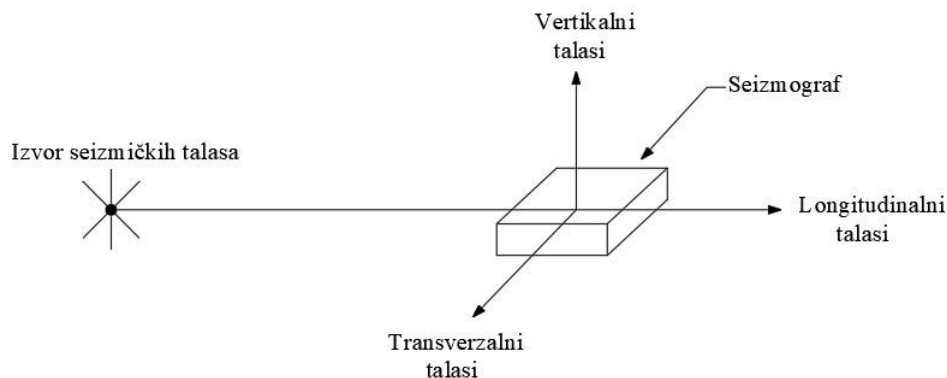
- talasi tipa R ili Rejljevi talasi - oscilovanje materijalnih čestica tla se vrši po eliptičnoj putanji, čija je glavna osa vertikalna, slika 3. 4c. U donjem dijelu elipse čestice se kreću od izvora eksplozije, a u gornjem dijelu u pravcu izvora,
- talasi tipa Q ili Loveovi talasi - čestice se kreću upravno na pravac prostiranja talasa, slika 3. 4d, a kretanje se odvija u horizontalnoj ravni i
- talasi tipa C - nastaju kombinacijom R i Q talasa, materijalne čestice pomjeraju se po dijagonalnoj putanji.

P-talasi se prostiru kroz stijensku masu najvećom brzinom, brzina S-talasa je manja, a najmanju brzinu imaju površinski talasi. Osnovni parametri svih talasa su amplituda, frekvencija i period oscilovanja, talasna dužina i brzina napredovanja talasa. Sve veličine seizmičkog talasa se dobijaju analizom zapisa seizmografa, koji predstavlja zapis oscilovanja tla. Seizmografi direktno mjere, tri osnovna parametra oscilovanja tla: brzinu oscilovanja, pomjeraj (pomjeranje) i ubrzanje čestice tla.

Brzina oscilovanja čestica tla predstavlja brzinu pomjeraja čestica tokom oscilovanja. Iskazuje se u (cm/s) ili (mm/s). Pomjeraj čestica tla od svog ravnotežnog položaja predstavlja rastojanje na kojem se čestica udaljava od svog ravnotežnog položaja u toku oscilovanja. Iskazuje se u (mm) ili (μm). Ubrzanje čestica tla je stepen promjene brzine oscilovanja. Iskazuje se u mm/s^2 ili g ($g=9,81 \text{ m/s}^2$).

3.1.3 Mjerenje potresa seizmografom

Potresi tla nastali miniranjem mjere se instrumentima koji se zovu seizmografi. Seizmografi su projektovani da vrše mjerenje i bilježenje pomjeraja tla i vazdušnih udara nastalih od miniranja. Sastoje se od senzora osjetljivih na pomjeraj, smještenih van ili u kućištu, blokova za obrade signala i prikaz intenziteta potresa. Izgled kućišta senzora zavisi od proizvođača i može biti u vidu valjka, kvadra, kocke. Digitalni seizmografi su elektronski instrumenti, a izvor napajanja su baterije standardnog tipa koje su dovoljne za više mjeseci rada. Seizmografi mogu mjeriti bilo koji od osnovnih parametara oscilovanja tla, brzinu, pomjeraj ili ubrzanje oscilovanja tla. Tri kanala seizmografa mjere i bilježe veličine tri komponente brzine oscilovanja tla (longitudinalnu, vertikalnu i transversalnu komponentu) u tri međusobno upravna pravca, a četvrti kanal bilježi intenzitet vazdušnih udara. Na slici 3. 5 prikazan je prostorni položaj tri međusobno upravne komponente oscilovanja na seizmografu. Vertikalna komponenta predstavlja kretanje gore - dole i označava se sa V , longitudinalna (ili radijalna) komponenta predstavlja kretanje duž linije spajanja izvora i tačke registrovanja L i poprečna komponenta predstavlja kretanje pod pravim uglom zavisno od linije koja spaja izvor i tačku registrovanja označena sa T .



Slika 3. 5 Komponente oscilovanja [Konya i Walter 1990]

Prije nego se počne sa mjerenjem potresa pri miniranju, u seizmograf se mogu unjeti i podaci koji se odnose na mjesto, datum i vrijeme miniranja, lokaciju instrumenta, broj instrumenta, naziv operatera koji vrši mjerenje i slično. Međunarodno udruženje inženjera koji se bave miniranjem (The International Society of Explosive Engineers - ISEE) predložilo je standarde [ISEE 2009] koje moraju ispoštovati seizmografi za praćenje potresa i vazdušnih udara nastalih miniranja. Standardi se odnose na preciznost, način mjerenja, zapreminsku masu senzora, brzinu uzorkovanja, način postavljanja seizmografa i kalibraciju. Dodatne smjernice za postavljanje akcelometara date su u standardu ISO 5348-3 [ISO 5348-3 1998].

Izmjerene vrijednosti sve tri komponentne brzine oscilovanja i rezultati analiza parametara oscilovanja prikazuju se na ekranu. Svi podaci se mogu odštampati direktno sa seizmografa ili sa kompjutera po prenosu i analizi podataka u odgovarajućem softveru. Maksimalni nivo oscilovanja, prilikom mjerenja brzine oscilovanja tla, dobija se određivanjem apsolutne vrijednosti najveće amplitude oscilovanja mjerene od nulte linije na bilo kom od tri grafika.

Grafik oscilovanja tla u funkciji vremena koje registruje seizmograf naziva se seizmogram. Seizmograf za mjerenje oscilovanja tla pri miniranju uglavnom prikazuje grafik brzine oscilovanja tla V u funkciji vremena koji predstavlja velosigram. Seizmografi prikazuju četiri grafika u funkciji vremena, tako što tri grafika predstavljaju promjenu komponenata brzine oscilovanja tla po vremenu, a četvrti grafik predstavlja izmereni nivo vazdušnog nadpritiska.

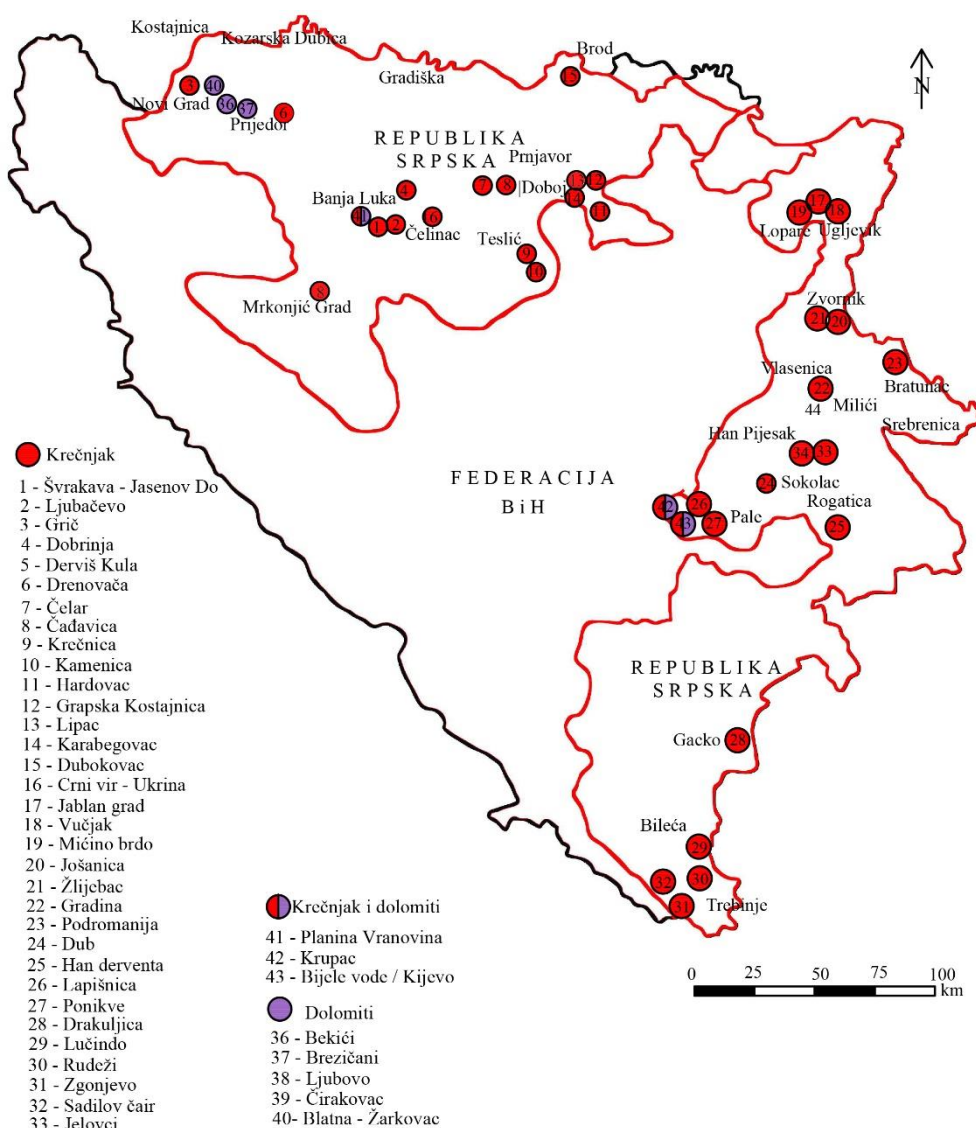
3.2 Pregled kamenoloma u Republici Srpskoj gdje se primjenjuje miniranje

Na području Republike Srpske je aktivno oko 40 kamenoloma na kojima se vrši površinska eksploatacija građevinskog kamena i arhitektonskog građevinskog kamena krečnjaka i dolomita (slika 3. 6). Za većinu površinskih kopova (PK) građevinskog kamena je karakteristična slaba istraženost novih ležišta i mala proizvodnja. U zavisnosti od oblasti primjene građevinski kamen se dijeli na tehničko-građevinski kamen (TGK) - krečnjak i arhitektonski tehnički (ukrasni) kamen.

Na malobrojnim lokalitetima urađena su obimna geološka istraživanja pri čemu su utvrđene bilansne rezerve od oko 192.260.000 m³ i potencijalne rezerve u količinama oko 285.500.000 m³ krečnjaka. Ležišta dolomita su locirana uglavnom u zapadnom i istočnom dijelu Republike Srpske. Ukupne utvrđene bilansne rezerve iznose oko 44.500.000 m³ a ukupne potencijalne rezerve iznose oko 45.400.000 m³ dolomita [Majstorović i dr 2015].

Ležišta tehničko-građevinskog kamena krečnjaka vezana su za gornjopermsko-mezozojsko-paleogenetske formacije. Učešće krečnjaka u litostratigrafskoj građi postepeno se povećava od trijasa i jure da bi u kredi postao osnovni litološki član unutar koga se javljaju dolomiti i dolomitični krečnjaci. Ležišta TGK - krečnjaka pripadaju krupnijim geološkim jedinicama koje su izdvojene na stratigrafskoj, paragenetskoj, tektonskoj ili nekoj drugoj geološkoj osnovi.

Trijaski krečnjaci i dolomiti su šireg domena primjene, javljaju se u vidu većih masa, a ostali dio čine onečišćeni krečnjaci ograničenog domena primjene. Značajni kamenolomi građevinskog kamena - krečnjaka i dolomita trijasko starosti su: Drenovača-Prijedor, Crni Vir-Ukrina, Lapišnica i Krupac u Istočnom Sarajevu, Gradina-Teslić, Dub-Rogatica, Blatna-Novigrad, Podbrdo i Čirakovac u Mrkonjić Gradu, Bijele Vode-Kijevo.



Slika 3. 6 Kamenolomi u Republici Srpskoj [Majstorović i dr 2015]

Jurski krečnjaci predstavljaju kvalitetnu sirovinu šireg domena primjene. Najčešće su masivni i slojeviti do bankoviti krečnjaci, sive do žućkasto smeđe boje. Dosta su poremećeni i deformisani, a mjestimično se susreću pukotine zapunjene glinovitim materijalom. Najznačajniji kamenolomi građevinskog kamena - krečnjaka jurske starosti su [Majstorović i dr 2015]: Ljubačevo i Planina-Vranovina kod Banja Luke i Dub-Rogatica.

Kredni krečnjaci, zauzimaju velike površine i imaju širok domen primjene. Od aktivnih kamenoloma kredne starosti značajni su [Popović 1984]: Rujevica - Kotor Varoš, Dubokovac - Brod, Dobrinja - Banja Luka.

Tercijarni krečnjaci, su podređeni i imaju ograničenu upotrebu. Izuzetak predstavljaju paleocensko-eocenske tvorevine kojima pripadaju najznačajnija ležišta krečnjaka na ovim prostorima: Karabegovac, Hardovac i Orlovača svi se nalaze u Doboju.

Tabela 3. 2 Fizičko mehaničke karakteristike krečnjaka i dolomita [Majstorović i dr 2015]

Lokalitet	Pritisna čvrstoća (Mpa)			upijanje vode (%)	otpornost na habanje (cm/50 cm ²)	zapreminska masa (g/cm ³)	specifična masa (g/cm ³)	poroznost (%)
	u suvom stanju	u vodom zasićenom stanju	poslije smrzavanja					
Karabegovac	125,8	113,9	115,0	0,47	23,51	2,690	2,725	1,29
Hardovac	136,11	126,66	114,49	0,194	11,86	2,661	2,687	1,00
Čađavica	88,91	74,25	66,06	0,184	29,13	2,680	2,703	0,85
Orlovača	128,00	115,00	-----	0,32	12,40	2,664	2,683	1,00
Pilica	137,90	120,50	104,10	0,209	13,20	2,645	2,722	1,28
Šaj kamen	150,39	140,69	137,35	0,23	18,32	2,670	2,730	2,05
Dub	170,98	157,17	150,53	0,04	21,09	2,690	2,710	0,42
Rudeži	101,00	84,10	77,50	0,33	17,40	2,649	2,662	0,63
Švrakava	153,00	120,00	108,00	0,10	19,34	2,690	2,750	2,68
Jošanica	115,00	108,00	90,23	0,38	19,80	2,651	2,690	2,80
Handerventa	135,35	123,24	128,13	0,18	21,20	2,692	2,714	0,42
Krupac	139,21	126,41	130,00	0,24	19,50	2,700	2,710	1,12
Bijele vode	131,93	123,31	111,0	0,08	17,69	2,710	2,760	0,90
Kijevo	125,63	112,75	117,00	0,24	14,00	2,560	2,684	1,42
Ljubačevo	126,75	111,48	----	0,20	17,58	2,672	2,702	0,004
Planina	132,50	122,00	113,40	0,30	20,80	2,692	2,728	1,25
Vranovina	120,70	104,40	98,60	0,84	28,50	2,702	2,812	3,88
Dubokovac	83,14	67,58	53,45	0,52	29,37	2,708	2,758	0,40
Rujevica	85,30	78,03	----	0,12	16,75	2,568	2,679	0,23
Drenovača	130,93	121,39	120,83	0,22	17,66	2,699	2,708	0,50
Čelar	88,91	74,25	66,06	0,18	29,13	2,680	2,703	0,85
Crni vir	176,00	153,30	146,30	0,40	19,72	2,670	2,730	2,50
Gradina Teslić	103,23	88,31	96,30	0,25	17,46	2,670	2,700	1,21
Jošanica	115,16	108,42	90,12	0,38	19,80	2,567	2,734	0,38
Podromanija	96,72	86,72	77,00	0,18	14,90	2,617	2,639	0,80
Lapišnica	131,55	125,18	95,11	0,22	18,60	2,682	2,711	1,24
Gradina Milići	107,18	86,43	71,80	0,118	23,65	2,682	2,710	0,704

U tabeli 3. 2 date su vrijednosti ispitivanja fizičko mehaničkih karakteristika TGK krečnjaka i dolomita za većinu površinskih kopova na području Republike Srpske. Za tehnički građevinski kamen bitno je da posjeduje prirodne karakteristike kojima se određuje njegova upotrebljivost, na osnovu mineraloških i petrografskih karakteristika kao i fizičko mehaničke karakteristike.

Građevinski tehnički kamena može se upotrebljavati kao: drobljeni kamen za održavanja cesta i izradu donjeg stroja cesta (nosivih slojeva), tampon, kameni agregat za izradu asfalta i betona, tucanik za izradu zastora željezničkih pruga, lomljeni kamen za zidanje, kamen za izradu obaloutvrda i vodopropusta i kao sirovina u metalurgiji, za proizvodnju kreča i dr. [Ćulibrk 2002].

Eksploatacija TGK krečnjaka vrši se površinskim kopovima, brdskog tipa, sa diskontinualnim sistemima eksploatacije i odgovarajućom tehnologijom. Sistem eksploatacije TGK krečnjaka karakterišu radni parametri etaže i konstrukcija tj. geometrija površinskog kopa. Za diskontinualni sistem eksploatacije TGK krečnjaka karakteristične su sljedeće tehnološke faze:

- skidanje otkrivke - jalovinskog materijala: Otkrivku na kamenoloma čine rastresite gline, zaglinjeni i raspadnuti krečnjaci i manjim dijelom humusno-glinoviti materijal. Skidanje otkrivke se vrši riperovanjem i guranjem buldozerom do mjesta odlaganja ili utovara u kamione. Otkrivka se odlaže unutar ili pored površinski kop, jer su količine otkrivke male.
- bušenje i miniranje: Izboru i usaglašavanju optimalnih parametara bušenja i miniranja mora se posvetiti posebna pažnja kao bi bili zadovoljeni tehničko-tehnološki, sigurnosni i ekonomski uslovi u procesu dobijanje krečnjaka [Majstorović i Malbašić 2013].
- utovar i transport odminiranog TGK do postrojenja za preradu: Za utovar rovnog krečnjaka na osnovnoj etaži koriste se: utovarivač - za kraće udaljenosti od prijemnog bunkera ili bager - za utovar u kamione kojima se transportuje do prijemnog bunkera postrojenja za preradu.
- pomoćne tehnološke faze su: održavanje puteva, odlagališta i osnovnog platoa, odvodnjavanje PK i odlagališta, održavanje mehanizacije i opreme, snabdijevanje energijom i dr.

3.3 Analiza uticaja potresa od miniranja na objekte

Svi parametri bušenja i miniranja, kao i parametri stijenske mase na površinskim kopovima imaju veći ili manji uticaj na intenzitet seizmičkog talasa. Na parametre bušenja i miniranja, možemo uticati i usklađivati ih sa geološkim i fizičko-mehaničkim karakteristikama sredine i tipu stijene, koji predstavljaju faktore na koje se ne može uticati, jer su oni prirodno uslovljeni. Usklađenost parametara bušenja i miniranja sa uslovima radne sredine obezbjeđuje maksimalno iskorišćenje energije eksploziva uz minimalno ispoljavanje nepoželjnih efekata u vidu vibracija ili potresa.

3.3.1 Parametri stijenske mase

Geološke i geomehaničke karakteristike stijenske sredine imaju veliki uticaj na potencijal seizmičkih talasa. Za svaku vrstu stijena brzina seizmičkih talasa osciluje u širokim granicama, zavisno od tipa stijene, sastava, gustine stijene, poroznosti, prisustva ili odsustva vode i sl. Na većim rastojanjima od minskog polja, na karakter seizmičkih talasa, presudnu ulogu imaju sredine kroz koje se prostiru. Brzina se mijenja sa povećanjem dubine sloja. U masivnim i homogenim čvrstim stijenama, seizmički talasi se prostiru u svim pravcima, nasuprot tome u složenim geološkim strukturama prostiranje se razlikuje po pravcima. Masivna stijenska masa omogućuje prenos energije talasa na veća rastojanja,

odnosno brže prostiranje seizmičkih talasa sa manjim prigušenjima. Raspucala stijenska masa brže prigušuje talas i on brže slabi u složenoj geološkoj strukturi i prostire se na kraćim rastojanjima. Raspucala zavodnjena sredina dalje prenosi talase od raspucale suve sredine, dok se u poroznim nevezanim sredinama talasi najbrže prigušuju. Čvrste stijene imaju znatno veću elastičnost nego nevezane, pa bolje prenose talase. Frekvencija talasa se smanjuje, dok se amplituda bitno povećava sa debljinom sloja. Kod nevezanih materijala amplitude oscilacije su znatno veće nego kod čvrstih stijena.

Karakteristike stijenskog masiva spadaju u parametre koji utiču na karakteristike seizmičkih talasa, a ne mogu se kontrolisati, jer su prirodno uslovljeni. Jedini šta se može postići je prilagođavanje faktora bušenja i miniranja uslovima radne sredine.

3.3.2 Parametri miniranja

Uticaj nekih parametara bušenja i miniranja je zanemarljiv, dok je uticaj pojedinih parametara značajan, te se njihovim izmjenama može kontrolisati seizmički efekat miniranja. Parametri koji imaju uticaj na pojavu seizmičkih efekata su: specifična potrošnja eksploziva, optimalno vrijeme usporenja, broj i raspored usporenja u mreži, linija najmanjeg otpora, šema iniciranja, vrsta eksploziva, redoslijed iniciranja, prečnik minske bušotine, probušenje minske bušotine, i dr. Parametri čiji smo uticaj razmatrali pri formiranju modela u ovoj disertaciji su: količina eksploziva po intervalu usporenja, ukupna količina eksploziva, rastojanje od mjesta miniranja do mjesta mjerenja, dužina bušotine, rastojanje između minskih bušotina i broj minskih bušotina.

Ukupna količina eksploziva ima veliki uticaj na seizmičke talase ukoliko se vrši trenutno iniciranje, bez usporenja, jer ovaj način iniciranja manifestuje se kao jedinstven impuls potresa. Količina eksploziva po intervalu usporenja je jedan je od najuticajnijih faktor na intenzitet seizmičkog talasa a zavisi od izbora vremena usporenja i šema iniciranja. Rastojanje od mjesta miniranja do mjesta mjerenja ima veliki uticaj na intenzitet potresa. Kako se rastojanje povećava od mjesta miniranja tako se i smanjuje intenzitet prenosa energije talasa kroz stijeski masiv. Na kraćim rastojanjima preovlađuju oscilacije sa visokim frekvencijama, a sa povećanjem rastojanja visokofrekventne oscilacije nestaju. Dužina bušotine određuje masu eksploziva koja se može smjestiti u bušotinu pa tako indirektno utiče na intenzitet seizmičkog talasa. Dužina bušotine određuje i dubinu na kojoj se nalazi eksplozivno punjenje, pa tako dublja punjenja generišu seizmičke talase većeg intenziteta. Rastojanje između bušotina u redu i rastojanje između redova bušotina imaju sličan uticaj kao i linija najmanjeg otpora. Velika geometrija minskih bušotina, treba i veći interval usporenja pri iniciranju, inače dolazi do pojave stiješnjenosti minskih punjenja i velikog seizmičkog efekta. Broj minskih

bušotina ima uticati na ukupno trajanje seizmičkog talasa i na ukupnu količinu energije predate stijenskoj masi ili ugroženim objektima.

3.3.3 Karakterizacija objekata

Vibracije tla zbog pomjeranja tla prilikom miniranja označavaju jedan od osnovnih problema u procesu eksploatacije ruda. Zavisno od nivoa naprezanja koja izazivaju kretanje talasa kroz stijensku masu, na okolnim građevinskim objektima mogu se pojaviti oštećenja prouzrokovana naprezanjima koja prevazilaze čvrstoću građevinskog materijala ili stijenske mase. Nužno je da se prilikom miniranja, nivo vibracija tla koji djeluje na ljude i građevinske objekte može predvidjeti, pratiti i kontrolisati [Vasović 2016].

Vibracije tla su nepoželjna pojava koja može dovesti do oštećenja obližnjih konstrukcija i objekata, susjednih stijenskih masa, puteva, podzemnih radova, padina, pruga, postojećih podzemnih vodovoda i reljefa obližnjeg područja [Torano i dr. 2006; Faramarzi i dr. 2014; Dindarloo 2015]. Oštećenja građevinskih objekata zavise od amplitude pomjeranja tla i od svojstava konstrukcije objekata kao što su vrsta, tip i stanje konstrukcije, kvalitet izgradnje, svojstva i vrsta korišćenih materijala, dinamičkih karakteristika konstruktivnog sklopa, zamora materijala, itd. Radi lakše identifikacije stanja objekata koji se nalaze u neposrednoj blizini mjesta miniranja, u daljem tekstu je prikazana kategorizacija objekata prema njihovoj otpornosti na potrese i oscilacije. Svi objekti su svrstani u tri osnovne kategorije u pogledu otpornosti na potrese, a odnose se na zgrade koje nisu građene po seizmičkim propisima:

- tip-A: Zgrade od neobrađenog kamena, seoske zgrade od nepečene cigle (čerpić), zgrade sa zidovima oblijepljenim blatom, znači da su i najmanje otporne na potrese i vibracije.
- tip-B: Zgrade od pečene cigle (opeke), zgrade od blokova i montažne zgrade (prefabrikovanog materijala), zgrade od prirodnog tesanog kamena i zgrade sa djelimično drvenom konstrukcijom.
- tip-C: Zgrade građene sa armiranobetonskom (AB) konstrukcijom i dobro građene drvene kuće. Ovaj tip građevina je i najotporniji na potrese i vibracije.

Za zgrade A kategorije oštećenja se mogu očekivati kod V-tog seizmičkog stepena, za zgrade C kategorije početna oštećenja mogu očekivati tek kod VII-tog seizmičkog stepena [Purtić 1991].

Kako bi se lakše ustanovilo stanje objekta, neophodna je podjela oštećenja koja je već poznata i koja se koristi u seizmologiji. Oštećenja su razvrstana u pet stepeni:

- I stepen oštećenja - laka oštećenja. Sitne pukotine u malteru. Osipanje kreča sa tavanica, opadanje sitnih dijelova maltera.

- II stepen oštećenja - umjerena oštećenja. Opadanje manjih parčadi maltera sa plafona i zidova, male pukotine u zidovima, padanje crjepova sa krova, padanje dijelova dimnjaka sa krova.
- III stepen oštećenja - teža oštećenja. Duboke pukotine u zidovima, raslojavanje i opadanje plafona, padanje dimnjaka sa krova.
- IV stepen oštećenja - razaranje. Otvorene pukotine u zidovima, rušenje dijelova građevine, kidanje veza između pojedinih dijelova zgrada, rušenje unutrašnjih zidova zgrada.
- V stepen oštećenja - totalno oštećenje. Potpuno razdvajanje konstrukcije i rušenje zgrade.

Tabela 3. 3 Dozvoljene brzine oscilovanja tla i intenziteta potresa za određene tipove i stanje objekata [Krsnik 1989]

Tip i stanje objekta	Dozvoljena brzina oscilovanja tla (cm/s)		Dozvoljeni intenzitet potresa (stepen)	
	Višestruke oscilacije	Pojedinačni udari	Višestruke oscilacije	Pojedinačni udari
Montažne stambene zgrade, trošne kamene zgrade, istorijski spomenici	1	3	IV	V
Stambene i društvene zgrade svih tipova osim montažnih, administrativni i industrijskih objekata koji imaju deformacije, toplane	3	6	V	VI
Administrativni i industrijski objekti, visoki dimnjaci, željeznički tuneli, transportne vodom zasićene pjeskovite kosine	6	12	VI	VII
Jednoetažne skeletne industrijske zgrade, metalne i monolitne AB zgrade, hidrotehnički tuneli, kosine slabo vezanih stijena	12	24	VII	VIII
Završne kosine kamenoloma, usjeka i zasjeka	24	48	VIII	IX

Osnovno pitanje prilikom miniranja u rudarstvu je definisanje jačine seizmičkog potresa, kao i njegovog uticaja na građevinske objekte. Potresi sa većom maksimalnom brzinom oscilovanja su snažniji potresi i predstavljaju veću opasnost za objekte. Jedna od klasifikacija potresa je i po kriterijumu S. V. Medvedeva koja se zasniva na količini i vrsti oštećenja na objektima prema vrijednostima brzine oscilovanja tla [Petrov 1993]. Ova podjela razgraničava dozvoljene brzine oscilovanja prema tipu i stanju objekta, i zavisno od toga da li su oscilacije tla višestruke ili pojedinačne, a prikazane su u tabeli 3. 3.

3.3.4 Standardi koji se koriste za ocjenu uticaja miniranja na objekte

U većini zemalja postoje propisi kojima se reguliše nivo potresa nastalih miniranjem, koji mogu da oštete objekte, a u zavisnosti od njihovog značaja, stanja i dinamičke otpornosti. Iako Pravilnik o tehničkim normativima pri upotrebi eksplozivnih sredstava i miniranju u rudarstvu [Sl. list SFRJ, 26/88 i 63/88] predviđa standard kojim bi se regulisala oblast seizmike miniranja takav standard u Republici Srpskoj ne postoji. U inostranstvu, postoji zakonska regulativa i preporuke kojima se određuju uslovi vršenja miniranja na površinskim kopovima sa aspekta zaštite građevinskih objekata od seizmičkih efekata miniranja. Upravo zbog činjenice da Republika Srpska nema standard kojim bi regulisala problematiku seizmike miniranja u daljem tekstu se daje pregled nekih inostranih standarda, nastali dugogodišnjim istraživanjima, a koji se najčešće primjenjuju kod nas.

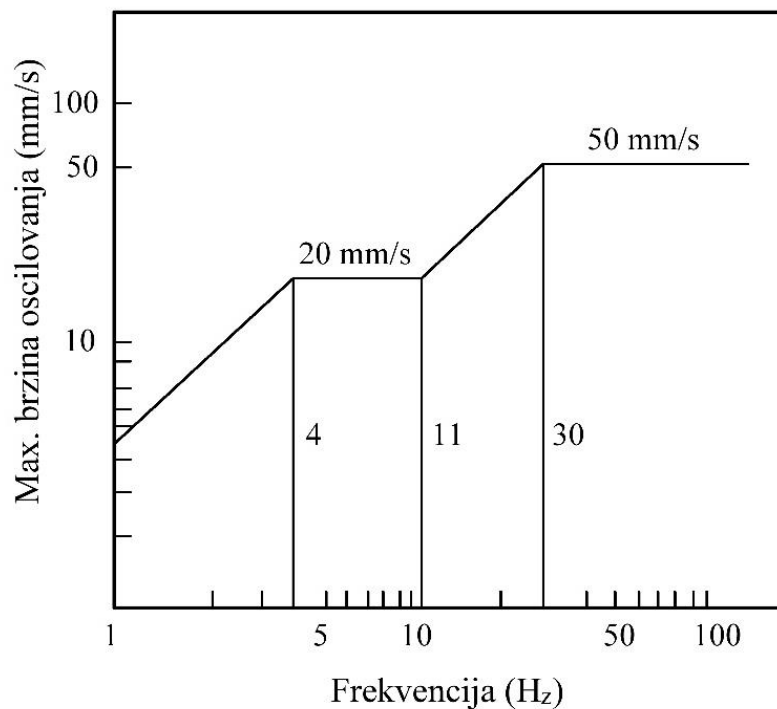
3.3.4.1 Propisi u Sjedinjenim Američkim Državama

Mnogobrojna istraživanja, uticaja miniranja na okolne objekte, uspostavila su vezu između brzine oscilovanja čestica tla, frekvencije potresa, rastojanja od mjesta miniranja i mogućih oštećenja građevinskih objekata, koji se nalaze u blizini rudarskih radova. Američko odjeljenje za površinsku eksploataciju (Office of Surface Mining - OSM), je u Izveštaju RI 8507 [Siskind i dr 1980] modifikovalo predložene kriterijume Američkog Biroa za rudarstvo (USBM), za primjenu na površinskim kopovima i predložilo propise date u tabeli 3. 4. i na slici 3. 7.

Tabela 3. 4 Granični nivoi potresa tla u funkciji rastojanja od mjesta miniranja [Savić 2000]

Redni broj	Rastojanje od mjesta miniranja (m)	Maksimalna dozvoljena brzina (cm/s)	Redukovano rastojanje ($m/\sqrt{kg}$)
1.	0 - 91.4	3.175	22.6
2.	91.5 - 1524	2.54	24.9
3.	1525 i više	1.9	29.4

Veća vrijednost brzine oscilovanja čestica tla je dozvoljena na manjim rastojanjima u odnosu na veća jer sa nisko frekventnim vibracijama objekti mogu ući u rezonancu i može doći do oštećenja objekta uslijed velike brzine oscilovanja čestica tla. Potresi tla sa frekvencijama od 2 do 10 Hz su opasni za objekte jer se najveći dio energije prenosi na objekte. To je posljedica vlastitih (rezonantnih) slobodnih oscilacija objekata koje su unutar opsega od 10 Hz [Kričak 2006].



Slika 3. 7 Granična brzina oscilovanja tla u funkciji frekvencije [Siskind i dr 1980]

3.3.4.2 Ruski standard

Ruski standard vrši klasifikaciju građevinskih objekata po važnosti, vrsti i namjeni u određene klase. Pri tome se svi građevinski objekti dijele na četiri klase [Trajković i dr. 2005]:

I-klasa - Veoma važni objekti i građevine od izuzetnog društvenog značaja, istorijski i arhitektonski spomenici, objekti u čijoj blizini je miniranje zabranjeno, osim samo u izuzetnim slučajevima.

II-klasa - Industrijski objekti velikih razmjera, sa vijekom trajanja 20 - 30 god, kao izvozna okna, cjevovodi, vodovodni tornjevi, velike fabričke hale, objekti i građevine stambene namjene sa velikim brojem ljudi, javne zgrade, pozorišta, domovi kulture,...

III-klasa - Industrijski i administrativni objekti manjih dimenzija i niži od tri sprata, radionice, kompresorske stanice, stambeni objekti za manji broj ljudi, prodavnice, magacini i sl.

IV-klasa - Različite građevine sa ili bez opreme, čije rušenje ne bi ugrozilo život i zdravlje ljudi, kao skladišta, prihvatni punktovi za transport i sl.

Građevinski objekti su podjeljeni u 6 grupa prema stanju i konstruktivnim karakteristikama i za njih se propisuju dozvoljene brzine oscilovanja tla u temeljima objekata, prema tabeli 3. 5.

Tabela 3. 5 Granične brzine oscilacija tla po klasama objekata [Trajković i dr. 2005]

Karakteristike objekta	Granične brzine oscilovanja tla (cm/s)		
	II	III	IV
Stambeni i industrijski objekti i građevine sa AB ili metalnim skeletom obloženi pločama ili ispunjeni lakim materijalom antiseizmički ojačani. Dobar kvalitet gradnje, bez izmjena projektnih rješenja i bez zaostalih deformacija u konstruktivnim elementima.	5,0	7,0	10,0
Objekti i građevine sa AB ili čeličnom konstrukcijom, sa lakom ispunom bez antiseizmičkih ojačanja. Bez zaostalih deformacije u konstruktivnim elementima.	2,0	5,0	7,0
Građevine skeletnog tipa gdje je materijal za ispunu cigla ili kamen. Stare ili nove građevine od cigli ili blokova bez seizmičkih ojačanja. Dobar kvalitet izrade. Nema oštećenja zidova	1,5	3,0	5,0
Skeletne građevine sa pukotine u materijalu ispune i prsline u skeletu. Građevine od cigle i blokova sa naprslinama u nosećim i pregradnim zidovima u vidu kosih pukotina, pukotine u uglovima, itd.	1,0	2,0	3,0
Skeletne građevine sa pukotine u skeletu i pokidane veze između pojedinih elemenata. Zgrade od cigle i blokova sa oštećenjima u nosećim zidovima u vidu kosih pukotina, pukotine u uglovima, itd.	0,5	1,0	2,0
Oštećena AB konstrukcija, korozijom armature, krupne pukotine u materijalu ispune. Zgrade sa pukotinama u nosećim zidovima i pokidanim vezama između zidova. Građevine od panela bez antiseizmičkog ojačanja.	0,3	0,5	1,0

3.3.4.3 Kriterijum Akademije Nauka Rusije

Ukoliko se za ocjenu seizmičkog dejstva koristi brzina oscilovanja tla, onda se preporučuje seizmička skala za ocjenu potresa uslijed miniranja ustanovljena u Institutu Fizika Zemlje Sovjetske akademije nauka, koja se zvanično koristi u Rusiji GOST-6249-52 [Purtić 1991].

Tabela 3. 6 Seizmička skala za ocjenu potresa izazvanih eksplozijom na različitim tipovima konstrukcija [Purtić 1991]

Stepen	Opis dejstva	Brzina oscilovanja, (cm/s)	
		pri zemljotresu	pri eksploziji
I	Samo seizmički instrumenti registruju oscilacije	0,125	0,2
II	Pojedini ljudi u miru i na višim spratovima osjećaju oscilacije	0,125-0,25	0,2-0,4
III	Mali broj ljudi osjeća dejstvo i blago klaćenje visećih predmeta	0,25-0,5	0,4-0,8
IV	Mnogi ljudi osjećaju oscilacije a posuđe i staklo zveckaju	0,5-1	0,8-1,5
V	Svi ljudi osjećaju oscilacije a javljaju se pukotine kod slabijih zgrada	1-2	1,5-3
VI	Javljaju se sitne pukotine a slabije zgrade se oštećuju	2,1-4	3-6
VII	Oštećenja i kod solidnih zgrada, otpada malter, oštećenja dimnjaka	4,1-8	6-12
VIII	Značajna oštećenja, pukotine u zidovima, rušenje vjenaca i dimnjaka	8-16	12-24
IX	Rušenje zidova, tavanica i krovova	-	24-48
X-XI	Veća razaranja, pojava pukotina u tlu, potpuno rušenje zgrada	-	>48

Ovaj standard bično se koriste u domaćoj inženjerskoj praksi, a prikazana je u tabeli 3. 6. Ova skala je opisnog tipa i sadrži 12 seizmičkih stepeni, a usaglašena je sa evropskom skalom Mercalli-Cancani-Seiberg (MCS), koja se koristi za ocjenu potresa uslijed zemljotresa. Ukoliko se u mjestu mjerenja

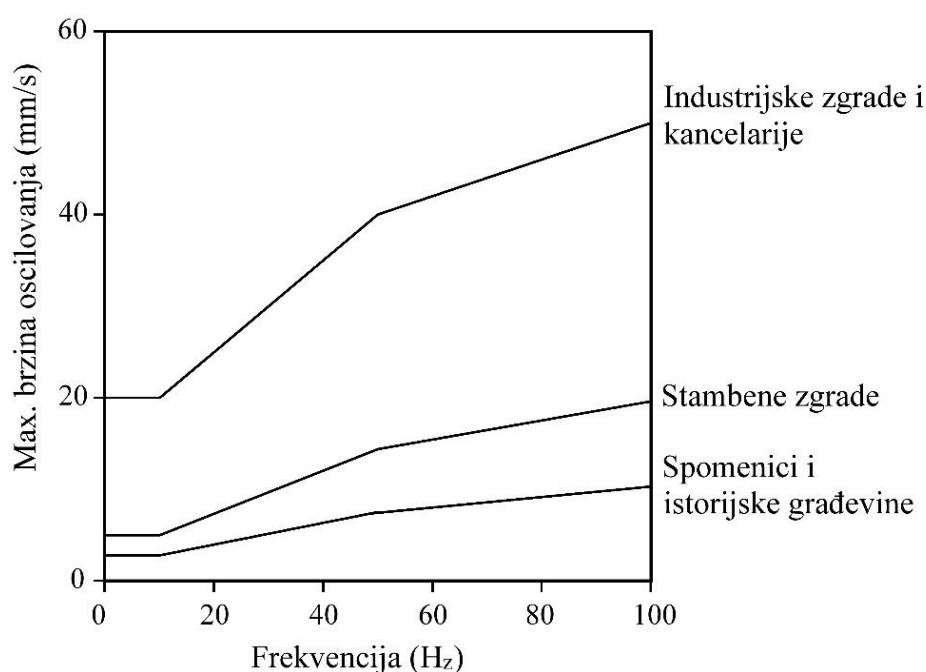
registruje brzina oscilovanja tla uslijed miniranja odmah se može ustanoviti odgovarajući stepen seizmičkog inteziteta potresa, kao i opis dejstva koji on izaziva na objektima koji su izloženi uticaju potresa [Purtić 1991].

3.3.4.4 Njemački standard

U Njemačkoj se koristi standard DIN 4150-3 [DIN 4150 1999] koji definiše maksimalne vrijednosti brzine oscilovanja tla u zavisnosti od frekvencije oscilovanja, namjene i tipa objekta. Standard DIN 4150 precizno definiše mjesto i način mjerenja vibracija.

Tabela 3. 7 Granična vrijednost brzine oscilovanja za standard DIN 4150-3 [DIN 4150 1999]

Red	Tip objekta	Maksimalna dozvoljena brzina oscilovanja (mm/s)			
		Temelj			Ravan tavanica
		Frekvencije (Hz)			Sve frekvencije
		1-10	10 - 50	50 - 100*	
1	Zanatski, industrijski i poslovni objekti i slično projektovani objekti	20	20 – 40	40 – 50	40
2	Stambeni objekti i slične građevine po konstrukciji ili namjeni	5	5 – 15	15 – 20	15
3	Objekti osetljivi na vibracije, a ne pripadaju pod red 1 ili 2 (spomenici pod zaštitom)	3	3 – 8	8 – 10	8
* Kod frekvencija iznad 100 Hz uzima se granična vrijednosti za najmanje 100 Hz					



Slika 3. 8 Grafički prikaz graničnih vrijednosti za standard DIN 4150-3 [DIN 4150 1999]

3.3.4.5 Standard u Velikoj Britaniji

Britanski standard [BS 7385-2 1993] BS 7385: Dio 2: daje preporuke o vrijednostima vibracija iznad kojih bi se objekti oštetili. Oštećenje su podjeljena na: kozmetička (pukotine debljine ljudske kose), malo oštećenja (formiranje velikih pukotina) ili velika oštećenja (oštećenje strukturnih elemenata). Vrijednosti definisane u standardu su povezane sa pragom kozmetičkog oštećenja, obično u materijalima plafona ili obloge zida. Granične brzine oscilovanja tla iznad kojih se mogu pojaviti kozmetička oštećenja, prikazane su u tabeli 3. 8.

Tabela 3. 8 Granične brzine oscilovanja tla prema BS 7385-2 [BS 7385-2 1993]

Tip objekta	Frekvencija (Hz)	Maksimalna dozvoljena brzine oscilovanja tla (mm/s)
Nearmirani objekti ili objekti sa lakom skeletnom konstrukcijom. Stambeni ili manji komercijalni objekti.	4-15 Hz	15 mm/s na 4 Hz i raste do 20 mm/s na 15 Hz
	preko 15 Hz	20 mm/s na 15 Hz i raste do 50 mm/s na 40 Hz i preko
AB objekti i objekti sa skeletnom konstrukcijom. Industrijski i veliki komercijalni objekti.	4-15 Hz	do 50 mm/s na 4 Hz i preko
	preko 15 Hz	

3.3.4.6 Standard u Švajcarskoj

Švajcarski standard (Kriterijum prema SN 640312) sadrži tabelarni prikaz dozvoljenih brzina oscilovanja u odnosu na frekvenciju oscilovanja (tabela 3. 9).

Tabela 3. 9 Standard SN 640312 [Purtić 1991]

Tip objekta	Opis objekta	Frekvencija oscilacija f (Hz)	Rezultantna brzina oscilacija V (mm/s)
I	AB i čelične konstrukcije, potporni zidovi, mostovi, stubovi, neukopani cjevovodi, podzemne prostorije, kaverne, pećine, tuneli, rovovi sa ili bez betonske obloge	10-60	30
		60-90	30-40
II	Zgrade sa zidanim temeljima i betonskim pločama, izliveni ili gotovi betonski zidovi, potporni zidovi ožidani sa lomljenim kamenom, podzemne prostorije i cjevovodi u nevezanim materijalima	10-60	18
		60-90	18-25
III	Zgrade sa zidanim temeljima i podrumskim pločama u betonu, drveni stropovi (podovi) u gornjim etažama, izliveni zidovi ili zidovi od umjetnih materijala	10-60	12
		60-90	12-18
IV	Objekti posebno osjetljivi na potres ili oštećeni objekti, istorijski spomenici	10-60	8
		60-90	8-12

3.3.4.7 Australijski standard

Australijski standard [AS 2187-2 1993], objekte razvrstava u tri kategorije, u odnosu na vrstu, konstrukciju i namjenu objekata. Granične brzine oscilovanja tla, po preporukama ovog standarda prikazane su u tabeli 3. 10.

Tabela 3. 10 Maksimalna brzina oscilovanja po Australijskom standardu [AS 2187-2 1993]

Klase objekta		Granična brzina oscilovanja V (mm/s)
1.	Stambeni objekti manje spratnosti, poslovni objekti koji nisu klasifikovani u 2	10
2.	Industrijski i poslovni objekti ili konstrukcije ojačane AB ili čelične konstrukcije	25
3.	Objekti s više spratova, bolnice, brane ili istorijski značajni objekti gdje ne postoji naznačena maksimalna brzina	5

3.4 Primjeri uticaja potresa od miniranja na objekte iz inženjerske prakse

Miniranja pri eksploataciji u rudnicima i građevinskim projektima korišćena na površini, često izazivaju potrese, pomjeranja tla i vazdušni pritisak, razbacivanje komada stijene koji imaju manji ili veći uticaj na okolne objekte. Potresi i vibracije tla nastali prilikom miniranja u rudnicima predstavljaju talasno kretanje koje se širi od mjesta miniranja, ka okolini, izazivajući i oscilovanje objekata na površini. Pritužbe na negativne efekte potresa izazvanih miniranjem variraju u širokom rasponu, od uticaja na ljudsku psihu do rušenja objekata. U slučaju neadekvatne kontrole, potresi mogu da izazovu ozbiljna oštećenja stambenih i industrijskih objekata i instalacija [Savić 2000].

Najvažnije osobine potresa pri miniranja su frekvencija, intenzitet i trajanje. Ukoliko se frekvencija oscilovanja tla poklopi sa sopstvenim frekvencijama oscilovanja objekata ili njihovih dijelova, može izazvati dugotrajne oscilacije, višestruko povećati svoj uticaj i dovesti do značajnih oštećenja objekta, uz istu brzinu oscilovanja. Frekvencije ispod 20 – 25 Hz, mogu dovesti do oscilovanja pregradnih zidova i vanjske stolarije, i višestruko uvećati njihova pomjeranja zavisno od registrovanih pomjeraja tla. Frekvencije ispod 10 Hz posebno su opasne za konstrukcije građevinskih objekata, i mogu dovesti do znatnih pomjeranja i velikih naprezanja u konstruktivnim elementima [Vasović 2016].

3.4.1 Reakcija objekata na prolazak seizmičkih talasa

Prilikom prolaska seizmičkih talasa čestice tla osciluju na isti način kao i sam talas. Oscilovanje tla se emituje na građevinske objekte koji su temeljeni u njemu, tako da i oni počinju da osciluju. Sistem tlo-objekat se može smatrati prigušenim prinudnim oscilatorom, ako uzmemo u obzir sile unutrašnjeg trenja u konstrukciji objekta, inerciju objekata i njihove elastične karakteristike. Pri tome su oscilacije

objekta prinudne, odnosno predstavljaju reakciju, dok su oscilacije tla u vidu pobude. Kod realnih objekata, mogu se pojaviti sopstvene slobodne oscilacije, prigušene oscilacije i rezonanca. Za proračuna frekvencija osnovnog tona sopstvenih slobodnih oscilacija građevinskih objekata postoji matematički model [Stojadinović 2009].

Lakši način definisanja frekvencije sopstvenih slobodnih oscilacija i prigušenje oscilacija, zbog inercije i otpora unutrašnjeg trenja konstrukcije objekta, je direktno mjerenje seizmografima montiranim na objektu pri pobuđivanju objekta seizmičkim talasima pri miniranju. Na seizmogramu se uočavaju dva perioda, period prinudnih oscilacija i period smirivanja objekta. Period smirivanja predstavljaju sopstvene slobodne oscilacije objekta. Frekvencija sopstvenih slobodnih oscilacija objekta zavisi od konstrukcije, tipa objekta i dimenzija ali se uglavnom kreće u rasponu od $3\div 12$ Hz [Aimone-Martin i dr. 2003]. Faktori prigušenja objekata isto zavise od tipa i konstrukcije objekta i kreću se u rasponu $2\div 13$ % ($0,02\div 0,13$) [Svinkin 2003, Siskind i dr. 1980].

Nastanak rezonance kod realnih građevinskih objekata ili u pojedinim konstruktivnim elementima, je ostvariva kada je frekvencija dominantne komponente seizmičkog talasa svojstvena frekvenciji sopstvenih slobodnih oscilacija objekta. Prilikom pojave rezonance amplituda oscilacija objekta se pojačava, dok koeficijent pojačanja zavisi od bliskosti pobudne i prinudne frekvencije, konstrukcije, tipa, dimenzija objekta i lokacije na kojoj je objekat izgrađen. Faktor pojačanja varira u rasponu $1\div 9$ za objekte u cjelini [Stojadinović 2009].

Reakcija objekta na prolazak seizmičkog talasa je komplikovana i zavisi od mnogo parametara. Parametri koji formulišu vid i intenzitet reakcije objekta su amplituda, frekvencija seizmičkog talasa i konstruktivne osobine objekta. Konstruktivne osobine objekta su čvrstoća, odnosno otpornost na vibracije tla, faktor prigušenja i frekvencija sopstvenih slobodnih oscilacija objekta. Detaljna istraživanja [Dowding i dr. 1980, Medearis 1978] su pokazala da su prirodne frekvencije zidova u opsegu od 12 do 20 Hz, a skeletne konstrukcije objekta od 5 do 10 Hz. Podovi imaju nižu prirodnu frekvenciju.

3.4.2 Uticaj seizmičkog talasa na objekte

Uticaj seizmičkog talasa, izazvanog miniranjima, na građevinske objekte koji se nalaze u blizini površinskih kopova, je kompleksan problem. Topografija, geologija terena, mehanizam prenosa seizmičkih talasa kroz tlo, mehanizam prenosa energije seizmičkog talasa na objekte, konstrukcija, tip i kvalitet izgradnje objekata i drugi faktori koji su izvan uticaja izvođača miniranja. Kako bi

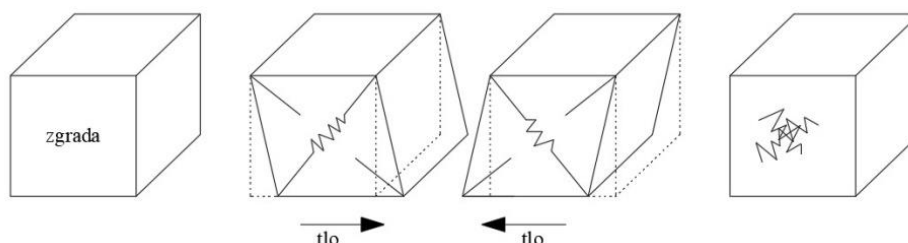
sistematizovali ovaj problem, može se izdvojiti tri osnovna tipa uticaja seizmičkih talasa na građevinske objekte [Persson i dr. 1994]:

1. direktno uzrokovanje pojave oštećenja na objektima;
2. ubrzano starenje objekata i
3. dinamičko slijeganje temeljnog tla objekata.

Direktno uzrokovanje oštećenja na objektima i ubrzano starenje objekata su oblici direktnog uticaj seizmičkog talasa na objekte, a s druge strane dinamičko slijeganje temeljnog tla objekata je indirektni uticaj. Nastanak oštećenja tiče se intenziteta seizmičkog talasa prikazanog brzinom oscilovanja tla i osobinama ugroženih objekata, odnosno njihove otpornosti na potrese. Kada na objektu već postoje oštećenja prouzrokovana dejstvom parametara nevezanih od miniranja, tada oscilovanje tla od miniranja na površinskom kopu u čijoj se blizini nalazi, direktno utiče na objekat i dovodi do bržeg razvoja oštećenja i ubrzanom starenju objekta. U rijetkim prilikama ukupno opterećenje kao zbir statičkog opterećenja od težine objekta i dinamičkog opterećenja od seizmičkih sila može postići vrijednost koje prekoračuju nosivosti tla što dovodi do popuštanja tla i dinamičkog slijeganja temelja objekta.

3.4.2.1 Mehanizam nastanka oštećenja

Seizmički talas i oscilovanje tla prilikom njegovog prolaska se prenose na objekat što dovodi do deformacija u konstrukciji objekta. Pri horizontalnim pokretima tla, vrh objekta, uslijed inercije, zaostaje, dok se osnova objekta pomjera zajedno sa tlom stvarajući smičuća naprezanja u konstrukciji objekta. Građevinski objekat se deformiše iz pravilnog pravouglog oblika u oblik paralelogram (slika 3. 9), sa jednom dijagonalom sabijenom a drugom izduženom zbog naprezanja na pritisak ili zatezanje.



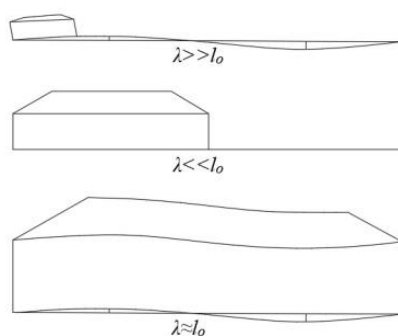
Slika 3. 9 Vibraciona ili X pukotina [Konya i Walter 1990]

Ukoliko izduživanje prevaziđe čvrstoću materijala na istezanje, materijal će popustiti i nastaće pukotina u materijalu. Ponavljanjem potresa tla ista stvar će se desiti, na suprotnoj strani objekta: dijagonale će biti sabijene i izdužene, uz mogućnost formiranja nove pukotine. Pukotine nastale na objektima [Konya i Walter 1990] zbog dejstva potresa, niskog intenziteta, imaju tipičan izgled

pukotina nastalih od vibracija ili tzv. X pukotina. Zbog vertikalnih kretanja tla nastaju deformacije savijanja horizontalnih ploča objekta, sa nastankom naprezanja na zatezanje i pritisak [Siskind 1980].

Potresi nastali pri miniranju pri niskim frekvencijama i velikim amplitudama mogu da izazovu velika naprezanja na građevinskim objektima i nastanak pukotina sličnog oblika. Ako sve deformacije ostanu u zoni elastičnosti, a rezultujuća naprezanja i naponi ne pređu granične vrijednosti čvrstoća konstruktivnih elemenata, neće doći do nastanka oštećenja.

Ako je talasna dužina seizmičkog talasa znatno veća od dimenzija objekta, prilikom prolaska seizmičkog talasa, objekat se pomjera sa talasom bez nastanka oštećenja, ukolikon su male brzine oscilovanja tla. Ako je talasna dužina talasa puno manja od dimenzija objekta, tlo objekta se pomjera sa malim amplitudama koje ne izazivaju oštećenja osim ukoliko su brzine oscilovanja tla izrazito visoke. Ukoliko se talasne dužine seizmičkog talasa i dimenzija objekta poklope, objekat prati talasno kretanje tla, uz nastanak naprezanja na pritisak i zatezanje u konstrukciji objekta koji mogu prouzrokovati oštećenja (slika 3. 10) čak i pri umjereno visokim brzinama oscilovanja tla [Persson i dr. 1994].



Slika 3. 10 Uticaj talasne dužine seizmičkih talasa na oštećenje objekata λ - talasna dužina, l_0 – dimenzija objekta [Tamrok 1984]

Oštećenja nastala kao posljedica oscilovanja objekta pod dejstvom seizmičkih talasa izazvanih miniranjima na površinskim kopovima uglavnom nisu karakteristična i lako prepoznatljiva. Međutim, postoje neki karakteristični oblici i karakteristične pozicije oštećenja na objektu koja mogu biti indikator uticaja seizmičkih talasa na objekte. Za seizmičke uticaje karakteristična je pojava dijagonalnih pukotina koje se pružaju iz uglova otvora (duž dijagonala zidova). Do pojave oštećenja dolazi po linijama koncentracije naprezanja pa se oštećenja mogu očekivati i u gornjim uglovima objekata, na spojevima zidova sa gredama ili stubovima, kontaktu ram/zid (prozora i vrata), spojevima tavanice i zidova (slika 3. 11) [Stojadinović 2009].



dijagonalna pukotina



„X“ pukotina



oštećenje gornjeg ugla zida

Slika 3. 11 Neka oštećenja karakteristična za uticaj seizmičkih talasa izazvanih miniranjima i njihove pozicije na objektima [Stojadinović 2009]

Studija koja je rađena u Turskoj, [Oncu i dr. 2015] okrug Silvan, u selima koja se nalaze u blizini rudnika, bavila se ispitivanjem efekti miniranja na 67 jednospratnih i dvospratnih seoskih kuća koje su oštećene uslijed uticaja seizmičkih talasa.



Slika 3. 12 Otpor savijanja, dijagonalne pukotine i oštećenja uglova na zgradama od čerpića [Oncu i dr. 2015]

Vibracije zemljišta koje je izazvalo miniranje u rudniku, ozbiljno je oštetilo objekte od čerpića (slika 3. 12) (nepečene gline) i pune opeke ili opekarskih blokova (slika 3. 13), dok je na nekim armiranobetobskim (AB) građevinskim objektima (slika 3. 14) došlo do oštećenje u vidu površinskih pukotina.



Slika 3. 13 Horizontalna, dijagonalana nepravilna oštećenja na zgradama od opeke i kamena [Oncu i dr. 2015]



Slika 3. 14 Oštećenja ispunjenih i nenosivih zidova u AB zgradama [Oncu i dr. 2015]

Istraživanja koja su pratila uticaj seizmičkih talasa, nastalih miniranjem u rudniku bakra Sungun, Iran, [Faramarzi i dr. 2014] na okolne objekte utvrdila su da neka miniranja imaju brzinu oscilovanja tla preko sigurne granice od 19 mm/s za stambene zgrade. Opšta analiza frekvencije i procjena rizika otkrili su da je 94% izmjerenih frekvencija manje od 14 Hz, što je unutar prirodne frekvencije objekata koje povećavaju rizik od oštećenja. Slika 3. 15 prikazuje oštećenja nastala na upravnoj zgradi rudnika, djelovanjem vibracija izazvanih miniranjem.



Slika 3. 15 Glavna upravna zgrada i štetni efekti vibracija tla na njene unutrašnje zidove, rudnik bakra Sungun [Faramarzi i dr. 2014]

U istraživanjima [Vasović 2016] uticaja pomjeraja tla izazvanih eksplozijom u kamenolomu Drenovac (Srbija) na susjedne stambene zgrade, posmatrani su okolni objekti, zidane seoske kuće i pomoćni objekti jednostavne konstrukcije (slika 3. 16). Upoređivanjem sa njemačkim standardom DIN 4150 i indijskim standardom DMGS, primjećeno je da postoji nekoliko slučajeva izmjerenih brzina koje su iznad gornje granice za ovu kategoriju objekata.

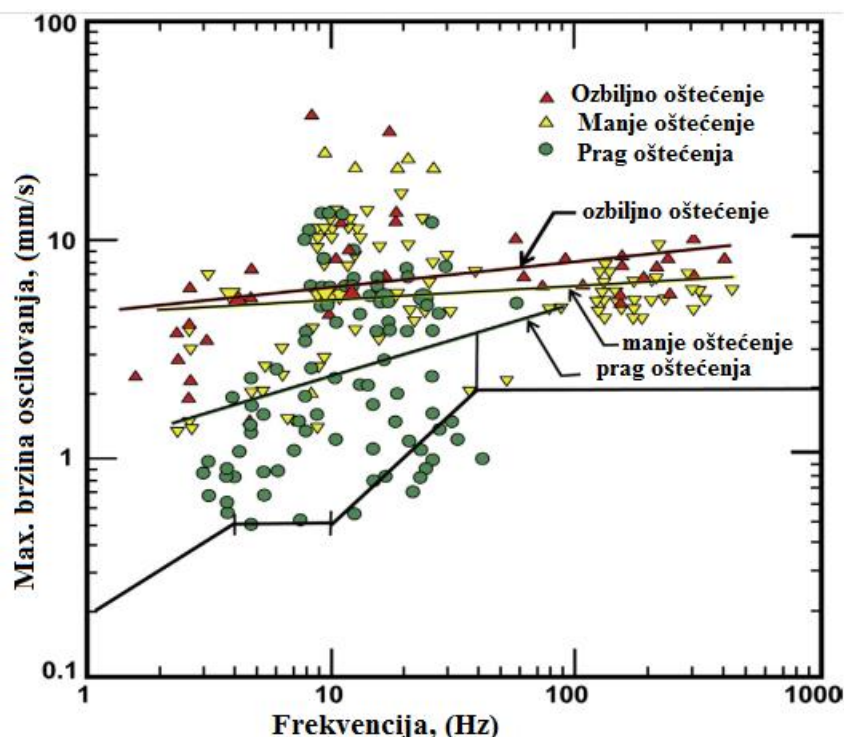


Slika 3. 16 Tipična oštećenja na građevinskim objektima [Vasović 2016]

3.4.2.2 Granična brzina oscilovanja

Pedesetih godina prošlog vijeka brzina oscilovanja tla se usvaja za faktor koji najbolje opisuje intenzitet seizmičkih talasa. Brojna svjetska istraživanja [Thoenen i Windes 1942, Crandell 1949, Edwards i Northwood 1960], za cilj su imala određivanje brzine oscilovanja tla pri kojoj se javljaju oštećenja a rezultat su uputstva za određivanje granične (maksimalne) brzine oscilovanja tla (PVV), pri kojoj je mala mogućnost pojava oštećenja na objektima. Prikaz rezultata istraživanja predstavljen je u biltenu 656 Američkog rudarskog biroa (USBM) i definisana je granicu za vrijednost brzine oscilovanja tla od 50,8 mm/s. Ali, ova istraživanja nisu razmatrala uticaj frekvencije seizmičkog talasa i mogućnost nastanka rezonance. Siskind je predstavio rezultate istraživanja [Siskind i dr. 1980] sprovedenih za USBM 8507 uvođenjem tri nivoa oštećenja (Slika 3. 17), koja su:

1. prag oštećenja (10.2 cm/s) - oštećenje boje, pojava novih pukotine (pojačavanje postojećih) na spojevima debljine vlasi kose u malteru.
2. manja oštećenja (13.7 cm/s) - otpadanje maltera, pukotine oko otvora i spojeva veličine 3 mm, nema slabljenja konstruktivnih elemenata objekta
3. ozbiljna oštećenja (19.3 cm/s) - velike pukotine u zidovima, rušenje tavanica i zidova, strukturna oštećenja konstruktivnih elemenata.



Slika 3. 17 Poređenje brzine i frekvencije oscilovanja tla sa oštećenjima objekata [Siskind i dr. 1980]

Dio zaključaka objavljenih u RI 8507 su:

- za definisanje oscilovanja tla najmjerodavniji parametar je brzina oscilovanja;
- seizmički talasi sa frekvencijom nižom od 40 Hz imaju veću mogućnost za nastanak oštećenja od talasa sa frekvencijom višom od 40 Hz;
- za frekvencije seizmičkih talasa iznad 40 Hz potrebno je usvojiti PVV od 50.8 mm/s,
- pri frekvencijama seizmičkog talasa nižim od 40 Hz treba usvojiti manje vrijednosti za granične brzine oscilovanja tla [Siskind i dr. 1980].

Uzimajući u obzir mogućnost nastanka rezonance i pojačanja, brzinu od 50.8 mm/s treba usvojiti za graničnu brzinu oscilovanja objekta [Svinkin 2003] za sve frekvencije. Vrste oštećenja koja mogu nastati pri određenim brzinama oscilovanja objekta predstavljena su u tabeli 3. 11. [Medearis 1978], iako je nastanak pojedinih oštećenja moguća i pri brzinama oscilovanja tla koje su manje od ovih vrijednosti. Nastanak oštećenja proizvod je udruženog dejstva više parametara i zavisi od naponsko-deformacionog stanja koje je prisutno u konstrukciji posmatranog objekta.

Tabela 3. 11 Vrste oštećenja objekata za određene brzine oscilovanja [Medearis 1978]

Brzina oscilovanja objekta (mm/s)	Efekat
254,0	Nastanak pukotina u betonskim stubovima ili zidovima.
114,3	Nastanak pukotina u zidovima od cigle ili blokova.
76,2	Pukotine u malteru između cigli ili blokova i na spojevima temelja i zidova.
50,8	Granični nivo oštećenja. Iznad ovog nivoa moguća je pojava strukturnih oštećenja.
25,4	Pojava novih pukotina u malteru i gipsanim pločama.
19,0	Proširenje postojećih pukotina u malteru i gipsanim pločama.
12,7	Pukotine u starom malteru i proširenje postojećih pukotina–prag pojave oštećenja.
1,0	Nema oštećenja objekata

U cilju definisanja parametara miniranja za konkretne slučajeve, za graničnu brzinu oscilovanja tla, treba na osnovu analize stanja konkretnih objekata, usvojiti preporuke nekog od inostranih standarda uzimajući u obzir frekvenciju dominantne komponente seizmičkog talasa. Po mišljenju autora, za naše uslove najbolje je usvojiti preporuke njemačkog standarda DIN 4150. Pregled standarda kojima se definiše oblast seizmike miniranja dat je u poglavlju 3.3.

3.4.3 Ocjena stepena ugroženosti objekta

Ako se u okolini površinskog kopa nalaze objekti koji su izrazito ugroženi seizmičkim uticajem od miniranja, potrebno je odrediti maksimalni intenzitet potresa kojim se mogu izložiti pojedini objekti. Pošto je brzina oscilovanja tla kriterijum koji najbolje opisuje intenzitet potresa, potrebno je odrediti PVV u samoj blizini objekta. Određivanjem PVV u samoj blizini objekata najbolje je vršiti na osnovu

usvojenih standarda kojima se reguliše problematika seizmike miniranja. Najbolji način, je uvođenje detaljne analize određenih uslova koja mora da uzme u obzir sljedeće korake [Stojadinović 2009]:

- detaljan pregled objekta i bilježenje mogućih nastalih oštećenja na objektu,
- određivanje maksimalno dozvoljene brzine oscilovanja tla,
- definisanje parametara zakona oscilovanja tla,
- predviđanje brzine oscilovanja tla u samoj blizini definisanog objekta,
- odabir i primjena mjera kontrole i smanjenja seizmičkih efekata miniranja.

Pregledom objekata moguće je registrovati veća oštećenja usljed kojih je otpornost objekata na potrese umanjena. Moguće je primjetiti nedostatke u konstrukciji samih objekata kao što je: loše dimenzionisani ili izvedeni konstruktivni elementi, lošijeg kvaliteta ugrađeni materijali, loše temeljeni objekti i sve što može dovesti do smanjene otpornosti objekata na potrese.

Izbor standarda i definisanje smjernica za PVV treba da je usklađeno sa opštim stanjem analiziranog objekta. Definisanjem određene vrijednosti za PVV ne poništava se mogućnost nastanka oštećenja već se ona samo osjetno umanjuje. Definisanje određene brzine oscilovanja tla treba da uzme u obzir i procjenu rizika mogućih oštećenja i preuzimanje odgovornosti za njihov potencijalni nastanak.

Ukoliko na površinskom kopu nema podataka o prethodnim seizmičkim mjerenjima, potrebno je uraditi manje kontrolno miniranja kao bi se odredio intenzitet seizmičkih talasa u neposrednoj blizini objekata. Ako postoje podaci o mjerenju seizmičkih efekata miniranja, potrebno je predvidjeti brzinu oscilovanja tla u blizini objekata, na osnovu poznatog zakona oscilovanja. Ako je brzina oscilovanja tla veća od usvojene granične brzine oscilovanja, potrebno je aktivirati mjere za smanjenje seizmičkih efekata miniranja.

3.5 Predviđanje potresa od miniranja

Pored dosadašnjeg razvoja istraživanja i nauke, još uvijek nije moguće egzatno i precizno utvrditi količinu energije koja se pri detonaciji eksploziva preda stijeni i koju nosi seizmički talas. Razlog za to je veliki broj uticajnih faktora koji zavise od uslova sredine, karakteristika eksploziva, klimatskih, ljudskih i drugih faktora koji su promjenljivi i varijabilni. Moguće je uspostaviti zavisnost između brzine oscilovanja stijenske mase i mase eksplozivnog punjenja, koja predstavlja mjeru intenziteta seizmičkog talasa. Na osnovu dugogodišnjih mjerenja i istraživanja na terenu, velikog broja istraživača uspostavljena je empirijska zavisnost brzine oscilovanja stijenske mase i uticajnih faktora. Za uspostavljanje korelacione veze između brzine oscilovanja i osnovna tri faktora količine eksploziva, karakteristike tla (stijena) i rastojanja od mjesta miniranja, u svijetu su razvijeni

empirijski modeli dobijeni regresionom analizom, koji se često u stručnoj literaturi nazivaju i zakon oscilovanja tla. Matematički model [Savić 2000] najšire primjenjen u svijetu ima teorijski oblik:

$$V = K \cdot R^n \text{ (mm/s)} \quad (3.1)$$

gdje je K koeficijent koji karakteriše tlo (stijenu) i određuju se regresionom analizom izmjerenih podataka za konkretnu oblast; n je eksponent koji definiše stepen prigušenja seizmičkog talasa dobijen regresionom analizom; V je brzina oscilovanja tla, a R je redukovano rastojanje.

Redukovano rastojanje predstavlja odnos rastojanja mjesta mjerenja od mjesta detonacije eksplozivnog punjenja i mase eksploziva koja se detonira po intervalu usporenja. Postoje dva načina za proračun redukovano rastojanja koja zavisi od uslova miniranja.

“Kubna“ formula se primenjuje pri procjeni seizmičkih efekata miniranja u neposrednoj blizini minskog polja. Ovaj pristup preporučuju i ruski izvori, a često je u primjeni i u našoj zemlji. Redukovano rastojanje prema Ruskoj preporuci [Savić 2000] iznosi:

$$R = \frac{r}{\sqrt[3]{Q}} \text{ (} m^3 \sqrt{kg} \text{)} \quad (3.2)$$

gdje r predstavlja rastojanje mjerne tačke od mjesta miniranja, (m); Q je masa eksploziva u minskoj seriji, (kg)

Ovako definisan izraz za redukovano rastojanje primjenljiv je kod trenutnog miniranja. Kod miniranja sa usporenjem, na veličinu potresa utiču pored količine istovremeno iniciranog eksploziva, veličine primijenjenih usporenja, preciznost sredstava za usporenje, eventualna interakcija talasa, položaj mjerne tačke u odnosu na liniju susretanja talasa, itd.

“Kvadratna“ formula proračuna je opšta i većina standarda zapadnih zemalja preporučuje njenu primjenu za izračunavanje redukovano rastojanja:

$$R = \frac{r}{\sqrt{Q}} \text{ (} m \sqrt{kg} \text{)} \quad (3.3)$$

gdje je Q masa eksploziva po intervalu usporenja

Utvrđivanje modela predviđanja potresa za konkretan teren, treba da se izvrši tako da predstavlja stvarnu korelaciju između količine eksploziva po intervalu usporenja i brzine oscilovanja na pojedinim rastojanjima. Ako su geološke formacije u okolini mjesta miniranja iste ili slične u pogledu

seizmičkog ponašanja, onda će jedan model predviđanja važiti za sve pravce. Ako postoji izrazita razlika u seizmičkom ponašanju stijena u raznim pravcima, onda treba utvrditi posebne modele predviđanja u pravcima objekata osjetljivih na potrese [Negovanović 2015].

Korelacija između izmjerene brzine oscilovanja tla i redukovano rastojanja može da se utvrdi regresionom analizom metodom najmanjih kvadrata. Prilikom predviđanja potresa određuje se jednačina predviđanja brzine oscilovanja za nivo pouzdanosti od 95%, koja obezbeđuje vjerovatnoću od 95%, da izmjerene brzine oscilovanja pri budućim miniranjima neće preći predviđenu vrijednost. To znači da se samo 5% izmjerenih vrijednosti može naći iznad ove linije.

Jednačina [Dowding 1985] predviđanja brzine oscilovanja tla za nivo pouzdanosti od 95% izračunava se prema sljedećem obrascu:

$$V_{95} = V_{50} \cdot 10^{1.645 \cdot SE} \text{ (mm/s)} \quad (3.4)$$

gdje V_{95} predstavlja predviđena brzina oscilovanja tla za nivo pouzdanosti od 95 %, (mm/s); V_{50} je predviđena brzina oscilovanja tla za nivo pouzdanosti od 50%, (mm/s); SE je standardna greška procjene.

3.5.1 Modeli za predviđanje potresa od miniranja

Među prvim modelima za predviđanje potresa predložio je Morris-a [Morris 1950] i glasio je:

$$A = K \cdot \frac{\sqrt{Q}}{r} \text{ (mm)} \quad (3.5)$$

gdje A predstavlja maksimalni pomjeraj čestice tla, (mm); Q je masa eksploziva, (kg); r je rastojanje od mjesta mjeranja do mjesta mjerenja, (m); K je koeficijent zavisao od karakteristika radne sredine sa vrijednostima od 0.57 za tvrde stijene do 3.40 za nevezano tlo.

Leconte je 1967. godine imao ideju da se maksimalni pomjeraj [Jimeno i dr. 1995] u prethodnom izrazu, zamjeni rezultantom tri komponente brzine oscilovanja čestica tla.

$$V = K_{vr} \cdot \frac{\sqrt{Q}}{r} \text{ (mm/s)} \quad (3.6)$$

Jedan od najstrožijih modela za predviđanje potresa je model predstavljen od strane Blair i Duvall [Blair i Duvall 1954] i Duvall i Petkof-a [Duvall i Petkof 1959], koji su pokušavali da pronađu interakciju intenziteta seizmičkih potresa sa količinom eksploziva i rastojanjem od mjesta miniranja. Pretpostavljajući da je količina eksploziva simetrična sfera, odlučili su da je linearnu dimenziju potrebno korigovati trećim korjenom mase eksploziva. Slične rezultate su dobili u svojim istraživanjima i Ambraseys i Hendron [Ambraseys i Hendron 1968], a takođe i Dowding [Dowding 1971]. Za karakterističan parametar potresa, uzeli su brzinu oscilovanja čestica tla, tako da je intenzitet potresa:

$$V = K \cdot \left(\frac{r}{Q^{1/3}} \right)^{-n} (mm/s) \quad (3.7)$$

gdje V predstavlja maksimalna brzina oscilovanja čestica tla, (mm/s); Q je maksimalna količina eksploziva po intervalu usporenja, (kg); r je rastojanje od mjesta miniranja do mjesta mjerenja, (m), a K , n predstavljaju empirijske koeficijente.

Kod cilindrična punjenja, predloženo je da rastojanje treba korigovati djeljenjem kvadratnim korjenom mase eksploziva po intervalu usporenja [Devine i Duvall 1963] tako da je model predviđanja brzine oscilovanja:

$$V = K \cdot \left(\frac{r}{\sqrt{Q}} \right)^{-n} (mm/s) \quad (3.8)$$

Ovaj obrazac drugačije se zove zakon oscilovanja tla i sa poznatim vrijednostima koeficijenata K i n moguće je procjeniti brzinu oscilovanja tla za bilo koju masu eksploziva i bilo koje rastojanje. Koeficijent K definiše karakteristike sredine i predstavlja otpor tla prema širenju seizmičkog talasa. Eksponent n isto zavisi od karakteristika sredine kroz koju se seizmički talas širi i opisuje stepen prigušenja seizmičkog talasa sa rastojanjem. Vrijednosti K i n zavise i od topografskih, hidroloških i tektonskih karakteristika sredine kroz koju se širi seizmički talas. Koeficijenti K i n određuju se mjerenjem seizmičkih efekata miniranja na terenu odnosno, regresionom analizom izmjerenih podataka o brzini oscilovanja. Preporuke za usvajanje vrijednosti ovih koeficijenata kada mjerenja nisu moguća su: $n=1.6 \div 1.67$ i $K=714 \div 750$ [Nicholls i dr. 1971; Egan i dr. 2001].

Ako se na bazi mjerenja brzina oscilovanja tla prilikom miniranja na odeđenoj lokaciji utvrde vrijednosti koeficijenata K i n , znači, utvrdi se zakon oscilovanja tla, tada je moguće za poznatu količinu eksploziva koja se jednovremeno inicira, predvidjeti brzinu oscilovanja tla na bilo kom

rastojanju od mjesta miniranja na toj lokaciji. Međutim, kada bi se pretpostavilo da je moguće da dva eksplozivna punjenja detoniraju na istoj poziciji, brzine oscilovanja tla mjerene na toj poziciji ne bi bile iste. Razlog tome su karakteristike sredine kroz koje se seizmički talas širi. Postojanje diskontinuiteta i nehomogenosti izazivaju disperziju energije seizmičkog talasa i gotovo je nemoguće da se prilikom nailaska na diskontinuitete seizmički talas svaki put identično prelomi ili reflektuje, kao i da se energija svaki put isto raspodjeli.

Prilikom predviđanja brzine oscilovanja tla na lokaciji u blizini mjesta miniranja treba imati u vidu i zakonitost da se seizmički talas ne širi u svim pravcima podjednakim intenzitetom. Tako da zakon oscilovanja utvrđen za jedan pravac ne može se pouzdano koristiti za predviđanje brzine oscilovanja u drugom pravcu. Razlog za ovu pojavu ponovo leži u razlikama u karakteristikama sredine i geološkoj, morfološkoj i topografskoj strukturi okoline.

Drugi autori poput Attewell i dr. [Davies i dr. 1964], Holmberg i Persson [Holmberg i Persson 1979], Shoop i Daemen [Shoop, Daemen 1983] dali su pojednostavljen model:

$$V = K \cdot Q^{\alpha} \cdot r^b \text{ (mm/s)} \quad (3.9)$$

gdje V predstavlja maksimalna brzina oscilovanja čestica tla, (mm/s); Q je masa eksploziva po intervalu usporenja, (kg); K , α , b su empirijski koeficijenti koji se određuju regresijom za određene uslove radne sredine.

Švedska škola predvođena Langefors, Kilhstrom i Gustafsson-om [Jimeno i dr. 1995], predstavila je odnos rastojanja, količine eksploziva i brzine oscilovanja čestica tla odnosom:

$$V = K \cdot \left(\frac{Q}{\sqrt{r}} \right)^{1/2} \text{ (mm/s)} \quad (3.10)$$

Lundborg je 1977. godine [Jimeno i dr. 1995] pri istraživanjima na osnovu zaključaka Američkog Biroa za Rudarstvo USBM [Nicholls 1971], predstavio modela predviđanja potresa $V = f(r, Q)$ jednačinom:

$$\log V = 4.08 + 0.14 \log Q - 2.06 \log r + 0.22 \log Q \cdot \log r \text{ (mm/s)} \quad (3.11)$$

što je predstavljeno trodimenzionalnom površi.

Just i Free [Jimeno i dr. 1995] su predstavili model procjene potresa na osnovu zapažanja kontrolisanih miniranja pretpostavljajući da zapreminski talasi dominiraju i da postoji sferična divergencija:

$$V = K \cdot \left(\frac{r}{Q^{1/3}} \right)^{-1} \cdot e^{-\alpha(r/Q^{1/3})} \text{ (mm/s)} \quad (3.12)$$

Ghosh i Daemen su razmatrali neelastičnu apsorpciju da bi preispitali eksponencijalno opadanje brzine oscilovanja čestica tla čineći ga proporcionalnim sa $e^{-\alpha r}$ [Ghosh i Daemen 1983].

Američki Biro za rudarstvo je na osnovu obimnih mjerenja potresa pri etažnom miniranju na različitim lokacijama i sredinama, predstavio model predviđanja brzine oscilovanja tla:

$$V = 750 \cdot \left(\frac{r}{\sqrt{Q}} \right)^{-1.67} \text{ (mm/s)} \quad (3.13)$$

3.5.2 Kontrola potresa predviđanjem brzine oscilovanja pomoću regresionog modela

Postupak kontrole potresa [Savić 2000] se sastoji u sljedećem:

- definisanje objekata u blizini miniranja koji se moraju štititi od potresa,
- u zavisnosti od prirode i konstruktivnih karakteristika objekta, određivanje PVV pored objekta primjenom nekog od standarda,
- definisanje rastojanja objekta od mjesta gdje se vrši miniranje,
- proračun dozvoljene količine eksploziva za istovremeno iniciranje, kako brzina oscilovanja na mjestu objekta ne bi premašila dozvoljenu granicu. Ako ima više objekata, proračunava se za sve objekte, a primijenjuje se najmanja dobijena količina eksploziva po intervalu usporenja,
- definisanje intervala usporenja bez preklapanje potresa od različitih minskih punjenja,
- mjerenjem potresa od miniranja na mjestu objekta utvrditi da li je brzina oscilovanja u granicama dozvoljenim za objekta koji se štiti.

Postupak kontrole vibracija koji se u praksi najviše koristi na konkretnoj lokaciji, jeste utvrđivanje matematičkog izraza odnosno modela procjene brzine oscilovanja tla mjerenjem i regresionom analizom dobijenih podataka. Ako su seizmičke karakteristike tla jednake u svim pravcima, za kontrolu potresa koristi se jedan model procjene potresa. Ako to nije slučaj, moraju se za različite pravce odrediti i primijeniti odgovarajući modeli predviđanja potresa. Regresioni model procjene brzine oscilovanja tla ima oblik koji je prikazan jednačinom 3.1:

Postupak definisanja ili kontrole potresa je sljedeći:

- određuju se objekti za štíćenje, njihovo rastojanje i dozvoljena brzina oscilovanja,
- definiše se redukovano rastojanje za dozvoljenu brzinu oscilovanja za štíćene objekat (za stambene objekte prema DIN 4150-3 [DIN 4150 1999] iznosi 5 mm/s):

$$R = \left(\frac{V}{K}\right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{m}{\sqrt{kg}}\right) \quad (3.14)$$

Na bazi poznatog redukovanog rastojanja definiše se grafik maksimalne količine eksploziva po intervalu usporenja u funkciji rastojanja mjesta miniranja do mjernog mjesta prema jednačini:

$$Q = \left(\frac{r}{R}\right)^2 (kg) \quad (3.15)$$

- definiše se vrijeme usporenja, tako da pri uračunatoj toleranciji usporivača, interval usporenja između uzastopnih minskih punjenja nije manji od 8 ms [Siskind i dr. 1980].

4 METODOLOGIJA OCJENE UTICAJA POTRESA OD MINIRANJA NA OBJEKTE

4.1 Opšte

U okviru metodologije istraživanja uticaja potresa nastalih pri miniranju na okolne građevinske objekte, zbog kompleksnosti problematike istraživanja, primjenjen princip realizacije planiranih aktivnosti u ovoj disertaciji, podrazumjevaao je istraživanja, izučavanja i ispitivanja u tri faze.

- Prva faza istraživanja podrazumjevala je analizu postojeće i dostupne literature, ispitivanja i izučavanja fondovske dokumentacije. Posebna pažnja je bila posvećena analizi rezultata studija prethodnih istraživanja vezanih za izučavanje brzine i frekvencije oscilovanja stijenske mase pri miniranju. Analizirani su rezultati istraživanja objavljeni u referentnim domaćim i međunarodnim časopisima. Poseban akcenat je bio na metode koje su korišćene za formiranje modela, MLR i ANN pristup. Nakon toga, izvršen je odabir pogodnih lokacija (PK "Hardovac" - Ševarlije i lokacija u gradskoj sredini Skyline - Beograd) za formiranje modela, u zavisnosti od različitosti u poziciji mjesta miniranja i specifičnosti bušačkih i minerskih parametara.
- Druga faza istraživanja predstavljala je terenski rad, odnosno prikupljanje podataka o predmetnim lokacijama, snimanje terena, okolnih objekata i mjerenja brzine i frekvencije oscilovanja stijenske mase pomoću instrumenata za registraciju seizmičkih karakteristika, seizmografa. Također, su prikupljeni i podaci prethodnih mjerenja i ispitivanja, za duži vremenski period, kako bi se dobilo što više uzoraka za pouzdaniju statističku analizu.
- Treća faza istraživanja obuhvatila je obradu i analizu izmjerenih, prikupljenih i dobijenih terenskih podataka, na osnovu čega se pristupilo formiranju modela procjene. Obrada podataka predstavljala je statističku analizu rezultata istraživanja i formiranje prognoznih modela sa određivanjem greške procjene. Formiranje modela procjene izvršeno je primjenom savremenih matematičkih metoda višestruke linearne regresije, regresionom analizom i vještačkih neuronskih mreža. Modeli su razvijeni kao nelinearne funkcije karakteristika oscilovanja stijenske mase i sigurnosnih rastojanja za različite građevinske konstrukcije od bušački i minerskih parametara. Ocjena uspjehnosti formiranog modela provjerena je određivanjem koeficijenta korelacije i srednje kvadratne greške, ispitivanjem raspodjele i autokorelacije reziduala.

Istraživanja su vršena na dvije različite lokacije: u rudniku i gradskoj sredini, sa bitno različitim karakteristikama bušenja i miniranja i uslovima koji vladaju u okolini.

- Istraživanja na prvoj lokaciji - površinski kop "Hardovac" - Ševarlije podrazumjevala su prikupljanje bušačko-minerskih podataka i mjerenje seizmičkih efekata, pomoću seizmografa prilikom miniranja. Izvršeno je prikupljanje i mjerenje podataka za vremenski period od 2012.

do 2015. godine, pri čemu je izvršeno ukupno kompletnih 68 mjerenja. Definisanje modela procjene uticaja potresa pri miniranja vršio se utvrđivanjem odnosa između odgovarajuće frekvencije oscilovanja i kontrolnih parametara, koji uključuju: rastojanje između bušotina, rastojanje između redova bušotina, dubinu bušotina, broj bušotina, količinu eksploziva po intervalu usporenja, ukupnu količinu eksploziva i rastojanje od mjesta miniranja do mjesta mjerenja.

- Istraživanja na drugoj lokaciji - lokacija stambeno-poslovne zgrade Skyline - Beograd obuhvatila su, također, prikupljanje podataka o bušenju i miniranju, kao i mjerenje seizmičkih efekata, pomoću seizmografa pri svakom miniranju. Izvršeno je prikupljanje i mjerenje podataka za vremenski period od 2018. do 2019. godine, pri čemu je izvršeno ukupno 477 mjerenja brzine oscilovanja stijenske mase. Za potrebe izrade pouzdanih modela izvršena je analiza uticaja bušačko-minerskih parametara za maksimalnu brzinu oscilovanja stijenske mase. Kontrolni parametri koji su se razmatrali su: rastojanje od mjesta miniranja do mjesta mjerenja, ukupna količina eksploziva i količina eksploziva po intervalu usporenja.

4.2 Terenski dio istraživanja

Terenska istraživanja koja su urađena za potrebe izrade ove disertacije obavljena su na dvije lokacije mjerenjem potresa stijenske mase prilikom miniranja. Prvi dio terenskih istraživanja izvršena su na površinskom kopu krečnjak "Hardovac" - Ševarlije u periodu od marta 2012 do novembra 2015. godine. Drugi dio istraživanja, koja su vršena na terenu, obavljena su u gradskoj sredini pri iskopavanju stijenske mase postupkom miniranja u toku izrade temelja objekta i podzemne garaže poslovno-stambenog kompleksa Skyline u Beogradu, u periodu od maja 2018. godine do juna 2019. godine.

Terenska istraživanja na odabranim lokacijama podrazumjevala su:

- definisanje geološke građe i litologije terena,
- fizičko-mehaničke karakteristike pojedinih litoloških članova,
- sistem eksploatacije na rudnicima i parametre bušačko-minerskih radova sa parametrima bušenja, parametrima miniranja, vrstom eksploziva, konstrukcijom punjenja, konstrukcijom minskog polja i
- rezultate mjerenja brzine i frekvencije oscilovanja stijenske mase pri miniranju.

Zadatak istraživanja bio je monitoring potresa tla od miniranja u navedenom periodu pomoću instrumenata (seizmografa) kojima se snimaju parametri potresa. Pored mjerenja potresa od miniranja, pri terenskim istraživanjima izvršeno je prikupljanje osnovnih podataka o predmetnoj

lokaciji, snimanje terena i okolnih građevinskih objekata koji su najugroženiji od potresa izazvanih miniranjem. Da bi se prikupilo što više relevantnih podataka za obradu i analizu, bilo je neophodno pratiti veći broj miniranja na različitim lokacijama primjenom više seizmografa. Na površinskom kopu “Hardovac” potresi od miniranja su registrovani seizmografima tipa Minimate Blaster kanadskog proizvođača Instantel [Instantel 2016] i Mini SuperGraph američkog proizvođača Nomis SeismoGraphs [Nomis 2008] na dva mjerna mjesta koja su locirana na različitim lokacijama. A u gradskoj sredini pri iskupu temeljne jame za stambeno-poslovni objekat Skyline mjerenja su vršena na tri mjerna mjesta sa seizmografima tipa Vibraloc švedskog proizvođača [ABEM 2010].

Potresi su mjereni kod najbližeg objekta mjestu miniranja, i to na stranama minskog polja gdje je uglavnom, najviši nivo potresa. Najviši nivo potresa je obično u smjeru u kojem se vrši iniciranje bušotina [Kričak 2006].

4.2.1 Površinski kop “Hardovac” - Ševarlije

Na površinskom kop “Hardovac” vrši se eksploatacija tehničkog građevinskog kamena – krečnjaka, pomoću bušačko-minerskih radova. Miniranja stijenske mase vrši se nekoliko puta u toku mjeseca i svaki put se vrši mjerenje oscilovanja tla na dvije lokacije sa dva seizmografa različitog proizvođača. Lokacije seizmografa su određene iz uslova da se najugroženiji objekti, koji se nalaze u neposrednoj blizini površinskog kopa, zaštite od mogućih budućih oštećenja. Lokacije mjernih mjesta su bila uslovljena zahtjevima vlasnika objekata, koji su insistirali na redovnom praćenju uticaja potresa pri miniranju na konkretnom stambenom objektu. Rastojanja od mjernih mjesta do minskih polja određena su primjenom GPS (global positioning system) sistema. Potresi su registrovani seizmografima proizvođača Instantel i Nomis SeismoGraphs na dva mjerna mjesta, na različitim rastojanjima, što je omogućilo uporednu analizu potresa nastalih kao posljedica miniranja.

Karakteristike seizmografa korišćenog za praćenje potresa – “Hardovac” Ševarlije

Za mjerenje potresa od miniranja na kamenolomu “Hardovac” primjenjeni su digitalni seizmografi tipa Minimate Blaster kanadskog proizvođača Instantel i Mini SuperGraph američkog proizvođača Nomis SeismoGraphs prikazan na slici 4. 1. U nastavku disertacije opisaćemo karakteristike seizmografa čije podatke mjerenja potresa smo koristili za analizu i formiranje modela.



Slika 4. 1 Seizmograf Mini SuperGraph, Nomis Seismographs [Nomis 2008]

Brzine oscilacija tla koje nastaju uslijed miniranja mogu se mjeriti na tlu (ukopavanjem) ili na građevini, zavisno od cilja i svrhe ispitivanja. Na slici 4. 1 nalazi se seizmograf Mini SuperGraph, američkog proizvođača Nomis Seismographs.

Tabela 4. 1 prikazuje detaljniji pregled karakteristika seizmografa koji je korišćen za mjerenje oscilovanja tla na kamenolomu “Hardovac”.

Tabela 4. 1 Karakteristike instrumenta Mini SuperGraph američkog proizvođača Nomis Seismographs [Nomis 2008]

Karakteristika	Mini SuperGraph, Nomis Seismographs
Kanali	Mikrofon i troaksijalni geofon
Opseg mjerenja	0- 254 mm/s
Rezolucija	0.127 mm/s
Triger mjerenja potresa	0.19 do 254 mm/s
Tačnost	+/- 3%
Opseg linearnog mjerenja vazdušnih udara	92 do 148 dB
Rezolucija linearnog mjerenja vazdušnih udara	0.25 Pa
Triger linearnog mjerenje	92 do 148 dB
Tačnost linearnog mjerenja vazdušnih udara	+/- 10% ili +/- 1 dB između 30 i 125 127
Opseg frekvencije	2 do 400 Hz
Mjerne skale vazdušnih udara	Linearna
Brzina uzorkovanja	1024 do 4096 uzoraka/s po kanalu
Kapacitet memorije	700 mjernih događaja
Vrijeme snimanja	1 do 80 s
Interval snimanja	1,10,20,30,40,50,60,s
Dimenzije seizmografa	152 x 108 x 76 mm
Masa	1.9 kg
Tastatura	8 tastera za navigaciju u sistemu menija
Baterija	Punjiva 6 V kapaciteta 14 dana mjerenja
Ekran	4-reda x 21-karaktera, LCD
Radna temperatura	-8 do 50°C
Daljinska komunikacija	Sve funkcije RS-232 port, GSM, RF



a)



b)

Slika 4. 2 Seizmograf Mini Supergraph u toku mjerenja, a) prikaz monitora u toku mjerenja
b) postavljen seizmografa pri mjerenju [foto Lj. Figun]

Slika 4. 2 prikazuje seizmograf Mini SuperGraph, Nomis Seismographs postavljen za mjerenje potresa od miniranja. Vidi se izgled ekrana seizmografa Mini Supergraph u toku mjerenja, kao i način na koji je postavljen seizmograf pri mjerenju kod najugroženijeg objekta, u ovom slučaju to je pumpna stanica.

4.2.2 Poslovno-stambeni kompleks Skyline - Beograd

Drugi dio terenskih istraživanja sastojao se od mjerenja potresa od miniranja u gradskoj sredini, za potrebe iskopa temeljne jame na lokaciji objekta Skyline Beograd i prikupljanjem neophodnih podataka. Lokacije mjernih mjesta, gdje su postavljeni seizmografi, određena su prema potrebi da se najugroženiji objekti, koji se nalaze najbliže mjestu miniranja, zaštite od eventualnih oštećenja prilikom miniranja. Određena mjerna mjesta su bila fiksna zbog neposredne blizine iskopu za podzemnu garažu, a druga mjerna mjesta su se određivala u skladu sa napredovanjem radova i pomjeranjem položaja minskog polja. Zbog neposredne blizine minskog polja građevinskim objektima bilo je obavezno konstantno snimanje i praćenje uticaja potresa od miniranja na okolne stambene objekte. Seizmografi su se postavljali u neposrednoj blizini temelja ugroženih objekata ili u samim objektima. Pošto je podloga uglavnom bila čvrsta (beton, pločice, asfalt, ..) seizmografi su se morali pričvrstiti za podlogu pomoću gipsa, plastelina, silikona i sl. u skladu sa preporukama proizvođača seizmografa. Rastojanja od mjernih mjesta do minskih polja određena su primjenom GPS sistema. Potresi su registrovani seizmografima, istovremeno na tri mjerna mjesta, na različitim rastojanjima, što je omogućilo uporednu analizu potresa nastalih kao posljedica miniranja.

Karakteristike seizmografa korišćenog za praćenje potresa - Skyline Beograd

Za mjerenje potresa nastalih miniranjem na iskopu temeljne jame za poslovno-stambeni objekat Skyline primjenjena su tri digitalna seizmografi tipa Vibraloc, švedskog proizvođača ABEM, (slika 4. 3) [ABEM 2010]. Prilikom mjerenja potresa od miniranja na lokaciji objekta Skyline, snimljeno je ukupno 477 podataka o brzini oscilovanja stijenske mase. Prilikom mjerenja seizmičkih potresa, seizmograf je potrebno pričvrstiti za podlogu, (ukoliko se ne može ukopati). Pričvršćivanje se radi gipsom, plastelinom ili pločicom za pričvršćivanje (slika 4. 3).



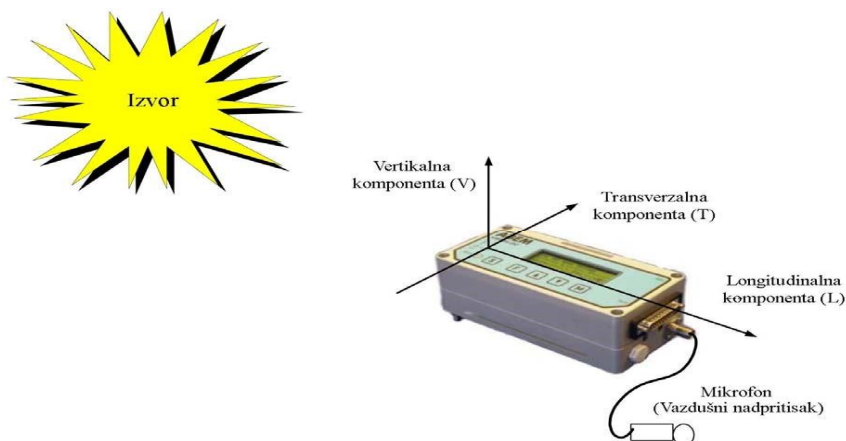
a)



b)

Slika 4. 3 Način pričvršćivanja seizmografa na čvrstu podlogu a) beton, pomoću gipsa b) pločice, pomoću plastelina [foto Lj. Figun]

Tokom obavljanja terenskih istraživanja na površinskom kopu “Hardovac” - Ševarlije i lokaciji Skyline - Beograd svi seizmografi su postavljeni prema uputstvima proizvođača (slika 4. 4), tako da longitudinalna komponenta prikazuje izmjerene brzine oscilovanja tla u pravcu izvora potresa. Pri terenskim istraživanjima mjerene su sve tri komponente brzine oscilovanja (vertikalna, longitudinalna i transverzalna), frekvencija oscilovanja i vazdušni nadpritisak.



Slika 4. 4 Postavljanje seizmografa u odnosu na izvor vibracija [ABEM 2010]

U tabeli 4. 2 prikazane su karakteristike instrumenta Vibraloc švedske firme ABEM, koji je korišćen za mjerenja potresa prilikom miniranja.

Tabela 4. 2 Karakteristike instrumenta Vibraloc švedske firme ABEM [ABEM 2010]

Karakteristika	Vibraloc, ABEM
Mogućnost mjerenja	Brzina, ubrzanje, pomjeraj i vazdušni udar
Broj kanala	Četiri
Standardni senzori	3 ugrađena senzora
Opcioni senzori	1 mikrofoni za vazdušni nadpritisak
Broj komponenti	Poprečni, vertikalni, uzdužni
Opseg frekvencija	2-250 Hz (-3 dB)
Dužina snimanja	Fiksna dužina, 1 - 100 s ili 1 - 1000 s
Mod snimanja	Mod maksimalne vrijednosti, mod događaja
Pretrig	0.5 s
Frekvencije uzorkovanja	1000, 2000 ili 4000 Hz
Opseg mjerenja	+ /- 250 mm/s
Rezolucija	0.02 mm/s do 31 mm/s, 0.1 mm/s do 250 mm/s
Nivo okidanja kanali V,L,T (trigger levels)	0.1 - 200 mm/s
Nivo okidanja kanali A (mikrofon)	2 – 150 Pa
Memorija	Najviše 800 događaja
Napajanje interno	Dve alkalne LR20 baterije, lako izmenljive
Dužina trajanja interne baterije	2 - 3 nedelje na 20 °C
Opseg radne temperature	-20 °C do + 60 °C
Displej	LCD, 4 x 20 karaktera
Tastatura	5 tastera za navigaciju u sistemu menija
Dimenzije (W x L x H)	86 x 178 x 67 mm
Masa	1.75 kg uključujući baterije
Vibraloc PC software	Vibraloc PC software
Analiza podataka	UVSZ software; UVSZA software

4.3 Analiza terenski prikupljenih podataka

Drugi dio istraživanja tj. numerički dio, podrazumjevaio je optimizaciju izbora parametara bušenja i miniranja razvojem pogodnih matematičkih modela, zasnovanih na detaljnim statističkim analizama rezultata prethodnih terenskih mjerenja. Istraživanja su se odnosila na obradu terenski prikupljenih podataka brzine i frekvencije oscilovanja stijenske mase pri miniranju, na osnovu čega se pristupilo formiranju predikcionih modela. Prvo smo izvršili analizu i statističku obradu izmjerenih podataka o brzini i frekvenciji oscilovanja stijenske mase, kako bismo odredili kontrolne parametre tj. bušačko minerske parametre koji imaju najveće uticaje na potrese nastale pri miniranju. Dalje smo odredili maksimalne brzine oscilovanja stijenske mase za postojeće standarde, DIN 4150 i USA, za različite vrste objekata. Izvršena je provjera brzine oscilovanja stijenske mase, korišćenjem konvencionalnih modela, zasnovana na odnosu između maksimalne brzina čestice tla, količine eksploziva i rastojanja od mjesta miniranja do mjesta mjerenja.

Naredna faza bila je, formiranje modele predikcije primjenom savremenih matematičkih metoda: višestruke linearne regresije (MLR) i vještačkih neuronskih mreža (ANN). MLR model provjeren je ANOVA testom za različite nelinearne funkcije između kontrolnih parametara. ANN model je obuhvatio brzo obučavanje u tri sloja mreža sa prostiranjem greške unazad Levenberg-Markart algoritam sa sigmoidom funkcijom aktivacije. Ocjena uspješnosti formiranih modela provjerena je određivanjem koeficijenta korelacije i srednje kvadratne greške, kao i ispitivanjem raspodjele i autokorelacije reziduala. Za analiziranu studiju slučaja, primjenjujući razvijeni model, konstruisane su izolinije sigurnosnog rastojanja za različitu ukupnu količinu eksploziva koji se koristi i različite vrste građevinskih konstrukcija.

4.3.1 Statistička analiza rezultata mjerenja

Za statističku analizu rezultata mjerenja potresa pri miniranju korišćene su metode višestruke linearne regresije (multiple linear regression) MLR, a rezultati su provjeravani ANOVA testom.

4.3.1.1 Regresiona analiza

Regresiona analiza je statistički postupak za procjenu odnosa između promjenljivih. Cilj istraživanja odnosa među promjenljivim je utvrditi statističku zavisnost i pokazatelje jačine takve zavisnosti. Regresiona analiza uključuje više metoda za modeliranje i analizu promjenljivih, gdje je fokus na odnosu između jedne zavisne promjenljive i jedne ili više nezavisnih promjenljivih. Regresiona analiza objašnjava kako se mijenja vrijednost zavisne promjenljive kada bilo koja nezavisna promjenljiva varira, dok su ostale nezavisne promjenljive fiksne. Moguće je predvidjeti zavisne promjenljive na osnovu promjena u skupu nezavisnih promjenljivih. Pomoću regresione analize mogu se predvidjeti vrijednosti zavisne promjenljive na osnovu promjena nezavisnih promjenljivih. Odnosi među pojavama mogu biti funkcionalni (deterministički) i statistički (stohastički). Razvijene su mnoge metode regresione analize [Skakić 2001] kao što su prosta, višestruka, linearna i nelinearna. Tabela 4. 3. prikazuje klasifikaciju regresionih modela u odnosu na broj nezavisnih promjenljivih i prema vrsti veze između promjenljivih [Dizdar 2006].

Tabela 4. 3 Podjela regresionih modela [Dizdar 2006]

	Linearni	Nelinearni
Prost (Simple)	$Y = b_0 + b_1X$ polinom prvog stepena	$Y = b_0 + b_1X + b_2X^2$ polinom drugog stepena $Y = b_0 + b_1X^2 + b_mX^m$ polinom n-tog stepena $Y = b_0b_1^x$ -eksponencijalna funkcija $Y = \log_b X$ -logaritamska funkcija itd.
Višestruk (Multiple)	$Y = b_0 + b_1X_1 + \dots \dots b_mX_m$	

Višestruka regresiona analiza

Zavisno promjenljiva uglavnom je definisana većim brojem nezavisnih promjenljivih, tako da je za određivanje te zavisnosti potrebno koristiti neku multivarijantnu analizu. Višestruka linearna regresija je među najčešće korišćenim regresionim analizama. Višestrukom linearnom regresionom analizom utvrđuje se linearna povezanost između tri ili više nezavisnih (prediktorskih) i jedne zavisne (kriterijske) promjenljive pri čemu je regresiona jednačina oblika:

$$y_i = b_0 + b_1x_{i1} + b_2x_{i2} + \dots + b_mx_{im} + e_i \quad (4.1)$$

Gdje y_i predstavlja zavisnu (kriterijumsku) promjenljivu, $x_1 \dots x_m$ su nezavisne (prediktorske) promjenljive, $b_0 \dots b_m$ su regresioni koeficijenti, e_i je greška tj. rezidual, m predstavlja broj nezavisnih promjenljivih i $i = 1, \dots, n$ (n - broj elemenata, $n > m$),

Regresioni koeficijenti mogu se izračunati rješavanjem regresione jednačine u matričnom obliku

$$y = Xb + e$$
$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1m} \\ 1 & x_{21} & \dots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_n \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Gdje y predstavlja vektor rezultata n elemenata u zavisnoj promjenljivoj, X je matrica (reda $n \cdot m + 1$) rezultata elemenata u m nezavisnih promjenljivih, b je vektor $m+1$ regresionih koeficijenata, e je rezidualni vektor rezultata n elemenata.

Regresioni koeficijenti b dobiju se metodom najmanjih kvadrata, uz kriterijum da zbir kvadrata reziduala, odnosno razlika izmjerenih vrijednosti od predviđenih budu minimalna.

$$y = Xb \quad (4.3)$$

Ako postoji inverz matrice $X^T X$ onda je konačan ocjena za b upravo:

$$(X^T X)^{-1} X^T y = b \quad (4.4)$$

Rezidualni vektor (greška) e predstavlja razliku predviđenih rezultata elemenata od izmjerenih:

$$e = y - y' = y - Xb. \quad (4.5)$$

Regresioni koeficijent b_0 predstavlja predviđeni rezultat u zavisnoj promjenljivoj y ako su rezultati u svim nezavisnim promjenljivim jednaki 0. Regresioni koeficijenti $b_1, \dots, b_m$ pokazuju koliko se u prosjeku linearno mijenja vrijednost zavisne promjenljive y za jedinični porast vrijednosti odgovarajuće nezavisne promjenljive ($x_1, \dots, x_m$) uz uslov da su vrijednosti ostalih nezavisnih promjenljivih konstantne [Dizdar 2006].

Rezidualne vrijednosti određuju se u mjernim jedinicama zavisne promjenljive. Relativne rezidualne vrijednosti mogu se izračunati kao:

$$\hat{e}_i = \frac{y_i - y'_i}{y_i} \cdot 100 \quad (4.6)$$

Standardna greška predviđanja (σ_e) ili standardna devijacija izmjerenih rezultata u odnosu na predviđene bila bi:

$$\sigma_e^2 = \frac{r_{ss}}{df} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2}{n - m - 1} \quad (4.7)$$

Ako se kriterijska i prediktorske promjenljive prethodno standardizuju, standardizovani regresioni koeficijenti mogu se izračunati rješavanjem sljedeće jednačine u matričnom obliku:

$$\begin{matrix} k & = & Z & \beta & + & \varepsilon \\ \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_n \end{bmatrix} & = & \begin{bmatrix} z_{11} & \cdot & \cdot & z_{1m} \\ z_{21} & \cdot & \cdot & z_{2m} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ z_{n1} & \cdot & \cdot & z_{nm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \cdot \\ \beta_m \end{bmatrix} & + & \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \cdot \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (4.8)$$

Gdje je k vektor n standardizovanih rezultata elementa u kriteriju, Z je matrica (reda $n \cdot m$) standardizovanih rezultata elementa u m prediktora, β predstavlja vektor m standardizovanih regresionih koeficijenata, ε je vektor standardizovanih rezidualnih rezultata n elemenata.

Ukoliko izraz pomnožimo inverzom matricom R , i ako je $R^{-1}R=I$ onda je:

$$R^{-1}r = \beta \quad (4.9)$$

Standardizovani regresioni koeficijenti ($\beta_1, \dots, \beta_m$) su relativni koeficijenti uticaja, i prikazuju veličinu promjene zavisne promjenljive iskazane u segmentima standardne devijacije za linearno povećanje standardizovane vrijednosti odgovarajuće nezavisne promjenljive ($Z_1, \dots, Z_m$), ako se ne mijenjaju vrijednosti ostalih nezavisnih promjenljivih.

Vektor rezidualnih vrijednosti ε izačunava se kao razlika vektora standardizovanih predviđenih rezultata k' i vektora standardizovanih izmjerenih rezultata k :

$$\varepsilon = k - k' = k - Z\beta \quad (4.10)$$

Koeficijent determinacije multiple korelacije dobije se kao:

$$\rho^2 = \beta^T r \quad (4.11)$$

Ili kao

$$\rho^2 = \sum_{j=1}^m \beta_1 r_1 + \beta_2 r_2 + \dots + \beta_m r_m = \sum_{j=1}^m \beta_j r_j = \sum_{j=1}^m p_j \quad (4.12)$$

tako da je multipla korelacija: $\rho = \sqrt{\rho^2}$.

Vrijednosti p_j označavaju zajednički varijabilitet pojedinih nezavisnih promjenljivih i zavisne promjenljive, tačnije označavaju relativni udio svake nezavisne promjenljive u objašnjenom varijabilitetu zavisne promjenljive. Zbir svih p_j jednak je ρ^2 i predstavlja parcijalni koeficijent determinacije. Kada p_j pomnoži sa 100, imamo postotak zajedničke varijance pojedine zavisne i nezavisne promjenljive. Analizirajući parcijalni koeficijent determinacije (p_j) mogu se dobiti supresori. Supresor predstavlja nezavisnu promjenljivu koja je u vrlo niskoj ili nultoj korelaciji sa zavisnom promjenljivom, a u isto vrijeme je vrijednost standardizovanog regresionog koeficijenta (β_j) visoka [Dizdar 2006].

U predmetnoj disertaciji, višestruka linearna regresija iskorišćena je za uspostavljanje korelacije između bušačko - minerskih parametara koji su registrovani na terenu kao što su: rastojanje između bušotina, rastojanje između redova bušotina, dubina bušotina, broj bušotina, količina eksploziva po intervalu usporenja i ukupna količina eksploziva i parametara oscilovanja stijenske mase brzine i frekvencije oscilovanja.

4.3.1.2 Analiza varijance, ANOVA

Analiza varijance, ANOVA, (Analysis of variance) je statistički test koji služi za odbacivanje ili prihvatanje nulte hipoteze o jednakosti matematičkih sredina skupova ili grupa. ANOVA se upotrebljava za upoređivanje više grupa ili za utvrđivanje postojanja razlika unutar grupa. ANOVA test ustanovio je statističar Ronald Fisher 1920. godine, koji ga je definisao kao odvajanje ukupne varijance u sastavne dijelove tako da se može odrediti udio svake komponente u ukupnoj varijanci.

U njegovu čast, F raspodjela nosi prvo slovo njegovog prezimena. Analiza varijance ispituje veličinu varijabilnosti u zavisnoj promjenljivoj i definiše odakle dolazi taj varijabilitet [Landau i Everitt 2004]. Analiza varijance (ANOVA) je uobičajen metod za poređenje srednjih vrijednosti za tri ili više grupa. Prema broju kontrolisanih faktora analizu varijance djelimo na: jednofaktorsku, dvofaktorsku, ..., n faktorsku [Skakić 2001].

ANOVA test daje odredbe o jednakosti sredina grupa, ta odredba se daje na osnovu upoređivanja varijabiliteta sredine uzoraka grupe sa sredinom uzoraka svih grupa, te upoređivanjem varijabiliteta unutar uzorka grupe. Kako su sredine uzoraka iste grupe više razmaknute, tako je varijanca unutar skupa iste grupe manja, pa i veća vjerovatnoća odbacivanja nulte hipoteze o jednakosti grupa. Zbog donošenja odredbe na osnovu varijabiliteta, ovaj test je i dobio naziv analiza varijanci. Pretpostavlja se da su grupe (prikupljeni uzorci probom) nezavisni i da se povinuju normalnoj raspodjeli s očekivanjima μ_i i jednakim varijancama σ^2 [Knežević 2017].

Hipoteze su definisane jednačinama:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_k \quad (4.13)$$

$$H_0: \text{najmanje dvije sredine nisu jednake.} \quad (4.14)$$

Ako y_{ij} predstavlja j . opservaciju (realizaciju) u probi i ., tada Tabela 4. 4 pokazuje zapis realizacija u probama. Gdje je Y_i zbir svih realizacija u i . probi, $\bar{y}_i$ je sredina svih realizacija u i . probi, $Y_{..}$ označava zbir svih realizacija u svim probama i $\bar{y}_{..}$ predstavlja sredinu svih realizacija u svim probama.

Tabela 4. 4 Tabelarno predstavljanje podataka k slučajnih uzoraka [Knežević 2017]

Uzorci Broj elemenata	1	2	...	i	...	k	
1	y_{11}	y_{21}	...	y_{i1}	...	y_{k1}	
2	y_{12}	y_{22}	...	y_{i2}	...	y_{k2}	
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	
n	y_{1n}	y_{2n}	...	y_{in}	...	y_{kn}	
Suma	$Y_{1.}$	$Y_{2.}$	...	$Y_{i.}$	...	$Y_{k.}$	$Y_{..}$
Sredina	$\bar{y}_{1.}$	$\bar{y}_{2.}$	...	$\bar{y}_{i.}$	...	$\bar{y}_{k.}$	$\bar{y}_{..}$

Sve realizacije mogu se iskazati u obliku $Y_{ij} = \mu_i + \varepsilon_{ij}$, ukoliko se unese zamjena $\mu_i = \mu + \alpha_i$, s napomenom da je $\sum_{i=0}^k \alpha_i = 0$, onda se sve realizacije mogu predstaviti kao slučajna promjenljiva koju čine stavke opšte srednje vrijednosti μ , efekta i ., probe α_i i slučajne greške ε_{ij} , koji se pokoravaju normalnoj raspodjeli $N(0, \sigma^2)$.

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \varepsilon_{ij} \quad (4.15)$$

$$\mu = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \mu_i \quad (4.16)$$

Prethodne hipoteze se mogu napisati kao:

$$H_0: \alpha_1 = \alpha_2 \dots = \alpha_k \quad (4.17)$$

$$H_0: \text{barem jedna } \alpha_i \text{ je različita od nule.} \quad (4.18)$$

Jednačine kojima se opisuju mjere varijabiliteta u podacima su:

$$SST = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 \quad (4.19)$$

$$SSA = n \sum_{i=1}^k (\bar{y}_i - \bar{y}_{..})^2 \quad (4.20)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{i.})^2 \quad (4.21)$$

Ova jednačina pokazuje vezu između varijabiliteta:

$$SST = SSA + SSE \quad (4.22)$$

Ukoliko se uporedi varijabilnost kod analize varijance i linearne regresije, imamo isti model. Kod povezanost testa linearne regresije i analize varijance važno je ispravno tumačiti rezultate. Ukoliko se jednofaktorski ANOVA model predstavi matrično, onda su predhodne jednačine ekvivalentne, uz konstataciju da su kategorije kod analize varijance predstavljene binarno. Znači da za svaki red i , mora važiti $\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1$.

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & \dots & x_{k1} \\ 1 & x_{12} & x_{22} & \dots & x_{k2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{1n} & x_{2n} & \dots & x_{kn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu \\ \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

Ukoliko su parametri u modelu linearne regresije prirodni brojevi, onda svi parametri mogu biti kategoričke promjenljive i kodirati isto kao u modelu analize varijance. Kod linearne regresije, rezultati su regresioni koeficijenti β_i , a rezultati kod analize varijance su sredine grupa μ_i . Veza između ovih rezultata može se prikazati sljedećom jednačinom:

$$\mu_i = \beta_i + \beta_0 \quad (4.24)$$

Modeli analize varijance i linearne regresije su jednaki, ali je tumačenje različito. Linearna regresija pokušava linearnim modelom opisati uzorke, tačnije odbaciti nultu hipotezu o prilagođavanju odabranog linearnog modela uzorcima, dok model analize varijance pokušava opisati uzorke sredinama grupa i varijacijom, i odbaciti nultu hipotezu o jednakosti sredina grupa.

Pretpostavimo da je $k = 2$ i da su grupe nezavisne, odnosno žele se provjeriti naredne hipoteze. Tada je test analize varijance jednak t testu.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 \rightarrow \mu_1 - \mu_2 = 0 \quad (4.25)$$

$$H_0: \mu_1 \neq \mu_2 \rightarrow \mu_1 - \mu_2 \neq 0 \quad (4.26)$$

Pošto je model analize varijance jednak modelu linearne regresije, tada je neodbacivanje hipoteze $H_0: \beta_1 = 0$ jednako odbacivanju hipoteze o jednakosti dvije grupe. Prilikom takvog testiranja, koristi se statistika $T = \frac{b_1}{\frac{s}{\sqrt{S_{xx}}}}$ koja se pokorava t raspodjeli s $n-2$ stepana slobode. U tabeli 4. 5 prikazan je način prikazivanja rezultata jednofaktorske analize varijance.

Tabela 4. 5 Jednofaktorska analiza varijance [Knežević 2017]

Izvor varijabiliteta	SS	Stepeni slobode	s^2	f
Eksperimenti	SSA	k-1	$s_1^2 = \frac{SSA}{k-1}$	$\frac{s_1^2}{s^2}$
Greška	SSE	k(n-1)	$s^2 = \frac{SSE}{k(n-1)}$	
Ukupno	SST	kn-1		

Ako se jednofaktorska analiza varijance proširi dodatnim faktorom dobije se dvofaktorska analiza varijance. Sve realizacija iz tabele 4. 6 mogu se opisati modelom $y_{ijk} = \mu_{ij} + \varepsilon_{ijk}$. Izraz $(\alpha\beta)_{ij}$ prikazuje korelaciju između i . i j . nivoa faktora A i B.

Korelacija između faktora može se predstaviti 2D koordinatnim sistemom, gdje su koordinatne osi faktori, tačke u sistemu prosječnu vrijednost y faktora, u zavisnosti o x . Prosječne vrijednosti y faktora prikazuju se krivim, koje sugerišu postojanje korelacija. Ukoliko su sve krive paralelne, onda korelacija ne postoji, u obrnutom slučaju postoji vjerovatnoća za korelacijom, ta vjerovatnoća se provjerava s određenom signifikantnošću [Knežević 2017].

Tabela 4. 6 Tabelarni prikaz dvofaktorske probe [Knežević 2017]

A/B	1	2	...	b	Zbir	Sredina
1	y_{111}	y_{121}	...	y_{1b1}	$Y_{1..}$	$\bar{y}_{1..}$
	y_{112}	y_{122}	...	y_{1b2}		
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		
2	y_{11n}	y_{12n}	...	y_{1bn}	$Y_{2..}$	$\bar{y}_{2..}$
	y_{211}	y_{221}	...	y_{2b1}		
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		
	y_{21n}	y_{22n}	...	y_{2bn}		
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		
a	y_{a11}	y_{a21}	...	y_{ab1}	$Y_{a..}$	$\bar{y}_{a..}$
	y_{a12}	y_{a22}	...	y_{ab2}		
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		
	y_{a1n}	y_{a2n}	...	y_{abn}		
Zbir	$Y_{.1}$	$Y_{.2}$	...	$Y_{.b}$	$Y_{..}$	
Sredina	$\bar{y}_{.1}$	$\bar{y}_{.2}$	...	$\bar{y}_{.b}$		$\bar{y}_{..}$

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (4.27)$$

$$\sum_{i=1}^a \alpha_i = 0, \quad \sum_{j=1}^b \beta_j = 0, \quad \sum_{i=1}^a (\alpha\beta)_{ij} = 0, \quad \sum_{j=1}^b (\alpha\beta)_{ij} = 0 \quad (4.28)$$

Pošto je definisan model, prethodne hipoteze se mogu definisati kao:

1. $H'_0: \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_a = 0, H'_1: \neg H'_0$
2. $H''_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b = 0, H''_1: \neg H''_0$
3. $H'''_0: (\alpha\beta)_{11} = (\alpha\beta)_{12} = \dots = (\alpha\beta)_{ab} = 0, H'''_1: \neg H'''_0$

Sljedeće jednačine predstavljaju mjere varijabiliteta u podacima.

$$SST = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (y_{ijk} - \bar{y}_{...})^2 \quad (4.30)$$

$$SSA = bn \sum_{i=1}^a (\bar{y}_{i..} - \bar{y}_{..})^2 \quad (4.31)$$

$$SSB = an \sum_{j=1}^b (\bar{y}_{.j} - \bar{y}_{..})^2 \quad (4.32)$$

$$SS(AB) = n \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (\bar{y}_{ij.} - \bar{y}_{i..} - \bar{y}_{.j.} + \bar{y} \dots)^2 \quad (4.33)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (y_{ijk} - \bar{y}_{ij.})^2 \quad (4.34)$$

Naredna jednačina pokazuje vezu između varijabiliteta.

$$SST = SSA + SSE + SSB + SS(AB) + SSE \quad (4.35)$$

U tabeli 4. 7 prikazan je način prikazivanja rezultata dvofaktorske analize varijance.

Tabela 4. 7 Dvofaktorska analiza varijance [Knežević 2017]

Izvor varijabiliteta	SS	Broj stepeni slobode	s^2	f
Faktor A	SSA	$a-1$	$s_1^2 = \frac{SSA}{a-1}$	$\frac{s_1^2}{s^2}$
Faktor B	SSB	$b-1$	$s_1^2 = \frac{SSA}{b-1}$	$\frac{s_1^2}{s^2}$
AB	SS(AB)	$(a-1)(b-1)$	$s_1^2 = \frac{SS(AB)}{(a-1)(b-1)}$	$\frac{s_1^2}{s^2}$
Greška	SSE	$ab(n-1)$	$s_1^2 = \frac{SSE}{ab(n-1)}$	
Ukupno	SST	$abn-1$		

Ubacivanjem faktora tvori se N -faktorska analiza varijance. N -faktorska ANOVA ima $2^N - 1F$ statistika koje mogu biti testirane za korisnost modela, te $\frac{N!}{(m+1)!(N-m-1)!}$ m -faktorskih korelacija.

Tako da 4-faktorska ANOVA ima 15 različitih F statistika: 4 za glavne faktore, 6 za korelaciju dva faktora, 4 za korelaciju tri faktora i 1 za korelaciju četiri faktora.

U ovoj disertaciji, ANOVA test upotrebljen je za ocjenu uspostavljenih korelacija između proračunatih bušačko-minerski parametara kao što su: rastojanje između bušotina, rastojanje između redova bušotina, dubina bušotina, broj bušotina, količina eksploziva po intervalu usporenja i ukupna količina eksploziva i efekata potresa pri miniranju koji se izražavaju u vidu brzine i frekvencije oscilovanja.

4.3.2 Primjena metode neuronskih mreža

Konvencionalni modeli, koji se koriste za procjenu vrijednosti maksimalnih brzina oscilovanja stijenske mase (PPV), često daju rezultate koji nisu zadovoljavajuće tačnosti. Razlog za to je što konvencionalni modeli koriste relativno jednostavne zavisnosti, kojima se uspostavlja relacija između vrijednosti PPV sa jedne strane i redukovano rastojanja sa druge strane. Potresi nastali miniranjem, pored redukovano rastojanja, odnosno rastojanja od mjesta miniranja do mjesta mjerenja i od količine eksploziva, zavise i od niza drugih uticajnih faktora, karakteristika stijenske sredine i tla, kao što su: tekstura, struktura, mineralni sastav stijenskih masa, strukturno-tektonske karakteristike, fizičko-mehaničke karakteristike i dr.

Postoji niz uticajnih faktora od koji zavisi registrovana PVV prilikom miniranja, tako da je u potpunosti opravdana i nemogućnost precizne ocjene vrijednosti PPV pomoću konvencionalnih modela, koji u obzir uzimaju samo redukovano rastojanje. Konvencionalni modeli razvijaju se na osnovu razmatranja rezultata miniranja na određenoj lokaciji, tako da nisu pouzdani za procjenu vrijednosti brzine oscilovanja stijenske mase na nekoj drugoj lokaciji, i to zbog različitih svojstava stijenske mase na različitim područjima. Da bi se ovi nedostaci prevazišli, u posljednjih dvadesetak godina istraživači primjenjuju vještačke neuronske mreže (ANN) za ocjenu vrijednosti PVV, zbog mogućnosti njihovog obučavanja i uočavanja međusobnih veza između podataka registrovanih na osnovu eksperimentalnih opažanja. Moguće je od relativno malog broja registrovanih podataka formirati model na bazi ANN, koji može poslužiti za predviđanje vrijednosti PPV na osnovu proizvoljnih ulaznih podataka, čime se omogućuje optimizacija projektovanih radova prilikom miniranja. Zahvaljujući dobijenom modelu mogu se odrediti optimalne vrijednosti i međusobne kombinacije ulaznih parametara koji će, dati traženu vrijednost brzine oscilovanja stijenske mase.

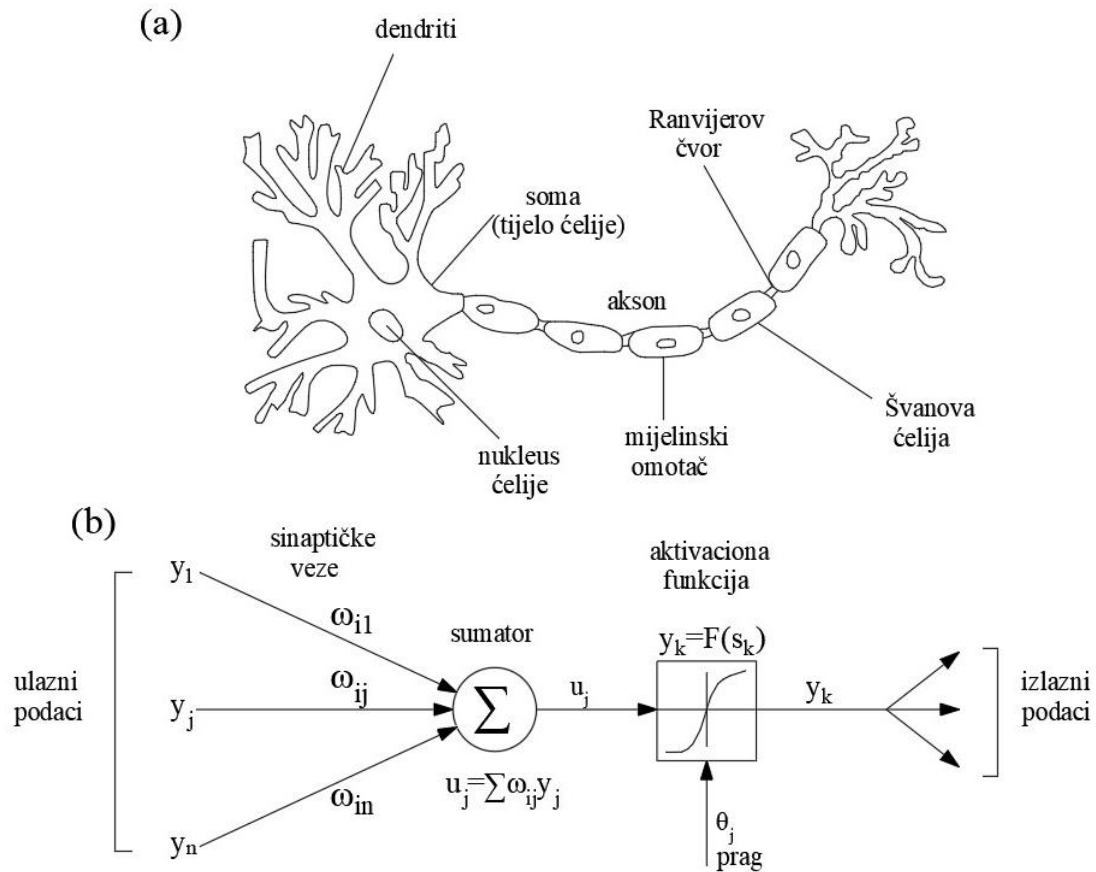
4.3.2.1 Osnovni nelinearni model vještačkog neurona

Vještačke neuronske mreže formirane su na osnovu realne biološke mreže neurona, kako je prikazano na slici 4. 5.

Rad vještačkog neurona je vrlo pojednostavljen i sličan je radu biološkog neurona: signal sa ulaznih jedinica ($i = 1, \dots, N_i$) sumiraju se i predaju aktivacionoj funkciji, dalje se izlazna informacija prenosi na druge jedinice u skrivenom ($h = 1, \dots, N_h$) i izlaznom sloju ($o = 1, \dots, N_o$) [Reed i dr. 1998].

Slike 4. 5b pokazuje da je izlazni podatak y_k na osnovu n ulaznih podataka y_i , $i = 1, \dots, j, \dots, n$ jednak:

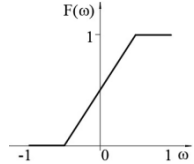
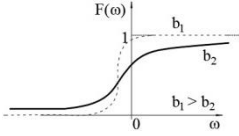
$$y_k = F(s_k) = F\left(\sum_{j=1}^n w_{ij}y_j + \theta_j\right) \quad (4.36)$$



Slika 4. 5 Uporedni prikaz realnog biološkog neurona (a) i vještačkog neurona (b) [Reed i dr. 1998]

Tabela 4. 8 Najčešći tipovi aktivacionih funkcija [Reed i dr. 1998]

Aktivaciona funkcija	Analitički izraz	Grafička prikaz
Hevisajdova funkcija praga	$F(\omega) = \begin{cases} 1, & \omega \geq 0 \\ 0, & \omega < 0 \end{cases}$	
Funkcija tipa znaka	$F(\omega) = \begin{cases} 1, & \omega \geq 0 \\ 0, & \omega = 0 \\ -1, & \omega < 0 \end{cases}$	

Dio - po - dio linearna funkcija	$F(\omega) = \begin{cases} 1, & \omega \geq 1/2 \\ 1/2 + \omega, & -1/2 < \omega < 1/2 \\ 0, & \omega \leq -1/2 \end{cases}$	
Sigmoida tj. logistička funkcija	$F(\omega) = \frac{1}{1 + e^{-b\omega}}$	

Gdje je F aktivaciona funkcija, za ograničavanje amplituda izlaznog signala neurona. Aktivacionom funkcijom se vrši normalizacija izlazne vrijednosti u intervalu $(0,1)$ ili $(-1,1)$. Najčešći vidovi aktivacionih funkcija prikazani su u tabeli 4. 8.

ω_{ij} – sinaptička težina, određuje jačinu veze zbiratora, $\sum_{j=i}^n w_{ij}y_j$, sa ulaznim podacima. Pozitivne vrijednosti težine odgovaraju ekscitabilnim sinaptičkim vezama, a negativne inhibitornim vezama; θ_j – prag, određuje položaj granične ravni među različitim klasama izlaznih podataka, zavisnosti od vrste aktivacione funkcije u odnosu na koordinatni početak u okolini izlaznih podataka a koristi se za rješavanje klasifikacionih zadataka. Ako analiziramo najjednostavniji primjer aktivacione funkcije – sigmoidnu funkciju, izlazni podatak neuronske mreže pripada klasi +1 (ulazni podaci pozitivni), odnosno klasi -1 (ulazni podaci negativni). Granica između ovih klasa je predstavljena pravom:

$$y_2 = -\frac{\omega_1}{\omega_2} y_1 - \frac{\theta}{\omega_2} \quad (4.37)$$

Težinske vrijednosti (ω_1 / ω_2) određuju nagib granice između klasa, a prag definiše odsječak (θ / ω_2) . Prag se predstavlja kao pozitivna težinska vrijednost (+1) koja se dodaje ulaznim podacima u prilikom obučavanja mreže [Reed i dr. 1998].

4.3.2.2 Arhitektura neuronskih mreža

U vještačkoj neuronskoj mreži neuroni su grupisani u slojevima i u zavisnosti od uloge u mreži, mogu biti:

- ulazni slojevi - sadrže realne ulazne podatke,
- izlazni slojevi - daju rezultate obrade,

- skriveni slojevi - nalaze se između ulaznog i izlaznog sloja i koriste aktivacionu funkciju za uspostavljanje odnosa između različitih ulaznih podataka zbog dobijanja izlaznih vrijednosti zadovoljavajuće tačnosti.

Veze u mreži mogu biti između neurona iz istog sloja ili između neurona iz različitih slojeva. [Kostić 2014]. Zavisno od smjera prostiranja informacija kroz mrežu, postoje dve vrste vještačkih neuronskih mreža:

- neuronske mreže sa prostiranjem signala (informacija) unaprijed (nerekurzivne ili nepovratne) (feedforward neural networks), gdje se prostiranje (propagacija) signala vrši samo u jednom smjeru (od ulaznih podataka prema izlaznim podacima). Predstavnik ove vrste neuronskih mreža je ANN sa više slojeva, koja se najčešće primjenjuje kod izučavanja PVV pri miniranju;
- neuronske mreže sa povratnim spregom (rekurzivne ili povratne), gdje viši slojevi vraćaju informacije nazad u niže slojeve (feedback neural networks).

4.3.2.3 Obučavanje vještačkih neuronskih mreža

Obučavanje (učenje, treniranje) neuronskih mreža je postupak podešavanja njihove konfiguracije ili usklađivanja jačine veza između slojeva, da bi neuronske mreže dale tražene izlazne podatke zadovoljavajuće tačnosti, na osnovu skupa ulaznih podataka. S jedne strane, mogu se eksplicitno podesiti težinske faktore koji odgovaraju svakoj vezi, koristeći poznavanje veza između slojeva. Drugi slučaj, predstavlja postupka obučavanja neuronskih mreža, pri čemu mreža sama podešava težinske vrijednosti pojedinih veza prema nekom unaprijed određenom pravilu obučavanja. Postoje dva osnovna načina obučavanja [Kostić 2014]:

- nadgledano ili asocijativno obučavanje (supervised learning), mreže na osnovu ulaznih podataka i datih izlaznih podataka. Traženi izlazni podatak postoji, i mreža treba da, na osnovu određenog broja realnih izlaznih podataka da izlazne podatke koji se upoređuju sa postojećim realnim podacima. Ovaj način obučavanja koristi se kod definisanja modela predikcije na osnovu registrovanih vrijednosti PPV pri miniranjima;
- nenadgledano ili samoorganizovano obučavanje (unsupervised learning) imamo kada se očekuje da neuronska mreža otkrije glavna statistička svojstva skupa ulaznih podataka. Sistem sam mora da razvije predstavu o mogućem skupu izlaznih podataka na osnovu datog skupa ulaznih informacija. Ovaj način obučavanja neuronske mreže koristi se za predviđanje (predikciju) nepoznatih vrijednosti PPV na osnovu proizvoljnih ulaznih podataka, u cilju optimizacije projektovanih minerskih radova.

Oba postupka obučavanja mreže sprovode se kroz prilagođavanje težinskih vrijednosti veza između jedinica (neurona) prema nekom prethodno utvrđenom pravilu. Ako jedinica y_k prima ulazni podatak od jedinice y_j , najjednostavnija verzija pravila predviđa promjenu težinske vrijednosti veze ω_{jk} na sljedeći način:

$$\Delta\omega_{jk} = \gamma y_j y_k \quad (4.38)$$

gdje je γ pozitivna konstanta proporcionalnosti odnosno brzina obučavanja (learning rate). Drugo, pravilo obučavanja koristi se kada se, pri promjeni težinskih vrijednosti, u obzir uzima razlika između dobijene i tražene izlazne vrijednosti.

$$\Delta\omega_{jk} = \gamma y_j (d_k - y_k) \quad (4.39)$$

gdje je d_k tražena vrijednost izlaznog podatka (aktivacije). Ova varijanta pravila obučavanja naziva se Vidrou-Hofovo ili delta pravilo obučavanja.

Postupak nadgledanog obučavanja neuronskih mreža vrši se tako što se postojeći skup podataka podjeli na tri podskupa: podskup za obučavanje (treniranje) mreže, podskup za validaciju mreže i podskup za testiranje mreže. Validacija mreže služi za provjeru da li je postupak prilagođavanja jačine veza (težinskih vrijednosti) doveo do stvarnog obučavanja mreže ili se desilo tzv. pretreniranja mreže (overlearning), odnosno nemogućnosti mreže da usvojene težinske vrijednosti jačina veza među jedinicama i slojevima primjeni na nepoznate podatke, na kojima nije vršeno obučavanje mreže. Ako se, tokom obučavanja mreže, greška u predviđanju smanjuje za podatke iz podskupa za obučavanje mreže a raste za validacioni podskup, onda mreža ne daje dovoljno tačne izlazne podatke i tu mrežu odbacujemo. Pretreniranje mreže često se javlja prilikom analize malog broja podataka, kada, tokom treniranja, mreža može da se prilagodi proizvoljnim ulazno-izlaznim podacima, koji su vrlo malo povezani sa podacima za validaciju i testiranje.

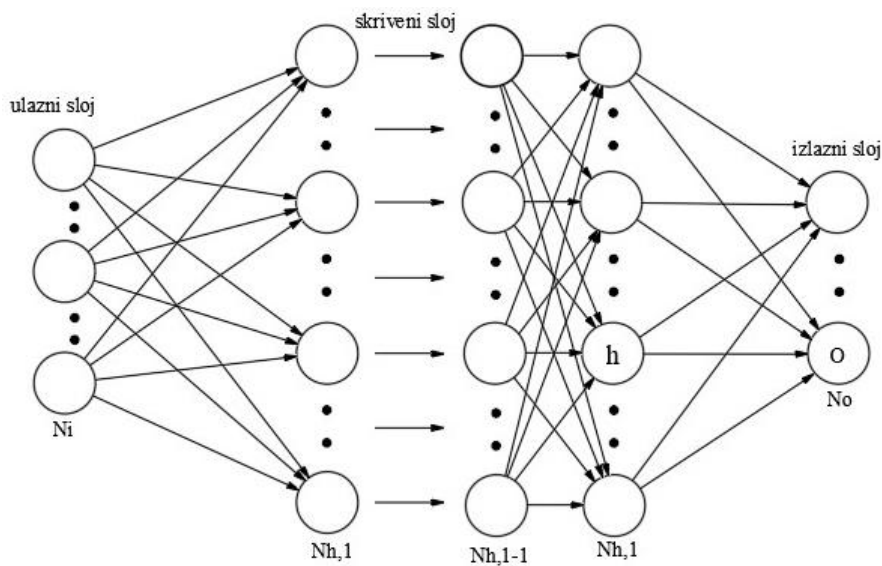
Obučavanje mreže prestaje, kada srednja kvadratna greška predviđanja tokom validacije dostigne traženi minimum. Podskup za testiranje podataka služi samo za konačnu provjeru tačnosti predikcije pomoću vještačkih neuronskih mreža na novim podacima koji nisu korišćeni za validaciju i treniranje mreže. Sva tri podskupa čine ulazni i odgovarajući izlazni podaci [Kostić 2014].

4.3.2.4 Višeslojne vještačke neuronske mreže sa prostiranjem signala unaprijed

Pri izučavanju potresa nastalih miniranjem, često se koriste neuronske mreže sa prostiranjem signala unaprijed. Vještačke neuronske mreže sa prostiranjem signala unaprijed obično imaju slojevitou strukturu, a svaki sloj se sastoji od jedinica (neurona, čvorova), koje primaju ulazne podatke od

jedinica u sloju direktno iza (prije) njih, a zatim dalje prenose informaciju na jedinice u sloju direktno ispred (poslije) njih. Jedinice nisu povezane međusobno unutar sloja. Takoreći, N_i ($i = 1, \dots, n$) ulaznih podataka prenosi se na prvi sloj od $N_{h,1}$ ($h = 1, \dots, n$) skrivenih jedinica. Ulazni podaci čine član, odnosno jedinice u ovom sloju neće biti podvrgnute nikakvoj daljoj obradi.

Aktivacija skrivene jedinice obavlja se pomoću aktivacione funkcije F_i težinskih vrijednosti ulaznih podataka i praga. Izlazni podaci prvog sloja skrivenih jedinica prelaze na sljedeći sloj od $N_{h,2}$ skrivenih jedinica, sve do posljednjeg skrivenog sloja, gdje se izlazne informacije predaju N_o ($o = 1, \dots, n$) izlaznim jedinicama (slika 4. 6).



Slika 4. 6 Višeslojne vještačke neuronske mreže sa prostiranjem signala unaprijed [Kostić 2014]

Iako je analizu potresa pri miniranju moguće izvršiti koristeći proizvoljan broj slojeva, dovoljan je i samo jedan sloj skrivenih jedinica za ocjenu bilo koje funkcije sa zadovoljavajućom tačnošću, ako je aktivaciona funkcija skrivenih jedinica nelinearna [Cybenko 1989]. Najčešće ANN sa prostiranjem signala unaprijed i sa jednim slojem skrivenih jedinica koristi sigmoidnu aktivacionu funkciju. Neuronske mreže sa prostiranjem signala unaprijed, koje koriste nelinearnu sigmoidnu aktivacionu funkciju, često primjenjuju generalisano delta pravilo (sa prostiranjem greške unazad). Izlazni podatak čini diferencijabilnu aktivacionu funkciju skupa ulaznih podataka, gdje je s_k [Krose i Smagt 1996]:

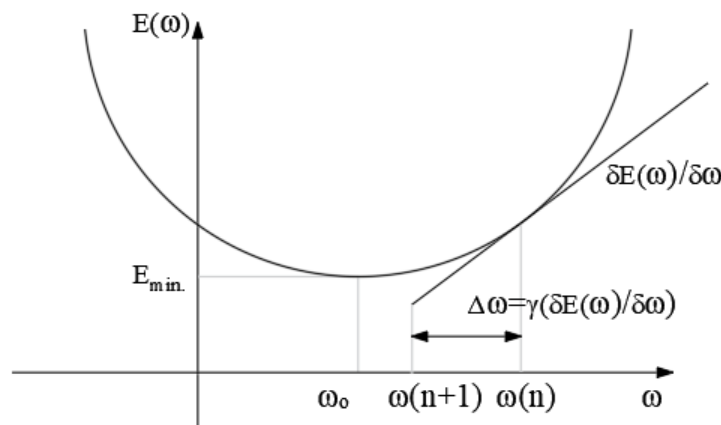
$$s_k = \sum_j \omega_{jk} y_j + \theta_k \quad (4.40)$$

Gdje su j -te jedinice ulazne jedinice ($j = 1, \dots, N_i$), a k -te jedinice su jedinice kojima se predaje informacija u narednom, skrivenom sloju ($k = 1, \dots, N_h$), a naredni sloj može biti i izlazni sloj o ($o = 1, \dots, n$). Mjera greške E je ukupna kvadratna greška za izlazne jedinice:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{o=1}^{N_o} (d_o - y_o)^2 \quad (4.41)$$

Ovdje je d_o tražena izlazna vrijednost jedinice o ($o = 1, \dots, N_o$). Izraz pokazuje greške primjenom metode najmanjih kvadrata, za određivanje težinske vrijednosti ulaznih podataka putem minimizacije greške, pomoću postupak postupnog opadanja (gradient descent) [Krose i Smagt 1996]. Promjene jačina veza vrše se proporcionalno sa negativnim parcijalnim izvodom greške po svakoj jačini veze (težinskoj vrijednosti) kako bi dobili pravilo obučavanja u vidu postupnog opadanja greške (slika 4. 7).

$$\Delta\omega_{jk} = \gamma \delta_k y_j \quad (4.42)$$



Slika 4. 7 Postupno opadanje greške pri podešavanju jačine veza između ulaznih i skrivenih/izlaznih podataka u mreži (delta pravilo) [Krose i Smagt 1996]

Pravilo obučavanja δ_k za svaku k -tu jedinicu u mreži, postiže se tako što parcijalni izvod koji definiše δ_k predstavimo kao proizvod dva faktora, pri čemu jedan predstavlja promjenu greške kao funkciju izlaznog podatka posmatrane jedinice, a drugi faktor pokazuje promjenu izlazne informacije u funkciji promjene ulaznog podatka:

$$\delta_k = -\frac{\partial E}{\partial s_k} = -\frac{\partial E}{\partial y_k} \frac{\partial y_k}{\partial s_k} \quad (4.43)$$

Ako pretpostavimo da k -ta jedinica predstavlja izlaznu jedinicu mreže, $k=o$ ($o=1, \dots, N_o$) i koristeći

izvod složene funkcije i zamjenama se dobije:

$$\delta_o = (d_o - y_o) F'_o(s_o) \quad (4.44)$$

za bilo koju izlaznu jedinicu o ($o = 1, \dots, N_o$).

Ako, k -ta jedinica ne predstavlja izlaznu, nego skrivenu jedinicu, $k = h$ ($h = 1, \dots, N$), onda nije poznat udio greške u informaciji koju daje ova skrivena jedinica u ukupnoj izlaznoj greški neuronske mreže. Mjera greške može se predstaviti kao funkcija prenosa informacije sa skrivenog na izlazni sloj: $E = E(s_1, s_2, \dots, s_j, \dots)$ i zamjenama se dobije:

$$\delta_h = F'(s_h) \sum_{o=1}^{N_o} \delta_o \omega_{ho} \quad (4.45)$$

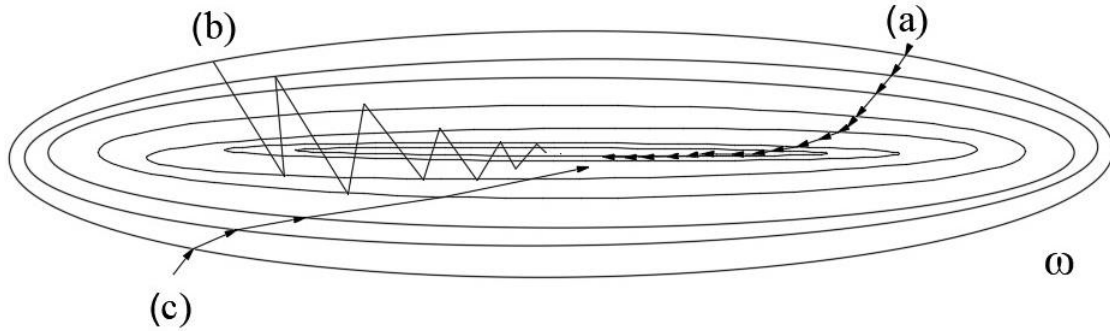
Predhodne dvije jednačine čine povratni postupak za izračunavanje pravila obučavanja δ za sve jedinice u mreži, koja se dalje koriste za proračun promjena jačine veza (težinskih vrijednosti). Ovaj postupak je generalisano delta pravilo za vještačku mrežu nelinearnih neurona sa prostiranjem signala unaprijed [Krose i Smagt 1996].

Na osnovu prikazanog postupku obučavanja (treniranja) mreže, promjena jačine veza je proporcionalna sa $\partial E / \partial \omega$, pri čemu se zahtjeva infinitezimalno mali korak pri definisanju izvoda. Za brže izračunavanja i pojednostavljenje, biramo što je moguće veću brzinu obučavanja γ uz uslov da ne dođe do oscilacija pri postupnom opadanju, što se može izbjeći promjenom jačine veze u funkciji prethodne promjene, dodavanjem novog člana koji se naziva moment [Krose i Smagt 1996]:

$$\Delta \omega_{jk}(t+1) = \gamma \delta_k y_j + \alpha \Delta \omega_{jk}(t) \quad (4.46)$$

ovdje je t posmatrana promjena jačine veze, a α je konstanta koja određuje efekat prethodne promjene jačine veze. Osnovnu ulogu momenta vidimo na slici 4. 8.

Bez momenta, relativno dug vremenski interval je potreban za dostizanje minimuma greške sa



Slika 4. 8 Postupno opadanje greške u prostoru jačina veza: (a) za nisku vrijednost brzine obučavanja; (b) za visoku vrijednost brzine obučavanja; (c) sa visokom vrijednošću brzine obučavanja i dodatim momentom [Krose i Smagt 1996]

niskom vrijednošću brzine obučavanja (putanja pod a), dok sa visokom vrijednošću brzine obučavanja minimum se ne može nikada dostići zbog pojave oscilacija (putanja pod b). Sa dodatkom momenta, znatno brže se dostiže minimum greške, odnosno za znatno manji broj koraka (putanja pod c).

Pored određenih ograničenja, postupak prostiranja greške unazad je najčešće korišćeni algoritam jer daje zadovoljavajuće rezultate u praksi, tako da smo jednu varijantu ovog algoritma koristili u izučavanju potresa pri miniranju u ovom doktoratu (Levenberg-Markart algoritam obučavanja).

4.3.2.5 Levenberg-Markart algoritam obučavanja

Levenberg-Markart (LM) algoritam obučavanja čini interpolaciju između postupka najstrmijeg opadanja (steepest descent method) i Gaus-Njutnovog algoritma, i najčešće je korišćen algoritam optimizacije. Objašnjenje ovog postupka se vrši kroz analizu metode najstrmijeg opadanja, Njutnove i Gaus-Njutnove metode. Detaljno objašnjenje ovog postupka je prikazano u korišćenoj literaturi [Kostić 2014], a mi ćemo ovdje prikazati samo najbitnije detalje i osnovne izraze za LM algoritam obučavanja.

Uspješnost obučavanja neuronske mreže ocjenjujemo pomoću zbira kvadrata grešaka:

$$E(x, w) = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M e_m^2 \quad (4.47)$$

ovdje je x vektor ulaznih podataka, dok je w vektor težina (jačina) veza. Indeks m je indeks izlaznih podataka, u rasponu od 1 do M , a M je ukupan broj izlaznih podataka. Indeksi i i j u daljem tekstu je indekse težina (jačina) veza, i to od 1 do N , gdje je N ukupan broj jačina veza, a indeks k je korak iteracije. Veličina e_m je greška izlaznog podatka m .

Algoritam najstrmijeg opadanja upotrebljava prvi izvod ukupne greške po jačinama veza, sa ciljem otkrivanja minimuma u prostoru grešaka [Yu i Milamowski 2011]. Podešavanje jačine (težine) veza prema algoritmu najstrmijeg opadanja vrši se kao:

$$w_{k+1} = w_k - \alpha g_k \quad (4.48)$$

gdje α predstavlja konstantu obučavanja (veličinu koraka).

Njutnova metoda procjenjuje da su sve komponente gradijenta $g_1, g_2, \dots, g_N$, funkcije težina (jačina) veza, i da su sve težine linearno nezavisne. Treba da razvijamo svaki element gradijenta g_i ($i = 1, 2, \dots, N$) u Tejlorov red i zadržimo sabirke do prvog člana, pa zamjenimo gradijentni vektora g , a zatim za svaku komponentu gradijentnog vektora izračunamo drugi parcijalni izvod ukupne greške [Yu i Milamowski 2011].

Za određivanje minimuma funkcije ukupne greške E , svaki element gradijenta mora da bude jednak nuli. Pošto postoji N jednačina sa N parametara možemo izračunati podešavanja jačina veza Δw_i . Ako jednačine zapišemo u matričnom obliku, tada kvadratna matrica predstavlja tzv. Hesijan (H):

$$\begin{bmatrix} -g_1 \\ -g_2 \\ \dots \\ -g_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\partial E}{\partial w_1} \\ -\frac{\partial E}{\partial w_2} \\ \dots \\ -\frac{\partial E}{\partial w_N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 E}{\partial w_1^2} & \frac{\partial^2 E}{\partial w_1 \partial w_2} & \dots & \frac{\partial^2 E}{\partial w_1 \partial w_N} \\ \frac{\partial^2 E}{\partial w_2 \partial w_1} & \frac{\partial^2 E}{\partial w_2^2} & \dots & \frac{\partial^2 E}{\partial w_2 \partial w_N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial^2 E}{\partial w_N \partial w_1} & \frac{\partial^2 E}{\partial w_N \partial w_2} & \dots & \frac{\partial^2 E}{\partial w_N^2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta w_1 \\ \Delta w_2 \\ \dots \\ \Delta w_N \end{bmatrix} \quad (4.49)$$

Zamjenom dobijamo:

$$-g = H \Delta w \quad (4.50)$$

Prema Njutnovoju metodi, podešavanje jačine veza izvodi se po obrascu:

$$w_{k+1} = w_k - H_k^{-1} g_k \quad (4.51)$$

a k je broj iteracije.

Hesijan H daje tačniju procjenu promjene gradijentnog vektora od algoritma najstrmijeg opadanja, jer su u pitanju drugi izvodi funkcije ukupne greške. Pravilna veličina koraka dobija se pomoću invertovanog Hesijana ($\alpha = H^{-1}$). Ako želimo da primijenimo Njutnov algoritam za podešavanje jačina veza prilikom obučavanja mreže, potrebno je izračunati Hesijan matricu H , odnosno druge parcijalne

izvode funkcije ukupne greške u odnosu na odgovarajuće jačine veze. Za pojednostavljenje procesa izračunavanja uvodimo Jakobijan J . Vezu između Jakobijana J i gradijenta g :

$$g = Je \quad (4.52)$$

Zamjenom, elementi i -tog reda i j -te kolone Hesijan matrice računaju se kao:

$$h_{i,j} = \frac{\partial^2 E}{\partial w_i \partial w_j} = \frac{\partial^2 \left(\frac{1}{2} \sum_{m=1}^M e_m^2 \right)}{\partial w_i \partial w_j} = \sum_{m=1}^M \frac{\partial e_m}{\partial w_i} + S_{i,j} \quad (4.53)$$

ovdje je $S_{i,j}$ jednako:

$$S_{i,j} = \sum_{m=1}^M \frac{\partial^2 e_m}{\partial w_i \partial w_j} e_m \quad (4.54)$$

Kako je osnovna pretpostavka Njutnove metode da je $S_{i,j}$ približno jednako nuli [Krose i Smagt 1996], veza između H i Jakobijan matrice J može da se zapiše kao:

$$H \cong J^T J \quad (4.55)$$

Podešavanje jačina veza prema Gaus-Njutnovom algoritmu vrši se kao:

$$w_{k+1} = w_k - (J_k^T J_k)^{-1} J_k e_k \quad (4.56)$$

Osnovna prednost Gaus-Njutnovog algoritma u odnosu na Njutnovu metodu je to što Gaus-Njutnov algoritam ne koristi druge parcijalne izvode ukupne greške po odgovarajućim težinama, nego u proračun uvodi Jakobijan matricu J [Yu i Milamowski 2011]. Gaus-Njutnov algoritam ukazuje na probleme kod konvergencije kao i Njutnova metoda, prilikom optimizacije greške u kompleksnom prostoru grešaka. Za obezbjeđenje da Hesijan matrica $J^T J$ bude uvijek invertibilna, LM algoritam uvodi još jednu aproksimaciju u H .

$$H \cong J^T J + \mu I \quad (4.57)$$

gdje je μ kombinacioni efekat (uvijek pozitivna vrijednost), a I je jedinična matrica.

Elementi na glavnoj dijagonali aproksimirane Hesijan matrice su veći od nule. Zahvaljujući ovoj aproksimaciji obezbjeđen je uslov da je H uvijek invertibilna. Smjenom, imamo pravilo podešavanja jačina veza po LM algoritmu [Yu i Milamowski 2011]:

$$w_{k+1} = w_k - (J_k^T J_k + \mu I)^{-1} J_k e_k \quad (4.58)$$

Levenberg-Markart algoritam, je kombinacija algoritma najstrmijeg opadanja i Gaus-Njutnovog algoritma, i prelazi sa jednog algoritma na drugi u procesu obučavanja. Ako kombinacioni koeficijent μ ima vrlo malu vrijednost (blizu nule), onda se koristi Gaus-Njutnov algoritam. Ako je vrijednost kombinacionog koeficijenta μ vrlo velika, onda se primjenjuje algoritam najstrmijeg opadanja.

Tabela 4. 9 daje pregled pravila podešavanja težina veza za različite algoritme obučavanja. Ako kombinacioni koeficijent μ ima vrlo visoku vrijednost, može da se interpretira kao koeficijent obučavanja kod metode najstrmijeg opadanja:

$$\alpha = \frac{1}{\mu} \quad (4.59)$$

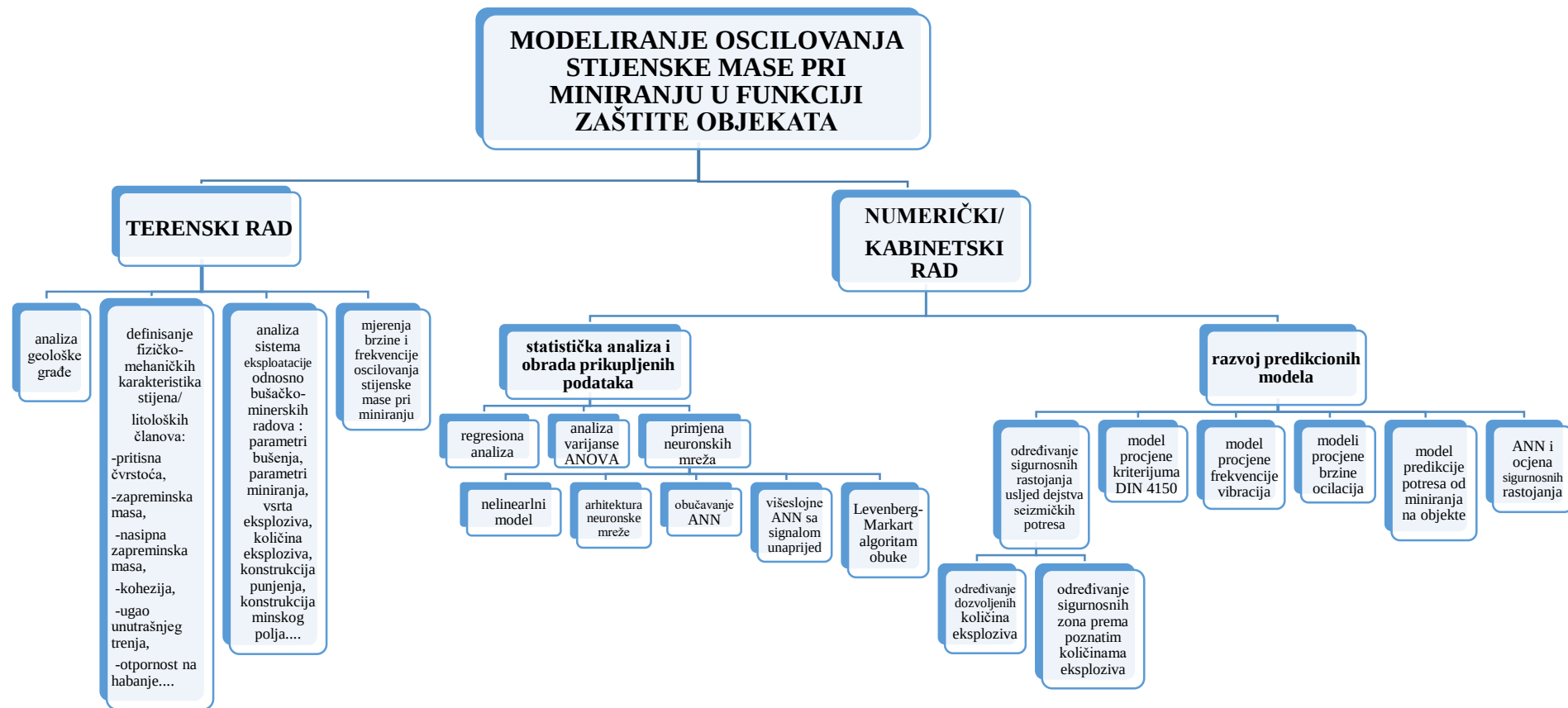
Tabela 4. 9 Pravila podešavanja težina veza za različite algoritme obučavanja [Yu i Milamowski 2011]

Algoritam	Pravilo podešavanja težina	Konvergenција	Kompleksnost proračuna
Najstrmije opadanje	$w_{k+1} = w_k - \alpha g_k$	stabilna, spora	gradijent
Njutn	$w_{k+1} = w_k - H_k^{-1} g_k$	nestabilna, brza	gradijent i Hesijan
Gaus-Njutn	$w_{k+1} = w_k - (J_k^T J_k)^{-1} J_k e_k$	nestabilna, brza	Jakobijan
Levenberg-Markart	$w_{k+1} = w_k - (J_k^T J_k + \mu I)^{-1} J_k e_k$	stabilna, brza	Jakobijan

Primjena neuronskih mreža u praksi je pokazala da se sa LM algoritmom obučavanja postiže brza i stabilna konvergenција, sa vrlo visokom tačnošću izlaznih podataka, pa smo ovaj algoritam primjenili u analizi predmetne doktorske disertacije.

Evaluacija rada ANN biće izvršena putem analize podataka o maksimalno registrovanim brzinama oscilovanja stijenske mase na površinskom kopu krečnjaka “Hardovac” - Doboj i na lokaciji Skyline - Beogard.

Prethodno detaljno predstvaljena, metodologija istraživanja razvijena u ovoj disertaciji prikazana je grafički na slici 4. 9.



Slika 4. 9 Grafički prikaz metodologija istraživanja

5 REZULTATI ISTRAŽIVANJA

U ovom poglavlju analizirani su potresi i vibracije tla izazvani miniranjem, kao i njihovi uticaji na moguća oštećenja objekata koji se nalaze u neposrednoj blizini mjesta miniranja. Vibracije i pomjeranje tla koji su prouzrokovani miniranjem, kao i njihovi uticaji na okolne objekte, istraživani su u stijenskoj masi koju čini krečnjak. Krečnjak je odabran kao reprezentativna stijena za ispitivanje vibracija tla, iz razloga što je krečnjak jedan od, najrasprostranjenijih vrsta tehničko-građevinskog kamena u Republici Srpskoj, najviše se minira i najčešće se koristi kao građevinska sirovina.

Predviđanje potresa od miniranja vršena su primjenom:

- vještačkih neuronskih mreža
- konvencionalnih prediktora - regresionih modela
- višestruke linearne regresije

Prema dostupnim saznanjima autora, ovakva detaljna istraživanja uticaja potresa prilikom miniranja na površinskim kopovima ili u građevinarstvu nisu ranije rađena na prostorima Republike Srpske.

5.1 Rezultati mjerenja na terenu

Predviđanje potresa od miniranja temelji se na podacima koji su zabilježeni terenskim mjerenjima potresa od miniranja na kamenolomu “Hardovac” - Ševarlije i na gradilištu Skyline -Beograd.

5.1.1 Osnovni podaci za površinski kop “Hardovac” - Ševarlije

Ležište “Hardovac” nalazi se u centralnom dijelu Republike Srpske i teritorijalno pripada opštini Doboj (slika 5. 1). Nalazi se u okolini naseljenog mjesta Ševarlije, oko 7 km južno od grada Doboja, na desnoj obali rijeke Bosne. Pored eksploatacionog polja prolazi regionalni put Doboj – Maglaj preko kojeg kamenolom ostvaruje drumsku vezu sa Zenicom, odnosno Željezarom kao jednim od kupaca i Sarajevom na jugu, odnosno Banja Lukom na zapadu. Obezbjedena je dobra veza između kamenoloma, fabrike kreča i potencijalnih kupaca.

Šira okolina ležišta “Hardovac” Ševarlije u geotektonskom pogledu pripada centralno ofiolitskoj zoni Dinarida. Obuhvata granicu između sjevernobosanske flišne zone i centralne ofiolitske zone.



Slika 5. 1 Lokacija kamenoloma “Hardovac” [Kostić i Figun 2022]

U geološkoj građi terena zastupljene su tvorevine jure, krede, tercijara i kvartara, koji pripadaju različitim geološkim periodima mezozoik i kenozoik. Tercijer je zastupljen sedimentima srednjeg eocena, koji se izdvaja u faciji fliša i krečnjaka. Pjeskoviti laporci, glinci i pješčari predstavljaju eocenski fliš i nalaze se plitko ispod eocenskih krečnjaka, koji su dijelom otkriveni na površini terena u sjevernom dijelu ležišta, a zaliježu u pravcu juga.

Korisnu i kvalitetnu sirovinsku osnovu čine svijetlosivi, bijeli i sivosmeđi krečnjaci čija je debljina različita u ležištu i ona se povećava u pravcu jugozapad gdje je nabušena na dubini 90 – 120 m. Srednja debljina rudne mase u ležištu je 35,85 metara. U dubljim dijelovima, bliže kontaktu kvalitetnih i podinskih krečnjaka, bušenjem su utvrđene veće kaverne, pukotine i prsline zapunjene kalcitom i glinovito–pjeskovitim materijalom. Struktura im je mikroznasta, masivne su teksture.

U tektonskom pogledu tercijarni sedimenti na ovom području pretrpjeli su izvjesna tektonska kretanja, koja nisu jasno izražena. Na ležištu se mogu uočiti dva osnovna sistema rasjeda, pravca pružanja SZ–JI i pravac pružanja SI–JZ [RI 2001].

Krečnjaci pripadaju klasi sedimentnih stijena, koje posmatrane kao monolit predstavljaju čvrstu stijensku masu. Uglavnom su to masivni do bankoviti krečnjaci, rjeđe slojeviti, koji su u plićim dijelovima masiva znatnije oštećeni sistemima pukotina i kaverni. Krečnjak sa PK “Hardovac” spada u grupu veoma čistih, odnosno udio minerala kalcita prelazi 95% (97.7%), a primjese minerala magnezita su 1.7%, ostale primjese su 0.6%. Srednje vrijednosti fizičko–mehaničkih karakteristika krečnjaka na bazi svih provedenih istraživanja date su u tabeli 5. 1.

Tabela 5. 1 Fizičko-mehaničke karakteristike stijena [Marinović 2020]

Fizička osobina		Jedinica mjere	Rezultati ispitivanja
Pritisna čvrstoća	suv uzorak	MPa	136,11
	vodozasićen uzorak		126,66
	poslije smrzavanja		114,49
Zapreminska masa sa porama i šupljinama		t/m ³	2,670
Specifična masa		t/m ³	2,687
Nasipna zapreminska masa		t/m ³	1,600
Kohezija		MPa	37
Ugao unutrašnjeg trenja		°	39
Poroznost		%	1,00
Upijanje vode		%	0,194
Otpornost na habanje brušenjem		cm ³ /50 cm ²	11,86
Otpornost na habanje "Los Angeles" metoda		%	19,24
Otpornost ivica na udar - bubanj		%	7,21
Postojanost na dejstvo mraza		–	postojan

Vladaju dobre inženjersko-geološke karakteristike, koje se ogledaju preko dobre stabilnosti, nosivosti i bezbjednosti pri izvođenju rudarskih radova na površinskom kopu "Hardovac".

Nominalni godišnji kapacitet kamenoloma "Hardovac" - Ševarlije iznosi 1.000.000 tona. Osnovna djelatnost površinskog kopa "Hardovac" je eksploatacija krečnjaka. Površinski kop spada u grupu manjih kopova i tehnologiju eksploatacije čine radovi na otkrivci i radovi na korisnoj mineralnoj sirovini.

Eksploatacija kamena i otkrivke odvija se diskontinualnom tehnologijom eksploatacije, koja sadrži sljedeće tehnološke faze sistema: otkopavanje i transport otkrivke, usitnjavanje korisne mineralne sirovine, utovar, drobljenje, prosijavanje, utovar i transport i pomoćne tehnološke postupke.

Osnovni način eksploatacije ležišta je upotreba bušačko – minerskih radova, nakon uklanjanja i transporta otkrivke. Materijal dobijen miniranjem se hidrauličnim bagerom, na etažama, dodaje u prihvatni koš primarne mobilne drobilice i postrojenje za prosijavanje. Izdrobljeni krečnjak transportuje se kamionima na sekundarno usitnjavanje i klasiranje ili za proizvodnju kreča. Slika 5. 2 prikazuje opremu koja se koristi pri eksploataciji površinskog kopa "Hardovac".

Za bušenje na površinskom kopu koriste se bušilice Atlas Copco FlexiROC T35, na slici 5. 3 prikazana je bušača garnitura u radu. Rad bušilice je na principu udarno - rotacionog bušenja, sa vanjskim bušačim čekićom Garnitura posjeduje sakupljač nabušenog materijala, što znatno umanjuje zaprašenost radne sredine.



Slika 5. 2 Površinski kop krečnjaka “Hardovac” i angažovana oprema u radu. 1-mobilno postrojenje za prosijavanje, 2-mobilna čeljusna drobilica, 3-hidraulični bager, 4-utovarač, 5-kamion kiper, 6-stacionarno postrojenje za usitnjavanje i prosijavanje [Marinović 2020]

Pogonski agregat je turbodizelski šestocilindrični SAT S7.1. Bušotine se buše pod uglom od 90° . Prečnik bušenja 89 mm, a brzina bušenja 14 m/s. Za rad u neabrazivnim stijenama koriste se krunicu Epiroc iz kataloške serije Trubbnos Buttons (slika 5. 3).



Slika 5. 3 Bušenje minskih bušotina udarno-rotacionom bušilicom Atlas Copco FlexiROC T35 na površinskom kopu “Hardovac” [foto Lj. Figun]

Tehnološka faza miniranja odvija se u skladu sa Rudarskim Projektima [IG 2006, Rudprom 2010]. Za primarno miniranje na površinskom kopu koriste se ANFO smješe kao glavno punjenje, a za izradu udarne patrone i kao pomoćno punjenje koristi se uglavnom Amonex ili se bira neki drugi eksploziv. Koristi se neelektrični sistem iniciranja nonel sa milisekundnim usporenjem između bušotina u redu od 17 ms i 42 ms između redova. Korišćenje nonel sistema zahtjeva i bušotinsko usporenje od 500 ms. Startovanje sistema za iniciranje vrši se vezivanjem rudarske kapice broj 8 (može i 6) i cjevčice prvog konektora. Cilj određivanja odgovarajućih parametara bušenja i miniranja je da se maksimalno poveća iskorišćenje energije eksplozije uz smanjenje negativnih

efekata miniranja, među kojima je i seizmički efekat. U tabeli 5. 2 prikazani su parametri bušenja i miniranja pri miniranju krečnjaka na površinskom kopu “Hardovac” [Marinović 2020].

Tabela 5. 2 Parametri bušenja i miniranja na PK “Hardovac” [Marinović 2020]

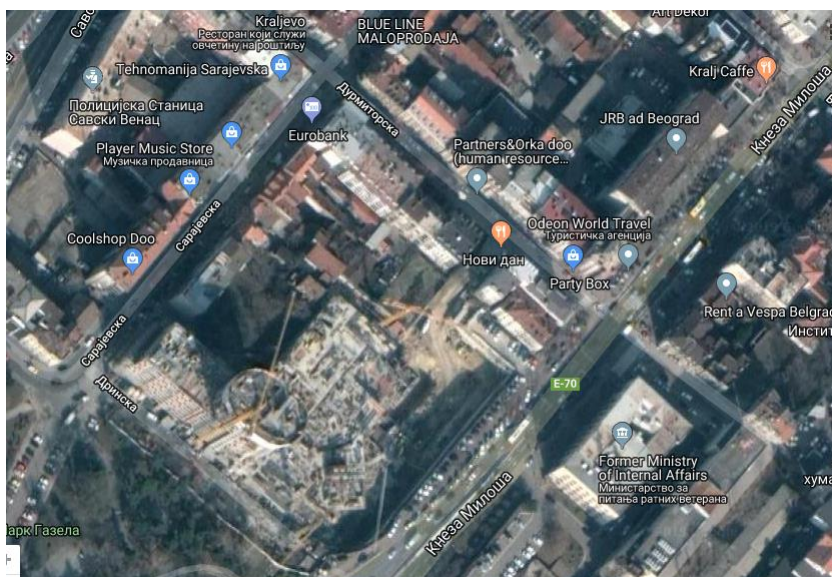
Naziv parametra	Malo raspucala stijena	Srednje raspucala stijena	Jako raspucala stijena
Visina etaže, H (m)	15	15	10
Nagib bušotine, α (°)	80	80	80
Prečnik bušenja, d (mm)	89	89	89
Dužina bušotine, L_b (m)	16,2	16,2	16,2
Dužina probušenja, L_{pr} (m)	1	1	1
Linija najmanjeg otpora, W (m)	3	3	3÷3,5
Dužina čepa, $L_{\check{c}}$ (m)	3,2	3,2	3,2 ÷ 3,5
Dužina eksplozivnog punjenja, L_p (m)	13	13	13
Rastojanje između bušotina u redu, a (m)	3	3	3÷3,5
Rastojanje između redova bušotina, b (m)	3	3	3÷3,5
Zapremina odminiranog bloka, V_b (m ³)	135	135	135÷185
Specifična potrošnja eksploziva, Q (kg/m ³)	0,35÷0,4	0,35÷0,4	0,35÷0,4
Količina glavnog punjenja, Q_g (kg)	40	48	42
Količina pomoćnog punjenja, Q_p (kg)	12	4	4
Ukupna količina eksploziva, Q_{uk} (kg)	52	52	46

U prilogu 1 prikazana je konstrukcija minskog punjenja, dok je u prilogu 2 prikazano iniciranje bušotina NONEL sistemom sa usporenjem između redova od 42 ms i šema iniciranja za masovna miniranja na etažama površinskog kopa “Hardovac”.

5.1.2 Osnovni podaci o lokaciji objekta Skyline

Poslovno-stambeni kompleks Skyline Beograd, smješten je između ulica: K. Miloša, Drinske, Sarajevske i Durmitorske. Slika 5. 4 predstavlja prikaz lokacije stambeno-poslovnog objekta Skyline Beograd. Objekat obuhvata površinu od oko 1,1 ha, na kome treba da se izgrade tri stambene i poslovne zgrade sa nizom drugih pratećih objekata. Objekat ima šest podzemnih nivoa - garaža od kote 97,0 do kote 75,50. Iznad kote 97,0 su tri visoka objekta od 11 do 30 spratova. Dubina ukopavanja u tlo je od 8,0 do 17,0 m jer je teren u nagibu.

Na osnovu obimnih laboratorijskih ispitivanja utvrđene su sljedeće litogenetske sredine, po redu pojavljivanja od površine: nasip, glina praškasto-pjeskovita, laporovite gline i lapori, laporovito-krečnjački kompleks, bazalni klasiti; krečnjaci. U nastavku ćemo opisati litogenetske sredine koje su zanimljive sa stanovišta bušenja i miniranja.



Slika 5. 4 Lokacija stambeno-poslovnog objekta Skyline Beograd [Trajković i Tomković 2019]

Laporovito-krečnjački kompleks – marinskog je porijekla i pripada miocenskim sarmatskim sedimentima. Kompleks se sastoji od nepravilnog smjenjivanja sprudnih organogenih krečnjaka, laporca i tankih proslojaka laporovitih gline. Kompleks je svijetlo žute, beličaste do svijetlo sive boje, sa dosta fosilnih ostataka, lokalno obogaćen limonitskim i hematitskim primjesama. Laporci se javljaju u formi tankih proslojaka debljine 10,0 – 20,0 cm. Obično su znatno tvrdi i veće čvrstoće u odnosu na slojeve sprudnog krečnjaka. Zone izgrađene od laporovite gline su značajno mekše. Može se svrstati u stijene vrlo male do male čvrstoće.

Bazalni klasiti – su marinski sedimenti koji pripadaju miocensko-sarmatskoj formaciji, u koje spadaju: breče i slabo vezane drobine i konglomerati.

Breče – izgrađene su od pretaloženih fragmenata i blokova urgonskih krednih krečnjaka vezanih pjeskovito-karbonatnim vezivom. Čvrstoća im je vrlo promjenljiva. Kompleks se može definisati kao stijenska masa vrlo male do male čvrstoće.

Drobine i konglomerati – izgrađeni su od izmjenjenih krečnjaka koji su naknadno prekriveni istaloženim bazalnim brečama. U sloju ili sočivu imaju neujednačenu debljinu od 2,5 do 9,0 m. Drobine i konglomerati su jače pjeskoviti, limonitirani, vrlo trošni, prslinsko-pukotinski izdijeljeni, lako drobljivi i izuzetno male čvrstoće. Stijenski fragmenti su promjenljivog petrološkog sastava, pri čemu dominiraju uglaviti do poluzaobljeni odlomci pjesčara, sprudnih krečnjaka, lapora i laporca centimetarske veličine.

Krečnjaci – su marinski sedimenti organogenog porijekla i pripadaju izmjenjenoj krednoj formaciji. Imaju mikro kristalastu strukturu do masivnu teksturu. Izmjenjeni krečnjaci zahvaćeni su karstifikacijom, tektonski oštećeni i izlomljeni sistemima zapunjenih pukotina. Izmjenjeni

krečnjaci su svrstani u stijene srednje čvrstoće koji varira između 50-90% . Izmjenjeni krečnjaci, u pojedinim intervalima, su jače do potpuno izmjenjeni, karstifikovani, gotovo u potpunosti degradirani i intenzivno izlomljeni u fragmente cm-dm veličine [Trajković i Tomković 2019].

Podaci o fizičko-mehaničkim svojstvima sredina koje izgrađuju predmetno područje, a u kojima je potrebna djelimična ili potpuna upotreba eksploziva za iskop dati su u tabeli (tabela 5. 3).

Tabela 5. 3 Fizičko-mehanička svojstva litogenetskih jedinica koje izgrađuju srednu u kojoj se vrši miniranje [Figun i dr. 2021]

Fizičko-mehaničak svojstva	Laporovito-krečnjački kompleks	Breče	Drobine i konglomerati	Krečnjaci	Izmjenjeni krečnjaci
Zapreminska težina, γ (kN/m ³)	20,5	23,8	/	26,7	26,7
Ugao unutrašnjeg trenja, φ (°)	43-46	44-48	34	53-55	44-45
Kohezija, c (kPa)	120	140-180	10	373-601	158-173
Modul stišljivosti, M_v (kPa)	/	/	/	/	/
Jednoaksijalna čvrstoća, σ_p (MPa)	15	20	/	68	/
Dinamički modul elastičnosti, E_{dyn} (MPa)	3100	3500	/	8700	3500
Dinamički modul smicanja, G_{dyn} (MPa)	910	1100	/	3200	1350
Poasonov koeficijent, μ	0,39	0,39	/	0,32	0,34
GN 200	IV-V	IV-V	V	V-VI	IV-V

Miniranje je izvedeno na 5 minskih polja, sa po 13 do 43 minske bušotine za jedno miniranje, zavisno o napredovanju radova. Izgled iskopa temeljne jame i lokacija minskih polja prikazani su na slici 5. 5.



Slika 5. 5 Fotografski snimak lokacije minskih polja MP-1/I, MP-1/II i MP-2/I [Figun i dr. 2021]

Dubina minskih bušotina je 1,4 - 2,4 m, sa uglom nagiba od 85° i prečnikom od 38,0 mm. raspoređenih u dva do četiri reda. Rastojanje između redova je 1,0-1,3 m, sa rastojanjem bušotina u redu od 1,0 m i linijom najmanjeg otpora od 1,3 - 1,5 m. Za razaranje stijenske mase korišćen je eksploziv Riohit LS oznake 32/550. Aktiviranje eksploziva u bušotinama vršeno je Nonel sistemom (dual delay - dvostruko usporenje), oznake N-17/500. U prilogu 3 je prikazan raspored, konstrukcija bušotine i šema vezevinja za minskog polja MP 1/I (tabela 5. 4). Iniciranje cjevčice

vršeno je nonel detonatorom uz primjenu nonel mašine. Registrovanje seizmičkih talasa vršeno je sa 3 instrumenta na 13 mjernih mjesta, više puta u toku dana, za svako miniranje [Figun i dr. 2021].

Tabela 5. 4 Parametri bušenja i miniranja, po minskim poljima [Figun i dr. 2021]

Parametar bušenja i miniranja	MP-1/I	MP-1/II	MP-2/I	MP-3/I	MP-3/II
Ukupan broj bušotina, (kom)	26	13	30	43	15
Dužina bušotina, (m)	1,7–1,8	1, –1,7	1,9–2,4	1,5–1,7	1,5–1,7
Ukupna dužina minskih bušotina, (m)	112,0	20,3	60,2	70,5	24,9
Količina eksploziva po bušotini, (kg)	0,50-0,60	0,40-0,55	0,5 –1,10	0,90–1,20	1,10–1,20
Ukupna količina eksploziva, (kg)	14,5	6,5	27,0	48,0	17,0
Količina eksploziva po usporenju, (kg)	0,60	0,55	1,10	1,20	1,20
Dužina čepa, (m)	1,1 – 1,2	1,0 – 1,1	1,2 – 1,3	0,9 – 1,0	0,9 – 1,0

5.1.3 Rezultati terenskih istraživanja na PK “Hradovac” - Ševarlije

Terenska mjerenja na površinskom kopu “Hardovac” vršena su u periodu od mart 2012. godine do novembar 2015. godine. U navedenom periodu registrovano je ukupno 68 podataka o potresima prilikom miniranja, na 4 različite lokacije mjernih mjesta (prilog 4). Registrovanje seizmičkih talasa vršeno je sa dva seizmografa različitog proizvođača, a lokacije mjernih mjesta prikazane su u tabeli 5. 5.

Tabela 5. 5 Raspored mjernih mjesta za PK “Hardovac”

Mjerno mjesto	Opis	Koordinate
MM1	Pumpna stanica	6 506 624; 4 946 595
MM2	Kuća-vlasnik Avdo Čajić	6 506 801; 4 946 785
MM3	Kuća-vlasnik Mirsad Čajić	6 506 888; 4 946 865
MM4	Kuća-vlasnik Mina Ahmetović	6 506 847; 4 946 857

Parametri koji se koriste za razvijanje modela procjene uticaja potresa od miniranja definisani su analizom parametara bušenja i miniranja minskih serija i analizom velesigrama dobijenih mjerenjem potresa pri miniranju na terenu. Definisanje modela procjene uticaja potresa pri miniranja vrši se utvrđivanjem odnosa između maksimalne brzine čestice, odgovarajuće frekvencije i kontrolnih faktora, koji uključuju: rastojanje između bušotina, rastojanje između redova bušotina, dubinu bušotina, broj bušotina, količinu eksploziva po intervalu usporenja, ukupnu količinu eksploziva i rastojanje od mjesta miniranja do mjesta mjerenja. Pomenuti parametri prikazani su u tabeli 5. 6.

Tabela 5. 6 Pregled kontrolnih parametara korišćenih u analizi [Kostić i Figun 2022]

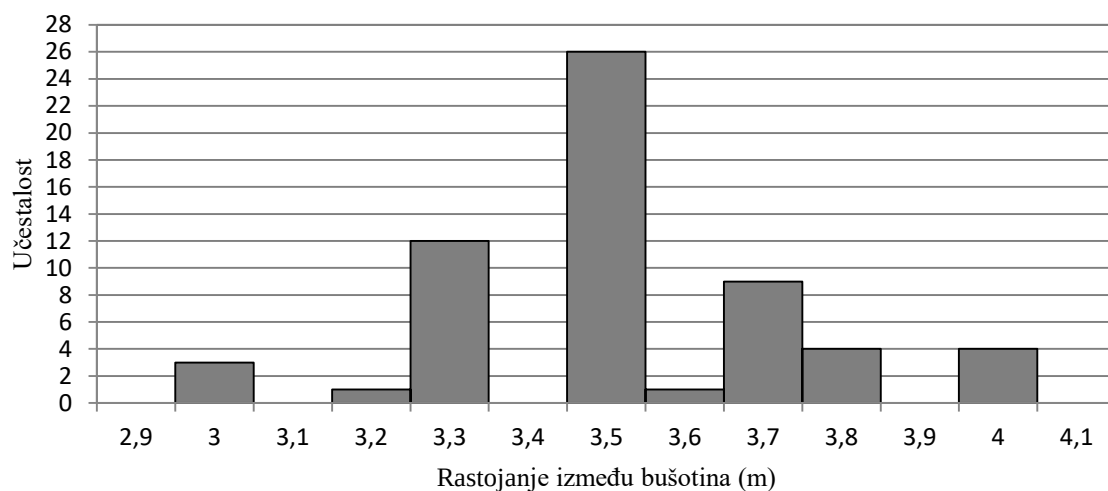
Parametri	Skraćenica	Mjerna jedinica
Rastojanje između bušotina	Db	m
Rastojanje između redova bušotina	Da	m
Dubina bušotine	DR	m
Broj bušotina	N	/
Količina eksploziva po intervalu usporenja	Qi	kg
Ukupna količina eksploziva	Qmax	kg
Rastojanje od mjesta miniranja do mjesta mjerenja	DBL	m
Frekvencija	FR	Hz

Prilikom predviđanja potresa od miniranja, analizirano je 68 izmjerenih podataka - maksimalna brzina oscilovanja (PPV) i frekvencije, snimljenih pomoću instrumenta tipa Nomis. Prvi korak u predviđanju potresa od miniranja je statistička analiza izmjerenih podataka. U tabeli 5. 7 prikazani su standardni statistički pokazatelji vrijednosti parametara koji su analizirani.

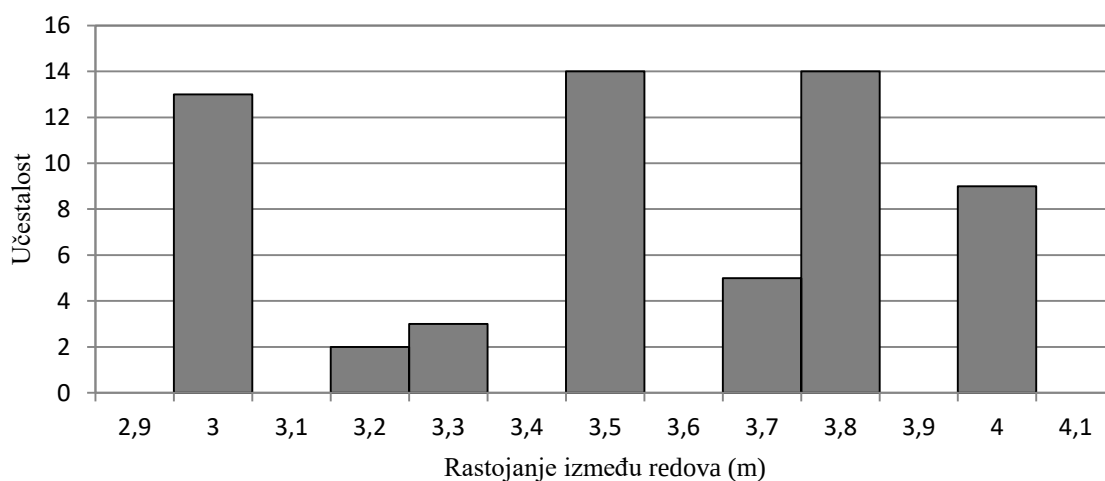
Tabela 5. 7 Standardni statistički pokazatelji analiziranih vrijednosti kontrolnih parametara

Analizirani parametri	Minimalna vrijednost	Maksimalna vrijednost	Srednja vrijednost	Standardna devijacija	Medijana
Rastojanje između bušotina	3	4	3,51	0,22	3,50
Rastojanje između redova bušotina	3	4	3,52	0,35	3,50
Dubina bušotine	8,5	22,5	18,66	3,10	19,50
Broj bušotina	11	69	26,11	9,64	25,00
Količina eksploziva po intervalu usporenja	43	107,7	73,89	16,87	77,32
Ukupna količina eksploziva	343	3077	1634,76	585,84	1565,00
Rastojanje od mjesta miniranja do mjesta mjerenja	166	358	257,11	44,94	250,00
Frekvencija	10,85	177,76	56,90	33,33	52,19

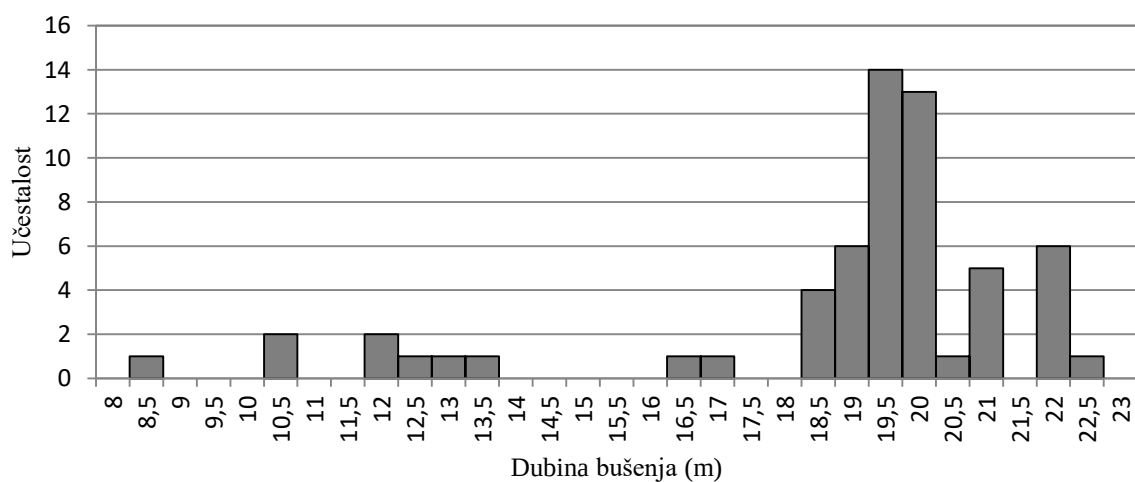
Na slikama od 5. 6 do 5. 13 prikazana je učestalost pojavljivanja svih kontrolnih parametara koji su korišćeni u analizi.



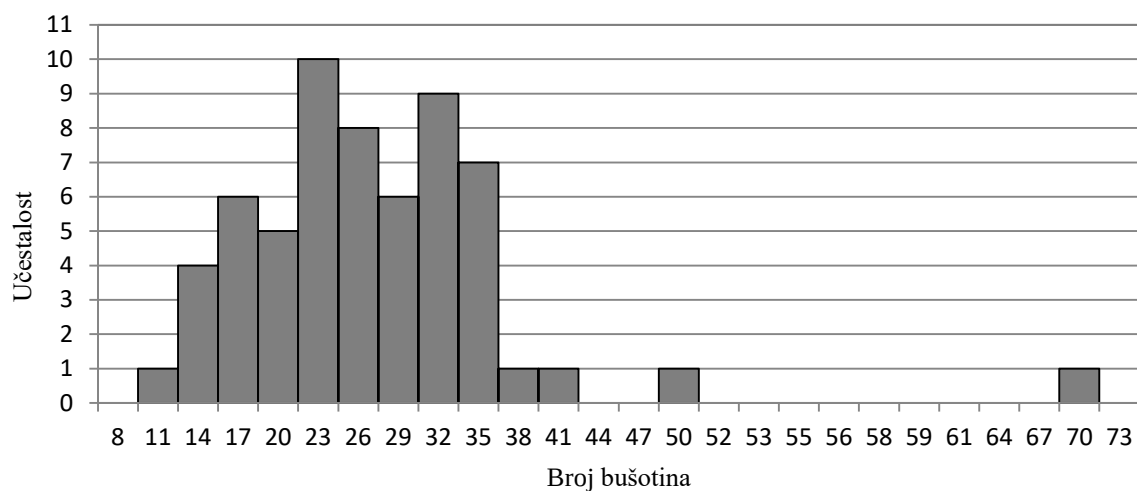
Slika 5. 6 Učestalost pojavljivanja rastojanja između bušotina



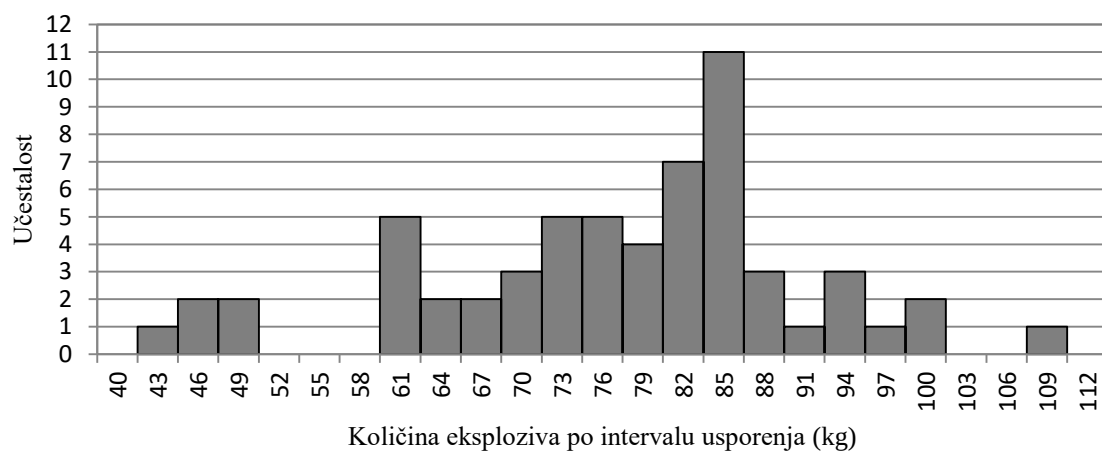
Slika 5. 7 Učestalost pojavljivanja rastojanja između redova bušotina



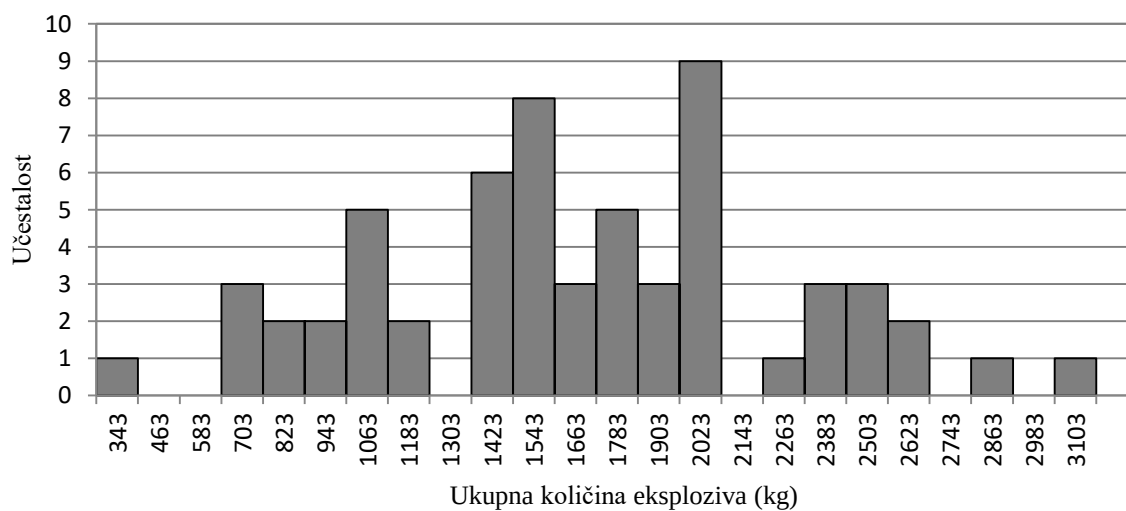
Slika 5. 8 Učestalost pojavljivanja dubine bušotine



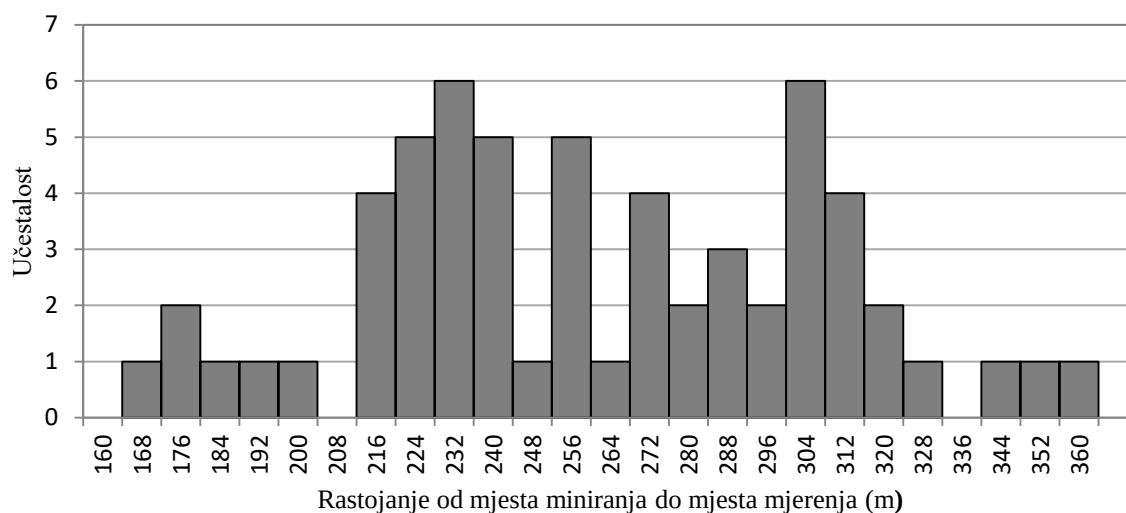
Slika 5. 9 Učestalost pojavljivanja broja bušotina



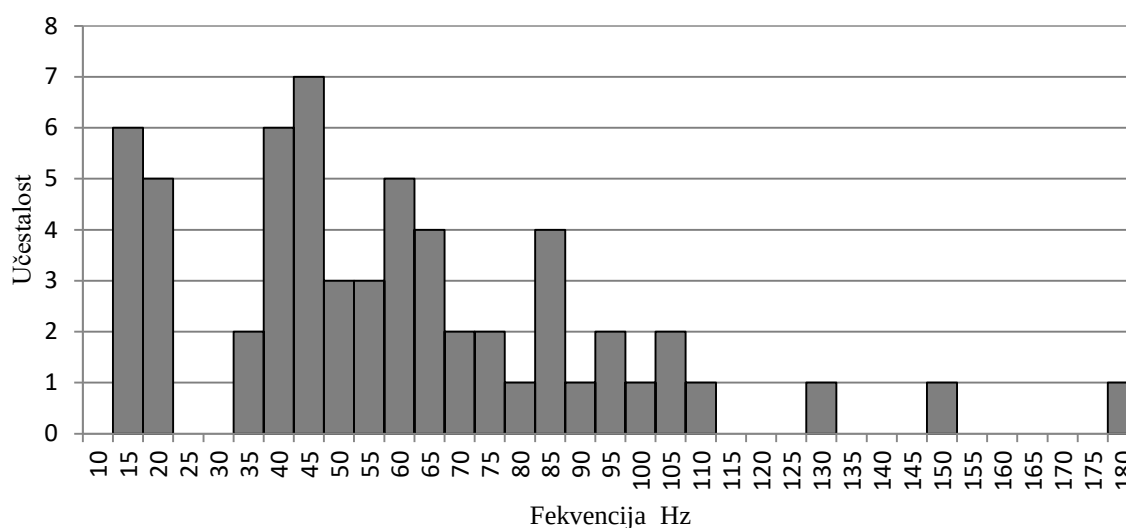
Slika 5. 10 Učestalost pojavljivanja količine eksploziva po intervalu usporenja



Slika 5. 11 Učestalost pojavljivanja ukupne količine eksploziva



Slika 5. 12 Učestalost pojavljivanja rastojanja od mjesta miniranja do mjesta mjerenja



Slika 5. 13 Učestalost pojavljivanja frekvencije

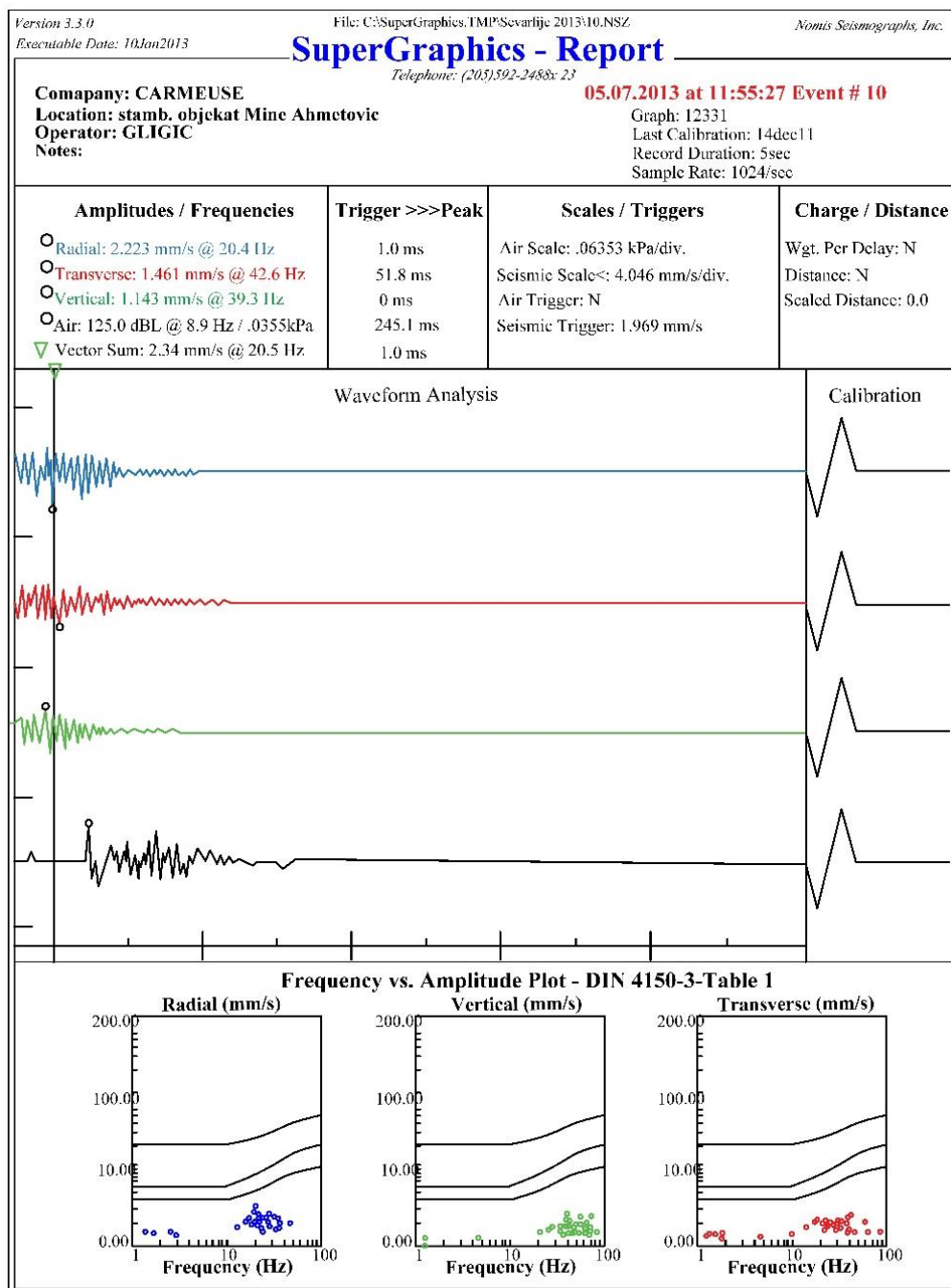
5.1.3.1 Softver za prikaz podataka izmjernih potresa od miniranja

Instrument za mjerenje potresa od miniranja (seizmograf) Mini SuperGraph američkog proizvođača Nomis SeismoGraphs [Nomis 2008] ima prateći softvera za prikaz podataka izmjerenih potresa od miniranja. Softver je prilagođen za Windows operativni sistem kompjutera, koji pruža mogućnost: prikaza podataka dobijenih mjerenjem potresa primjenom Mini SuperGraph seizmografa, zumiranje, podešavanje razmjere, mjerenje vremena, kao i štampanje određenog prikaza podataka u kolor ili crno bijeloj verziji.

Na prikazu podataka izmjerenih potresa od miniranja moguće je očitati osnovne podatke o datumu i vremenu mjerenja, broju instrumenta i osnovnim podacima o kalibraciji, broju mjernog događaja, podatke o operateru, klijentu kod koga je vršeno mjerenje, lokaciji mjerenja, vremenske dužine

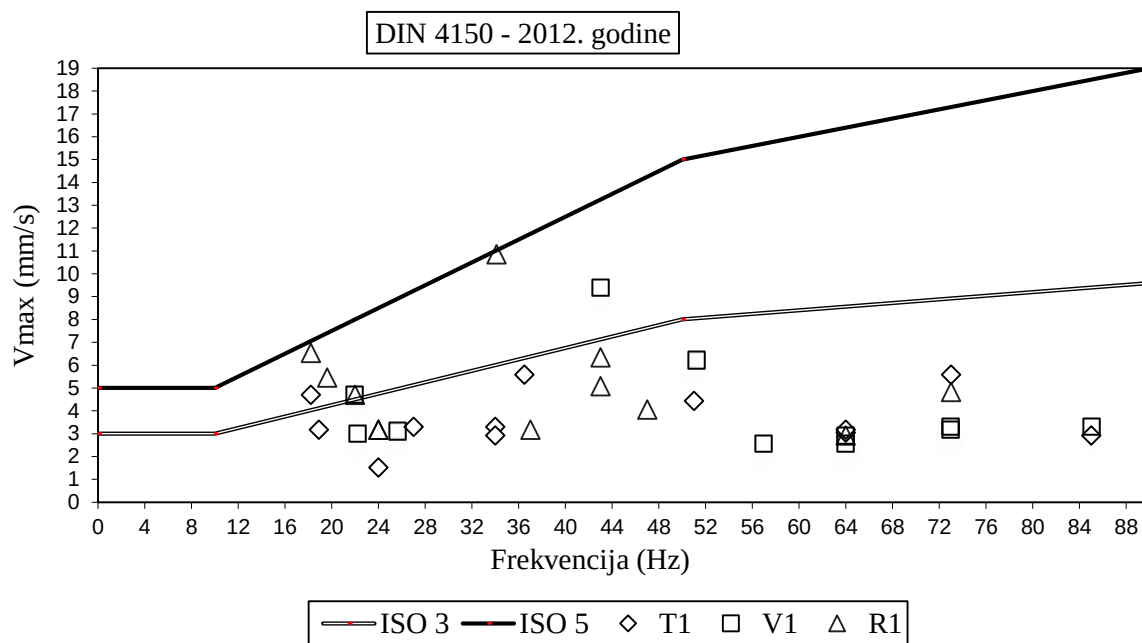
snimanja potresa, maksimalne rezultujuće vrijednosti sve tri komponente brzine oscilovanja. Za svaki kanal mjerenja posebno se ispisuju velosigrama i daju se podaci o vrijednosti brzine oscilovanja za sve tri komponente (longitudinalnu, transferzalnu i vertikalnu), nivo trigera (donji prag brzine oscilovanja pri kojem se aktivira bilježenje vrijednosti brzina oscilovanja), i frekvencije za maksimalnu brzinu oscilovanja. Na slici 5. 14 dat je prikaz odštampanih podataka izmjerenih potresa od miniranja primjenom Mini SuperGraph seizmografa.

Softver pruža mogućnost prikaza i štampanja podataka pojedinačnih ili svih kanala na grafiku standarda DIN 4150-3 za procjenu dejstva vibracija od miniranja na objekte. Na slici 5. 14 je dat prikaz izlaznih podataka pri mjerenju brzine oscilovanja i vazdušnih udara primjenom seizmografa Mini Supergrph kompanije Nomis Seismographs, koji je korišten pri terenskim istraživanjima na PK "Hardovac", za potrebe predmetne disertacije.

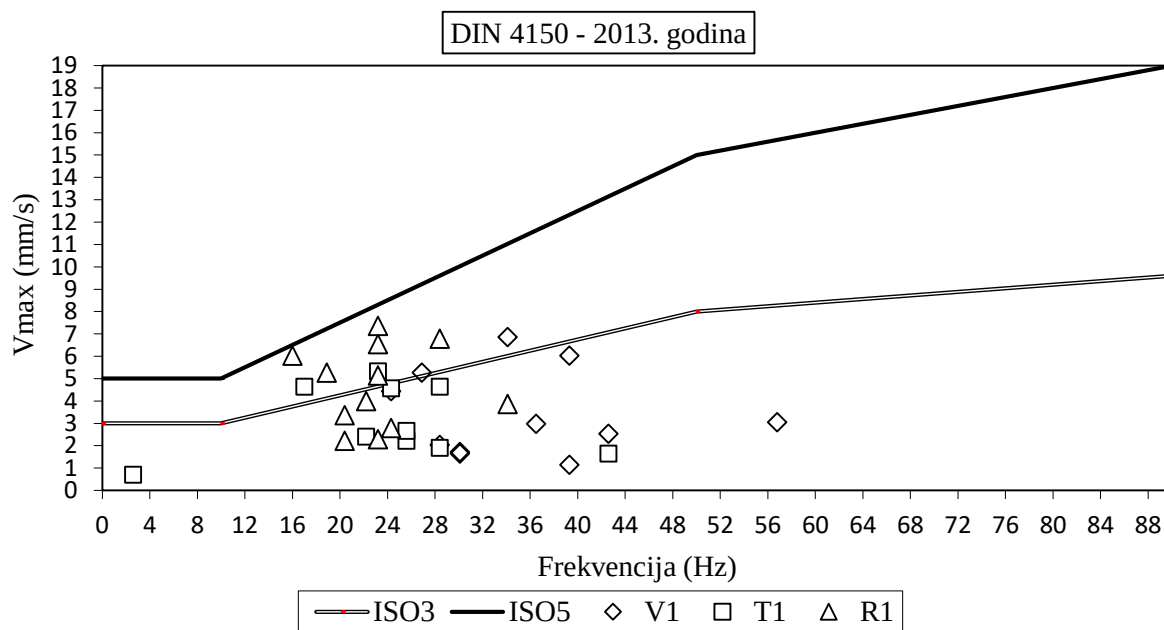


Slika 5. 14 Izgled odštampanog prikaza podataka izmjerenih potresa od miniranja (05.07.2013.god.) primjenom Mini SuperGraph seizmografa [Dnevnik miniranja Carmeus]

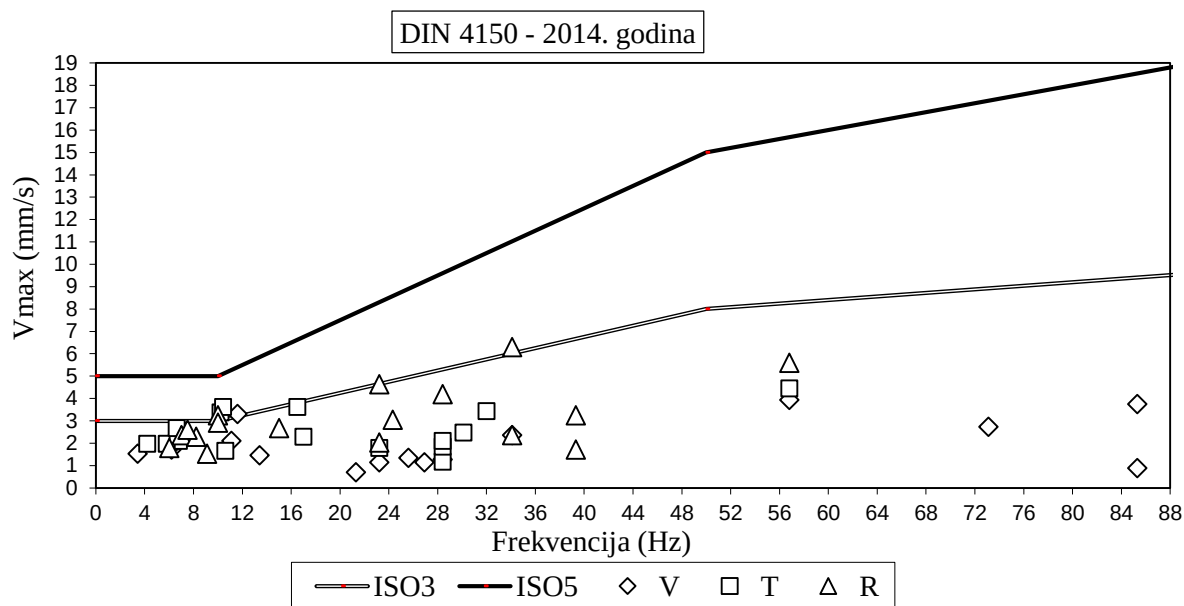
Na slikama od 5. 15 do 5. 18 prikazani su grafici standarda DIN 4150-3 za procjenu dejstava potresa od miniranje na okolne objekte. Prikazani podaci u grafiku standarda DIN 4150-3 odnose se na sva miniranja koja su se desila u posmatranom periodu (od 2012. do 2015. godina) na površinskom kopu "Hardovac".



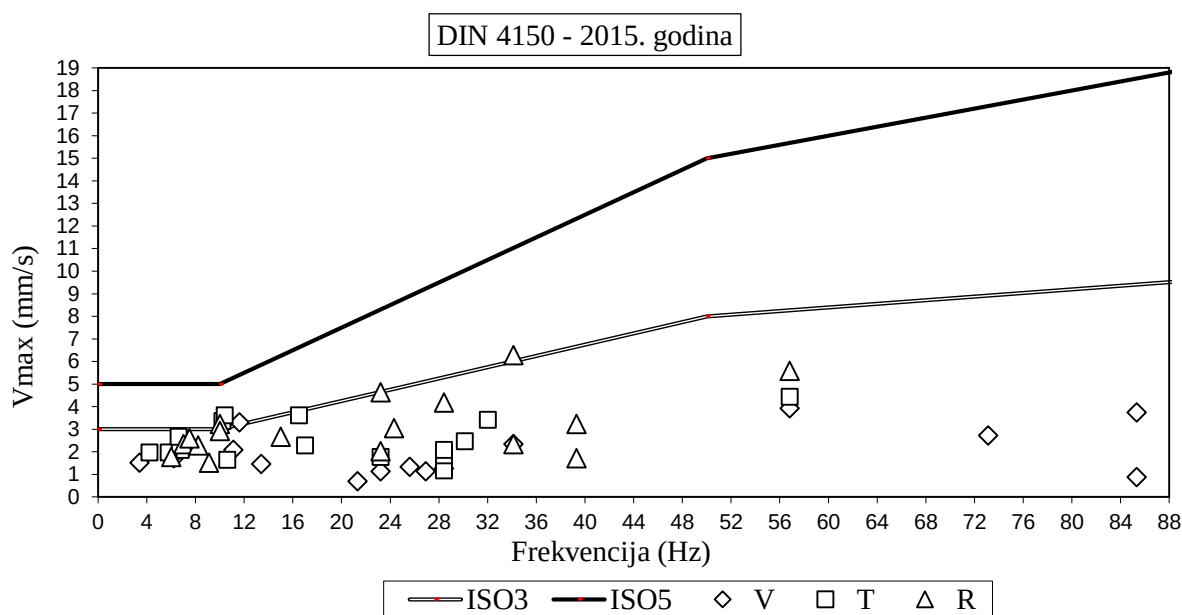
Slika 5. 15 Grafik standarda DIN 4150-3 za procjenu dejstava potresa od miniranje na okolne objekte za izmjerene podatke u 2012. godini



Slika 5. 16 Grafik standarda DIN 4150-3 za procjenu dejstava potresa od miniranje na okolne objekte za izmjerene podatke u 2013. godini



Slika 5. 17 Grafik standarda DIN 4150-3 za procjenu dejstava potresa od miniranje na okolne objekte za izmjerene podatke u 2014. godini



Slika 5. 18 Grafik standarda DIN 4150-3 za procjenu dejstava potresa od miniranje na okolne objekte za izmjerene podatke u 2015. godini

Mjerenjem potresa od miniranja pomoću seizmografa, dobijeni su podaci o PVV za svaku komponentu pojedinačno. Zatim su izmjereni podaci importovani i obrađeni u Excelu i prikazani u vidu grafika standarda DIN 4150-3 kako bi se izvršila procjena dejstava potresa od miniranje na okolne objekte. Na osnovu svih prikazanih podataka o brzini oscilovanja u dijagramima na slikama od 5. 15 do 5. 18 možemo zaključiti, da u analiziranom četvorogodišnjem periodu, nije bilo registrovanih potresa od miniranja koji bi ugrozili okolne objekte, jer nisu zabilježeni potresi veći nego su dopušteni standardom DIN 4150-3 za stambene i industrijske objekte.

5.1.4 Rezultati terenskih istraživanja na lokaciji objekta Skyline - Beograd

Terenska mjerenja na lokaciji poslovno –stambenog kompleksa Skyline Beogradu, pri iskopu temeljne jame upotrebom miniranja, vršena su u periodu od maja 2018. godine do juna 2019 godine. U navedenom periodu izmjerno je ukupno 477 podataka o brzini oscilovanja stijenske mase prilikom miniranja, sa 13 različitih lokacija mjernih mjesta, (prilog 5). Mjerenje podataka vršeno je sa tri seizmografa švedskog proizvođača ABEM tipa Vibraloc. Instrumenti za registraciju -seizmografi, ukopavani su u tlo ispred građevinskog objekta i to na rastojanju 1,0 – 1,5 m od temelja ili su postavljani u blizini ugroženih objekata. U tabeli 5. 8 prikazan je raspored i pozicija mjernih mjesta na kojima se vršilo registrovanje seizmičkih talasa pomoću seizmografa.

Tabela 5. 8 Raspored mjernih mjesta [Figun i dr 2021]

Mjerno mjesto	Opis	Koordinate
Mjerno mjesto MM – 1	stambena zgrada – Sarajevska br. 2	7 457 042,70; 4 961 908,20
Mjerno mjesto MM – 1a	stambena zgrada – Sarajevska br. 2	7 457 051,50; 4 961 917,70
Mjerno mjesto MM – 2	kuća – vlasnika Slađana Vuković	7 457 085,60; 4 961 909,70
Mjerno mjesto MM – 3	unutar objekta gradilišta, pored kрана	7 457 120,40; 4 961 884,03
Mjerno mjesto MM – 4	ul. Durmitorska 14, garažni dio	7 457 147,00; 4 961 916,83
Mjerno mjesto MM – 4a	ul. Durmitorska 14, prolaz	7 457 137,00; 4 961 927,90
Mjerno mjesto MM – 4b	ul. Durmitorska 14, (pored trafoa)	7 457 126,00; 4 961 934,60
Mjerno mjesto MM – 4c	ul. Durmitorska 14,(iza menze)	7 457 115,40; 4 961 921,60
Mjerno mjesto MM – 5	kod prvog kontejnera EX ING B&P	7 457 047,90; 4 961 834,78
Mjerno mjesto MM – 6	ul. K.Miloša br. 86	7 457 181,00; 4 961 886,00
Mjerno mjesto MM – 6a	ul. K.Miloša br. 86	7 457 185,39; 4 961 882,79
Mjerno mjesto MM – 7	ul. K.Miloša	7 457 169,20; 4 961 867,00
Mjerno mjesto MM – 7a	ul. K.Miloša	7 457 160,30; 4 961 856,00

Parametri koji se koriste za razvijanje modela definisani su analizom parametara bušenja i miniranja minskih serija i analizom velesigrama dobijenih mjerenjem potresa od miniranja na terenu. Za potrebe izrade pouzdanih modela analiziran je skup od 477 podataka o brzini oscilovanja stijenske mase, sa sljedećim kontrolnim parametrima: rastojanje od mjesta miniranja

do mjesta mjerenja, ukupna količina eksploziva, količina eksploziva po intervalu usporenja i maksimalan brzina oscilovanja stijenske mase, tabela 5. 9.

Tabela 5. 9 Pregled kontrolnih parametara korišćenih u analizi [Figun i dr 2021]

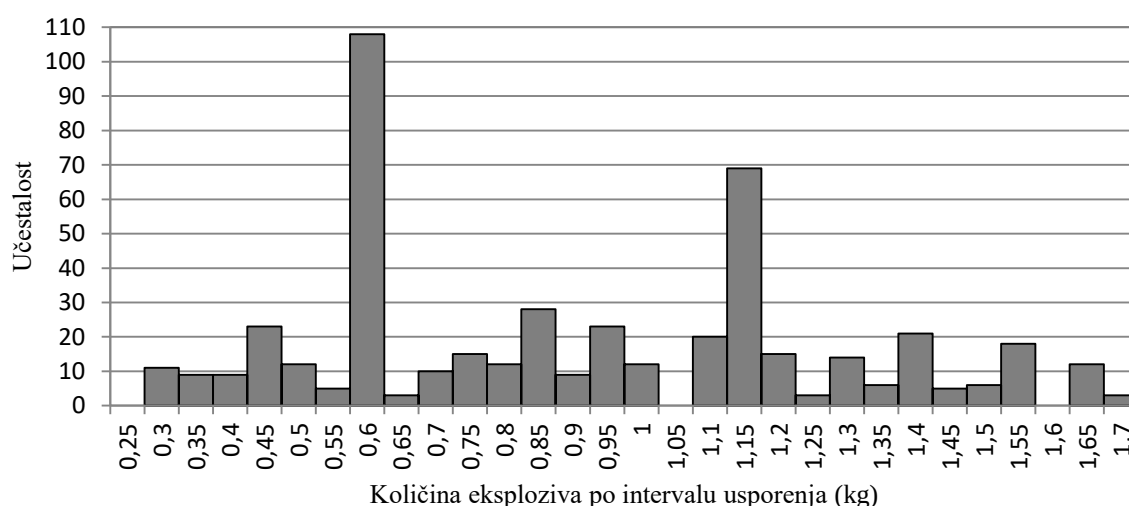
Parametri	Skraćenica	Mjerna jedinica
Količina eksploziva po intervalu usporenja	Q_i	kg
Ukupna količina eksploziva	Q_{max}	kg
Rastojanje od mjesta miniranja do mjesta mjerenja	D_{BL}	m
Maksimalan brzina oscilovanja	V	mm/s

U tabeli 5. 10 prikazani su standardni statistički pokazatelji vrijednosti kontrolnih parametara koji su analizirani.

Tabela 5. 10 Standardni statistički pokazatelji analiziranih vrijednosti kontrolnih parametara

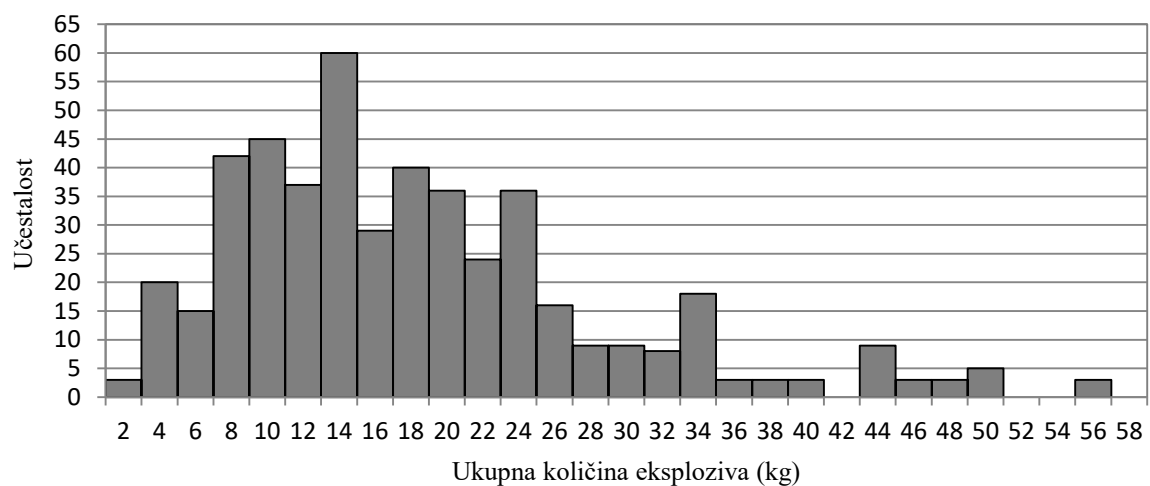
Analizirani parametri	Minimalna vrijednost	Maksimalna vrijednost	Srednja vrijednost	Standardna devijacija	Medijana
Količina eksploziva po intervalu usporenja	0,26	1,67	0,88	0,37	0,83
Ukupna količina eksploziva	1,39	55,53	17,56	10,46	15,00
Rastojanje mjesta miniranja od mjesta mjerenja	18,52	105,24	50,69	14,75	50,57
Maksimalna brzina oscilovanja	0,74	16,51	3,32	2,18	2,86

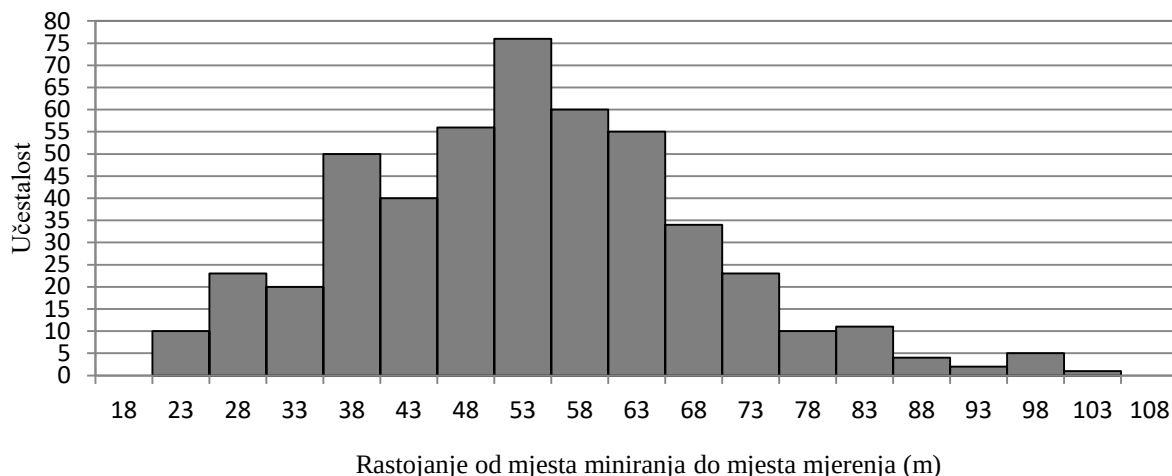
Na slikama od 5. 19 do 5. 22 prikazana je učestalost pojavljivanja svih kontrolnih parametara koji su korišćeni u analizi.



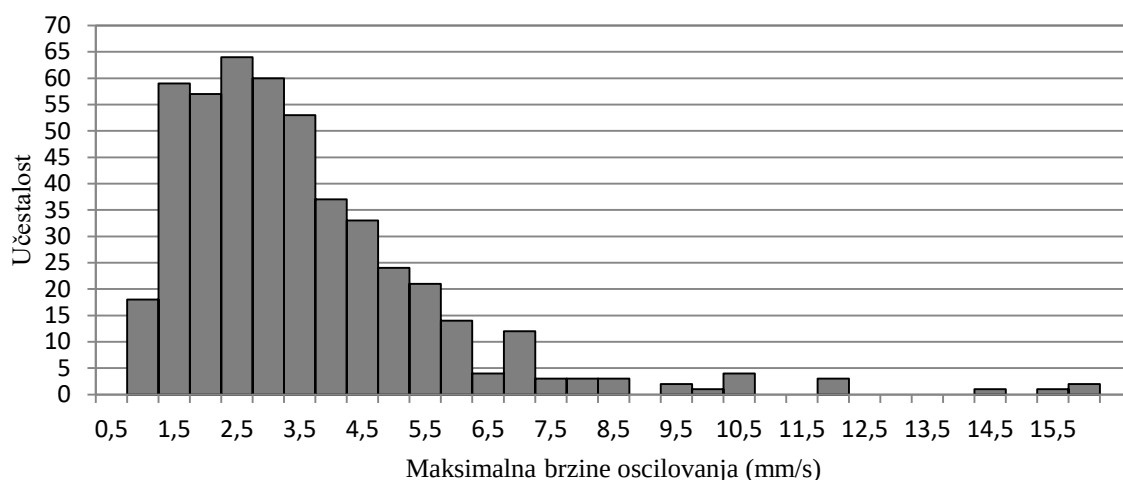
Slika 5. 19 Učestalost pojavljivanja količine eksploziva po intervalu usporenja

Slika 5. 20 Učestalost pojavljivanja ukupne količine eksploziva





Slika 5. 21 Učestalost pojavljivanja rastojanja od mjesta miniranja do mjesta mjerenja



Slika 5. 22 Učestalost pojavljivanja maksimalne brzine oscilovanja

5.2 Modelovanje

Aдекватno planiranje i projektovanje miniranja omogućava optimalno usitnjavanje stijenske mase radi dobijanja željene granulacije materijala, uz siguran nivo oscilacija stijenske mase koja ne ugrožava postojeće objekte na površinskom kopu i u njegovoj neposrednoj blizina. Takvo planiranje podrazumjeva empirijski pristup: za određenu količinu eksploziva i projektovani raspored i dubinu minskih bušotina, za koje je zna da obezbjeđuju prihvatljiv nivo potresa. Vibracije izazvane miniranjem se bilježe instrumentima a zatim se registrovani rezultati upoređuju sa graničnim vrijednostima iz najčešće korišćenih standarda, u zavisnosti od kategorije objekata: DIN-4150-3, USBM-RI-8507, BS-7385, itd [Trajković i dr. 2005].

Međutim, moguće je izvršiti optimizaciju izbor parametara miniranja razvojem pogodnih matematičkih modela, zasnovanih na detaljnim statističkim analizama rezultata prethodnih

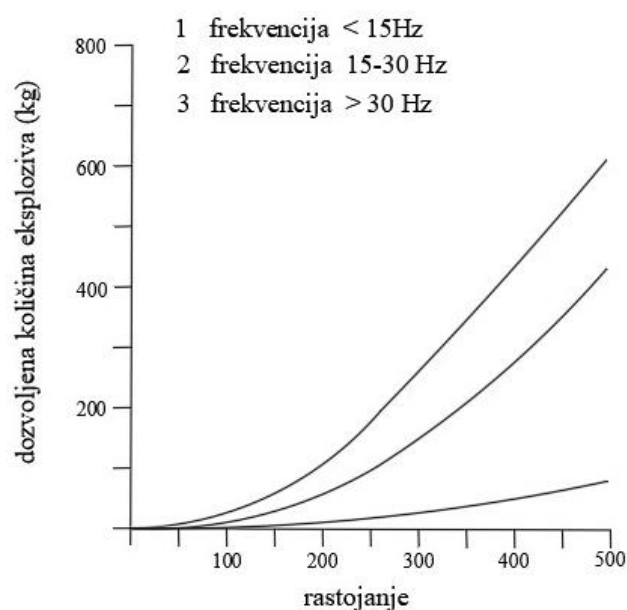
mjerenja. Na ovaj način smanjuje se potreba za mjerenjem vibracija izazvanih miniranjem, što dovodi do optimizacije organizacije rada u rudnicima. Da bi se izvršila karakterizacije oscilovanja stijenske mase u zoni elastičnih deformacija, mogu se koristiti mnogi postojeći modeli koji se zasnivaju na odnosu između maksimalne brzina čestice, količina eksploziva i rastojanja od mjesta miniranja do mjesta mjerenja. Opšti izraz konvencionalnih modela je sljedeći:

$$PPV = K_v R^{-n} \quad (5.1)$$

gdje PPV predstavlja brzinu oscilovanja stijenske mase (mm/s), K_v i b su parametri oscilovanja stijenske mase koje zavise od svojstva stijene i uslova miniranja i R predstavlja redukovano rastojanje:

$$R = \frac{r}{\sqrt[3]{Q}} \quad (5.2)$$

gdje je r rastojanje od mjesta miniranja do mjesta mjerenja (m) a Q je količina eksploziva (kg).



Slika 5. 23 Sigurno rastojanje od minskog polja do objekata u funkciji dozvoljene količine eksploziva i frekvencije oscilovanja prema standardu DIN 4150 [Kostić i Figun 2022]

Na osnovu jednačine 5.1 mnogi autori su predložili različite konvencionalne modele predviđanja, date u tabeli 2. 3 (poglavlje 2) koji se obično koriste u rudarskoj inženjerskoj praksi. Što se tiče rizika od miniranja, uobičajeni pristup za procjenu nivoa rizika koji postoji za postojeće objekte od vibracija izazvanih eksplozijom je korišćenje nekih konvencionalnih modela predviđanja iz tabele 2. 3, gde je PPV postavljena kao poznata granična vrijednost iz važećih propisa i standarda. Tada se za različite količine eksploziva Q_{max} može odrediti dozvoljena sigurnosna rastojanja od minskog polja do postojećih objekata, slika 5. 23. Odgovarajuće maksimalne dozvoljene

vrijednosti brzine oscilovanja tla za stambene zgrade iznose 5 mm/s za frekvencije < 10 Hz, 15 mm/s za frekvencije u rasponu 15 – 30 Hz i 20 mm/s za frekvencije preko 30, prema standardu DIN.

Primjena računarskih metoda našla je svoje mjesto za procjenu vibracija izazvanih miniranjem u posljednjoj deceniji. Kao što nam je poznato, nijedno prethodno istraživanje koje je koristilo ANN pristup nije uspostavilo vezu između brzine oscilovanja čestica, minerskih parametara i nivoa rizika od miniranja za objekte.

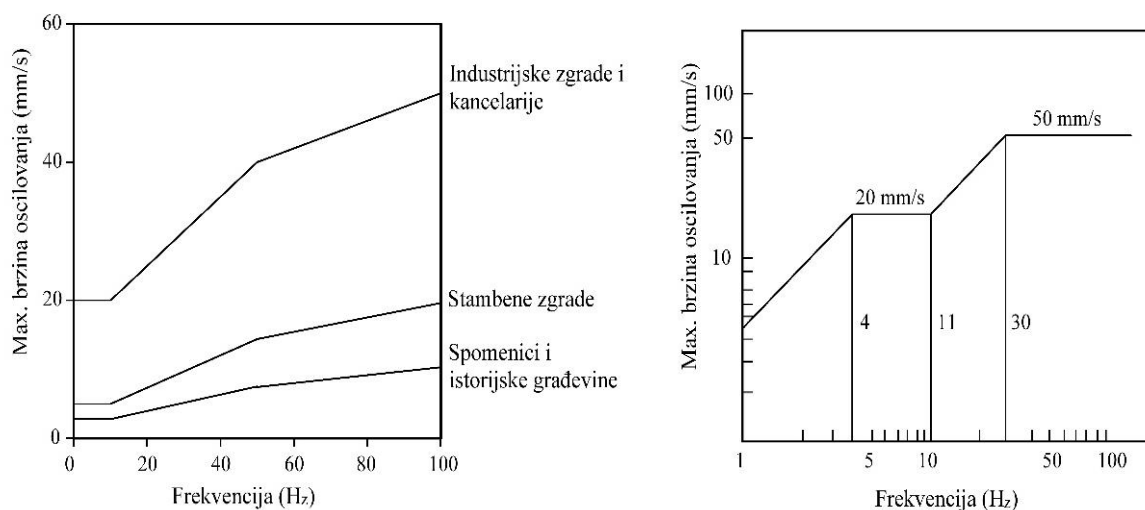
5.2.1 Analiza registrovanih podataka za PK “Hardovac” – Ševarlije

Uticaj vibracija izazvanih miniranjem na objekte razmatramo analizirajući rezultate miniranja u kamenolomu krečnjaka "Hardovac" – Ševarlije. Numerička analiza se vrši pomoću višestruke linearne regresije za utvrđivanje korelacije između maksimalne brzine oscilovanja, odgovarajuće frekvencije i kontrolnih faktora. Uspostavljena je statistički značajna korelacija između maksimalne brzine oscilovanja (PPV) i frekvencije za njemački standard DIN-4150 i američki standard USBM-RI-8507. Pri formiranju modela potrebno je definisati matematičke zavisnosti ulaznih i izlaznih parametara određenom funkcijom, koja predstavlja matematičku zavisnost frekvencije oscilovanja kao izlaznog parametra u funkciji ulaznih parametara koji su: rastojanje između bušotina (D_B), rastojanje između redova bušotina (D_a), dubina bušotine (D_R), broj bušotina (N), rastojanje od mjesta miniranja do mjesta mjerenja (D_{BL}), količina eksploziva po intervalu usporenja (Q_i) i ukupna količina eksploziva (Q_{max}).

Snimljeni skup podataka analizira se na sljedeći način:

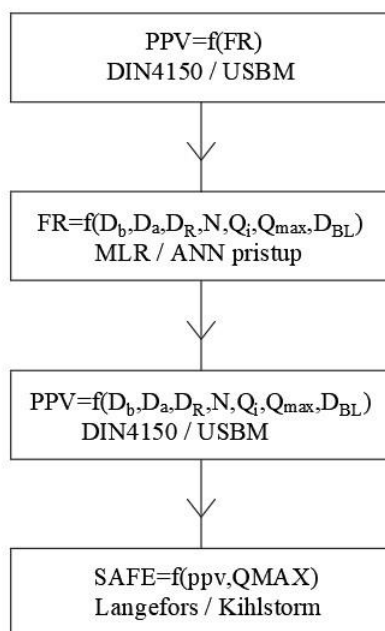
1. postojeći DIN 4150 i američki standard (slika 5. 24) izraženi su u obliku nelinearne jednačine korišćenjem jednostavne metode nelinearne regresije. Za DIN standard dati su pojedinačni izrazi za različite tipove objekata (fabrike, stambene zgrade i kulturno-istorijski spomenici);
2. registrovane frekvencije izražene su kao nelinearne funkcije parametara miniranja, odnosno ulaznih podataka iz tabele 5. 6. Ove funkcije su uspostavljene korišćenjem MLR i ANN pristupa. MLR pristup se zasniva na seriji ANOVA testova za različite nelinearne funkcije između pojedinih parametara, uključujući i dvofaktorske interakcije. ANN pristup podrazumjeva brzo napredovanje troslojne mreže sa povratnom propagacijom sa Levenberg-Marquardt (LM) algoritmom sa sigmoidnom aktivacionom funkcijom. Algoritam obučavanja LM obično se smatra najbržim metoda za obučavanje neuronskih mreža sa prostiranjem signala unaprijed.
3. nakon što su frekvencije izražene kao nelinearna funkcija kontrolnih faktora, PPV se izračunava korišćenjem nelinearnih jednačina iz koraka (5.1), gdje je frekvencija izražena kao u korak (5.2)

4. minimalna sigurnosna rastojanja za različitu količinu eksploziva izračunavaju se pomoću Langefors-Kilhstromovog modela (tabela 2. 3).



Slika 5. 24 a) Njemački DIN 4150 i b) američki standard za granične brzine oscilovanja čestica izazvanih miniranjem [Kostić i Figun 2022]

Na slici 5. 25 prikazan je proces obrade podataka za izradu modela za procjenu brzine i frekvencije oscilovanja stijensk mase.



Slika 5. 25 Dijagram predloženog procesa obrade podataka [Kostić i Figun 2022]

5.2.1.1 Određivanje sigurnosnih rastojanja uslijed dejstva seizmičkih potresa

Veoma bitna faza u procesu izvođenja bušačko - minerskih radova je određivanje sigurnosnih zona pri miniranju. To se prije svega odnosi na definisanje seizmičkog dejstva miniranja i određivanje

sigurnosnih rastojanja od minskog polja do rudarskih objekata, naseljenih mjesta i drugih objekata. Sigurnosne zone pri miniranju su definisane kao prostor u kojem potresi, leteći materijal ili gasovi eksplozije mogu uzrokovati negativne efekte. Sigurnosna rastojanja zavise od upotrebljene količine eksploziva, rasporeda minskih punjenja, izbora milisekundnog intervala usporenja i načina iniciranja, pokazatelja dejstva eksplozije i drugih faktora.

U našoj rudarskoj praksi ne postoje domaći standardi za definisanje sigurnosnih zona prema kriterijumu seizmičkih talasa, niti analizu podataka dobijenih mjerenjem potresa prilikom miniranja, već se koriste standardi drugih svjetskih zemalja. Zato su prilikom obrade rezultata i definisanja bušačko-minerskih parametara u ovoj disertaciji korišćeni navedeni standardi u poglavlju 3.3. To su standardi koji se koriste u Rusiji kriterijum prema GOST-6249-52, u Njemačkoj kriterijum prema DIN 4150 III, američki standard kriterijum prema USMB RI 8507 i švajcarski standard kriterijum prema SN 640312. Dozvoljena brzina oscilovanja tla, po ovim standardima dobiju se na osnovu tabela i grafikona koji se koriste za ove kriterijume. Analizom rezultata monitoringa efekata miniranja, odnosno seizmičkih mjerenja na površinskom kopu, izvršen je definisanje dozvoljene količine eksploziva po interval usporenja u odnosu na sve kriterijume. Definisana su sigurnosna rastojanja uslijed dejstva seizmičkih efekata pri izvođenju minerskih radova.

Određivanje dozvoljenih količina eksploziva

Prema kriterijumu seizmičke sigurnosti, izvršeno je na osnovu definisanih rastojanja od objekata kod kojih je vršeno mjerenje ili koji su ugroženi miniranjem. Izračunavanje maksimalno dozvoljene količine eksploziva za jednovremeno miniranje vrši se pomoću sljedeće jednačine:

$$R_{red} = \frac{R}{\sqrt[3]{Q_{max}}} \text{ (m)} \Rightarrow Q_{max} = \left(\frac{R}{R_{red}} \right)^3 \text{ (kg)} \quad (5.3)$$

Dok je po Američkoj zakonskoj regulativi maksimalno dozvoljena količina eksploziva:

$$R_{red} = \frac{R}{\sqrt[2]{Q_{max}}} \text{ (m)} \Rightarrow Q_{max} = \left(\frac{R}{R_{red}} \right)^2 \text{ (kg)} \quad (5.4)$$

gdje R_{red} predstavlja redukovano rastojanje, R je rastojanje i Q_{max} je maksimalana dozvoljena količina eksploziva.

Brzina oscilovanja tla (oko posmatranog objekta):

$$V_{doz} = k_s \cdot \frac{1}{R_{red}^n} \quad (cm/s) \quad (5.5)$$

gdje V_{doz} predstavlja dozvoljenu brzinu oscilovanja tla, k_s je seizmička konstanta, koeficijent sredine u kojoj se minira, usvojeno je $k_s = 0.9$ i n je koeficijent prigušenja seizmičkih talasa na putu širenja (prema literaturi najčešće se kreće oko $n = 1.5 \div 1.6$), usvojeno je $n = 1.5$.

Iz čega sljedi da je redukovano rastojanje:

$$R_{red} = \sqrt[n]{\frac{k_s}{V_{doz}}} \quad (5.6)$$

Redukovane količine eksploziva iznose:

$$q_{red} = \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \quad (kg/m) \quad (5.7)$$

Brzine oscilacija tla su snimljene na seizmografima i do najbližih objekta iznose:

$$V = \sqrt{v_t^2 + v_v^2 + v_l^2} \quad (mm/s) \quad (5.8)$$

Određivanje sigurnosnih zona pomoću poznatih količina eksploziva

Prema kriterijumu seizmičke sigurnosti, izvršeno je na osnovu definisanog redukovano rastojanja i poznate količine eksploziva za jednovremeno miniranje. Izračunavanje sigurnosnih rastojanja po gore navedenim standardima izvršeno je pomoću sljedeće jednačine:

$$Q = \left(\frac{R}{R_{red}} \right)^3 \Rightarrow R = R_{red} \cdot \sqrt[3]{Q} \quad (m) \quad (5.9)$$

Dok po Američkoj zakonskoj regulativi sigurnosno rastojanje iznosi:

$$Q = \left(\frac{R}{R_{red}} \right)^2 \Rightarrow R = R_{red} \cdot \sqrt{Q} \quad (m) \quad (5.10)$$

Određivanje dozvoljenih količina eksploziva i sigurnosnih zona prema kriterijumu seizmičke sigurnosti, izvršen je proračun i određene dozvoljene količine eksploziva na određenim

rastojanjima od objekata koji su ugroženi miniranjem. Rezultati proračuna prikazani su u tabeli 5.11.

Tabela 5. 11 Dozvoljene količine eksploziva i sigurnosna rastojanja [Figun i dr. 2016]

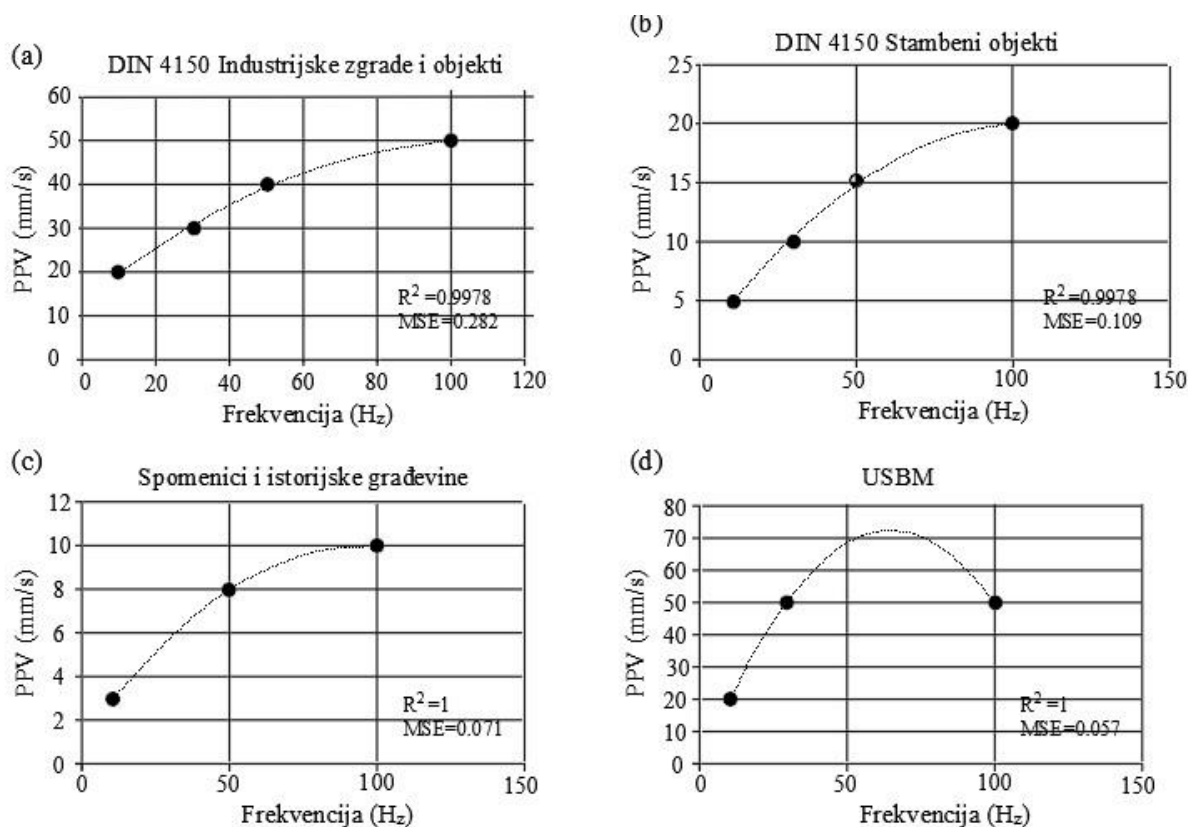
Standard	MP-I				MP-II			
	Stambeni objekat		Pumpna stanica		Pumpna stanica		Stambeni objekat	
	proračun	stvarno	proračun	stvarno	proračun	stvarno	proračun	stvarno
Dozvoljene količine eksploziva sa aspekta seizmičke sigurnosti								
GOST 6249-52	604.40	976	691.10	976	3447.94	2587	4269.80	2587
SN 640312	1360.20	976	1555.27	976	7759.48	2587	9609.04	2587
DIN 4150 III	2122.13	976	2426.47	976	1345.09	2587	1666.94	2587
USMB RI 8507	62.59	976	68.44	976	199.84	2587	230.45	2587
Sigurnosna rastojanja prema poznatim količinama eksploziva								
GOST 6249-52	231.12	197	231.12	206	319.86	352	319.86	378
SN 640312	176.37	197	176.37	206	244.08	352	244.08	378
DIN 4150 III	152.06	197	152.06	206	437.64	352	437.64	378
USMB RI 8507	777.90	197	777.90	206	1266.48	352	1266.48	378

Na osnovu analize tabele 5. 11 možemo primjetiti da je kod određivanje dozvoljenih količina eksploziva i kod određivanje sigurnosnih rastojanja pomoću poznatih količina eksploziva, sa aspekta seizmičke sigurnosti, utvrđeno sljedeće:

- prilikom miniranja u južnoj zoni kopa (MP-I), objekti mogu biti ugroženi prema ruskom standardu GOST 6249-52,
- prilikom miniranja u centralnoj zoni kopa (MP-II), objekti mogu biti ugroženi prema njemačkom standardu DIN 4150 III,
- prema ostalim standardima proračunom je utvrđeno da objekti nisu ugroženi. Američki standard USMB RI 8507 može posmatrati kao nerelevantan, jer njegovi rezultati drastično odstupaju od drugih.

5.2.1.2 Modeli procjene kriterijuma

Budući da ne postoje domaći standardi koji se tiču uticaja eksplozije na okolne objekte, potencijalno oštećenje objekata procjenjeno je na osnovu najčešće primjenjivanih kriterijuma koji definišu granice za konstruktivna oštećenja objekata kao funkciju maksimalne brzine oscilovanja tla i frekvenciju eksplozije. Da bi odredili granične vrijednosti PVV koje osiguravaju vibracije bez oštećenja objekata od miniranja, prvo smo razvili nelinearne veze između graničnih vrijednosti PPV i frekvencija (FR) oscilacija prema njemačkom standardu (DIN 4150) i američkom standardu, prikazanim na slici 5.26.



Slika 5. 26 Odnosi između PPV i frekvencije prema DIN 4150 i američkom standardu za različite tipove objekata: a) DIN4150 industrijske zgrade i kancelarije, b) stambene kuće, c) spomenici i istorijske građevine, d) američki standard [Kostić i Figun 2022]

Primjenom nelinearne regresije dobijaju se sljedeći odnosi (slika 5. 26):

$$PPV = -0.0031 \cdot FR^2 + 0.681 \cdot FR + 13.188, \text{ za DIN 4150 - za industrijske zgrade i kancelarije} \quad (5.11)$$

$$PPV = -0.0016 \cdot FR^2 + 0.3405 \cdot FR + 1.5938, \text{ za DIN 4150 - za stambene kuće} \quad (5.12)$$

$$PPV = -0.0009 \cdot FR^2 + 0.1817 \cdot FR + 1.2778, \text{ za DIN 4150 - za spomenike i istorijske građevine} \quad (5.13)$$

$$PPV = -0.0177 \cdot FR^2 + 2.3063 \cdot FR + 3.229, \text{ za američki standard} \quad (5.14)$$

Glavna prednost definisanja kriterijuma korišćenjem jednačina (5.11-5.14) je u bržem i pouzdanijem način definisanja graničnih vrijednosti PPV za različite tipove objekata. S druge strane, glavni nedostaci ovakvog pristupa su dvostruki:

1. ne može se definisati jednostavan matematički izraz za granične krive prikazane na slici 5. 24; dakle, predložene jednačine (5.11-5.14) su najbolja aproksimacija kriterijuma prikazanih na slici 5. 24 korišćenjem jednostavnog regresionog pristupa:
2. pošto smo koristili nelinearne (kvadratne) jednačine, tada su vrijednosti PPV u blizini granične krive veći nego što je dato u originalnim kriterijumima na slici 5. 24.

To ukazuje da se jednačinama (5.11-5.14) mogu dobiti pouzdani rezultati, koji su u dozvoljenim granicama, samo u slučajevima kada vrijednosti brzine oscilovanja tla nisu u neposrednoj blizina graničnih vrijednosti za određeni tip objekata.

5.2.1.3 Modeli procjene frekvencije vibracija primjenom višestruke linearne regresije

Koristeći metodu višestruke linearne regresije (MLR pristup), dobije se sljedeći odnos između frekvencije vibracija i kontrolnih parametara:

$$FR = 1 / (-2.81 + 0.77 \cdot (D_b) + 1.88 \cdot (D_a) - 0.11 \cdot (D_R) + 0.0097 \cdot (N) - 0.017 \cdot (Q_i) + 0.00037 \cdot (Q_{\max}) - 0.0023 \cdot (D_{BL}) - 0.28 \cdot (D) \cdot (B) + 0.0035 \cdot (D_b) \cdot (Q_i) - 0.000097 \cdot (D_b) \cdot (Q_{\max}) - 0.000014 \cdot (D_R) \cdot (Q_{\max}) - 0.0000078 \cdot (N) \cdot (Q_{\max}) + 0.000023 \cdot (Q_i) \cdot (D_{BL}) + 0.00000028 \cdot (Q_{\max}) \cdot (D_{BL}) - 0.14 \cdot (D_a)^2 + 0.0042 \cdot (D_R)^2 + 0.000067 \cdot (N)^2 + 0.0000001 \cdot (Q_{\max})^2) \quad (5.15)$$

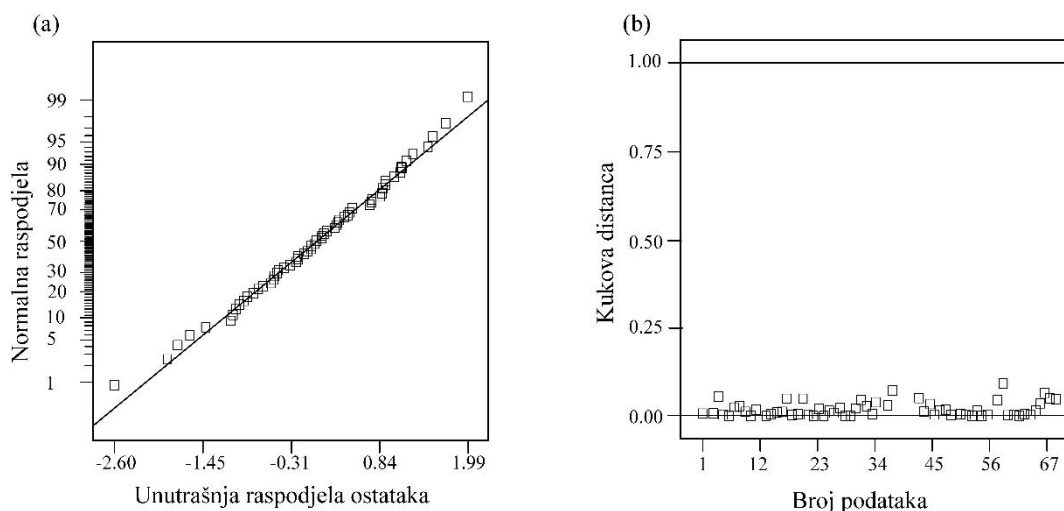
Tabela 5. 12 Rezultati ANOVA testa za model (5.15) [Kostić i Figun 2022]

Ulazni parametri	Zbir Kvadrata	Srednji kvadrat	F vrijednost	p-vrijednost Pr>F
Model	0.168211	0.009345	20.19275	< 0.0001
D _b	0.003911	0.003911	8.450246	0.0059
D _a	0.011813	0.011813	25.52471	< 0.0001
D _R	0.00446	0.00446	9.637725	0.0035
N	0.005249	0.005249	11.34158	0.0017
Q _i	0.002639	0.002639	5.701334	0.0218
Q _{max}	0.00536	0.00536	11.58206	0.0015
D _{BL}	0.000761	0.000761	1.644412	0.2071
D _b ·D _a	0.009386	0.009386	20.28076	< 0.0001
D _b ·Q _i	0.002952	0.002952	6.378975	0.0156
D _b ·Q _{max}	0.002779	0.002779	6.004734	0.0187
D _R ·Q _i	0.004124	0.004124	8.910449	0.0048
N·Q _i	0.006309	0.006309	13.63254	0.0007
Q _i ·D _{BL}	0.008022	0.008022	17.33435	0.0002
Q _{max} ·D _{BL}	0.001637	0.001637	3.537717	0.0673
D _a ²	0.006567	0.006567	14.18986	0.0005
D _R ²	0.022703	0.022703	49.05565	< 0.0001
N ²	0.001696	0.001696	3.664872	0.0627
Q _{max} ²	0.005473	0.005473	11.82556	0.0014

ANOVA test je potvrdio da je dobijeni model statistički značajan (tabela 5. 12). Takođe, statistički testovi ukazuju na značaj dvofaktorske interakcija. Analiza je pokazala visoke vrijednosti R (0,95) (tabela 5. 12 i slika 5. 27).

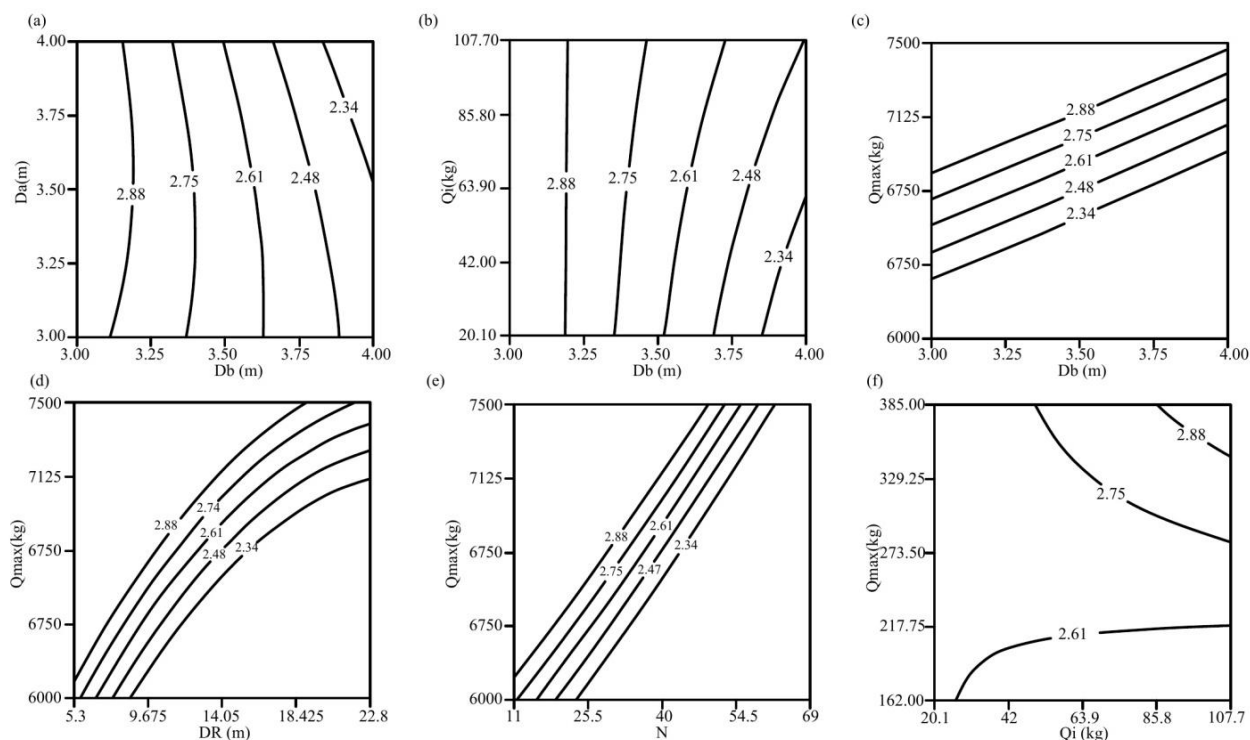
Grafikon normalne raspodjele (slika 5. 27a) pokazuje odsustvo bilo kakvih statistički značajnih relacija između reziduala, što dodatno potvrđuje da je jednačina 5.15 obuhvatila sve relevantne međuodnose između ulaznih parametara i frekvencije kao jedinog izlaznog parametra. Dalje,

Kukovo rastojanja (Cook's distance) prikazana na slici 5. 27b potvrđuje da više nema tačaka podataka čiju tačnost i uticaj treba dodatno provjeriti.



Slika 5. 27 Grafikon normalne raspodjele ostataka (a) i Kukova rastojanja, (b) za model (5.15) [Kostić i Figun 2022]

Osim što daje statistički značajne rezultate, jednačina 5.15 ukazuje na statistički značajan uticaj kako za pojedinačne ulazne parametre, tako i za dvofaktorsku interakciju. Dakle, postoji sedam značajnih dvofaktorskih interakcija čiji je uticaj na frekvenciju oscilovanja prikazan na slici 5. 28. Kao što se može vidjeti sa slike 5. 28 rastojanje između bušotina D_B (m), dubina bušotine D_R (m) i broj bušotina N imaju jak negativan nelinearni efekat na frekvenciju oscilovanja, dok rastojanje između redova bušotina D_a (m) ima mali negativan nelinearni uticaj na frekvenciju oscilovanja. Konkretno, povećanje rastojanja između bušotina, prosječne dubine bušenja i povećanje broja bušotina dovodi do smanjenja frekvencija vibracija, što se može objasniti rasipanjem energije eksplozije u slučaju da se miniranje vrši sa većim broj dubljih bušotina (i N i D_R) i na većim međusobnim rastojanjima (i D_B i D_a). S druge strane, ukupna količina eksploziva Q_{max} (kg) i količinu eksploziva po intervalu usporenja Q_i (kg) imaju jak pozitivan efekat na frekvenciju oscilacija. To znači da povećanje količine eksploziva, kako ukupne količine eksploziva tako i količine eksploziva po intervalu usporenja, dovodi do povećanja frekvencija vibracija. Zanimljiv podatak je statistički beznačajan efekat rastojanja od mjesta miniranja do mjesta mjerenja D_{BL} (m), što ne znači da rastojanje od mjesta mjerenja nema nikakvog uticaja na frekvenciju oscilacija. To samo znači da u analiziranom raspon izmjereno rastojanje od mjesta miniranja do mjesta mjerenja (166–358 m), nema značajan uticaj na frekvenciju oscilacija.

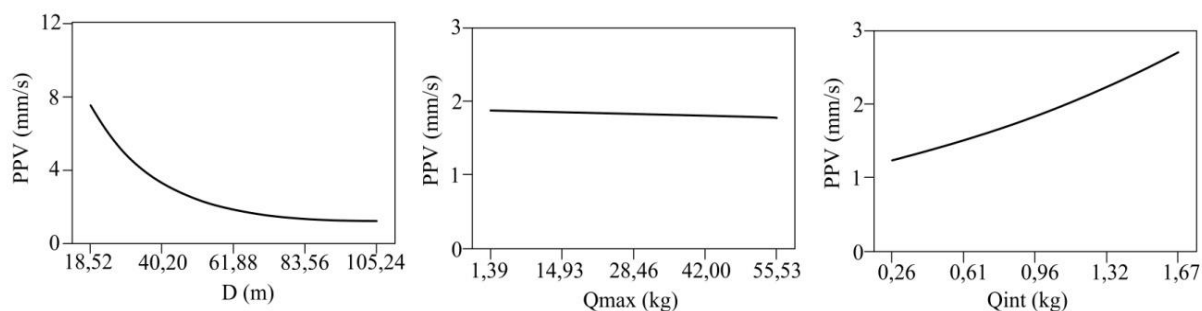


Slika 5. 28 Statistički značajne dvofaktorske interakcije iz jednačine (5.15): a) rastojanje između redova bušotina, D_a (m) i rastojanje između bušotina, D_b (m); b) količina eksploziva po intervalu usporenja, Q_i (kg) i rastojanje između bušotina, D_b (m); c) ukupna količina eksploziva, Q_{max} (kg) i rastojanje između bušotina, D_b (m); d) ukupna količina eksploziva, Q_{max} (kg) i dubina bušotine DR (m); e) ukupna količina eksploziva, Q_{max} (kg) i broj bušotina, N i f) ukupna količina eksploziva, Q_{max} (kg) i količina eksploziva po intervalu usporenja, Q_i (kg) [Kostić i Figun 2022]

5.2.2 Analiza snimljenih podataka za lokaciju objekta Skyline – Beograd

Nakon statističke obrade registrovanih podataka dobijenih prilikom mjerenja potresa od miniranja na lokaciji Skyline Beograd izvršeno je predviđanje potresa od miniranja primjenom konvencionalnih prediktora (regresionom analizom) i metode vještačkih neuronskih mreža. Pri formiranju modela potrebno je definisati matematičke zavisnosti ulaznih i izlaznih parametara određenom funkcijom, koja predstavlja matematičku zavisnost maksimalne brzine oscilovanja kao izlaznog parametra u funkciji ulaznih parametara koji su: maksimalne količina eksploziva po intervalu usporenja, ukupna količina eksploziva i rastojanje od mjesta miniranja do mjesta mjerenja.

Uticajnost pojedinih kontrolnih parametara, koji su korišćeni u analizi, prikazana je na slici 5. 29, gdje se jasno uočava da sa povećanjem rastojanja od mjesta mjerenja od mjesta miniranja opada brzina oscilovanja stijenske mase, dok ista raste sa povećanjem količine eksploziva po intervalu usporenja. A ukupna količina eksploziva nema statistički značajan uticaj, u razmatranom rasponu, na jačinu potresa od miniranja.



Slika 5. 29 Uticaj pojedinih kontrolnih faktora na PPV [Figun i dr. 2021]

Predviđanje brzine oscilovanja primjenom konvencionalnih metoda

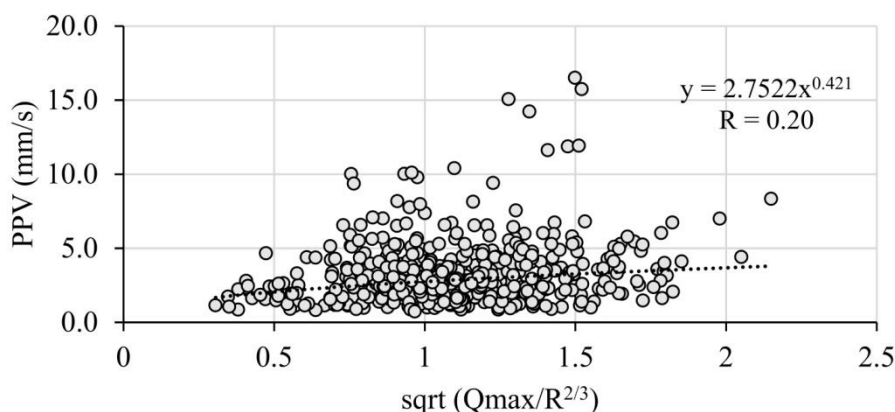
Za predviđanje potresa od miniranja primjenom konvencionalnih modela (regresionom analizom) korišćena su 477 podataka registrovana terenskim istraživanjima. Idućan broj podataka koristili smo i u primjeni vještačkih neuronskih mreža za procjenu potresa, da bi se omogućilo poređenje dobijenih rezultata predikcije u cilju testiranja modela.

Podaci su statistički analizirani primjenom regresione analize kako bi se dobio model procjene maksimalne brzine oscilovanja na osnovu dva ključna ulazna parametra: maksimalne količine eksploziva i rastojanje mjesta miniranja od mjesta mjerenja. Maksimalna brzina oscilovanja predstavlja maksimalnu vrijednost od tri mjerene komponente (longitudinalna, transversalna i vertikalna) brzine oscilovanja. Konvencionalnim prediktorima definiše se zakon oscilovanja stijenske mase, kao odnos između vrijednosti brzine oscilovanja i redukovano rastojanja. Redukovano rastojanje se računa po obrascu (jednačina 3.3):

Za predviđanje potresa od miniranja koristili smo, uobičajan postupak primjene, najčešće korišćen konvencionalni prediktor (model) za procjenu vrijednosti maksimalne brzine oscilovanja u inženjerskoj praksi [Langefors i Kihlstrom 1963]:

$$PPV = 2,75 \left[\sqrt{(Q_{max}/R^{2/3})} \right]^{0,42} \quad (5.16)$$

Na koordinatnom sistemu (slika 5. 30) nanešene su vrijednosti maksimalnih brzina oscilovanja (y osa) dobijene terenskim mjerenjima PPV i vrijednosti redukovano rastojanja (x osa). Na slici 5. 30 prikazana je veza između vrijednosti maksimalnih brzina oscilovanja procjenjenih konvencionalnim modelom i registrovanih na terenu. Kao što se može vidjeti, primjena konvencionalnih modela, u ovom slučaju obrazac Langefors i Kihlstrom, ne daju zadovoljavajuće rezultate u pogledu procjenjenih PVV, s obzirom na to da koeficijent determinacije je ispod vrijednosti 0,8, dok je korjen srednje kvadratne greške RMSE=2.2.



Slika 5. 30 Procjena maksimalne brzine oscilovanja korišćenjem konvencionalnog prediktora 5.16 [Figun i dr. 2021]

Model predviđanja maksimalne brzine oscilovanja iznosi:

$$V_{max} = 2.7522 \cdot R^{0.421} \Rightarrow 2.7522 \cdot \left(\frac{r}{\sqrt{Q}} \right)^{0.421} \text{ (mm/s)} \quad (5.17)$$

gdje Q predstavlja maksimalnu količinu eksploziva po intervalu usporenja, (kg), r je rastojanje mjernog mjesta od mjesta miniranja, (m), R je redukovano rastojanje, (m/kg^{0.5})

Izvršena je i procjena uticaja potresa na objekte u zavisnosti od klase objekta, prema kriterijumima Ruske akademije nauka. Kriterijum je prikazan u poglavlju 3.3.4. gdje su prikazani inostrani standardi koji se najčešće koriste kod nas (tabela 3. 5). Iz tabele se vidi da dozvoljene brzine oscilovanja kod građevinskih objekata (stambeni, industrijski i dr.) zavise od vrste objekta, značaja i namjene. Iz tih razloga svi građevinski objekti podjeljeni su u tri klase: I klasa (industrijski objekti od izuzetne važnosti: cjevovodi, industrijske hale većih dimenzija, izvozni tornjevi u rudnicima, vodovodni tornjevi i sl. objekti čiji vijek trajanja je duži od 20 – 30 godina; stambeni objekti u kojima živi veći broj stanovnika, domovi kulture, bioskopi i slični objekti), II klasa (industrijski objekti i administrativne zgrade relativno malih dimenzija čija visina nije veća od tri sprata: mehaničke radionice, kompresorske stanice i sl. objekti; stambeni objekti u kojima živi manji broj ljudi, magacini i sl.) i III klasa (zgrade i industrijski objekti u koje su smještene skupocene mašine i uređaji - čije oštećenje ne ugrožava život i zdravlje ljudi; skladišta, automobilske baze, zgrade hladnjača, kompresorskih stanica i sl.).

Objekti, pored kojih su vršena mjerenja potresa u cilju kontrole i procjene oscilacija koja nastaju pri miniranju temeljne jame za objekat Skyline, spadaju u objekte I klase, i za njih je maksimalna dozvoljena brzina oscilovanja tla uslijed miniranja 50 mm/s.

5.3 Formiranje modela predikcije uticaja potresa od miniranja na objekte

U posljednje vrijeme, vještačke neuronske mreže se sve više koriste za procjenu potresa od miniranja, i rezultati dosadašnjih istraživanja ukazuju na njihovu veću moć predikcije u odnosu na postojeće konvencionalne modele. Široka primjena ANN proizilazi, prije svega, iz njihove mogućnosti da iz velikog broja ulaznih parametara, uspostavljanjem složenih međusobnih veza, sa dovoljnom preciznošću daju izlazni podatak, odnosno, u ovom slučaju, brzinu oscilovanja stijenske mase [Lapčević i dr. 2014]. Broj jedinica u skrivenom sloju određen je korišćenjem različitih obrazaca, tabela 5. 13. Kao što se vidi iz tabele broj jedinica koje mogu da se koriste u skrivenom sloju je u rasponu od 1 do 12.

Tabela 5. 13 Određivanje broja jedinica u skrivenom sloju [Kostić 2014]

Heuristički obrazac	Broj jedinica u skrivenom sloju	Referenca
$3 \cdot N_i$	12	[Hush 1989]
$\leq 2 \cdot N_i + 1$	≤ 9	[Hecht-Nielsen 1987]
$2N_i$	8	[Kanellopoulas i Wilkinson 1997]
$2N_i / 3$	$2,67 \approx 3$	[Wang 1994]
$(N_i + N_0) / 2$	$2,5 \approx 3$	[Ripley 1993]
$\sqrt{(N_i + N_0)}$	$2,24 \approx 2$	[Kaastra i Boyd 1996]
$\frac{2 + N_0 \cdot N_i + 0,5N_0 \cdot (N_0^2 + N_i) - 3}{N_i + N_0}$	$1,1 \approx 1$	[Paola 1994]

Kako ulazno-izlazni podaci imaju različite jedinice mjere, kao i da se za aktivacionu funkciju koristi sigmoidna funkcija, vrijednosti ulaznih i izlaznih parametara moraju biti skalirani u intervalu (0,1), na sljedeći način [Monjezi i dr. 2013].

$$\text{skalirana vrijednos} = \frac{\text{maksimalna vrijednost} - \text{izmjerena vrijednost}}{\text{maksimalna vrijednost} - \text{minima lna vrijednost}} \quad (5.18)$$

Računata je i promjena srednje kvadratne greške (MSE) sa brojem iteracija prilagođavanja jačina veza (treniranja, obučavanja), koristeći različiti broj jedinica u skrivenom sloju. Obučavanje (treniranje) mreže prestaje onda kada srednja kvadratna greška procjene tokom validacije dostigne traženi minimum, što se može podešavati u okviru samog algoritma. Formiranje modela predikcije uticaja potresa od miniranja na objekte prikazano je u nastavku, odnosno u sljedećem poglavlju.

Analiza postupka formiranja i obučavanja vještačkih neuronskih mreža, kao i preciznost njihove primjene, su izvedeni sa istim podacima koji su poslužili i za analizu konvencionalnih modela.

5.3.1 Primjena ANN za predviđanje potresa za PK “Hardovac” - Ševarlije

Primjena postupka procjene vrijednosti frekvencije oscilovanja pomoću ANN počinje definisanjem skupa ulaznih i izlaznih podataka koji predstavljaju kontrolne parametre. Kontrolni parametri su bušačko minerski parametri koji se koriste u analizi, a koji imaju najveći uticaj na potrese koji se javljaju pri miniranju. U formiranju modela koristili smo sljedeće kontrolne parametre kao ulazne podatke: rastojanje između bušotina (D_B), rastojanje između redova bušotina (D_a), dubina bušotina (D_R), broj bušotina (N), količina eksploziva po intervalu usporenja (Q_i), ukupna količina eksploziva (Q_{max}) i rastojanje od mjesta miniranja do mjesta mjerenja, (D_{BL}). S druge strane, frekvencija oscilovanja (FR) je uzeta kao jedini izlazni parametar. Pomenuti kontrolni parametri prikazani u tabeli 5. 14, koristili su se i za formiranje regresionog modela.

Tabela 5. 14 Pregled ulazno-izlaznih podataka za izvođenje modela procjene [Kostić i Figun 2022]

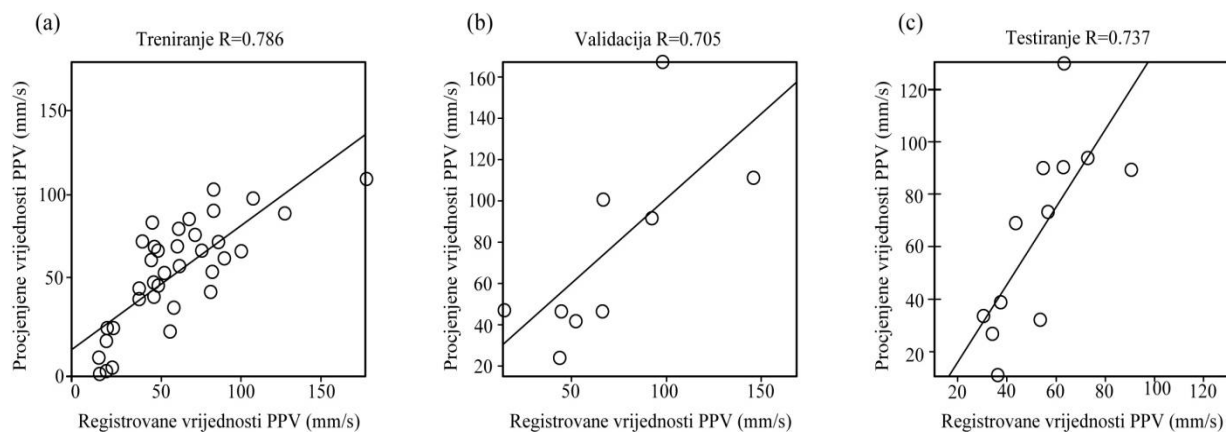
Parametri	Mjerna jedinica	Analizirani raspon
Ulazni podaci		
Rastojanje između bušotina, D_B	m	3-4
Rastojanje između redova bušotina, D_a	m	3-4
Dubina bušotine, D_R	m	8.5-22.5
Broj bušotina, N	/	11-69
Količina eksploziva po intervalu usporenja, Q_i	kg	43-107.7
Ukupna količina eksploziva, Q_{max}	kg	343-3077
Rastojanje od mjesta miniranja do mjesta mjerenja, D_{BL}	m	166-358
Izlazni podaci		
Frekvencija, FR	Hz	10.85-177.76

Odabrali smo model vještačkih neuronskih mreža sa jednim skrivenim slojem [Rumelhart i dr. 1986], dok je broj skrivenih čvorova utvrđen korišćenjem istraživanja koju su sumirali Sonmez i saradnici [Sonmez i dr. 2006]. Razvili smo ANN model sa 10 skrivenih jedinica. U pogledu obučavanja mreže, skup od 68 podataka podjeljen je na sljedeći način: 65% za obučavanje (38 podataka), 15% za validaciju (9 podataka) i 20% za testiranje (12 podataka), što odgovara preporuci autora Nelsona i Illingvorta [Nelson i Illingworth 1990] koji su podržali ideju o 20-30% podataka za testiranje i preporuci Lonija koji je predložio 25 % podataka za testiranje. Algoritam obučavanja izveden je pomoću Levenberg-Markuardt algoritma učenja, kao jednog od najčešće korišćenih algoritama sa ciljem da se stvori adekvatan model ANN za predikciju frekvencije oscilovanja tla na osnovu registrovanih podataka.

Primjena vještačkih neuronskih mreža (ANN pristupa) rezultirala je modelom 5.19 između frekvencije i statistički značajnih parametara, koji najviše utiču na vrijednost frekvencije oscilovanja, kontrolnih parametara:

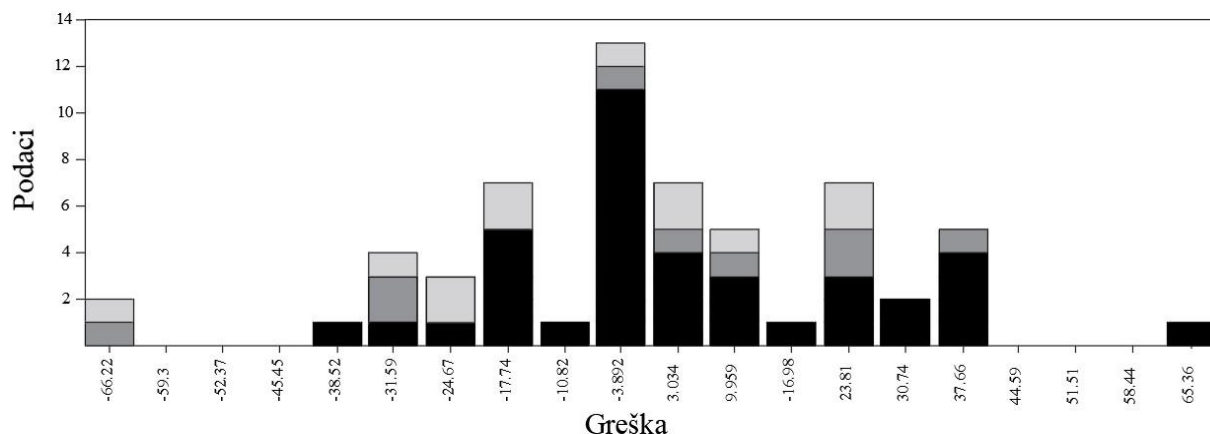
$$\begin{aligned}
Hz = & \left(-0.9492 + \begin{bmatrix} -1.5239 \\ -0.5728 \\ -0.3849 \\ 0.625 \\ -1.0591 \\ 0.6125 \\ -0.3584 \\ -0.2870 \\ -0.2870 \\ -0.2100 \end{bmatrix} \cdot \text{tansig} \left(\begin{bmatrix} 3.0585 \\ -2.2742 \\ -12424 \\ 1.1304 \\ -3.1444 \\ 2.8448 \\ 0.1694 \\ 1.4140 \\ -1.9204 \\ 3.6715 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.6199 \\ 0.8067 \\ 0.7207 \\ -0.971 \\ 0.4583 \\ 1.7007 \\ -1.1578 \\ 0.4425 \\ -0.9906 \\ 0.5277 \end{bmatrix} \cdot Db + \begin{bmatrix} -0.7203 \\ 1.1662 \\ -0.5474 \\ -0.4547 \\ 1.1379 \\ -1.1721 \\ -2.6459 \\ -3.6497 \\ -0.0632 \\ 0.7913 \end{bmatrix} \cdot Da + \begin{bmatrix} 0.6706 \\ -0.759 \\ -1.6245 \\ -0.6543 \\ 0.789 \\ -1.6643 \\ -1.1609 \\ -1.6329 \\ -1.8698 \\ -0.3356 \end{bmatrix} \cdot D_R + \right. \\
& \left. \begin{bmatrix} -0.6743 \\ 2.0682 \\ 4.3021 \\ 1.6574 \\ -0.3033 \\ 2.6185 \\ -1.8977 \\ -0.2398 \\ -1.1443 \\ 0.6021 \end{bmatrix} \cdot N + \begin{bmatrix} -0.2952 \\ -1.6784 \\ -0.9518 \\ -0.667 \\ -1.2732 \\ 0.5772 \\ 0.4485 \\ -1.2051 \\ 0.1754 \\ 1.4026 \end{bmatrix} \cdot Qi + \begin{bmatrix} -1.7258 \\ -0.2021 \\ -2.735 \\ -0.7654 \\ -0.1492 \\ -2.836 \\ -0.4441 \\ 1.0326 \\ -4.5526 \\ -0.8824 \end{bmatrix} \cdot Q_{max} + \begin{bmatrix} 2.2814 \\ -1.1478 \\ -0.8569 \\ -1.4165 \\ -1.366 \\ 1.6199 \\ 1.194 \\ 1.5949 \\ -2.6725 \\ 0.059 \end{bmatrix} \cdot D_{BL} \right) \quad (5.19)
\end{aligned}$$

Dobijeni rezultati pokazuju da model predviđanja 5.19 ima zadovoljavajuću tačnost procjene sa koeficijentom korelacije (R) većim od 0,7 (slika 5. 31). Isključena je mogućnost prekomjernog fitovanja, jer svako povećanje tačnosti u odnosu na skup podataka za obučavanje dovodi do povećanja tačnosti u odnosu na skupa podataka o validaciji.



Slika 5. 31 Regresijski grafikoni za model (5.19) a) treniranje, b) validacija i c) testiranje (Kostić i Figun 2022]

Takođe, moglo bi se pokazati da greške imaju normalnu raspodjelu, što dodatno potvrđuje da je model procjene 5.19 obuhvatio sve statistički relevantne zavisnosti između ulaznih i izlaznih podataka (slika 5. 32).



Slika 5. 32 Distribucija grešaka za model (5.19). Crni binovi označavaju raspodjelu greške za trening set, tamnosivi binovi na raspodjelu greške za validacioni set, dok svjetlosivi binovi se odnose na raspodjelu greške za test set (Kostić i Figun 2022]

5.3.1.1 Modeli za procjenu minimalnih sigurnosnih rastojanja

Sigurnosna rastojanja za različite tipove objekata prema DIN-4150 izračunavaju se uzimajući u obzir statistički značajnu povezanost PPV-a, rastojanja od mjesta miniranja i ukupne količine upotrebljenog eksploziva, dok se frekvencija izražava kao nelinearna funkcija u zavisnosti od kontrolnih faktora.

Polazeći od Langefors-Kihlstromove opšte jednačine prikazane u tabeli 2. 3, može se uspostaviti statistički značajna korelacija ($R=0,91$) između posmatranih vrijednosti PPV, rastojanja od mjesta miniranja R i maksimalne količine eksplozivnog Q_{max} , u sljedećem obliku:

$$PPV = 0.887 \cdot \sqrt{\frac{Q_{max}}{R^{2/3}}} \quad (5.20)$$

Polazeći od jednačine 5.20 i uzimajući u obzir jednačine (5.11-5.15; 5.19; 5.20) može se utvrditi sljedeći izrazi za proračun minimalnog sigurnosnog rastojanja za različite kategorije objekata prema DIN-4150, bilo koristeći MLR pristup, jednačina 5.15 ili ANN pristup, jednačina 5.19:

Industrijske zgrade i kancelarije

$$SAFE (m) = (0,788 \cdot Q_{max} / ((-0,0031 \cdot (FR)^2 + (0,681 \cdot FR + 13,188)^2))^{3/2}) \quad (5.21)$$

Stambene kuće

$$SAFE (m) = (0,788 \cdot Q_{max} / ((-0,0016 \cdot (FR)^2 + (0,3405 \cdot FR + 1,5938)^2))^{3/2}) \quad (5.22)$$

Spomenici i istorijske građevine

$$SAFE (m) = (0,788 \cdot Q_{max} / ((-0,0009 \cdot (FR)^2 + (0,1817 \cdot FR + 1,2778)^2))^{3/2}) \quad (5.23)$$

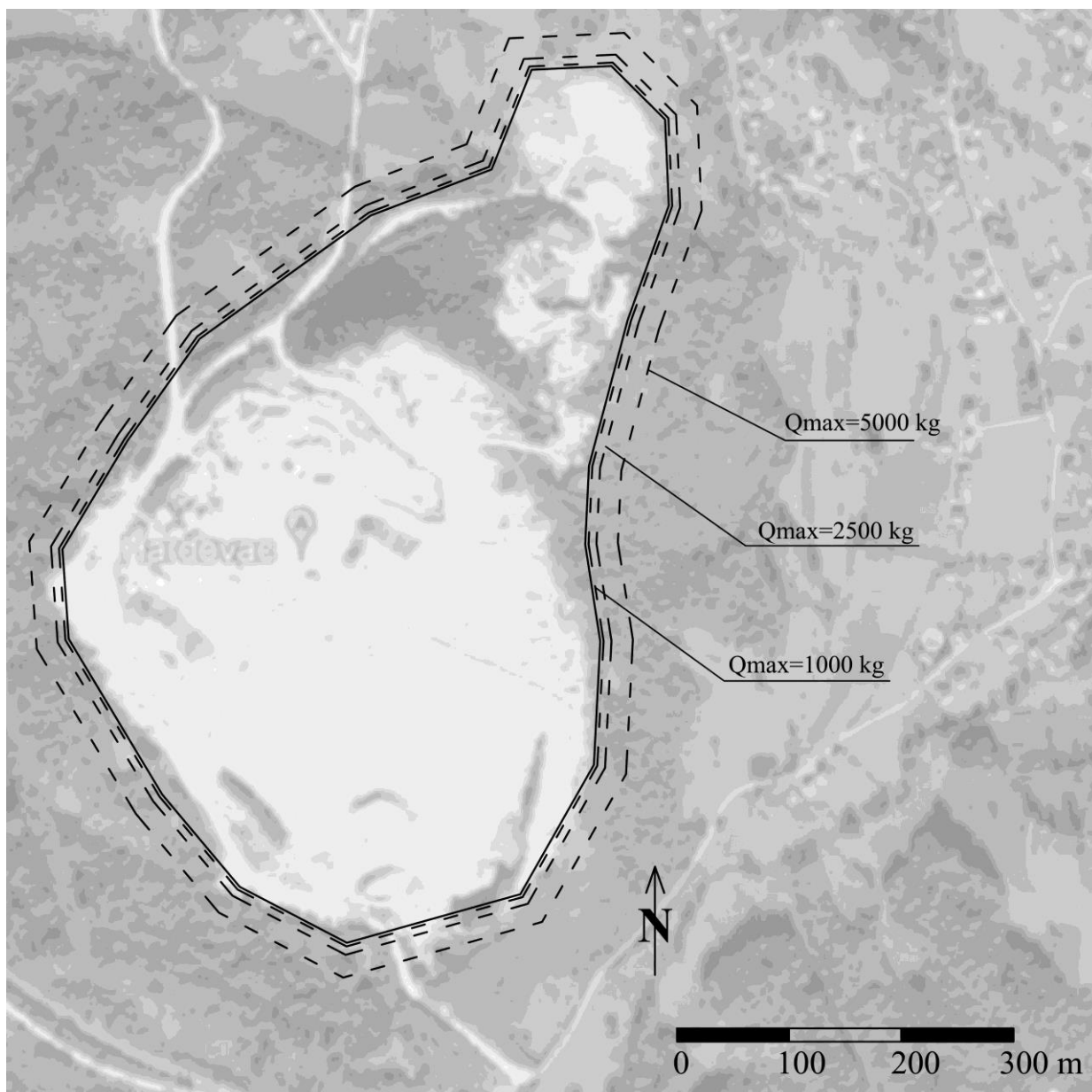
Minimalna sigurnosna rastojanja su izračunata pomoću višestruke linearne regresije u tabeli 5. 15, a za različite vrste objekata u blizini kamenoloma “Hardovac“ nacrtane su odgovarajuće sigurnosne krive (slika 5. 33, slika 5. 34 i slika 5. 35).

Tabela 5. 15 Maksimalna i minimalna sigurnosna rastojanja za ulazne podatke registrovane na lokaciji kamenolom “Hardovac“, tabela 5. 6 [Kostić i Figun 2022]

Industrijske zgrade i kancelarije						
Q _{max}	Q _{max} =1000 kg		Q _{max} =2500 kg		Q _{max} =5000 kg	
min/max	min	max	min	max	min	max
PPV (mm/s)	20.23	50.59	20.23	50.59	20.23	50.59
Frekvencija (Hz)	10.88	109.69	10.88	109.69	10.88	109.69
SAFE (m)	0.20	3.01	0.68	10.56	1.91	29.87
Stambene kuće						
PPV (mm/s)	5.11	19.71	5.11	19.71	5.11	19.71
Frekvencija (Hz)	10.88	109.69	10.88	109.69	10.88	109.69
SAFE (m)	2.89	165.91	11.42	655.81	32.31	1854.90
Spomenici i istorijske građevine						
PPV (mm/s)	3.15	10.44	3.15	10.44	3.15	10.44
Frekvencija (Hz)	10.88	109.69	10.88	109.69	10.88	109.69
SAFE (m)	19.45	709.1	76.89	2802.92	217.47	7927.85

Potrebno je istaknuti da su izolinije konstruisane pod pretpostavkom da se miniranje vrši na ivici površinskog kopa “Hardovac“.

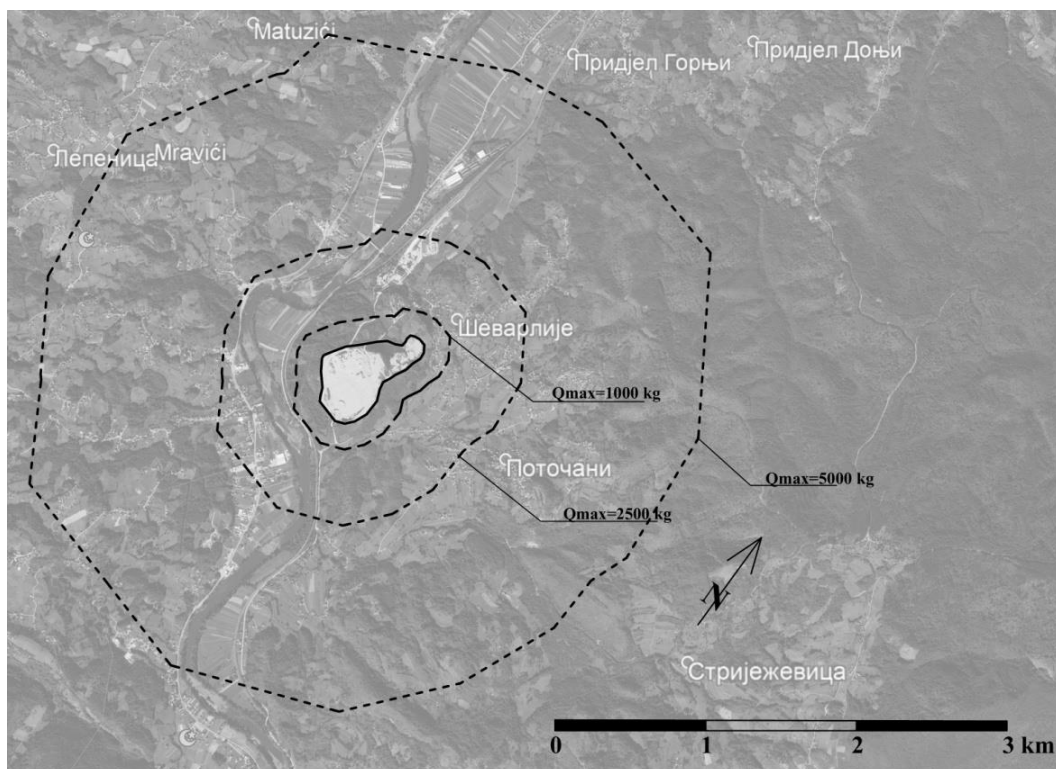
Kao što se može vidjeti sa slike 5. 33 i tabele 5. 15, sigurna rastojanja za industrijske zgrade i kancelarije, za ukupnu količinu upotrebljenog eksploziva $Q_{max} = 1000$ kg je 0,2–3,1 m, gde je PPV u granicama 20,2–50,6 mm/s, dok je frekvencija vibracija 10,9–109,7 Hz, što je u okviru dozvoljenih vrijednosti prema prema DIN 4150 standardu (slika 5. 24). Za veće ukupne količine upotrebljenog eksploziva, 2500 kg i 5000 kg, dozvoljena brzina i frekvencija oscilovanja tla ostaju iste, dok su se sigurnosna rastojanja povećala na raspon 0,7–10,6 m odnosno 1,9–30 m.



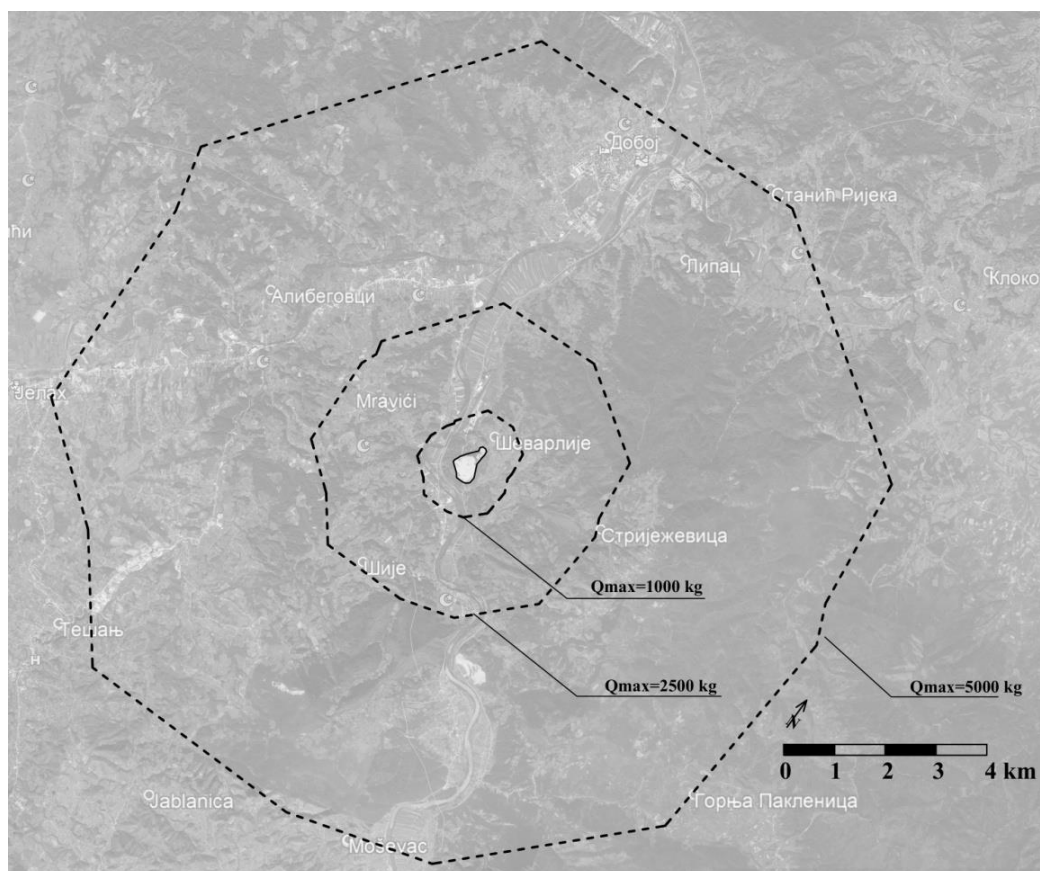
Slika 5. 33 Izolinije minimalnih sigurnosnih rastojanja za industrijske zgrade i kancelarije prema MLR modelu (5.1) i DIN 4150, za različite ukupne količine eksploziva: $Q_{\max} = 1000$ kg, $Q_{\max} = 2500$ kg i $Q_{\max} = 5000$ kg [Kostić i Figun 2022]

Što se tiče stambenih kuća (slika 5. 34) sigurnosna rastojanja za $Q_{\max} = 1000$ kg je 2,89–165,91 m, sa PPV i frekvencija u granicama 5,11–19,71 mm/s odnosno 10,9–109,7 Hz. Za $Q_{\max} = 2500$ kg i $Q_{\max} = 5000$ kg, sigurnosno rastojanje se povećava do raspona 11,4–655,8 m odnosno 32,3–1854,9 m.

Što se tiče spomenika i istorijskih građevina (slika 5. 35), koji su najosjetljiviji na dejstvo od vibracija izazvanih miniranjem sigurnosna rastojanja za $Q_{\max} = 1000$ kg iznosi 19,5–709,1 m, gdje su PPV i frekvencija u rasponu 3,15–10,44 mm/s odnosno 10,9–109,7 Hz. Za veće ukupne količine upotrebljenog eksploziva, 2500 kg i 5000 kg, sigurnosno rastojanje je u rasponu 76,9–2802,9 m i 217,5–7927,9 m, odnosno u zavisnosti od nivoa PPV.



Slika 5. 34 Izolinije minimalnih sigurnosnih rastojanja za stambene zgrade prema MLR modelu (5.1) i DIN 4150, za različite ukupne količine eksploziva: $Q_{max} = 1000$ kg, $Q_{max} = 2500$ kg i $Q_{max} = 5000$ kg [Kostić i Figun 2022]



Slika 5. 35 Izolinije minimalnih sigurnosnih rastojanja za spomenike i istorijske građevine prema MLR modelu (5.1) i DIN 4150, za različite ukupne količine eksploziva: $Q_{\max} = 1000 \text{ kg}$, $Q_{\max} = 2500 \text{ kg}$ i $Q_{\max} = 5000 \text{ kg}$ [Kostić i Figun 2022]

U ovoj disertaciji razvijen je model za procjenu sigurnih rastojanja od mjesta miniranja, za različite tipove konstrukcija prema standardu DIN-4150. Ovaj model je formulisan u oblik jednostavnog nelinearnog eksplicitnog matematičkog izraza koji pokazuje zavisnost frekvencije oscilovanja pri miniranju od ulaznim kontrolnim faktorima, koristeći ili MLR pristup ili ANN metodologiju. Osnovna ideja disertacije je sljedeća:

- utvrđivanje jednostavne matematičke korelacije između PPV i frekvencije vibracija pri miniranju prema DIN-1450 i američkom standardu;
- utvrđivanje statistički značajne korelacije između frekvencije miniranja stijena i kontrolnih parametara: rastojanja između bušotina, rastojanja između redova bušotina, dubina bušotina, broj bušotina, količina eksploziva po intervalu usporenja, ukupna količina eksploziva i rastojanje od mjesta miniranja do mjesta mjerenja i
- utvrđivanje statistički značajne korelacije između registrovanih vrijednosti PPV, maksimalne količine eksploziva i rastojanje od mjesta miniranja do mjesta mjerenja, koja se dalje koristi za određivanje sigurnih rastojanja.

Dobijeni rezultati su pokazali da i MLR i ANN pristup pružaju statistički značajne modeli procjene, pri čemu MLR pristup daje tačnije rezultate. Osim toga, MLR pristup omogućava dalju detaljniju analizu prirode uticaja kontrolnih faktora na frekvenciju vibracija pri miniranju. Konkretno, izvršena analiza ukazuje na postojanje statistički značajnih dvofaktorskih interakcije, između svih analiziranih ulaznih faktora. Rastojanje između bušotina, D_B (m), dubina bušotine, D_R (m) i broj bušotina N imaju jak negativan nelinearni efekat na frekvenciju oscilacija, dok rastojanje između redova bušotina, D_a (m) i rastojanje od mjesta miniranja do mjesta mjerenja, D_{BL} (m) imaju mali nelinearni negativni uticaj na frekvenciju oscilovanja. S druge strane, ukupna količina eksploziva, $Q_{\max}$ (kg) i količina eksploziva po intervalu usporenja, Q_i (kg) imaju snažan pozitivno uticaj na frekvenciju oscilovanja.

Sigurnosna rastojanja za različite vrste konstrukcija izračunavale su se polazeći od Langefor-Kihlstorma opšte jednačine, gde su frekvencije oscilovanja tla izražene kao nelinearna funkcija analiziranih uticajnih faktora.

Kao primjer moguće primjene, dali smo detaljnu analizu sigurnosnih rastojanja objekata različitog tipa od mjesta miniranja, uz pretpostavku da se miniranje vrši na ivici kamenoloma krečnjaka Hardovac. Za analiziranje podataka je korišćena jednačina procjene, gdje su konstruisane različite

konturne linije za različite ukupne količine eksploziva (1000 kg, 2500 kg i 5000 kg). Kao što se i očekivalo, spomenici i historijski objekti su najosjetljiviji na vibracije izazvane eksplozijom, pa je i sigurnosno rastojanje za ove konstrukcije najveća. S druge strane, industrijski objekti su najmanje osjetljivi na vibracije izazvane eksplozijom, pa je njihovo sigurnosno rastojanje najmanje.

Treba napomenuti da ne postoji apsolutno tačna mjera sigurnih rastojanja u pogledu uticaja vibracija izazvanih eksplozijom na različite tipove konstrukcija. U ovoj disertaciji dajemo poređenje prikazanog pristup sa opštim pristupima koji se primjenjuje u domaćoj inženjerskoj praksi. Sigurno rastojanje se obično izračunava pomoću utvrđene korelacije između ukupne količine eksploziva, rastojanja od mjesta miniranja i maksimalne brzina oscilovanja, koja se koristi za procjenu sigurnog rastojanja. Tako se dobija sigurna vrijednosti Q_{max} , za granične vrijednosti PPV prema seizmičkoj skali koju je predložila Ruska akademija nauke, koja pruža korelaciju između makroseizmičkog intenzitet, PPV i uticaj na objekte. Standard koji se koristi u Rusiji, a često i kod nas, u nedostatku domaćih standarda, a prikazan je u poglavlju 3. 3. 4 (tabela 3. 8).

Iz tabele 5. 15 jasno je da bi se konstrukcije značajno oštetile zbog vibracija izazvanih eksplozijom pri vrijednostima PPV iznad 15 mm/s, što se obično usvaja kao granična vrijednost. U sljedećoj fazi, odnos između PPV i takozvanog redukovano rastojanja (jednačina 3.3) se dobija korišćenjem Ambraseys–Hendron pristupa (tabela 2. 3). U ovom slučaju, odnos ima sljedeći oblik:

$$PPV = 0,0087 \cdot R^{(-0,169)} \quad (5.24)$$

sa $R = 0,32$. Iz jednačine 5.24, dobija se odnos između sigurnog rastojanja r (m) i Q_{max} (kg), za graničnu vrijednost $PPV = 0,015$ m/s:

$$r = 1,1 \cdot Q_{max}^{(0,33)} \quad (5.25)$$

Za iste ukupne količine eksploziva pretpostavljenu u ovoj analiza: 1000 kg, 2500 kg i 5000 kg, dobija se iz jednačine 5.25 sljedeće vrijednosti sigurnog rastojanja: 11 m, 15 m i 18,3 m. Ako se ovo uporedi sa modelom razvijenim u ovoj disertaciji, dobija se sljedeće. Maksimalna brzina oscilovanja čestica $PPV = 15$ mm/s spada u okvire granične vrijednosti PPV za stambene kuće (tabela 5. 15). Prema formuli 5.12, frekvencija od 35 Hz je dobijena za $PPV = 15$ mm/s za stambene kuće prema DIN 4150. Ako se uvrsti ova vrijednost frekvencije u jednačinu 5.22, sigurna rastojanja za $Q_{max} = 1000$ kg, 2500 kg i 5000 kg su 11,2 m, 44,3 m i 125,2 m.

Može se vidjeti da formirani pristup daje skoro isto rastojanje za minimalnu vrijednost ukupne količine eksploziva. Međutim, za veće vrijednosti Q_{max} , razvijeni pristup omogućava veća sigurnosna rastojanja, što ukazuje na sljedeće:

- nije se moglo očekivati da taj pojednostavljeni pristup koji se obično koristi u inženjerskoj praksi, pruža pouzdane rezultate u svim slučajevima, jer uzima u obzir samo zavisnost PPV-a od rastojanja od mjesta miniranja do mjesta mjerenja i ukupna količina eksploziva;
- očigledno postoji značajan efekat drugih kontrolnih faktora, prikazanih u jednačini 5.15 i ispitanih u tabeli 5. 12 na frekvenciju vibracija, što opravdava razvijenu pristup i potvrđuje potrebu za preciznijom tehnikom u određivanju sigurnog rastojanja od mjesta miniranja.

5.3.2 Primjena ANN za predviđanje potresa na lokaciji Skyline Beograd

Primjena postupka procjene vrijednosti PVV pomoću vještačkih neuronskih mreža počinje definisanjem skupa ulaznih podataka, koji se sastoje od tri parametra miniranja: ukupna količina eksploziva (Q_{max}), količina eksploziva po intervalu usporenja (Q_i) i rastojanje od mjesta miniranja do mjesta mjerenja (D_{BL}), tabela 5. 16. Jedini izlazni podatak predstavlja maksimalnu brzinu oscilovanja stijenske mase. Tabela 5. 16 prikazuje ulazno-izlazne parametre koji se koriste za formiranje modela.

Tabela 5. 16 Pregled ulazno-izlaznih podataka za formiranje modela [Figun i dr. 2021]

Parametri	Mjerna jedinica	Analizirani raspon
Ulazni podaci		
Količina eksploziva po intervalu usporenja, Q_i	kg	0.26-1.67
Ukupna količina eksploziva, Q_{max}	kg	1.39-55.53
Rastojanje od mjesta miniranja do mjesta mjerenja, D_{BL}	m	18.52-105.24
Izlazni podaci		
Maksimalan brzina oscilovanja, V	mm/s	0.74-16.51

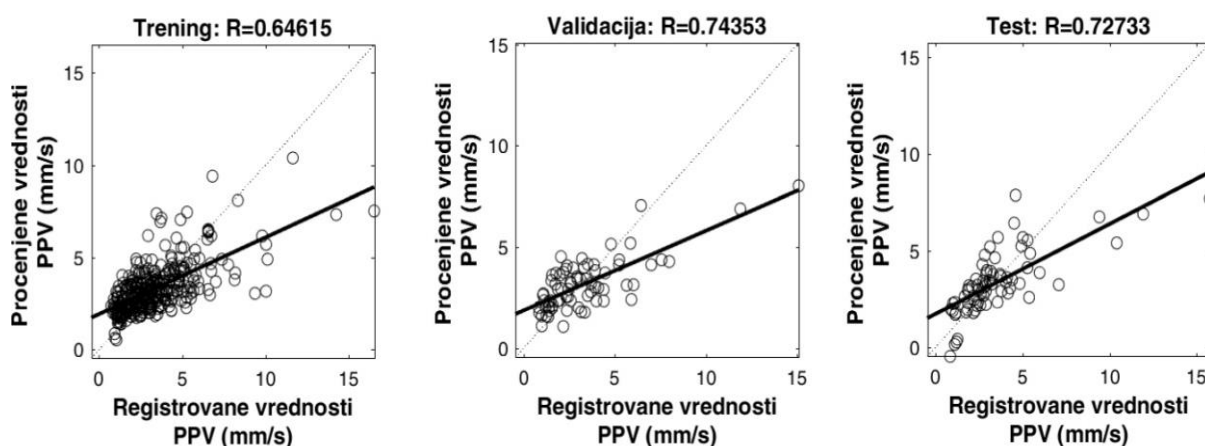
U pogledu arhitekture mreže, odabrana je neuronska mreža sa prostiranjem signala unaprijed i sa jednim skrivenim slojem. Za određivanje arhitekture mreže sa najpreciznijim izlaznim podatkom izvršena je analiza rada neuronskih mreža sa 10 jedinica u skrivenom sloju. Za potrebe obučavanja neuronskih mreža, skup od 477 podataka podjeljen je na sljedeći način: 50% za obučavanje mreže (333 podataka), 25% za validaciju (72 podataka) i 25% za testiranje mreže (72 podataka). Tokom obučavanja neuronskih mreža, kao aktivaciona funkcija korišćena je sigmoidna funkcija, kao uobičajena funkcija transfera koja se pronalazi u literaturi [Sonmez i dr. 2006]. Dok je za algoritam obučavanja usvojen Levenberg–Markart algoritam, kao varijanta algoritma sa prostiranjem greške unazad.

Izvedena analiza je pokazala da se između kontrolnih faktora – ulaznih podataka: ukupne količine eksploziva, količine eksploziva po intervalu usporenja i rastojanja od mjesta miniranja do mjesta

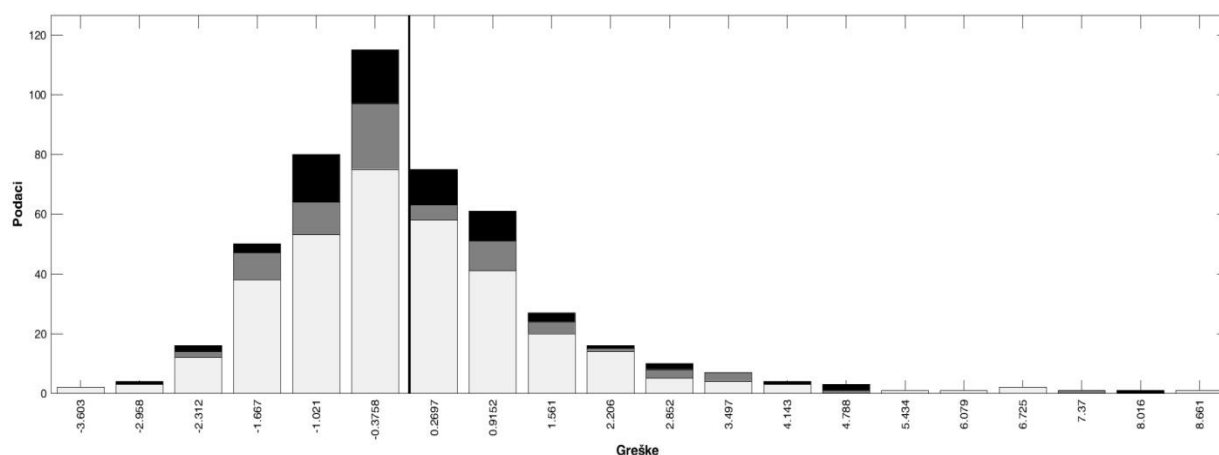
mjerena i brzine oscilovanja stijenske mase (PPV) može uspostaviti sljedeća statistički značajna korelacija:

$$PPV = \left(1.88 + \begin{bmatrix} -1.18 \\ -0.36 \\ 2.22 \\ -3.15 \\ -0.16 \\ -1.90 \\ 1.33 \\ 2.07 \\ -1.97 \\ -1.32 \end{bmatrix} \cdot tansig \begin{bmatrix} 4.35 \\ -1.59 \\ -2.95 \\ -0.18 \\ -4.03 \\ -0.08 \\ -2.37 \\ -0.40 \\ 4.03 \\ -2.60 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1.21 \\ 2.94 \\ 2.34 \\ 0.80 \\ 3.82 \\ -1.56 \\ -1.93 \\ -0.19 \\ -1.17 \\ -1.62 \end{bmatrix} \cdot D + \begin{bmatrix} -0.72 \\ 2.25 \\ -0.06 \\ -1.01 \\ 2.61 \\ 0.64 \\ -1.45 \\ -0.98 \\ -3.84 \\ -1.89 \end{bmatrix} \cdot Q_{max} + \begin{bmatrix} 0.89 \\ -1.11 \\ 1.25 \\ 0.72 \\ 4.80 \\ -0.65 \\ 4.15 \\ 0.60 \\ 2.99 \\ 4.62 \end{bmatrix} \cdot Q_{int} \right) \quad (5.26)$$

Poređenjem procjenjenih i izmjerenih vrijednosti PPV za podatke treniranja (obučavanje), validacije i testiranja prikazano je na slici 5. 36 za vještačke neuronske mreže. Rezultati su pokazali da formirani model 5.26 daje prihvatljivu procjenu PVV jer je koeficijen korelacije $R > 0,7$, a korjen srednje kvadratne greške je $RMSE = 1,6$ što se vidi na slici 5. 36.



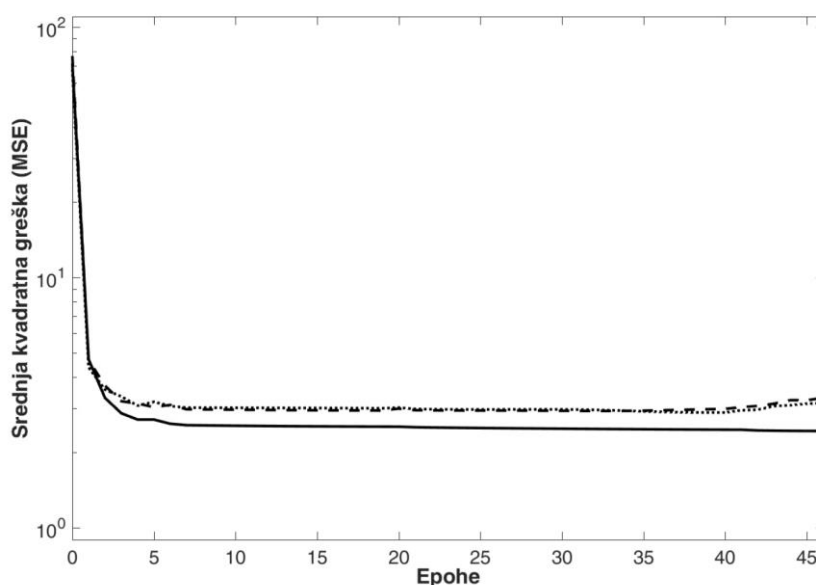
Slika 5. 36 Poređenje realno osmatranih i procjenjenih vrijednosti brzine oscilovanja stijenske mase za različite setove podataka pri formiranju modela (5.26) [Figun i dr. 2021]



Slika 5. 37 Analiza raspodjele grešaka modela (5.26). Svjetlosivi binovi se odnose na raspodjelu greške za trening set, tamnosivi binovi na raspodjelu greške za validacioni set, dok crni binovi označavaju raspodjelu greške za test set [Figun i dr. 2021]

Može se pokazati da greške u procjeni modela 5.26 imaju normalnu raspodjelu, što znači da je model 5.26 obuhvatio sve statistički značajne veze između kontrolnih parametara i brzine oscilovanja stijenske mase (slika 5. 37).

Da bismo isključili uticaj tzv. prekomjernog fitovanja (overfitting), može se pokazati da veličina srednje kvadratne greške opada sa povećanjem epoha treniranja mreže za trening i validacioni skup (slika 5. 38). Znači, da proces obučavanja neuronskih mreža sa deset jedinica u skrivenom sloju ne pokazuje znake pretreniranja, odnosno srednja kvadratna greška za testiranje i validaciju opada približno srazmjerno greški za treniranje.



Slika 5. 38 MSE (srednja kvadratna greška) u funkciji broja epoha za treniranje. Puna linija – trening set, tačkasta linija – validacioni set, isprekidana linija – test set [Figun i dr. 2021]

Ukoliko poredimo rezultate modela 5.26 sa najčešće korišćenim konvencionalnim modelom u inženjerskoj praksi [Langefors i Kihlstrom, 1963]:

$$PPV = 2,75 \left[\sqrt{(Q_{max}/R^{2/3})} \right]^{0,42} \quad (5.27)$$

jasno je da model 5.26 daje daleko preciznije procjene maksimalne brzine oscilovanja stijenske mase od modela 5.27.

U ovoj disertaciji razvijen je novi model procjene brzine oscilovanja stijenske mase u obliku nelinearne funkcije brzine oscilovanja od glavnih parametara miniranja: rastojanja od mjesta miniranja do mjesta mjerenja i količine eksploziva. Pokazano je da je razvijeni model statistički značajan i da prestavalja fizički moguće interakcije. Tako formirani model na bazi neuronskih mreža može biti dalje korišćen za:

- predviđanje vrijednosti PPV na osnovu proizvoljnih ulaznih podataka i
- optimizaciju vrijednosti parametara miniranja, putem analize matrice svih mogućih vrijednosti ulaznih podataka, kao i njihovih međusobnih kombinacija. Na taj način, moguće je odrediti one vrijednosti rastojanja od mjesta eksplozije, dubina minskih bušotina i dr. (zavisno od broja i vrste ulaznih podataka) koje daju najmanju vrijednost maksimalne brzine oscilovanja stijenske mase, čime se u značajnoj mjeri redukuje potreban broj miniranja na površinskim kopovima.

6 DISKUSIJA I KOMENTARI ISTRAŽIVANJA

6.1 Ocjena uticaja miniranja na okolne objekte na površinskom kopu "Hardovac" - Doboj

U cilju povećanja pouzdanosti modela predviđanja, prvo su sistematizovani i analizirani podaci dobijeni terenskim mjerenjima za četvorogodišnji period na površinskom kopu "Hardovac", a zatim je izvršena analiza izmjerenih karakteristika potresa pomoću postojećih standarda. Izvršena analiza registrovanih vrijednosti potresa svih miniranja prema standardu DIN 4150-3. za stambene i industrijske objekte, pokazala je da su vrijednosti brzina oscilovanja tla, u odnosu na propisane standarde frekvencija, ispod graničnih vrijednosti. Također su proračunate vrijednosti dozvoljene količine eksploziva i sigurnosna rastojanja na osnovu više standarda: ruski kriterijum prema GOST-6249-52, njemački kriterijum prema DIN 4150 III, američki standard prema USBM-RI-8507 i švajcarski standard prema SN 640312. Korišćenjem konvencionalnih modela zaključeno je da se za niže frekvencije oscilovanja treba koristiti manja količina eksploziva kako bi vrijednosti PPV bile u dozvoljenim granicama za iste vrijednosti sigurnosnih rastojanja.

Analiza je izvršena pomoću višestruke linearne regresije (MLR) i vještačkih neuronskih mreža (ANN) za utvrđivanje korelacije između maksimalne brzine oscilovanja, odgovarajuće frekvencije i kontrolnih faktora. Model procjene uticaja potresa od miniranja formiran je na osnovu definisanja matematičke zavisnosti frekvencije oscilovanja kao izlaznog parametra u funkciji ulaznih parametara. Za formiranje modela korišteno je sedam ulaznih parametara: ukupna količina eksploziva (Q_{max}), količina eksploziva po intervalu usporenja (Q_i), rastojanje od mjernog mjesta do mjesta miniranja (D_{BL}), dužine minskih bušotina (D_R), broja bušotina (N), rastojanja između redova bušotina (D_a) i rastojanja između bušotina u redu (D_B). Izlazne promjenljive modela ANN su: maksimalna brzina oscilovanja i frekvencija.

Dalje su postojeći DIN 4150 i američki standard izraženi u obliku nelinearne veze između graničnih vrijednosti PPV i frekvencija oscilacija korišćenjem jednostavne metode nelinearne regresije, za različite tipove objekata. Dobijeni rezultati su pokazali da je koeficijent determinacije R^2 u rasponu 0,99-1,0 zavisno od vrste objekata, dok je srednja kvadratna grešak MSE u rasponu 0,057 - 0,0282. Zatim su utvrđene statistički značajne korelacije ($R=0,91$) između registrovanih vrijednosti PPV, maksimalne količine eksploziva i rastojanje od mjesta miniranja do mjesta mjerenja, koje su se dalje koristile za određivanje izolinja sigurnih rastojanja za različite količine eksploziva pomoću Langefors-Kilhstromovog modela.

Dobijeni rezultati istraživanja u doktorskoj disertaciji ukazuju da i MLR i ANN pristup pružaju statistički značajne modele procjene, koji omogućavaju izračunavanje sigurnosnih rastojanja za različitu količinu eksploziva. Osim toga, MLR pristup omogućava dalju detaljniju analizu prirode uticaja kontrolnih faktora na frekvenciju vibracija pri miniranju. Konkretno, izvršena analiza ukazuje na postojanje statistički značajnih dvofaktorskih interakcije, između svih analiziranih ulaznih faktora. Rastojanje između bušotina D_B (m), dubina bušotine D_R (m) i broj bušotina N imaju jak negativan nelinearni efekat na frekvenciju oscilovanja, dok rastojanje između redova bušotina D_a (m) i rastojanje od mjesta miniranja do mjesta mjerenja D_{BL} (m) imaju slab nelinearni negativni uticaj na frekvenciju oscilovanja. S druge strane, ukupna količina eksploziva Q_{max} (kg) i količina eksploziva po intervalu usporenja Q_i (kg) imaju jak pozitivan uticaj na frekvenciju oscilovanja.

Kao rezultat izvedenih istraživanja i primjenjujući razvijeni model za analiziranu studiju slučaja, konstruisane su izolinije sigurnosnog rastojanja za različitu ukupnu količinu eksploziva koji se koristi i različite vrste građevinskih konstrukcija.

6.2 Ocjena uticaja miniranja na objekte u gradskim uslovima lokacija Skyline - Beograd

Za predviđanje potresa od miniranja na lokaciji poslovno-stambenog objekta Skyline- Beograd, koristili smo, najčešće korišćen konvencionalni model za procjenu vrijednosti maksimalne brzine oscilovanja u inženjerskoj praksi Langefors i Kihlstrom. Analiza je pokazala da primjenjeni konvencionalni model, ne daju zadovoljavajuće rezultate u pogledu procjenjenih vrijednosti maksimalne brzine oscilovanja, jer je koeficijent determinacije ($R=0,20$) ispod vrijednosti 0,8, dok je korjen srednje kvadratne greške $RMSE=2.2$.

Poređenjem procjenjenih i izmjerenih vrijednosti PPV za podatke obučavanje, validacije i testiranja za vještačke neuronske mreže, pokazali su da formirani model daje prihvatljivu procjenu vrijednosti brzine oscilovanja stijenske mase jer je koeficijent determinacije $R>0,7$, a korjen srednje kvadratne greške je $RMSE=1,6$

Uticajnost pojedinih kontrolnih parametara, koji su korišćeni u analizi ukupna količina eksploziva (Q_{max}), količina eksploziva po intervalu usporenja (Q_i) i rastojanje od mjesta miniranja do mjesta mjerenja (D_{BL}), pokazuju da sa povećanjem rastojanja od mjesta mjerenja do mjesta miniranja opada brzina oscilovanja stijenske mase, dok ista raste sa povećanjem količine eksploziva po intervalu usporenja. Ukupna količina eksploziva nema statistički značajan uticaj, u razmatranom rasponu, na jačinu potresa od miniranja.

U procesu istraživanja izvršeno je modeliranje predviđanja potresa pri miniranju na površinskim kopovima primjenom MLR i ANN, zasnovano na podacima registrovanim terenskim istraživanjima. Parametri modela definisani su analizom bušačko-minerskih parametara pri miniranju, kao i istraživanjem velosigrama dobijenih mjerenjem potresa pri miniranju.

7 ZAKLJUČAK

Prekomjerno oscilovanje tla, koje može nastati pri miniranju na površinskim kopovima predstavlja potencijalno negativnu prateću pojavu miniranja, s obzirom na to da može da izazove opasne vibracije okolnih objekata koje mogu prekoračiti dozvoljene nivoe vibracija, usljed čega može doći do pojave deformacija na objektima. Stoga je procjena veličine oscilacija tla značajna, jer se time omogućava kontrola intenziteta potresa i sprečavaju moguća oštećenja okolnih građevinskih objekata.

Utvrđivanje zakonitosti oscilovanja stijenske mase pri izvođenju minerskih radova predstavlja aktuelnu temu istraživanja u domaćim i međunarodnim naučno- stručnim krugovima, o čemu svjedoči značajan broj radova sa publikovanim rezultatima recentnih istraživanja, koji su objavljeni u referentnim međunarodnim časopisima.

Doktorska disertacija sa temom “Modeliranje oscilovanja stijenske mase pri miniranju u funkciji zaštite objekata“ obuhvata veoma aktuelna i značajna istraživanja iz oblasti matematičkog modeliranja u rudarstvu kao osnove za efikasno planiranje i upravljanje procesom bušenja i miniranja, a samim tim i samom eksploatacijom čvrstih mineralnih sirovina.

7.1 Opšti pregled

Realizovanim istraživanjem uspostavljena je fizički moguća i statistički značajna korelacija između karakteristika vibracija tla, bušačko-minerskih parametara i sigurnosnih rastojanja od građevinskih objekata. Vibracije tla nastale miniranjem, kao i njihov uticaji na okolne objekte, istraženi su u stijenskoj masi koju čini krečnjak, kao jedan od najzastupljenijih tipova ležišta tehničko-građevinskog kamena u Republici Srpskoj i Srbiji a u kojem se najčešće i vrši miniranje.

Karakteristike vibracija tla prilikom miniranja koje smo izučavali su maksimalna brzina oscilovanja (PPV) i frekvencija oscilovanja (FR).

Bušačko-minerski parametri koji su se izučavali su: ukupna količina eksploziva (Q_{max}), količina eksploziva po intervalu usporenja (Q_i), rastojanje od mjernog mjesta do mjesta miniranja (D_{BL}), dužine bušotine (D_R), broja bušotina (N), rastojanja između redova bušotina (D_a), rastojanja između bušotina u redu (D_B) i sigurnosna rastojanja do građevinskih objekata.

U ovoj disertaciji razvijen je model za procjenu sigurnih rastojanja od mjesta miniranja, za različite tipove konstrukcija prema standardu DIN-4150. Ovaj model je formulisan u obliku jednostavnog nelinearnog eksplicitnog matematičkog izraza koji pokazuje zavisnost brzine i frekvencije

oscilovanja pri miniranju od ulaznih kontrolnih faktora, koristeći MLR pristup i ANN metodologiju. Istraživanja su uzvedena u tri faze:

- prva faza se sastojala od detaljne analize literaturnih podataka i prethodnih istraživanja iz predmetne oblasti. Pregleda stanja, regulative, postojećih modela predikcije i metoda za izradu sigurnih zona u okolini građevinskih objekata;
- faza terenskih istraživanja sastojala se od prikupljanja podataka vezanih za parametre bušenja i miniranja, registrovanje parametara potresa tj. oscilovanja stijenske mase (brzinu i frekvenciju oscilovanja), prikupljanje osnovnih podataka o predmetnoj lokaciji i okolnim građevinskim objektima koji su najugroženiji od potresa izazvanih miniranjem na odabranim lokacijama i
- u trećoj fazi istraživanja izvršena je statistička obrada podataka dobijenih na terenu i formirani su modeli predikcije i konstruisane su karte sigurnog građenja.

Izradom ove doktorske disertacije, definisan je novi model predviđanja oscilovanja stijenske mase na osnovu terenskih istraživanja, primjenom konvencionalnog pristupa i pomoću vještačkih neuronskih mreža, na površinskom kopu "Hardovac" - Ševarlije i lokaciji poslovno-stambene zgrade Skyline - Beograd. Štaviše, terenski prikupljeni podaci, kao i podaci dobijeni korišćenjem formiranih modela, su korišćeni za razvoj metodologije za ocjenu uticaja miniranja na objekte, u zavisnosti od vrste konstrukcije i strukturnih karakteristika, a u funkciji njihove udaljenosti od minskog polja.

7.2 Naučni doprinos istraživanja

Naučni doprinos rezultata istraživanja realizovanih u okviru predmetne doktorske disertacije ogleda se u sljedećem:

- uspostavljene su statistički značajne i fizički moguće korelacije između parametara miniranja i sigurnosnih rastojanja do objekata u određenim geološkim uslovima, primjenom višestruke linearne regresije i vještačkih neuronskih mreža, što predstavlja originalni naučni doprinos u međunarodnoj naučnoj javnosti;
- eksplicitni matematički modeli ukazali su na postojanje statistički značajnih i fizički mogućih dvofaktorskih interakcija, što ukazuje na međuzavisnost više parametara, čak i na mogućnost postojanja statistički značajne dvofaktorske interackije u odnosu na uticaja individualnih kontrolnih parametara, koji ne moraju biti statistički značajni;
- rezultati istraživanja predstavljaju značajan naučni doprinos rješavanju kompleksnog problema projektovanja, praćenja i upravljanja procesom miniranja na površinskim kopovima, jer

obuhvataju veoma aktuelna i značajna istraživanja iz oblasti matematičkog modeliranja u rudarstvu.

- prema saznanju doktoranta, rezultati izvedenih istraživanja predstavljaju prvi primjer sveobuhvatne analize uticaja potresa od miniranja na građevinske objekte u domaćoj naučnoj javnosti, na primjeru površinskog kopa na teritoriji Republike Srpske. S obzirom da ne postoje domaći standardi za ocjenu uticaja potresa od miniranja, rezultati izvedenih istraživanja mogu poslužiti kao smjernice za definisanje nacionalnih standarda u ovoj oblasti.

7.3 Mogućnost primjene formiranih modela u inženjerskoj praksi

U inženjerskoj praksi, rezultati doktorske disertacije mogu se direktno primjeniti na PK "Hardovac" - Ševarlije i u gradskoj sredini na lokaciji objekta Skyline – Beograd. Dobijeni rezultat imaju inženjerski doprinos, jer se prikazana metodologija modeliranja, može primjeniti i na drugim površinskim kopovima i prilikom miniranja u gradskim sredinama, pri predviđanju potresa nastalih od miniranja u istim ili sličnim geološkim uslovima, i stanju ispućalosti i fizičko-mehaničke oštećenosti radne sredine. Na ovaj način potreba za čestim mjerenjima vibracija izazvanih eksplozijom može se značajno smanjiti, dok bi sigurnost i zaštita objekata u okviru određenog kamenoloma i u neposrednoj blizini miniranja bila znatno povećana.

Definisani modeli procjene oscilovanja stijenske mase doprinose optimizaciji projektovanja minerskih radova na površinskim kopovima, u smislu preciznijeg određivanja sigurnosnih rastojanja minskog polja od okolnih građevinskih objekata u cilju zaštite istih.

7.4 Preporuke za buduća istraživanja

Razvijeni modeli nisu obuhvatili i uticaj deformabilnih karakteristika geotehničke sredine kroz koju se prostiru udarni talasi. U daljem radu, bilo bi poželjno da se modeli prošire i analizom uticaja geotehničke sredine, što bi podrazumjevalo izvođenje statistički značajnog broja laboratorijskih ispitivanja i terenskih istraživanja, koja će omogućiti dobijanje dovoljnog broja podataka za analizu i evaluaciju uticaja parametara geotehničke sredine na veličinu oscilovanja stijenske mase pri miniranju. Parametri koji bi mogli da se analiziraju su: dinamički modul elastičnosti i deformabilnosti stijenske mase, ispućalost stijenske mase, geometrijske karakteristike ispućalosti (orijentacija pukotina u prostoru u odnosu na pravac udarnog talasa, i pozicije objekata u odnosu na mjesto miniranja), i sl.

Dalja istraživanja mogla bi se usmjeriti i na detaljnije razmatranje karakteristika građevinskih objekata, kada su u pitanju konstruktivne karakteristike, kvalitet i starost gradnje, vrsta korišćenih materijala, vrsta konstrukcije, kvalitet održavanja, spratnost, itd.

Uključivanjem parametara radne sredine i karakteristika konstrukcije u analizu prethodno formirani modeli bi povećali opštost primjene, sa jedne strane, a omogućili bi i pouzdanije definisanje uticaja miniranja na kopovima na postojeće građevinske objekte.

8 LITERATURA

1. ABEM (2010) Vibralock Vibration Monitor, User's Manual Version 1.2.9: 63 p.
2. Afeni B., Osasan S.K. (2009) Assessment of noise and ground vibration induced during blasting operations in an open pit mine - A case study on Ewekoro limestone quarry, Nigeria. *Mining Science and Technology (China)* 19(4): 420-424.
3. Aimone-Martin, C.T., Martell, M.A., McKenna, L.M., Siskind, D.E., Dowding, C.H. (2003) Comparative study of structure response to coalmine blasting, Office of surface mining reclamation and reinforcement, Appalachian Regional Coordinating Center Pittsburgh: 158p.
4. Alvarez-Vigil, A.E., Gonzales-Nicieza, C., Lopez Gayarre F., Alvarez-Fernandez, M.I. (2012) Predicting blasting propagation velocity and vibration frequency using artificial neural network, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 55: 108-116.
5. Ambraseys, N.R., Hendron, A.J. (1968) Dynamic behavior of rock masses: rock mechanics in engineering practices, *Rock mechanics in Engineering practices*. London, John Wiley: 203-207.
6. Amnieh, B.H., Mozdianfard, M.R., Siamaki, A. (2010) Predicting of blasting vibrations in Sarcheshmeh copper mine by neural network. *Safety Science*, 48 (3): 319-325.
7. Amnieh H.B., Siamaki A., Soltani S. (2012) Design of blasting pattern in proportion to the peak particle velocity (PPV): artificial neural networks approach, *Safety Science*, 50(9): 1913-1916.
8. Armaghani, J.D., Hajihassani, M., Mohamad, E.T., Marto, A., Noorani, S.A. (2014) Blasting induced flyrock and ground vibration prediction through an expert artificial neural network based on particle swarm optimization. *Arabian Journal of Geosciences*. 79(12): 5383–5396
9. AS 2187-2 (1993), Australian Standard: 76 p.
10. Berta, G. (1990) *Explosives: an engineering tool*, Italesplosivi, Milano: 483 p.
11. Blair, B.E., Duvall, W.I. (1954) Evaluation of gages for measuring displacement, velocity, acceleration of seismic pulses, USBM RI 5073: 21 p.
12. British Standard BS 7385-1 (1990) Evaluation and measurement for vibration in buildings. Part-1: Guide for measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings, 24p.
13. British Standard BS 7385-2 (1993) Evaluation and measurement for vibration in buildings. Part - 2 Guide to damage levels from groundborne vibration: 16 p.

14. Bureau of Indian Standard (1973) Criteria for safety and design of structures subjected to underground blast, ISI, India: 13 p.
15. Chiquito, M., López, L.M., Castedo, R., Pérez-Caldentey, A., Santos, A.P. (2019) Behaviour of retrofitted masonry walls subjected to blast loading: Damage assessment. *Engineering Structures*: 201 p.
16. Corser, P. (1979) Wall cracking in residential structures from surface mining and hard rock construction blasts. M.S. Thesis DCE. Northwestern Univ. Evanston III: 199 p.
17. Crandell, F.J. (1949) Ground vibration due to blasting and its effect upon structures, *Journal of the Boston Society of Civil Engineers*, 49(2): 152-168.
18. Crum, S.V., Siskind, D.E., Pierce, W.E., Radcliffe, K.S. (1995) Ground vibrations and airblasts monitored in Swedesburg, Pennsylvania, from blasting at the McCoy Quarry, USBM, Minneapolis, MN 55417, Department of Environmental Resources: 129 p.
19. Cybenko, G. (1989) Approximation by superpositions of a sigmoidal function, *Mathematics of Control Signals and Systems (MCSS)* 2: 303-314
20. Čulibrk, R. (2002) Eksploatacija i priprema tehničkog kamena, Monografija, Univerzitet u Novom Sadu, Građevinski fakultet Subotica: 315 str.
21. Davies, B., Farmer, I.W., Attewell, P.B. (1964) Ground vibrations from shallow sub-surface blasts, *The Engineer* 217: 553-559.
22. Dehghani, H., Ataee-pour, M. (2010) Development of a model to predict peak particle velocity in a blasting operation, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 48(1): 51-58.
23. Devine, J.F., Duvall, W.I. (1963) Effect of charge weight on vibration levels for millisecond delayed quarry blast, *Earthquake Notes, Seismological Society of America*, 34(2): 583 p.
24. Dindarloo, S.R. (2015) Prediction of blast-induced ground vibrations via genetic programming. *International Journal of Mining Science and Technology* 25(6): 1011–1015
25. Dizdar, D. (2006) Kvantitativne metode, Kineziološki fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 356str.
26. Dnevnik miniranja Carmeus za 05.07.2013. godinu
27. Dogan, O., Anil, O., Akbas, S.O., Kantar, E., Erdem, R.T. (2013) Evaluation of blast-induced ground vibration effects in a new residential zone. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 50: 168-181.

28. Dopunski rudarski projekat eksploatacije i prerade krečnjaka na površinskom kopu „Hardovac“ Ševarlije Doboj, (2006). Institut za građevinarstvo „IG“ d.o.o. Banja Luka
29. Dopunski rudarski projekat eksploatacije i prerade krečnjaka na površinskom kopu „Hardovac“ Ševarlije kod Doboja iznad i ispod nivoa etaže 205 m, (2010). Rudprom d.o.o. Prijedor
30. Dowding, C.H. (1971) Response of buildings to ground vibrations from construction blasting, PhD Thesis, University of Illinois, Urbana - Champaign: 219 p.
31. Dowding, CH., Beck, WK., Atmatzidis, DK. (1980) Blast vibration implications of cyclic shear behavior of model plaster panels, ASTM Geotechnical Testing Journal, 3(2): 81-90.
32. Dowding C.H., Corser P.G. (1981) Cracking and Construction Blasting. Importance of Frequency and Free Response. Journal of the Construction Division, ASCE.,107(1): 89-106.
33. Dowding, C.H. (1985) Blast vibration monitoring and control. Englewood Cliffs, NJ:Prentice-Hall: 297 p.
34. Duvall, W.I., Petkof, B. (1959) Spherical propagation of explosion-generated strain pulses in rock, USBM RI 5483: 56 p.
35. Duvall W.I., Fogelson D.E. (1962) Review of criteri for estimating damage to residences from blasting vibrations USBM RI 5968: p.19
36. Ebrahimi, E., Monjezi, M., Khalesi, M.R., Armaghani, J.D. (2015) Prediction and optimization of back-break and rock fragmentation using an artificial neural network and a bee colony algorithm. Bulletin of Engineering Geology and the Environment.75(1): 27-36
37. Edwards, AT., Northwood, TD. (1960) Experimental studies of the effects of blasting on structures, National Research Council, Ottawa, Canada: 538-546
38. Egan, J., Kermode, J., Skyrman, M., Turner L. (2001) Ground vibration monitoring for construction blasting in urban areas, Final report state of California Department of Transportation: 16 p.
39. Faramarzi, F., Ebrahimi Farsangi, MA., Mansouri, H. (2014) Simultaneous investigation of blast induced ground vibration and airblast effects on safety level of structures and human in surface blasting. International Journal of Mining Science and Technology 24(5): 663–669
40. Figun, Lj., Kostić, S., Milivojević, N., Trajković, S. (2021) Procena jačine potresa od miniranja u gradskoj sredini primenom veštačkih neuronskih mreža, Zemljotresno inženjerstvo i geotehnički aspekti građevinarstva, Vrnjačka Banja: 210-220.

41. Figun, Lj., Kostić, S., Malbašić, V., Agbaba, S. (2016) Definisanje sigurnosnih zona pri miniranju na površinskom kopu Hardovac Ševarlije - Doboj, Beograd: 423-434,
42. Garai D., Agrawal H., Mishra A.K., Kumar S., (2018) Influence of initiation system on blast-induced ground vibration using random forest algorithm, artificial neural network, and scaled distance analysis, *Mathematical Modelling of Engineering Problems* 5(4): 418-426.
43. German Standards (1999) Part 3-Structural vibrations in building, effects on structures, DIN 4150, Berlin, Germany: 11 p.
44. Ghosh, A., Daemen, J.J.K. (1983) A simple new blast vibration predictor (based on wave propagation laws), *Proceedings 24th U.S. Symposium on Rock Mechanics*, Texas, USA: 151-161.
45. Gupta, R.N., Roy, P.P., Singh, B. (1987) On a blast induced blast vibration predictor for efficient blasting, In: *Proceedings of the 22nd International Conference on safety in Mines Research Institute*, Beijing, China: 1015-1021.
46. Hajihassani, M., Armaghani, D.J, Marto, A, Mohamad, E.T. (2015a) Ground vibration prediction in quarry blasting through an artificial neural network optimized by imperialist competitive algorithm. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*; 74(3): 873–888.
47. Hajihassani, M., Armaghani, D.J., Monjezi, M., Mohamad, E.T., Marto, A. (2015b) Blast-induced air and ground vibration prediction: A particle swarm optimization-based artificial neural network approach. *Environmental Earth Science*; 74(4): 2799–2817.
48. Hasanipanah, M., Naderi, R., Kashir, J., Noorani, S.A., Qaleh, A.Z.A. (2017) Prediction of blast-produced ground vibration using particle swarm optimization. *Engineering with Computers*; 33(2): 173–179.
49. Heath, D.J., Gad, E.F., Wilson, J.L. (2005) Establishing damage thresholds for unreinforced masonry using Off-Axis Prism Tests, Stewart, Mark G (Editor); *Australian Structural Engineering Conference Sydney*, Engineers Australia: 865-875.
50. Hecht-Nielsen, R. (1989) Kolmogorov's mapping neural network existence theorem. In: *Proceedings of the international conference on Neural Networks*. New York, USA: IEEE Press: 11-14.
51. Holmberg, R., Persson, P.A. (1979) Design of tunnel perimeter blasthole patterns to prevent rock damage, *Proceedings Tunnelling '79*: 280-283.
52. Hudaverdi, T. (2012) Application of multivariate analysis for prediction of blast-induced ground vibrations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 43: 300–308.

53. Hudaverdi, T., Akyildiz O. (2019) Evaluation of capability of blast-induced ground vibration predictors considering measurement distance and different error measures. *Environmental Earth Sciences* 78: 421
54. Hush, D.R. (1989) Classification with neural networks: a performance analysis. In: *Proceedings of the IEEE international conference on systems engineering*. Ohio, USA: Dayton: 277-280.
55. Instantel (2016) Minimate blaster, Blast Vibration and Overpressure Monitor, Xmark Corporation, Instantel: 10 p.
56. Iphar, M., Yavuz, M., Ak, H. (2008) Prediction of ground vibrations resulting from the blasting operations in an open-pit mine by adaptive neuro-fuzzy inference system, *Environmental Geology* 56(1): 97-107.
57. ISEE. (2009) Field Practice Guidelines for Blasting Seismographs, International Society of Explosives Engineers, Standards Committee, Final Standard: 5 p.
58. ISO 5348-3. (1998) Mechanical vibration and shock-Mechanical mounting of accelerometers: 12 p.
59. Jimeno, C.L., Jimeno, E.L., Carcedo, F.J.A. (1995) Drilling and blasting of rocks, A.A.Balkema, Rotterdam, Brookfield: 391 p.
60. Kaastra, I., Boyd, M. (1996) Designing a neural network for forecasting financial and economic time series. *Neurocomputing*, 10(3): 215-236.
61. Kahriman, A. (2004) Analysis of parameters of ground vibration produced from bench blasting at a limestone quarry. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 24: 887–892.
62. Kamali, M., Ataei, M. (2011) Prediction of blast induced vibrations in the structures of Karoun III power plant and dam, *Journal of Vibration and Control* 17(4): 541-548.
63. Kamali, M., Ataei, M. (2011a), Prediction of blast induced ground vibrations in Karoun III power plant and dam: a neural network, *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*: 110 p.
64. Kanellopoulos, I., Wilkinson, G.G. (1997). Strategies and best practice for neural network image classification. *International Journal of Remote Sensing*, 18(4), 711-725.
65. Karadogan, A., Kahriman, A., Ozer, U. (2014) A new damage criteria norm for blast-induced ground vibrations in Turkey, *Arabian Journal Geosciences*, 7: 1617–1626.

66. Kesimal, A., Ercikdi, B., Cihangir, F. (2008) Environmental impacts of blast-induced acceleration on slope instability at a limestone quarry. *Environmental Geology*, 54: 381-389.
67. Khandelwal, M., Singh, T.N. (2005) Prediction of blast induced air overpressure in opencast mine. *Noise Vibration Worldwide*; 36: 7–16.
68. Khandelwal, M., Singh, T.N. (2006) Prediction of blast induced ground vibrations and frequency in opencast mine: A neural network approach. *Journal of Sound and Vibration* 289: 711-725.
69. Khandelwal, M., Singh, T.N. (2007) Evaluation of blast-induced ground vibration predictors, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 27(2): 116-125.
70. Khandelwal, M., Singh, T.N. (2009) Prediction of blast-induced ground vibration using artificial neural network, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 46: 1214-1222.
71. Khandelwal, M., Kumar, D.L., Yellishetty, M. (2009) Application of soft computing to predict blasting-induced ground vibration, *Engineering with Computers*: 117-125.
72. Khandelwal, M. (2010) Evaluation and prediction of blast-induced ground vibration using support vector machine, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*: 47p.
73. Khandelwal, M., Kumar, D.L., Yellishetty, M. (2011) Application of soft computing to predict blast-induced ground vibration. *Engineering Computations*; 27(2): 117–125.
74. Khandelwal, M., Monjezi, M. (2013) Prediction of backbreak in open-pit blasting operations using the machine learning method. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 46(2): 389–396
75. Kim, D.S., Lee, J.S. (2000) Propagation and attenuation characteristics of various ground vibrations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 19: 115–126.
76. Knežević, K. (2017) Analiza varijance i dizajn eksperimenta, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva: 50 str.
77. Konya, J.C., Walter E.J. (1990) Surface blast design. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey: 303 p.
78. Kostić, S., Figun, Lj. (2022) ANN and MLR-based estimation of allowed blast-induced vibrations for safe constructions at Hardovac limestone quarry (Bosnia and Herzegovina). *Environmental Earth Sciences* 81(2): 1-14
79. Kostić, S. (2014), Matematičko modelovanje pobuđenih i indukovanih potresa u rudarstvu, Zadužbina Andrejević: 102 str.

80. Kovačević, Č. (2005) Bušačko-minerski radovi u praksi građenja, Časopis Izgradnja, Beograd: 398 str.
81. Kričak, L. (2006) Seizmika miniranja, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd: 246 str.
82. Krose, B., Smagt, P. (1996) An Introduction to neural networks. 8th edition, University of Amsterdam: 135 p.
83. Krsnik, J. (1989) Miniranje, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb: 178 str.
84. Kumar S., Choudhary B.S. (2019) Prediction of blast-induced ground vibration by ANN, USBM and CMRI formulae for safety of the structures near surface coal mines. Journal of Mines, Metals and Fuels 67(7): 351-356.
85. Kuzu, C. (2008) The importance of site-specific characters in prediction models for blast - induced ground vibrations. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 28: 405-414.
86. Landau, S., Everitt, B. (2004). A handbook of statistical analyses using SPSS (Vol. 1). Boca Raton, FL: Chapman & Hall/CRC: 339 p.
87. Langefors, U., Kihlstrom, B. (1963) The modern techniques of rock blasting, 2nd edn. Wiley, New York: 438 p.
88. Langefors, U., Kihlstrom, B. (1978) The modern techniques of rock blasting, New York, John Wiley, 437 pp.
89. Lapčević, R., Kostić, S., Pantović, R., Vasović, N. (2014) Prediction of blast-induced ground motion in a copper mine, International Journal rock mechanics and mining sciences: 19-25.
90. Luccioni, B.M., Ambrosini, R.D., Danesi, R.F. (2004) Analysis of building collapse under blast loads, Engineering Structures, 26: 63–71.
91. Majstorović, S., Malbašić, V. (2013) Uvod u rudarstvo, Rudarski fakultet Prijedor:330 str.
92. Majstorović, S., Malbašić, V., Čelebić, M. (2015) Perspectives for development of technical building stone-limestone in the Republic Srpska, Archives for technical sciences: 27-36
93. Malbašić, V. (2021) The strategy of management and utilization of mineral raw materials in the Republic of Srpska through the globalization era, Arhives for Technical Sciences, 25(1), 17-28
94. Marinović, D. (2020) Optimizacija potresa bušenja i miniranja primjenom postupka interaktivnog projektovanja minskog polja PK Hardovac, Diplomski rad. Rudarski fakultet Prijedor: 58 str.

95. Medearis, K. (1978) Rational damage criteria for low-rise structures subjected to blasting vibrations, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. 611-621.
96. Mitrović, D. (2011) *Mineralne sirovine Republike Srpske*, Republički zavod za geološka istraživanja Zvornik: 574 str.
97. Mohamed, M.T. (2009) Artificial neural network for prediction and control of blasting vibrations in Assiut (Egypt) limestone quarry. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 46: 426-431.
98. Mohamed, M.T. (2011) Performance of fuzzy logic and artificial neural network in prediction of ground and air vibrations, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 48(5): 845-851.
99. Mohamad, E.T.; Noorani, S.A.; Armaghani, D.J.; Saad, R. (2012) Simulation of blasting induced ground vibration by using artificial neural network. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17: 2571–2584.
100. Mohamadnejad, M., Gholami, R., Ataei, M. (2012) Comparison of intelligence science techniques and empirical methods for prediction of blasting vibrations. *Tunnelling and Underground Space Technology* 28: 238-244.
101. Monjezi, M., Ahmadi, M., Sheikhan, M., Bahrami, A., Salimi, A. (2010) Predicting blast-induced ground vibration using various types of neural networks. *Soil Dynamics Earthquake Engineering*; 30(11): 1233–1236.
102. Monjezi, M., Ghafurikalajahi, M., Bahrami, A. (2011) Prediction of blast-induced ground vibration using artificial neural networks. *Tunnelling and Underground Space Technology* 26: 45-50.
103. Monjezi M., Hasanipanah M., Khandelwal, M. (2013) Evaluation and prediction of blast-induced ground vibration at Shur River Dam, Iran, by artificial neural network. *Neural Computing and Applications* 22: 1637-1643.
104. Morris, G., (1950) Vibration due to blasting and their effects on building structure, *The Engineer*: 394-395
105. Noren-Cosgriff, K.M., Ramstad, N., Neby A, Madshus, C. (2020) Building damage due to vibration from rock blasting, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 138:106331: 1-13
106. Negovanović, M. (2015) Model predviđanja potresa od miniranja na površinskim kopovima primenom simulacione metode Monte Karlo i Fazi logike, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu: 322 str.

107. Nelson, M., Illingworth, W.T. (1990) A practical guide to neural nets. Addison-Wesley, Reading: 344 p.
108. Nicholls, H.R., Johnson, C.F., Duvall, W.I. (1971) Blasting vibrations and their effects on structures, USBM RI 656: 105 p.
109. Nomis SeismoGraphs (2008) Nomis Supergraph and Mini Supergraph operating instructions. Birmingham: 19 p.
110. Oncu, M.E., Yon, B., Akkoyun, O., Taskiran, T. (2015) Investigation of blast-induced ground vibration effects on rural buildings. *Structural Engineering and Mechanics* 54: 545-560.
111. Ozcelik, M. (2018) Back analysis of ground vibrations which cause cracks in buildings in residential areas Karakuyu (Dinar, Afyonkarahisar, Turkey). *Nat Hazards* 92:497–509
112. Paola, J.D., Schowengerdt, R.A. (1995). A review and analysis of backpropagation neural networks for classification of remotely-sensed multi-spectral imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 16(16), 3033-3058.
113. Persson, P., Holmer, R., Lee, J. (1994) Rock blasting and explosive engineering, CRC Press, Inc, Distributed by International Society of Explosives Engineering, USA: 560 p.
114. Petrov, M. (1993) Smanjenje intenziteta potresa izazvanih miniranjem na kamenolomima Hercegovac i Max-Stoja, Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 5: 187-195
115. Popović, N. (1984) Naučne osnove projektovanja površinskih kopova, Univerzitete u Tuzli, Rudarsko geološki institut i fakultet: 971 str.
116. Prashanth, R., Nimaje, D.S. (2018) Estimation of ambiguous blast-induced ground vibration using intelligent models: A case study. *Noise Vibration Worldwide*; 49(4): 147–157.
117. Pravilnik o tehničkim normativima pri upotrebi eksplozivnih sredstava i miniranju u rudarstvu Službeni list SFRJ, 26/88 i 63/88: 95 str.
118. Purčić, N. (1991) Bušenje i miniranje, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, 441 str.
119. Ragam, P., Nimaje, D.S. (2018a) Monitoring of blast-induced ground vibration using WSN and prediction with an ANN approach of ACC dungri limestone mine, India. *Journal of Vibroengineering*; 20(2): 1051–1062.
120. Ragam, P., Nimaje, D.S. (2018b) Evaluation and prediction of blast-induced peak particle velocity using artificial neural network: A case study. *Noise Vibration Worldwide*; 49(3): 111–119.

- 121.Ragam, P., Nimaje, D.S. (2018c) Assessment of blast-induced ground vibration using different predictor approaches-A comparison. *Chemical Engineering Transactions*; 66: 487–492.
- 122.Rai, R., Singh, T.N. (2004) A new predictor for ground vibration prediction and its comparison with other predictors, *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences* 11(3): 178-184.
123. Reed, R.D., Marks, R.J. (1998) *Neural smithing: Supervised learning in feedforward artificial neural networks*. MIT Press Cambrige: 346 p.
- 124.Ripley, B.D. (1993) Statistical aspects of neural networks. *Networks and chaos-statistical and probabilistic aspects*, 50: 40-123.
- 125.Roy, P.P. (1991) Vibration control in an opencast mine based on improved blast vibration predictors, *Mining Science and Technology* 12(2): 157-165.
- 126.Roy, P.P. (2005) *Rock blasting effects and operations*. New Delhi: Oxford, IBH Publishing: 360 p.
- 127.Rumelhart, D.E., Hinton, G.E., Williams, R.J. (1986) Learning internal representation by error propagation. In: Rumelhart D.E, McClelland J.L (eds) *Parallel distribution processing: explorations in the microstructure of cognition*, vol 1. MIT Press, Cambridge: 318–362
- 128.Saadat, M., Khandelwal, M., Monjezi, M. (2014) 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*, 6(1): 67–76.
129. Savić, M. (2000) *Miniranje na površinskim kopovima*, RTB Bor, Institut za bakar Bor: 410 str.
- 130.Shoop, S.A., Daemen, J.J.K, (1983) Site-specific predictions of ground vibrations induced by blasting, In: Paper presented at the AIME spring meeting, Atlanta
- 131.Singh, D.P, Sastry, V.R. (1986) Rock fragmentation by blasting: influence of joint filling material. *Journal of Explosive. Engineering*: 18-27.
- 132.Singh, T.N., Kanchan, R., Saigal, K., Verma, A.K. (2004) Prediction of P-wave velocity and anisotropic property of rock using artificial neural networks technique. *Journal of Scientific and Industrial Research*;63: 32–38.
- 133.Singh, T.N., Singh, V. (2005) An intelligent approach to predict and control ground vibration in mines, *Geotechnical and Geological Engineering* 23(3): 249-262.

134. Siskind, D.E., Stagg, M.S., Kopp, J.W., Dowding, C.H. (1980), Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting, USBM RI 8507, International Society of Explosives Engineers: 74 p.
135. Siskind, D.E., Crum, S.V., Otterness, R.E., Kopp, J.W. (1989) Comparative study of blasting vibrations from Indiana surface coal mines, USBM RI 9226:41p.
136. Siskind, D.E. (2000) Vibrations from blasting, International Society of Explosives Engineers, 10: 120 p.
137. Skakić, N. (2001) Teorija vjerovatnoće i matematička statistika, Naučna knjiga Beograd: 342 str.
138. Sonmez, H., Gokceoglu, C., Nefeslioglu, H.A., Kayabasi, A. (2006) Estimation of rock modulus: For intact rocks with an artificial neural network and for rock masses with a new empirical equation. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 43: 224-235
139. Stojadinović, S. (2009) Seizmički efekti miniranja na površinskim kopovima i zaštita objekata od njihovog dejstva, Magistarska teza, Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet Bor: 158 str.
140. Stojadinović, S. (2013) Sprega neuronskih mreža i numeričkih modela za definisanje sigurnih rastojanja kod razletanja komada pri miniranju, Doktorska disertacija, Rudarsko - geološki fakultet Beograd: 154 str.
141. Svinkin, M.R. (2003), Drawbacks of blast vibration regulations, Proceedings of the Annual Conference on Explosives and Blasting Technique (vol. II), USA, Cleveland: 157–168
142. Tamrock, (1984) Handbook on surface drilling and blasting, Painofaktorit: 308 p.
143. Thoenen, J.R., Windes, S.L. (1942) Seismic effects on quarry blasting. Bulletin No. 442, USBM, Washington. 94 p.
144. Torano, J., Ramirez-Oyanguren, P., Rodriguez, R., Diego, I. (2006) Analysis of the environmental effects of ground vibrations produced by blasting in quarries. International Journal of Mining Reclamation and Environment 20(4): 249–266
145. Trajković, S., Slimak, Š., Lutovac, S. (2005) Tehnika miniranja i potresi, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd: 295 str.
146. Trajković, S., Tomković, M. (2019) Studija seizmičkih uticaja na okolne građevinske objekte kao posledica izvođenja miniranja u toku izvođenja radova na izgradnji poslovno-stambenog kompleksa Skyline Belgrade, faza 1 – objekat A i podzemna garaža u Ul. K. Miloša br. 90 – 92

u Beogradu. Agencija za inženjerske delatnosti i tehničko savetovanje Fluctus 032 Čačak, 394 str.

147. Uprošćeni rudarski projekat miniranja na PK „Hardovac” – Ševarlije Rudnik krečnjaka Doboj (2001). Rudarski institut Prijedor
148. Vasović, D. (2016) Modelovanje ponašanja arhitektonskih objekata usled potesa od miniranja na površinskim kopovima, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu: 178 str.
149. Verma, A.K., Singh, T.N. (2011) Intelligent systems for ground vibration measurement: A comparative study, *Engineering with Computers*, 27: 225-233.
150. Zhongya, Z., Xiaoguang, J. (2018) Prediction of peak velocity of blasting vibration based on artificial neural network opti-mized by dimensionality reduction of FA-MIV. *Mathematical Problems Engineering*: 1–12.
151. Yu H., Wilamowski B.M. (2011) Levenberg–Marquardt Training. *Industrial Electronics Handbook*, 2nd Edition 5, CRC Press: 16 p.
152. Wang, C. (1994). A theory of generalization in learning machines with neural network applications. PhD thesis, University of Pennsylvania: 305 p.
153. Wiss, J.F., Linehan, P.W. (1978) Control of vibration and air noise from surface coalmines - III. USBM RI: 623 p.

9 PRILOZI

Prilog 1. Konstrukcija minskih punjenja na PK “Hardovac” - Ševarlije

Prilog 2. Šema iniciranja za minsko polje na PK “Hardovac” - Ševarlije

Prilog 3. Raspored bušotina, konstrukcija minskih punjenja i šema iniciranja za minsko polje na lokaciji Skyline - Beograd

Prilog 4. Podaci terenskih mjerenja za lokaciju PK “Hardovac” - Ševarlije

Prilog 5. Podaci terenskih mjerenja za lokaciju poslovno-stambenog objekta Skyline - Beograd

SPISAK SKRAĆENICA

DIN 4150 - njemački standard

DMGS - indijski standard

AB - armiranobetonski

TGK - tehničko-građevinski kamen

ANN - (artificial neural network) vještačka neuronska mreža

MLR - (multiple linear regression) višestruka linearna regresija

MVRA - (multivariate regression analysis) - višestruka regresiona analiza

PPV - (peak particle velocity) maksimalna brzina oscilovanja tla

USBM - (United States Bureau of Mines) Biro za rudarstvo Sjedinjenih Američkih Država

RI - (Report of Investigations) Istraživački izvještaji

USBM-RI-8507 - američki standard

AI - (artificial intelligence) vještačka inteligencija

SVM - (support vector machine algorithm) metoda potpornih vektora

GA - (genetic algorithm) genetski algoritmi

FIS - (Fuzzy inference system) fazi logika

MVRA - (multivariate regression analysis) višestruka regresiona analiza

ICA - (imperialist competitive algorithm) dominantni konkurentnim algoritmom

PSO - (particle swarm optimization) PSO algoritam, heuristički optimizacioni algoritam

R^2 - (coefficient of determination) koeficijent refleksije

R - koeficijent korelacije

V - vertikalna komponentna (talasi)

L - longitudinalna ili radijalna komponenta (talasi)

T - transverzalna ili poprečna komponenta (talasi)

ISEE - (International Society of Explosive Engineers) Međunarodno udruženje inženjera za miniranje

PK - površinski kop

BS 7385 - Britanski standard

OSM - (Office of Surface Mining) Američko odjeljenje za površinsku eksploataciju

MCS - (Mercalli-Cancani-Seiberg) Merkalijeva skala

GOST-6249-52 - ruski standard

SN 640312 - švajcarski standard

AS 2187-2 1993 - avstralijski standard

GPS - (global positioning system) globalni pozicioni sistema

ANOVA - (Analysis of variance) analiza variјance

LM - Levenberg-Marquardt (algoritam obučavanja)

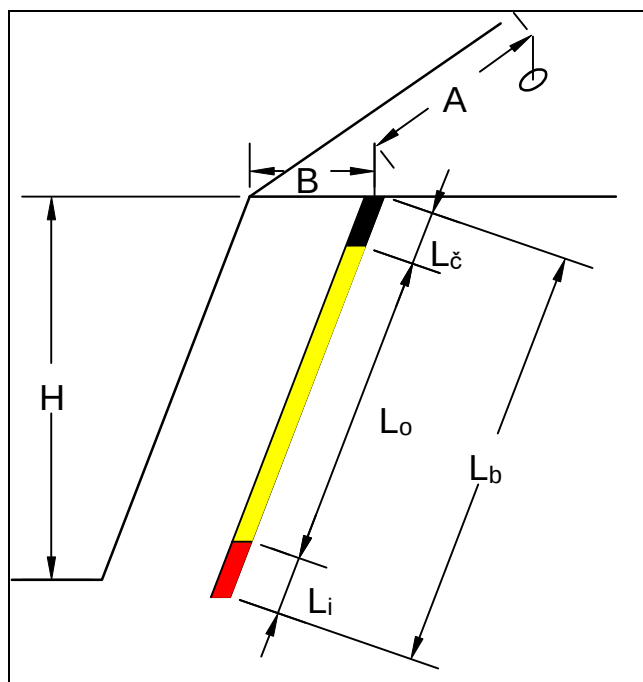
H - Hesijan matrica

FR - frekvencija

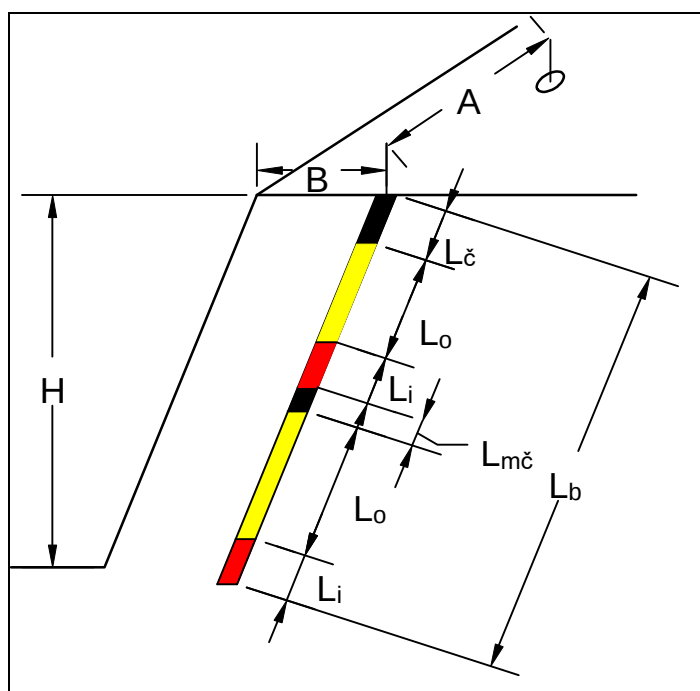
MSE - srednja kvadratna greška

Prilog 1

Konstrukcija minskih punjenja na PK "Hardovac" – Ševarlije



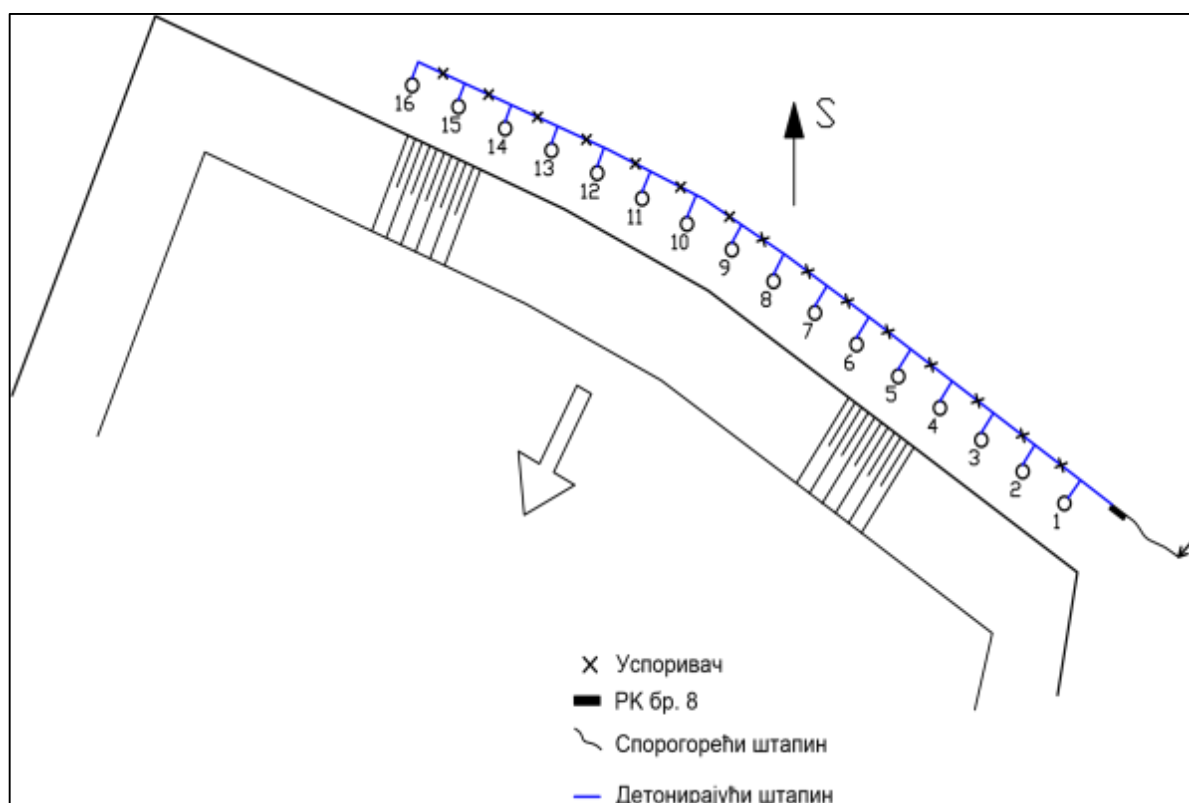
Slika P1. 1 Konstrukcija kontinuiranog minskog punjenja



Slika P1. 2 Konstrukcija razdvojenog minskog punjenja

Prilog 2.

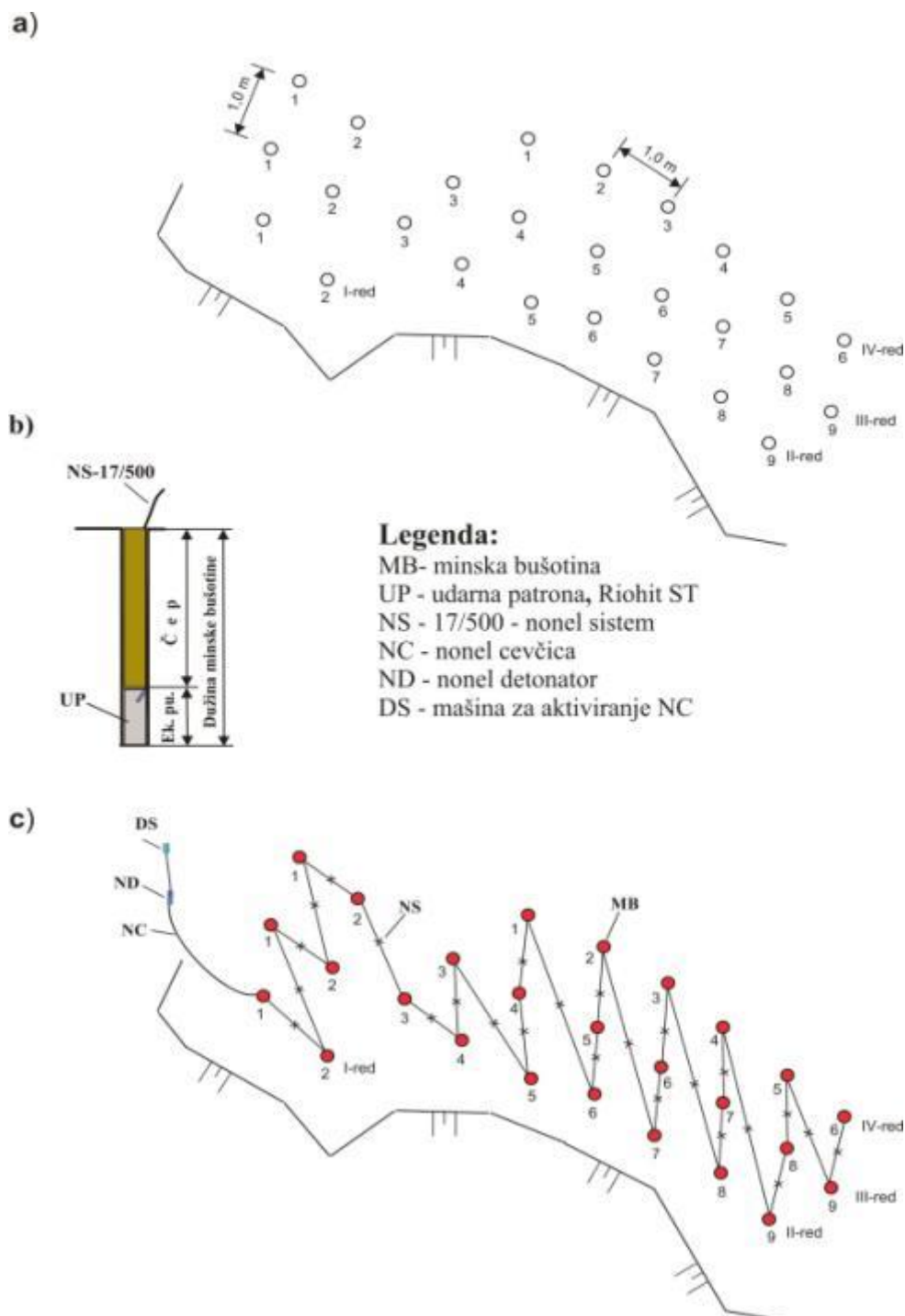
Šema iniciranja za minsko polje na PK “Hardovac” – Ševarlije



Slika P2. 1 Šema iniciranja za minsko polje na PK “Hardovac”

Prilog 3.

Raspored bušotina, konstrukcija minskih punjenja i šema iniciranja za minsko polje na lokaciji Skyline - Beograd



Slika P3. 1 Raspored bušotina (a), konstrukcija punjenja (b) i šema vezivanja (c), na primjeru minskog polja MP-1/I na lokaciji Skyline - Beograd

Prilog 4

Podaci terenskih mjerenja za lokaciju PK "Hardovac" – Ševarlije

Tabela P4. 1 Rezultati terenskih mjerenja za lokaciju PK "Hardovac" - Ševarlije

Redni broj	Rastojanje između bušotina (m)	Rastojanje između redova (m)	Prosječna dubina bušenja (m)	Broj bušotina	Prečnik bušotine (m)	Trenutno inicirano (kg)	Ukupna količina eksploziva (kg)	Udaljenost (m)	Maksimalna brzina oscilovanja po komponentama PPV						Vazdušni udar	
									Longitudinalna		Transverzalna		Vertikalna			
									V _L	V _L	V _T	V _T	V _V	V _V	dB	Hz
1	3,3	3,0	18,0	44	82	73,25	2817,0	245	4,255	25,6	3,239	51,2	2,604	36,5	113,0	14,2
2	3,8	3,5	19,0	18	89	65,00	1161,0	249	4,382	64,0	1,715	73,1	2,985	25,6	114,0	1,9
3	3,8	3,3	19,7	30	89	68,00	1858,0	238	5,779	39,3	2,667	64,0	3,683	51,2	126,0	10,4
4	3,3	3,0	18,7	30	89	49,00	1365,0	302	2,223	30,1	1,334	16,0	1,27	56,8	127,0	10,8
5	3,8	3,5	19,9	27	89	74,00	1825,0	233	3,493	51,2	2,604	42,6	2,921	64,0	125,0	17,0
6	3,8	3,5	20,0	28	89	61,00	1694,0	230	10,795	42,6	4,636	42,6	4,318	56,8	116,0	22,2
7	3,3	3,0	19,6	31	89	60,00	1428,0	307	4,255	46,5	2,35	46,5	2,096	32,0	132,0	10,8
8	3,5	3,0	11,8	11	89	64,00	656,0	224	9,589	30,1	4,001	39,3	6,35	56,8	121,0	7,4
9	4,0	3,5	20,0	25	89	63,50	1394,0	226	2,286	13,8	1,143	32,0	2,223	42,6	121,0	5,0
10	4,0	3,5	20,0	16	89	61,00	976,0	197	5,461	19,6	3,175	18,9	2,985	22,2	125,0	16,0
11	3,5	3,5	19,0	16	89	61,00	943,0	250	6,541	18,2	4,699	18,2	3,112	25,6	128,0	24,3
12	3,5	3,0	22,8	36	89	107,39	2721,0	352	2,477	17,6	1,334	16,0	1,778	12,1	130,0	8,5
13	3,2	3,0	18,7	31	89	71,42	1964,0	245	6,287	30,1	2,667	32,0	3,429	42,6	128,0	17,6
14	3,5	3,0	18,4	22	89	73,51	1460,0	223	10,859	34,1	5,588	36,5	6,223	51,2	127,0	8,9
15	3,7	3,2	18,5	37	82	69,50	2344,0	218	5,271	18,9	4,445	102,4	3,556	102,4	128,5	6,6
16	3,7	3,0	18,3	32	89	73,24	1955,0	218	4,128	30,1	3,239	14,6	2,985	102,4	128,6	12,4
17	3,5	3,2	18,4	34	82	71,70	2325,8	213	6,541	23,2	2,223	15,6	57,271	26,9	113,0	18,2
18	3,5	3,0	17,0	50	82	65,23	1734,0	256	2,223	20,4	1,461	42,6	1,143	39,3	125,0	8,9
19	4,0	3,0	19,3	32	82	76,94	1912,9	213	6,795	28,4	4,572	24,3	4,445	24,3	113,3	17,6

Redni broj	Rastojanje između bušotina (m)	Rastojanje između redova (m)	Prosječna dubina bušenja (m)	Broj bušotina	Prečnik bušotine (m)	Trenutno inicirano (kg)	Ukupna količina eksploziva (kg)	Udaljenost (m)	Maksimalna brzina oscilovanja po komponentama PPV						Vazdušni udar	
									Longitudinalna		Transverzalna		Vertikalna			
									V _L	Hz	V _T	Hz	V _V	Hz	dB	Hz
20	4,0	3,0	19,4	33	82	86,67	2302,0	211	6,033	16,0	5,334	23,2	6,858	34,1	114,0	5,2
21	3,7	3,3	19,4	21	82	72,90	1347,5	266	3,366	20,4	2,413	22,2	2,54	42,6	123,1	8,1
22	3,7	3,3	19,6	23	72	70,50	1433,5	268	4,001	22,2	2,667	25,6	2,032	28,4	121,7	17,0
23	3,7	3,5	19,5	35	82	78,40	1966,5	235	5,144	23,2	4,636	17,0	3,048	56,8	125,7	23,2
24	3,7	4,0	16,3	69	82	58,50	1519,5	253	2,794	24,3	1,905	28,4	1,715	30,1	111,5	5,5
25	3,5	3,7	18,8	32	82	77,70	1986,5	265	3,874	34,1	0,254	170,6	2,985	36,5	112,6	10,2
26	3,5	3,7	19,5	27	82	75,40	1907,2	275	2,286	23,2	4,636	28,4	1,651	30,1	124,4	8,5
27	3,0	3,0	10,4	27	89	45,50	819,0	227	1,397	5,7	3,239	15,0	1,397	7,5	114,4	14,2
28	3,0	3,0	10,2	26	82	43,00	792,8	224	2,350	7,0	2,096	6,8	2,096	11,1	118,1	11,1
29	3,7	3,5	19,5	33	82	75,68	2178,1	249	4,636	23,2	3,429	32,0	2,731	73,1	123,6	9,6
30	3,7	3,5	19,5	22	82	79,25	1424,6	284	2,667	15,0	2,286	17,0	1,143	26,9	123,1	7,4
31	3,7	3,5	19,5	21	82	82,00	1352,4	262	5,588	56,8	3,620	16,5	3,937	56,8	126,0	5,8
32	3,5	3,5	8,5	14	82	44,95	343,0	338	3,239	39,3	2,477	30,1	0,699	21,3	113,3	5,3
33	3,5	3,5	12,2	17	82	47,35	686,6	238	2,350	34,1	1,715	28,4	1,334	25,6	123,5	11,6
34	3,5	4,0	12,8	35	82	79,25	1478,4	279	1,715	39,3	1,842	28,4	0,889	85,3	120,9	22,2
35	3,5	3,0	13,3	33	82	74,35	1357,4	162	6,287	34,1	4,445	56,8	3,747	85,3	119,1	4,2
36	3,5	3,0	13,2	19	82	70,90	699,4	234	3,048	24,3	2,096	28,4	1,143	23,2	124,1	21,3
37	3,5	3,7	22,5	12	82	94,38	1009,2	227	3,239	10,0	1,969	4,2	1,524	3,4	121,9	7,5
38	3,5	3,7	6,4	23	82	27,40	339,1	383	1,778	6,0	1,969	5,8	1,715	6,2	115,2	8,9
39	3,5	3,8	19,5	26	82	69,67	1796,2	295	2,604	7,5	3,366	10,2	3,302	11,6	114,0	12,8
40	3,5	3,0	7,9	28	82	29,80	559,5	257	2,286	8,2	2,350	6,7	2,096	6,6	117,1	20,4
41	3,5	3,0	5,3	50	82	20,10	579,0	215	1,524	9,1	1,651	10,6	1,461	13,4	130,9	11,1
42	3,5	3,5	20,1	14	82	82,76	940,3	302	2,032	23,2	1,778	23,2	1,270	28,4	120,6	19,6
43	3,5	3,7	19,5	22	82	83,10	1713,0	190	4,191	28,4	3,620	10,4	2,350	34,1	129,3	4,5
44	3,5	3,7	21,6	16	82	98,4	1335,0	358	2,921	10,0	2,667	6,6	2,032	6,1	119,4	10,0

Redni broj	Rastojanje između bušotina (m)	Rastojanje između redova (m)	Prosječna dubina bušenja (m)	Broj bušotina	Prečnik bušotine (m)	Trenutno inicirano (kg)	Ukupna količina eksploziva (kg)	Udaljenost (m)	Maksimalna brzina oscilovanja po komponentama PPV						Vazdušni udar	
									Longitudinalna		Transverzalna		Vertikalna			
									V _L	Hz	V _T	Hz	V _V	Hz	dB	Hz
45	3,5	4,0	21,0	24	82	82,10	1781,0	180	3,302	23,2	2,921	42,6	1,524	32,0	113,1	16,5
46	3,5	4,0	21,0	23	82	82,72	1716,0	301	2,159	34,1	2,794	36,5	1,397	64,	121,6	8,9
47	3,5	4,0	21,0	21	82	86,47	1565,0	282	4,953	17,0	8,827	25,6	2,921	22,2	111,8	9,8
48	3,5	4,0	21,0	19	82	92,50	1480,9	226	4,001	34,1	3,366	10,6	4,890	42,6	113,3	19,6
49	3,5	4,0	18,8	14	82	70,25	758,1	385	1,651	9,6	0,953	11,6	2,159	10,4	115,4	7,8
50	3,6	3,8	19,9	22	82	82,48	1654,1	272	2,350	30,1	1,715	24,3	1,397	42,6	124,1	14,6
51	3,5	4,0	21,0	18	82	82,47	1463,0	306	1,969	22,2	1,969	25,6	1,207	56,8	121,8	9,4
52	3,5	3,8	20,0	24	82	83,84	1937,4	172	7,176	25,6	7,049	39,3	3,429	42,6	114,4	14,2
53	3,5	3,8	20,0	16	82	78,80	1166,6	317	1,905	26,9	2,413	56,8	1,270	64,	124,5	14,6
54	3,5	3,8	20,0	32	82	85,18	2434,9	315	2,604	25,6	2,604	17,6	2,413	32,	122,2	30,1
55	3,5	3,5	20,0	25	82	83,1	1927,5	323	2,794	13,8	2,286	18,9	1,397	28,4	119,1	9,3
56	3,5	3,8	19,8	23	82	84,90	1768,8	327	1,778	26,9	0,318	256,0	0,762	34,1	123,4	25,6
57	3,5	3,8	20,0	24	82	83,40	1903,8	170	7,811	21,3	1,207	102,4	2,921	73,1	120,6	6,6
58	3,3	3,8	19,5	23	82	81,40	1546,4	229	3,556	12,8	2,921	51,2	3,366	85,3	115,9	23,2
59	3,3	4,0	19,5	33	82	83,398	2557,9	310	1,588	23,2	2,350	17,0	1,270	18,2	127,9	18,2
60	3,3	4,0	21,7	27	82	98,50	2414,3	309	2,032	7,2	2,477	12,4	1,524	5,5	132,0	15,0
61	3,3	3,8	21,9	28	82	107,70	2508,0	302	1,842	6,1	1,969	4,6	1,143	7,7	126,9	8,9
62	3,3	3,8	22,0	13	82	91,50	1063,0	285	1,397	8,2	1,842	10,6	1,588	8,2	119,6	11,6
63	3,3	3,8	22,0	33	82	92,60	2811,2	290	4,636	7,0	2,667	6,3	3,048	8,2	129,0	10,2
64	3,3	3,8	18,8	16	82	80,40	1038,0	216	2,223	23,2	2,350	17,6	1,969	34,1	112,0	16,0
65	3,3	3,8	21,6	31	82	90,05	2451,6	299	2,032	6,7	2,286	9,6	2,223	5,8	128,6	10,4
66	3,3	3,8	19,5	40	82	81,29	3077,0	345	3,175	10,80	2,032	10,8	2,223	12,4	120,7	18,9
67	3,0	3,0	11,8	24	82	83,33	979,2	166	5,017	32,0	5,271	26,9	4,191	42,6	123,1	30,1
68	3,3	3,8	19,5	19	82	79,16	1400,0	302	3,683	11,90	5,080	26,9	4,001	9,6	114,8	11,1

Prilog 5.

Podaci terenskih mjerenja za Skyline - Beograd

Tabela P5.1 Rezultati terenskih mjerenja za lokaciju Skyline - Beograd

Redni broj	Mjerno mjesto	Rastojanje (m)	Ukupna količina eksploziva (kg)	Količina po intervalu usporenja (kg)	Maksimalna brzina oscilovanja po komponentama						Rezultanta (mm/s)	Stvarna rezultanta (mm/s)
					Vertikalna V _V		Transverzalna V _T		Longitudinalna V _L			
					mm/s	Hz	mm/s	Hz	mm/s	Hz		
1/I	MM-1	63,26	14,5	0,60	0,943	30,5	0,477	17,6	0,519	28,0	1,177	0,960
	MM-2	43,67	14,5	0,60	2,907	20,0	2,085	14,6	1,798	31,2	4,004	3,070
	MM-3	34,07	14,5	0,60	3,810	101,0	2,777	83,6	0,913	90,0	4,802	3,870
1/II	MM-1	55,67	6,50	0,55	0,688	109,0	0,424	65,4	0,493	29,9	1,132	0,750
	MM-2	37,74	6,50	0,55	1,466	57,3	1,577	29,7	1,402	33,0	2,569	2,030
	MM-3	36,52	6,50	0,55	1,570	164,0	1,074	64,6	0,548	99,7	1,979	1,630
2/I	MM-1	63,73	27,0	1,10	0,892	123,0	0,556	119,0	0,545	112,0	1,184	0,960
	MM-2	41,05	27,0	1,10	2,779	29,5	1,737	39,4	3,491	39,7	4,788	3,720
	MM-4	71,63	27,0	1,10	2,523	40,9	0,943	37,9	0,652	77,5	2,771	2,520
3/I	MM-1	64,91	48,0	1,20	1,133	97,8	0,734	87,5	0,574	58,0	1,467	1,220
	MM-2	38,56	48,0	1,20	2,676	64,8	2,245	58,7	2,697	27,6	4,413	3,140
	MM-4	66,30	48,0	1,20	1,962	57,3	1,377	74,2	0,779	83,1	2,520	2,110
3/II	MM-1	50,91	17,0	1,20	0,978	85,7	1,127	69,4	0,443	49,9	1,556	1,170
	MM-2	33,25	17,0	1,20	2,496	32,0	2,352	20,9	2,962	59,6	4,531	3,720
	MM-4	76,36	17,0	1,20	1,325	54,1	0,689	49,9	0,415	57,5	1,550	1,340
4/I	MM-1a	53,32	30,0	1,00	0,695	29,3	0,629	31,9	0,443	53,4	1,036	0,810
	MM-2	33,69	30,0	1,00	2,650	31,3	2,459	17,9	4,072	41,6	5,445	4,680
	MM-4	73,85	30,0	1,00	2,344	54,2	0,901	26,1	0,779	41,5	2,629	2,370
4/II	MM-1a	64,12	20,0	0,75	0,695	37,9	0,707	29,6	0,443	43,0	1,086	0,890
	MM-2	35,86	20,0	0,75	2,238	16,1	2,485	29,9	3,411	38,3	4,777	3,630
	MM-4	62,19	20,0	0,75	2,701	58,3	1,589	67,1	0,805	44,3	3,235	3,130
6/I	MM-1a	50,44	14,0	0,90	1,184	41,7	0,865	42,1	0,939	71,2	1,741	1,390

Redni broj	Mjerno mjesto	Rastojanje (m)	Ukupna količina eksploziva (kg)	Količina po intervalu usporenja (kg)	Maksimalna brzina oscilovanja po komponentama						Rezultanta (mm/s)	Stvarna rezultanta (mm/s)
					Vertikalna V _V		Transverzalna V _T		Longitudinalna V _L			
					mm/s	Hz	mm/s	Hz	mm/s	Hz		
	MM-2	28,39	14,0	0,90	3,576	38,1	4,704	36,2	7,325	41,2	9,411	8,020
	MM-4	71,19	14,0	0,90	2,421	43,9	1,245	60,1	1,039	57,1	2,914	2,450
6/II	MM-1a	63,88	22,0	1,30	1,776	57,0	0,838	51,1	0,808	73,1	2,123	1,810
	MM-2	35,23	22,0	1,30	3,113	49,7	4,543	21,6	3,887	27,6	6,741	5,420
	MM-4	58,70	22,0	1,30	4,994	50,4	3,841	65,0	1,792	58,0	6,550	5,410
7/I	MM- 5	25,20	18,15	0,825	2,264	34,8	2,432	28,9	1,587	46,6	3,682	3,030
7/II	MM- 1a	63,81	12,375	0,825	1,570	50,9	0,917	59,1	0,417	37,4	1,865	1,630
	MM- 2	33,71	12,375	0,825	3,936	13,3	4,436	31,1	3,147	45,8	6,714	5,080
	MM- 4	55,04	12,375	0,825	3,007	43,9	2,040	45,0	1,532	33,8	3,943	3,220
8/I	MM- 1a	49,67	5,50	0,275	0,489	28,9	0,576	47,5	0,339	58,6	0,828	0,590
	MM- 2	25,16	5,50	0,275	2,624	33,0	2,592	34,6	2,830	36,9	4,649	3,460
	MM- 4	65,93	5,50	0,275	2,319	42,7	0,715	46,6	0,623	40,4	2,505	2,350
8/II	MM- 2	77,58	18,5	0,925	0,515	23,7	0,748	40,3	0,397	45,3	0,991	0,750
	MM- 4	59,60	18,5	0,925	3,975	50,7	3,576	40,1	1,818	33,6	5,647	4,190
9/I	MM-1a	86,44	30,25	1,375	0,644	31,7	0,314	31,2	0,469	55,4	0,856	0,690
	MM-2	73,90	30,25	1,375	1,415	19,5	1,390	26,0	0,899	30,2	2,177	1,790
	MM-4	105,24	30,25	1,375	4,612	39,2	3,629	49,4	2,908	42,3	6,549	4,790
9/II	MM-1a	86,81	20,90	1,100	0,695	56,6	0,341	66,5	0,574	60,4	0,964	0,760
	MM-2	69,63	20,90	1,100	1,209	19,5	1,203	24,1	1,031	39,1	1,993	1,650
	MM-4	99,94	20,90	1,100	0,968	38,8	0,609	47,5	0,415	36,9	1,216	1,010
10/I	MM-1a	50,78	4,440	0,370	0,798	60,1	0,498	32,2	0,574	35,6	1,102	0,900
	MM-2	24,09	4,440	0,370	2,830	37,0	3,474	29,0	4,786	38,1	6,556	5,420
	MM-4	62,51	4,440	0,370	1,223	25,9	2,225	46,5	0,701	49,9	2,634	2,330
10/II	MM-1a	81,66	20,56	1,285	0,824	38,3	0,629	55,4	0,443	58,6	1,127	0,920
	MM-2	65,70	20,56	1,285	2,110	20,1	2,138	27,3	1,005	51,6	3,167	2,480
	MM-4	94,70	20,56	1,285	1,962	30,6	2,596	36,4	1,013	45,3	3,408	2,780
11/I	MM-2	36,45	11,0	0,550	2,007	33,6	2,352	20,6	1,878	39,3	3,617	3,160
	MM-4	50,09	11,0	0,550	2,421	28,7	2,781	43,6	1,506	40,4	3,982	3,220

Redni broj	Mjerno mjesto	Rastojanje (m)	Ukupna količina eksploziva (kg)	Količina po intervalu usporenja (kg)	Maksimalna brzina oscilovanja po komponentama						Rezultanta (mm/s)	Stvarna rezultanta (mm/s)
					Vertikalna V _V		Transverzalna V _T		Longitudinalna V _L			
					mm/s	Hz	mm/s	Hz	mm/s	Hz		
11/II	MM-1a	54,15	11,0	0,550	0,772	30,8	0,550	26,2	0,365	49,9	1,016	0,830
	MM-2	23,26	11,0	0,550	2,676	27,3	2,539	32,6	2,618	14,8	4,523	3,240
	MM-4	61,38	11,0	0,550	1,631	36,3	1,722	49,6	1,013	49,2	2,579	2,200
11/III	MM-1a	69,88	8,00	0,666	1,236	72,0	0,917	26,5	0,574	32,0	1,642	1,390
	MM-2	35,44	8,00	0,666	4,065	32,1	4,089	30,0	3,993	33,8	7,013	5,400
	MM-4	52,71	8,00	0,666	4,255	47,7	2,146	66,9	1,999	80,7	5,168	4,310
12/I	MM-1a	51,06	7,700	0,550	1,236	36,3	0,560	68,8	0,760	21,4	1,541	1,300
	MM-2	26,37	7,700	0,550	3,473	33,5	5,211	56,9	7,827	37,2	10,024	8,310
	MM-4	65,51	7,700	0,550	2,828	31,1	2,543	41,8	1,818	31,3	4,215	3,140
12/II	MM-1a	50,85	18,70	0,935	1,184	24,7	0,576	70,1	0,991	36,9	1,648	1,490
	MM-2	22,50	18,70	0,935	3,936	45,6	3,448	26,2	4,363	25,7	6,813	4,750
	MM-4	59,78	18,70	0,935	4,281	36,3	3,815	46,2	1,844	35,6	6,023	4,600
12/III	MM-2	29,74	8,250	0,550	1,055	18,1	1,657	27,7	1,058	11,9	2,231	1,900
	MM-4	57,37	8,250	0,550	0,662	33,2	0,609	44,3	0,675	38,8	1,125	0,880
12/IV	MM-1a	58,09	11,00	0,550	1,236	31,4	1,022	35,6	1,173	23,7	1,988	1,740
	MM-2	27,53	11,00	0,550	7,332	23,3	5,211	23,5	5,236	32,9	10,408	8,670
	MM-4	54,55	11,00	0,550	3,440	28,7	2,596	30,8	2,986	49,2	5,242	4,560
	MM-1a	64,98	9,350	0,935	1,210	34,8	0,760	45,3	0,965	31,2	1,724	1,410
12/V	MM-2	33,38	9,350	0,935	3,808	32,8	4,116	35,6	5,368	32,3	7,762	5,810
	MM-4	50,52	9,350	0,935	4,561	27,3	4,503	39,3	3,012	46,1	7,082	5,090
	MM-1a	49,94	5,10	0,450	1,081	21,2	0,524	27,7	0,417	40,4	1,272	1,110
13/I	MM-2	23,61	5,10	0,450	2,521	29,6	4,223	22,5	4,363	46,9	6,574	4,800
	MM-4	62,87	5,10	0,450	1,147	22,7	0,662	46,4	0,571	89,6	1,442	1,260
	MM-1a	60,82	14,0	0,55	0,592	41,5	0,576	25,6	0,522	28,2	0,977	0,860
13/II	MM-2	28,54	14,0	0,55	3,242	23,9	2,004	34,9	2,988	40,0	4,843	3,920
	MM-4	49,53	14,0	0,55	2,726	46,4	1,272	70,0	0,961	83,1	3,158	2,760
	MM-1a	67,47	2,40	0,40	0,721	26,5	0,367	25,6	0,287	47,5	0,858	0,740
13/III	MM-2	35,10	2,40	0,40	2,110	31,1	2,459	21,5	3,358	47,4	4,666	3,910

Redni broj	Mjerno mjesto	Rastojanje (m)	Ukupna količina eksploziva (kg)	Količina po intervalu usporenja (kg)	Maksimalna brzina oscilovanja po komponentama						Rezultanta (mm/s)	Stvarna rezultanta (mm/s)
					Vertikalna V _V		Transverzalna V _T		Longitudinalna V _L			
					mm/s	Hz	mm/s	Hz	mm/s	Hz		
13/IV	MM-4	47,72	2,40	0,40	1,299	32,4	0,556	46,4	0,493	45,3	1,620	1,300
	MM-2	21,13	8,25	0,55	2,161	38,9	2,405	37,1	1,904	43,9	3,752	2,490
	MM-4	58,02	8,25	0,55	3,160	50,1	1,272	39,9	1,376	72,4	3,674	3,310
14/I	MM-1a	54,65	13,2	1,10	0,875	70,0	0,812	23,3	0,574	38,3	1,324	1,080
	MM-2	26,76	13,2	1,10	4,168	26,9	3,100	22,7	2,909	25,6	5,853	4,410
	MM-4	61,92	13,2	1,10	2,115	52,4	1,298	32,7	1,584	48,5	2,944	2,140
14/II	MM-1a	55,11	8,00	0,40	0,978	35,1	0,576	32,9	0,417	38,3	1,209	1,110
	MM-2	24,35	8,00	0,40	3,190	33,5	4,490	33,4	8,092	51,6	9,788	8,500
	MM-4	56,02	8,00	0,40	2,828	43,0	0,901	40,9	0,805	66,8	3,075	2,910
14/III	MM-4	55,14	8,80	0,40	2,548	37,8	1,192	58,3	0,961	58,2	2,972	2,610
15/I	MM-1a	53,22	9,00	0,35	0,669	33,6	0,472	30,2	0,522	26,2	0,971	0,710
	MM-2	22,28	9,00	0,35	3,293	30,1	3,047	24,2	4,813	39,2	6,579	5,080
	MM-4	54,10	9,00	0,35	2,675	43,4	1,934	41,3	1,194	39,9	3,510	2,690
15/II	MM-1a	65,09	4,95	0,55	0,644	50,6	0,498	30,2	0,391	59,8	0,903	0,800
	MM-2	33,12	4,95	0,55	2,032	24,5	1,844	38,5	1,904	41,3	3,339	2,340
	MM-4	48,84	4,95	0,55	3,898	46,0	1,616	37,1	1,220	45,2	4,392	4,010
16/I	MM-2	36,15	12,15	0,55	1,749	83,7	1,871	40,7	2,036	42,8	3,272	2,530
	MM-4	61,59	12,15	0,55	1,274	49,3	0,689	46,6	0,597	73,0	1,566	1,390
16/II	MM-2	39,60	12,15	0,55	1,904	29,8	1,764	31,3	1,640	46,2	3,070	2,070
	MM-4	69,25	12,15	0,55	1,198	42,3	0,503	72,1	0,493	63,3	1,389	1,240
16/III	MM-2	40,95	12,15	0,45	1,466	24,3	2,058	36,3	1,719	45,9	3,056	2,100
	MM-4	67,00	12,15	0,45	1,299	63,0	0,821	32,0	0,441	45,3	1,598	1,330
16/IV	MM-2	37,72	11,55	0,444	1,466	19,7	0,755	37,1	1,481	50,4	2,223	1,700
	MM-4	59,30	11,55	0,444	1,621	80,9	1,390	101,0	0,551	84,7	2,205	1,720
17/I	MM-2	35,23	24,0	0,40	1,466	24,7	2,245	32,3	1,825	41,5	3,243	2,870
	MM-4	51,89	24,0	0,40	2,743	60,4	1,438	54,3	1,350	75,3	3,378	3,120
17/II	MM-2	27,84	25,0	0,42	2,624	30,6	4,116	25,4	2,036	43,5	5,289	4,140
	MM-4	53,85	25,0	0,42	3,020	88,8	1,059	35,1	0,661	104,0	2,372	2,100

Redni broj	Mjerno mjesto	Rastojanje (m)	Ukupna količina eksploziva (kg)	Količina po intervalu usporenja (kg)	Maksimalna brzina oscilovanja po komponentama						Rezultanta (mm/s)	Stvarna rezultanta (mm/s)
					Vertikalna V _V		Transverzalna V _T		Longitudinalna V _L			
					mm/s	Hz	mm/s	Hz	mm/s	Hz		
18/I	MM-1a	57,34	25,0	0,417	0,850	69,0	0,524	81,8	0,391	51,1	1,072	0,940
	MM-2	30,13	25,0	0,417	2,238	16,6	2,245	28,2	2,856	39,8	4,267	3,320
	MM-4	62,91	25,0	0,417	1,631	41,5	0,795	32,0	0,597	31,2	1,910	1,660
18/II	MM-1a	49,72	25,0	0,417	0,695	27,3	0,603	73,5	0,548	51,1	1,071	0,730
	MM-2	28,92	25,0	0,417	2,727	42,8	2,485	32,0	3,517	36,0	5,097	3,780
	MM-4	72,65	25,0	0,417	1,096	37,6	0,636	29,1	0,493	26,7	1,359	1,100
18/III	MM-1a	66,13	33,0	0,550	0,566	39,3	0,603	34,1	0,339	37,2	0,894	0,890
	MM-2	44,71	33,0	0,550	2,135	59,0	3,367	31,4	1,878	42,5	4,407	3,450
	MM-4	74,99	33,0	0,550	0,968	46,1	0,689	54,6	0,389	78,7	1,250	1,010
19/I	MM-2	34,07	33,0	0,55	1,544	28,7	2,646	34,9	1,878	41,1	3,593	2,650
	MM-4	68,82	33,0	0,55	0,968	38,3	0,424	83,1	0,312	71,2	1,102	0,990
19/II	MM-2	39,28	31,0	0,517	1,775	35,3	1,897	31,8	2,063	54,8	3,317	2,120
	MM-4	75,95	31,0	0,517	0,892	46,5	0,609	47,9	0,597	73,9	1,234	0,920
20/I	MM-1a	51,07	18,0	0,30	1,004	76,3	0,288	52,5	0,313	47,5	1,090	1,040
	MM-2	35,00	18,0	0,30	0,875	26,5	1,283	32,9	1,587	38,2	2,220	1,720
21/I	MM-1a	72,40	55,525	1,175	1,210	53,0	0,838	32,2	0,704	54,8	1,631	1,210
	MM-2	41,65	55,525	1,175	4,991	23,6	4,543	45,0	4,892	43,5	8,335	5,860
	MM-4	53,37	55,525	1,175	5,555	33,4	3,126	33,6	2,882	44,4	6,995	6,430
21/II	MM-1a	72,65	42,470	1,180	0,798	23,5	0,576	31,2	0,991	20,8	1,397	1,140
	MM-2	48,02	42,470	1,180	2,238	19,9	2,085	17,3	1,534	14,3	3,422	2,520
	MM-4	70,47	42,470	1,180	1,325	50,7	1,536	41,3	1,039	51,6	2,279	1,780
22/I	MM-1a	71,96	39,875	1,375	1,055	58,4	0,681	26,2	0,600	21,2	1,392	1,100
	MM-2	41,64	39,875	1,375	4,116	21,3	3,688	32,1	3,861	35,6	6,742	4,930
	MM-4	53,78	39,875	1,375	4,714	59,6	2,437	44,9	2,285	51,1	5,777	4,960
22/II	MM-1a	71,68	22,125	1,106	0,875	33,2	0,655	38,3	0,626	45,3	1,259	1,010
	MM-2	45,65	22,125	1,106	3,447	19,3	2,619	28,2	2,354	52,1	4,928	3,690
	MM-4	64,47	22,125	1,106	2,497	63,0	1,748	37,2	1,220	49,4	3,283	3,040
23/I	MM-2	49,74	25,00	0,417	0,952	38,7	0,641	26,4	0,899	39,3	1,458	1,130

Redni broj	Mjerno mjesto	Rastojanje (m)	Ukupna količina eksploziva (kg)	Količina po intervalu usporenja (kg)	Maksimalna brzina oscilovanja po komponentama						Rezultanta (mm/s)	Stvarna rezultanta (mm/s)
					Vertikalna V _V		Transverzalna V _T		Longitudinalna V _L			
					mm/s	Hz	mm/s	Hz	mm/s	Hz		
23/II	MM-2	51,19	9,435	0,673	1,261	18,1	1,523	30,4	1,243	39,6	2,335	1,600
	MM-4	78,85	9,435	0,673	1,121	37,3	0,556	36,5	0,364	40,4	1,303	1,140
23/III	MM-1a	59,90	23,782	0,396	0,618	44,7	0,681	62,3	0,391	74,8	0,999	0,680
	MM-2	43,45	23,782	0,396	1,389	41,6	1,630	20,5	1,111	40,7	2,412	1,960
	MM-4	81,76	23,782	0,396	0,866	43,0	0,530	29,3	0,260	55,4	1,048	0,870
23/IV	MM-1a	52,62	23,782	0,396	0,927	30,0	0,524	79,8	0,469	52,5	1,163	1,020
	MM-2	39,45	23,782	0,396	2,161	33,1	2,352	37,7	1,402	35,5	3,488	2,530
	MM-4	83,69	23,782	0,396	0,815	41,5	0,636	38,3	0,415	21,7	1,114	0,830
24/I	MM-2	60,46	27,2	0,46	1,852	19,9	0,909	28,2	0,873	15,8	2,240	1,940
24/II	MM-4	96,02	27,2	0,46	0,917	38,0	0,636	29,8	0,623	35,6	1,278	1,020
25/I	MM-2	54,11	33,0	0,55	0,900	29,9	1,203	42,7	1,058	42,0	1,837	1,400
	MM-4	89,51	33,0	0,55	0,815	39,1	0,424	51,6	0,208	38,3	0,942	0,840
26/I	MM-1a	80,66	22,0	1,257	0,721	19,9	0,812	22,7	0,391	35,6	1,154	0,920
	MM-2	64,50	22,0	1,257	1,492	16,4	1,497	21,1	1,243	41,0	2,452	1,920
	MM-4	95,16	22,0	1,257	1,325	39,9	0,689	36,5	0,571	21,7	1,598	1,360
27/I	MM-2	60,29	50,0	1,428	1,931	24,0	2,008	30,0	1,499	44,3	3,163	2,300
	MM-4	87,80	50,0	1,428	1,695	46,2	0,997	35,0	0,983	31,9	2,198	1,730
28/I	MM-1a	78,05	50,0	1,666	1,030	30,1	0,760	17,8	1,434	6,11	1,922	1,430
	MM-2	55,61	50,0	1,666	2,496	24,7	2,699	33,8	1,825	23,1	4,104	3,350
	MM-4	79,45	50,0	1,666	3,032	14,9	1,934	32,8	1,065	44,1	3,750	3,260
29/I	MM-1a	78,16	44,0	1,517	0,747	27,3	0,576	20,3	0,313	68,8	0,994	0,840
	MM-2	50,43	44,0	1,517	2,341	36,2	2,138	38,1	2,459	45,8	4,012	2,710
	MM-4	65,58	44,0	1,517	4,485	35,8	1,748	37,8	1,272	20,2	4,978	4,540
29/II	MM-1a	80,44	22,0	1,100	0,952	39,4	0,603	28,0	0,678	29,1	1,315	1,030
	MM-2	47,59	22,0	1,100	2,959	22,9	2,940	28,1	2,935	42,0	5,100	3,750
	MM-4	46,69	22,0	1,100	5,937	37,7	3,099	26,9	3,505	44,3	7,558	6,640
30/I	MM-1a	78,56	29,0	1,611	1,107	37,9	0,629	27,7	0,600	53,0	1,407	1,120
	MM-2	47,27	29,0	1,611	3,782	27,2	3,260	48,4	2,962	32,4	5,805	4,940

Redni broj	Mjerno mjesto	Rastojanje (m)	Ukupna količina eksploziva (kg)	Količina po intervalu usporenja (kg)	Maksimalna brzina oscilovanja po komponentama						Rezultanta (mm/s)	Stvarna rezultanta (mm/s)
					Vertikalna V _V		Transverzalna V _T		Longitudinalna V _L			
					mm/s	Hz	mm/s	Hz	mm/s	Hz		
	MM-4	53,58	29,0	1,611	4,892	43,8	2,675	44,9	2,103	39,6	5,959	5,460
31/I	MM-2	53,28	45,0	1,531	1,852	25,2	1,336	29,5	1,640	23,0	2,811	2,250
	MM-4	59,56	45,0	1,531	3,644	43,2	2,517	41,4	1,922	42,4	4,828	3,760
	MM-6	67,88	45,0	1,531	1,210	27,7	1,231	26,9	0,913	19,9	1,952	1,380
32/I	MM-2	51,35	13,0	1,100	2,213	29,3	1,256	38,8	1,349	39,9	2,880	2,430
	MM-4	49,56	13,0	1,100	4,255	53,3	1,510	81,9	1,740	35,6	4,838	4,370
	MM-6	60,38	13,0	1,100	1,776	61,8	1,205	40,3	1,460	48,6	2,596	2,170
32/II	MM-2	58,42	35,0	1,522	3,087	19,5	2,085	15,2	1,269	34,8	3,935	3,390
	MM-4	60,91	35,0	1,522	4,561	36,4	2,252	38,8	1,766	45,8	5,384	4,660
	MM-6	65,32	35,0	1,522	1,596	34,0	1,572	19,9	2,217	29,3	3,152	2,370
33/I	MM-2	54,97	23,1	1,650	2,264	29,9	2,111	45,3	2,036	44,0	3,705	2,990
	MM-4	50,04	23,1	1,650	4,816	52,6	1,536	20,9	2,233	49,1	5,526	5,180
	MM-6	57,76	23,1	1,650	2,497	41,2	1,415	55,4	1,408	49,2	3,199	2,510
34/I	MM-2	60,30	23,1	1,650	1,312	43,1	1,390	49,0	1,454	25,7	2,401	1,660
	MM-4	53,53	23,1	1,650	2,701	53,2	1,722	41,3	1,220	53,5	3,427	3,050
	MM-6	56,31	23,1	1,650	1,107	38,6	1,493	33,6	0,861	48,5	2,048	1,670
35/I	MM-2	54,35	20,56	1,10	1,981	25,7	1,550	35,9	2,116	24,4	3,287	2,390
	MM-4	78,69	20,56	1,10	2,370	26,7	2,119	40,9	1,065	37,6	3,353	2,710
	MM-6	89,47	20,56	1,10	0,747	30,0	0,576	24,9	0,861	28,9	1,277	1,040
36/I	MM-1a	72,93	11,0	0,550	0,927	27,7	0,472	35,6	0,756	31,2	1,286	1,120
	MM-2	39,42	11,0	0,550	4,168	25,2	2,218	37,4	3,147	33,7	5,674	4,500
	MM-4	43,21	11,0	0,550	3,338	33,2	1,960	73,3	1,506	63,9	4,153	3,340
37/I	MM-2	44,93	14,3	0,55	1,698	27,8	0,935	33,7	1,322	42,2	2,346	1,820
	MM-4	42,76	14,3	0,55	2,446	42,2	1,563	82,5	1,688	54,6	3,357	2,490
	MM-6	61,51	14,3	0,55	0,798	51,9	0,524	60,4	0,808	57,3	1,250	0,890
37/II	MM-2	50,57	18,7	1,32	2,213	41,1	2,111	33,7	2,327	40,9	3,843	3,070
	MM-4a	55,71	18,7	1,32	1,452	33,8	1,113	27,1	1,428	31,2	2,321	2,250
	MM-6	63,11	18,7	1,32	1,776	54,7	1,231	42,9	0,652	62,3	2,257	1,860

Redni broj	Mjerno mjesto	Rastojanje (m)	Ukupna količina eksploziva (kg)	Količina po intervalu usporenja (kg)	Maksimalna brzina oscilovanja po komponentama						Rezultanta (mm/s)	Stvarna rezultanta (mm/s)
					Vertikalna V _V		Transverzalna V _T		Longitudinalna V _L			
					mm/s	Hz	mm/s	Hz	mm/s	Hz		
38/I	MM-2	49,11	12,234	0,55	1,312	30,8	0,802	45,8	1,190	24,7	1,944	1,780
	MM-4a	49,50	12,234	0,55	0,841	42,6	1,033	31,6	1,117	42,8	1,738	1,560
	MM-6	59,26	12,234	0,55	1,648	31,0	0,996	44,8	0,600	47,7	2,017	1,860
38/II	MM-2	53,59	18,764	0,55	1,389	21,7	0,828	45,3	0,926	26,0	1,863	1,490
	MM-4a	51,17	18,764	0,55	1,198	42,0	0,715	46,0	0,935	49,0	1,679	1,490
	MM-6	55,99	18,764	0,55	0,721	32,7	0,603	45,3	0,574	40,4	1,101	0,860
39/I	MM-2	58,41	33,0	1,65	2,161	23,1	1,497	18,8	2,116	30,3	3,375	2,230
	MM-4a	54,47	33,0	1,65	0,892	34,0	0,530	18,3	0,467	26,2	1,138	0,910
	MM-6	53,85	33,0	1,65	0,952	17,5	0,891	24,4	0,469	22,7	1,385	1,010
39/II	MM-2	54,63	15,0	1,375	1,595	16,8	1,336	45,9	1,560	29,8	2,601	2,200
	MM-4a	74,84	15,0	1,375	1,198	36,2	0,742	26,5	0,831	39,2	1,636	1,510
	MM-6	80,33	15,0	1,375	1,004	27,3	0,681	27,1	0,548	29,0	1,331	1,050
40/I	MM-2	28,02	3,750	0,55	2,959	73,6	2,485	37,8	2,036	48,4	4,367	3,330
	MM-4a	45,06	3,750	0,55	0,943	27,7	0,583	57,0	0,545	38,3	1,235	1,050
40/II	MM-2	46,86	32,25	0,55	2,676	22,0	1,523	41,3	1,772	28,0	3,552	2,890
	MM-4a	69,91	32,25	0,55	1,478	35,0	1,086	37,9	0,519	45,3	1,906	1,520
41/I	MM-2	47,80	33,4	0,55	2,393	21,9	1,871	45,2	2,010	31,3	3,642	3,040
	MM-4b	60,15	33,4	0,55	2,523	17,4	1,377	30,9	1,091	29,2	3,074	2,970
	MM-4c	47,35	33,4	0,55	2,394	22,0	0,786	18,5	1,121	29,9	2,758	2,410
41/II	MM-2	59,36	14,4	1,20	3,344	26,2	1,844	34,6	1,666	33,1	4,166	3,550
	MM-4b	65,78	14,4	1,20	2,089	21,0	2,013	28,6	0,935	25,8	3,048	2,340
	MM-4c	54,93	14,4	1,20	3,604	24,5	1,729	29,1	1,721	24,7	4,352	3,940
42/I	MM-2	42,59	24,0	0,45	1,955	33,8	2,138	51,0	2,036	33,3	3,541	2,420
	MM-4b	57,47	24,0	0,45	1,376	46,2	1,404	36,9	0,805	43,6	2,124	1,750
42/II	MM-2	44,03	33,0	0,55	2,856	21,4	1,897	30,0	2,274	27,7	4,114	3,180
	MM-4	60,12	33,0	0,55	2,421	36,1	1,483	27,7	0,805	55,4	2,951	2,470
	MM-6	76,02	33,0	0,55	0,927	38,9	0,838	24,5	0,522	41,5	1,354	1,100
43/I	MM-2	51,33	44,00	1,467	3,756	25,5	3,394	49,7	3,279	36,9	6,031	4,260

Redni broj	Mjerno mjesto	Rastojanje (m)	Ukupna količina eksploziva (kg)	Količina po intervalu usporenja (kg)	Maksimalna brzina oscilovanja po komponentama						Rezultanta (mm/s)	Stvarna rezultanta (mm/s)
					Vertikalna V _V		Transverzalna V _T		Longitudinalna V _L			
					mm/s	Hz	mm/s	Hz	mm/s	Hz		
	MM-4	57,06	44,00	1,467	4,510	42,6	2,172	25,6	1,558	54,7	5,242	4,710
	MM-6	58,94	44,00	1,467	1,828	50,0	1,572	24,4	1,356	38,3	2,766	1,960
43/II	MM-2	56,86	27,00	1,286	2,393	22,7	2,031	42,6	2,539	36,4	4,037	3,470
	MM-4	59,49	27,00	1,286	5,020	41,5	2,861	45,8	1,558	60,8	5,984	5,200
	MM-6	59,18	27,00	1,286	1,519	43,2	1,022	38,7	0,808	55,4	2,001	1,730
44/I	MM-2	61,85	30,0	1,428	2,418	33,2	2,004	35,6	2,618	34,8	4,088	3,220
	MM-4	60,82	30,0	1,428	4,969	44,6	3,126	18,6	1,350	20,8	6,023	5,470
	MM-6	58,52	30,0	1,428	1,210	49,9	1,729	39,0	0,965	36,3	2,320	1,940
44/II	MM-2	65,76	32,0	1,454	1,518	29,9	1,684	34,8	2,142	37,6	3,119	2,340
	MM-4	62,66	32,0	1,454	3,261	36,4	2,066	55,9	2,077	35,4	4,383	3,450
	MM-6	58,93	32,0	1,454	1,055	30,0	1,336	42,2	0,939	23,9	1,944	1,500
45/I	MM-2	69,86	8,00	1,00	2,575	29,1	3,487	35,2	2,755	35,7	5,136	4,060
	MM-4a	68,64	8,00	1,00	1,987	30,1	1,290	39,9	1,996	23,1	3,097	2,320
	MM-6	52,47	8,00	1,00	6,144	39,8	6,664	34,5	4,263	24,7	10,016	9,070
46/I	MM-2	69,18	24,00	1,333	2,444	24,6	1,871	33,8	3,068	30,7	4,345	3,480
	MM-4	60,34	24,00	1,333	2,930	33,9	2,093	40,3	1,792	28,6	4,022	3,220
	MM-6	54,89	24,00	1,333	1,261	70,5	1,284	31,2	0,808	37,7	1,973	1,460
47/I	MM-2	64,85	24,0	1,360	2,084	16,9	2,165	25,2	1,825	36,0	3,515	2,580
	MM-4	53,57	24,0	1,360	4,918	31,8	1,987	31,2	2,051	20,7	5,687	5,190
	MM-6	49,29	24,0	1,360	1,879	19,3	1,179	28,0	0,678	22,0	2,319	1,890
47/II	MM-2	51,81	20,5	0,342	1,621	27,2	0,962	32,5	1,243	37,0	2,257	1,740
	MM-4	66,55	20,5	0,342	1,580	39,6	0,821	39,9	0,493	55,4	1,847	1,620
47/III	MM-2	49,25	20,5	0,342	1,621	23,2	1,390	27,7	1,296	33,2	2,497	2,100
	MM-4	58,97	20,5	0,342	1,886	37,5	0,927	54,2	0,623	59,5	2,192	1,930
48/I	MM-2	62,66	13,00	1,531	2,933	37,5	3,688	46,4	4,496	36,1	6,513	4,690
	MM-4	46,82	13,00	1,531	5,911	38,5	3,152	36,2	3,090	29,4	7,377	6,710
	MM-6	43,00	13,00	1,531	2,549	42,2	1,179	43,7	0,887	24,9	2,945	2,590
49/I	MM-2	59,28	16,5	0,55	1,518	35,6	1,363	50,5	1,930	25,3	2,808	2,420

Redni broj	Mjerno mjesto	Rastojanje (m)	Ukupna količina eksploziva (kg)	Količina po intervalu usporenja (kg)	Maksimalna brzina oscilovanja po komponentama						Rezultanta (mm/s)	Stvarna rezultanta (mm/s)
					Vertikalna V _V		Transverzalna V _T		Longitudinalna V _L			
					mm/s	Hz	mm/s	Hz	mm/s	Hz		
	MM-4	74,09	16,5	0,55	1,223	29,3	1,113	31,2	0,623	34,4	1,767	1,390
	MM-6	74,87	16,5	0,55	0,489	51,6	0,603	21,0	0,365	27,7	0,858	0,710
50/I	MM-2	54,22	17,75	0,458	1,029	54,4	1,042	45,8	1,428	34,9	2,045	1,580
	MM-4	51,93	17,75	0,458	2,650	44,9	1,060	49,9	0,961	61,0	3,011	2,810
	MM-6	53,19	17,75	0,458	0,644	59,1	0,419	41,5	0,365	49,9	0,851	0,710
50/II	MM-2	64,94	19,25	0,550	2,007	15,5	1,897	36,3	2,301	32,3	3,594	2,440
	MM-4	60,15	19,25	0,550	2,497	55,6	2,490	49,2	1,298	48,6	3,757	3,020
	MM-6	57,00	19,25	0,550	1,236	36,8	1,127	26,2	0,574	42,2	1,768	1,240
51/I	MM-2	53,87	18,425	0,55	1,724	29,8	1,764	32,7	1,930	33,7	3,132	2,120
	MM-4	37,76	18,425	0,55	4,357	37,6	2,437	48,7	2,389	73,9	5,534	4,360
	MM-6	39,21	18,425	0,55	1,416	69,2	1,179	53,6	0,991	52,1	2,092	1,510
51/II	MM-2	59,81	16,575	0,872	1,621	31,4	1,149	41,9	1,930	27,7	2,769	1,940
	MM-4	38,94	16,575	0,872	2,574	53,7	1,828	40,9	2,233	29,8	3,867	3,200
	MM-6	36,94	16,575	0,872	1,725	57,7	0,812	39,1	1,147	53,8	2,225	1,840
52/I	MM-2	63,71	20,0	0,602	1,595	25,8	1,443	35,6	1,878	35,3	2,855	2,000
	MM-4a	51,61	20,0	0,602	2,163	23,8	1,085	17,7	1,609	32,7	2,905	2,410
	MM-6	37,09	20,0	0,602	1,554	28,6	1,103	60,4	0,882	100,0	2,099	1,860
53/I	MM-2	63,71	37,0	0,752	1,801	30,0	1,149	29,7	1,454	34,1	2,584	2,190
	MM-4	41,30	37,0	0,752	1,529	46,0	1,351	43,3	1,220	26,7	2,377	1,700
	MM-6	37,09	37,0	0,752	1,493	38,3	1,205	46,7	0,756	44,6	2,062	1,520
54/I	MM-2	58,88	21,0	0,35	1,261	23,6	0,962	43,3	1,111	27,4	1,936	1,640
	MM-4	66,96	21,0	0,35	1,172	27,7	0,848	56,5	0,571	66,5	1,555	1,180
54/II	MM-2	56,98	18,0	0,30	0,772	18,0	0,668	71,2	0,529	66,5	1,149	0,880
	MM-4	60,31	18,0	0,30	0,968	48,0	0,450	61,0	0,649	40,7	1,249	1,110
55/I	MM-2	68,47	16,5	1,375	2,238	42,5	2,673	39,1	3,491	40,0	4,933	3,580
	MM-4	46,13	16,5	1,375	1,936	50,0	1,642	52,6	1,246	56,1	2,828	2,190
	MM-6	40,56	16,5	1,375	1,622	74,3	1,389	44,0	0,939	53,9	2,333	1,870
55/II	MM-2	67,90	25,575	0,825	2,624	25,4	2,245	37,0	2,777	38,6	4,431	3,360

Redni broj	Mjerno mjesto	Rastojanje (m)	Ukupna količina eksploziva (kg)	Količina po intervalu usporenja (kg)	Maksimalna brzina oscilovanja po komponentama						Rezultanta (mm/s)	Stvarna rezultanta (mm/s)
					Vertikalna V _V		Transverzalna V _T		Longitudinalna V _L			
					mm/s	Hz	mm/s	Hz	mm/s	Hz		
	MM-4	51,79	25,575	0,825	3,618	42,2	1,377	38,0	1,947	34,9	4,333	3,780
	MM-6	46,82	25,575	0,825	1,493	47,7	1,441	40,9	0,834	63,0	2,236	2,010
56/I	MM-2	68,86	18,15	0,825	2,110	22,0	1,069	39,9	1,216	41,5	2,659	2,170
	MM-4	60,25	18,15	0,825	2,064	42,7	1,404	42,8	0,727	39,7	2,600	2,240
	MM-6	55,67	18,15	0,825	0,669	38,9	0,734	31,2	0,417	17,8	1,077	0,890
56/II-1	MM-2	64,55	7,92	0,264	0,592	30,9	0,668	38,0	0,767	37,8	1,177	0,860
	MM-4	62,36	7,92	0,264	0,637	53,9	0,397	56,2	0,389	63,3	0,845	0,730
56/II-2	MM-2	64,55	7,92	0,264	0,849	22,7	0,775	26,0	0,873	32,5	1,443	1,090
	MM-4	62,36	7,92	0,264	0,892	56,4	0,689	42,4	0,338	71,2	1,176	1,090
57/I	MM-2	69,74	14,00	0,569	1,389	16,2	1,363	38,9	1,375	34,5	2,383	1,850
	MM-4	65,51	14,00	0,569	1,401	30,0	1,007	48,5	0,727	41,5	1,872	1,670
	MM-6	61,91	14,00	0,569	0,566	43,3	0,734	30,8	0,522	43,0	1,064	0,850
57/II	MM-2	69,85	10,45	0,550	3,087	29,3	2,085	36,1	2,248	34,1	4,351	3,170
	MM-4	42,82	10,45	0,550	2,166	65,0	2,040	71,9	2,181	74,3	3,689	2,810
	MM-6	37,09	10,45	0,550	2,137	44,0	1,860	68,6	1,173	48,4	3,066	2,420
58/I	MM-2	68,46	25,0	0,55	1,338	33,9	1,737	42,9	1,534	33,9	2,676	1,960
	MM-4	68,75	25,0	0,55	1,427	47,0	0,901	38,3	0,519	63,6	1,765	1,630
59/I	MM-4	53,88	14,976	0,832	2,221	29,9	0,880	23,3	1,579	25,6	2,864	2,540
	MM-6	47,12	14,976	0,832	1,132	51,3	0,662	32,4	0,882	34,1	1,580	1,320
	MM-6a	50,04	14,976	0,832	2,972	23,6	1,880	43,4	1,435	26,1	3,797	3,110
59/II	MM-4	51,71	8,88	0,740	2,338	45,2	1,114	27,0	1,162	63,8	2,838	2,480
	MM-6	44,76	8,88	0,740	1,332	29,1	1,665	34,5	1,499	48,8	2,606	2,310
	MM-6a	47,91	8,88	0,740	2,058	47,9	3,019	41,2	1,521	37,8	3,957	3,420
59/III	MM-4	49,75	10,344	0,862	3,653	47,3	1,290	61,1	2,175	19,7	4,443	3,830
	MM-6	42,55	10,344	0,862	1,510	28,2	2,185	41,8	1,874	48,8	3,250	2,910
	MM-6a	45,83	10,344	0,862	2,501	25,2	1,709	17,4	0,810	31,5	3,135	2,720
60/I	MM-4	54,79	15,0	1,11	1,724	24,7	1,026	43,9	0,924	19,2	2,208	1,840
	MM-6	47,10	15,0	1,11	1,066	33,5	0,794	17,8	0,639	23,3	1,475	1,110

Redni broj	Mjerno mjesto	Rastojanje (m)	Ukupna količina eksploziva (kg)	Količina po intervalu usporenja (kg)	Maksimalna brzina oscilovanja po komponentama						Rezultanta (mm/s)	Stvarna rezultanta (mm/s)
					Vertikalna V _V		Transverzalna V _T		Longitudinalna V _L			
					mm/s	Hz	mm/s	Hz	mm/s	Hz		
60/II	MM-6a	48,82	15,0	1,11	2,029	38,3	1,369	19,2	0,810	41,8	2,577	2,070
	MM-4	52,10	12,21	1,11	1,812	51,3	1,231	40,3	1,221	38,2	2,508	2,150
	MM-6	43,98	12,21	1,11	1,421	26,7	1,832	24,4	1,102	24,8	2,567	1,960
	MM-6a	45,88	12,21	1,11	2,200	30,7	2,136	21,0	1,449	21,9	3,391	2,590
61/I	MM-4	58,29	16,65	0,925	1,754	31,5	1,407	46,3	0,596	55,4	2,326	1,990
	MM-6	47,97	16,65	0,925	0,821	40,3	1,015	42,4	0,772	46,2	1,516	1,220
	MM-7	27,78	16,65	0,925	6,030	69,5	5,354	66,4	11,72 4	59,0	14,229	13,650
61/II	MM-4	53,88	13,875	0,925	2,338	39,0	1,290	53,9	1,549	42,4	3,087	2,480
	MM-6	42,73	13,875	0,925	1,154	51,3	1,037	51,1	0,860	78,0	1,774	1,280
	MM-7a	18,52	13,875	0,925	10,288	44,2	4,429	19,9	3,112	16,9	11,625	10,530
61/III	MM-4	50,50	10,66	0,92	1,987	43,0	1,056	25,9	1,549	25,0	2,732	2,220
	MM-6	36,76	10,66	0,92	1,687	86,5	1,412	22,9	1,609	22,2	2,725	2,160
	MM-6a	36,48	10,66	0,92	6,744	49,6	3,930	42,7	1,663	22,9	7,980	7,000
62/I	MM-4	47,62	15,54	1,11	3,010	30,1	1,906	46,7	2,294	31,0	4,237	3,700
	MM-6	33,50	15,54	1,11	1,643	86,8	2,185	46,4	1,631	38,5	3,183	2,520
	MM-6a	28,86	15,54	1,11	2,901	62,3	3,717	31,6	1,492	35,4	4,945	3,890
62/II	MM-4	42,82	10,0	1,11	1,783	38,8	1,466	29,9	1,758	35,3	2,901	1,980
	MM-6	29,37	10,0	1,11	1,088	58,1	1,236	24,7	0,882	34,1	1,868	1,370
	MM-6a	27,84	10,0	1,11	1,400	35,6	1,481	21,5	0,767	49,9	2,177	1,790
63/I	MM-4	44,52	13,32	1,11	2,017	38,8	0,997	65,9	1,579	32,7	2,748	2,040
	MM-4c	67,44	13,32	1,11	1,572	21,7	1,509	22,2	1,890	29,5	2,884	2,430
	MM-6	29,01	13,32	1,11	1,887	79,1	1,346	30,4	0,882	40,3	2,480	2,200
63/II	MM-4	41,55	16,65	1,11	2,221	36,9	1,231	25,7	2,205	29,3	3,363	2,350
	MM-4c	63,98	16,65	1,11	2,543	22,7	1,880	23,7	2,757	28,5	4,195	3,250
	MM-6	27,25	16,65	1,11	1,576	56,5	2,229	56,5	1,102	68,2	2,944	2,580
63/III	MM-4	43,48	9,99	1,11	1,374	60,5	0,880	19,4	0,924	21,7	1,875	1,400
	MM-4c	27,03	9,99	1,11	2,200	38,0	1,851	25,3	2,018	24,5	3,512	2,710

Redni broj	Mjerno mjesto	Rastojanje (m)	Ukupna količina eksploziva (kg)	Količina po intervalu usporenja (kg)	Maksimalna brzina oscilovanja po komponentama						Rezultanta (mm/s)	Stvarna rezultanta (mm/s)
					Vertikalna V _V		Transverzalna V _T		Longitudinalna V _L			
					mm/s	Hz	mm/s	Hz	mm/s	Hz		
	MM-6	21,11	9,99	1,11	1,732	54,0	1,611	33,1	1,543	31,4	2,824	1,920
64/I	MM-4	39,97	17,76	1,11	3,420	31,4	2,170	32,4	1,728	46,5	4,403	3,760
	MM-6	24,68	17,76	1,11	2,753	45,9	3,288	52,8	2,358	49,2	4,894	3,610
	MM-6a	22,59	17,76	1,11	3,658	44,3	3,104	27,9	2,217	32,7	5,285	3,750
65/I	MM-4	56,33	16,65	1,11	1,841	24,1	1,525	39,9	1,788	22,7	2,985	2,390
	MM-6	48,75	16,65	1,11	1,132	46,0	1,589	37,6	0,507	18,1	2,016	1,640
	MM-6a	49,44	16,65	1,11	2,086	35,6	2,563	17,1	1,066	32,7	3,472	2,920
65/II	MM-4	52,78	13,32	1,11	2,338	33,6	1,114	39,9	1,788	19,8	3,147	2,510
	MM-6	44,72	13,32	1,11	1,487	43,0	1,236	34,4	1,080	38,8	2,215	1,650
	MM-6a	45,47	13,32	1,11	2,258	39,5	1,709	32,8	0,810	46,8	2,945	2,690
65/III	MM-4	49,48	13,32	1,11	2,046	43,9	1,319	39,9	1,519	16,8	2,869	2,640
	MM-6	49,91	13,32	1,11	5,866	39,5	1,081	22,7	1,014	27,8	1,716	1,240
	MM-6a	41,72	13,32	1,11	2,058	23,7	2,207	21,5	1,293	21,0	3,283	2,500
65/IV	MM-4	46,22	13,32	1,11	2,893	48,0	1,701	44,9	2,264	29,5	4,048	3,180
	MM-6	37,07	13,32	1,11	1,687	34,7	1,942	33,5	1,389	34,0	2,923	2,190
	MM-6a	37,98	13,32	1,11	2,543	23,5	2,378	17,1	1,293	21,3	3,714	3,100
66/I	MM-4	59,15	18,87	1,11	1,066	30,9	0,949	52,7	0,838	22,3	1,655	1,250
	MM-6	49,49	18,87	1,11	1,841	27,5	1,144	54,2	1,639	20,6	2,717	2,320
	MM-7a	23,31	18,87	1,11	14,432	41,7	5,810	20,1	2,430	20,0	15,746	15,020
66/II	MM-4	55,26	17,76	1,11	1,043	43,0	1,015	30,9	0,551	31,9	1,556	1,230
	MM-6	44,13	17,76	1,11	2,075	28,4	1,173	52,0	1,341	33,7	2,735	2,280
	MM-7a	22,25	17,76	1,11	14,746	53,3	6,664	40,2	3,254	64,2	16,506	14,540
66/III	MM-4	50,92	13,32	0,832	1,421	31,4	1,148	40,8	0,926	47,8	2,049	1,460
	MM-6	38,95	13,32	0,832	3,244	42,8	1,378	41,6	1,251	22,3	3,739	3,510
	MM-7a	23,28	13,32	0,832	13,717	43,6	5,598	44,3	2,771	26,3	15,072	13,960
67/I	MM-4	55,65	7,77	0,902	1,754	43,9	0,938	26,4	0,953	70,6	2,205	1,820
	MM-6	48,63	7,77	0,902	1,820	23,5	1,236	27,5	0,816	71,0	2,346	1,970
	MM-6a	29,51	7,77	0,902	4,801	51,8	2,108	41,7	1,165	20,7	4,940	4,830

Redni broj	Mjerno mjesto	Rastojanje (m)	Ukupna količina eksploziva (kg)	Količina po intervalu usporenja (kg)	Maksimalna brzina oscilovanja po komponentama						Rezultanta (mm/s)	Stvarna rezultanta (mm/s)
					Vertikalna V _V		Transverzalna V _T		Longitudinalna V _L			
					mm/s	Hz	mm/s	Hz	mm/s	Hz		
67/II	MM-4	58,38	19,98	1,11	2,075	40,3	1,642	58,1	1,102	14,9	2,866	2,640
	MM-6	49,75	19,98	1,11	0,844	38,3	0,861	33,5	0,705	29,3	1,396	1,100
	MM-6a	26,89	19,98	1,11	1,800	34,8	2,791	24,7	0,938	32,2	3,451	3,020
67/III	MM-4	61,49	8,25	1,11	1,228	27,5	0,850	49,0	0,834	28,6	1,710	1,280
	MM-6	51,41	8,25	1,11	0,444	43,9	0,640	26,4	0,441	32,9	0,895	0,740
	MM-6a	24,89	8,25	1,11	1,515	44,3	1,581	38,2	0,698	42,1	2,298	1,980
68/I	MM-4	45,94	12,21	1,11	3,566	44,7	2,258	44,4	2,026	23,5	4,682	3,720
	MM-6	37,62	12,21	1,11	1,954	40,8	1,876	34,7	1,499	40,0	3,095	2,340
	MM-6a	29,12	12,21	1,11	3,129	32,6	2,378	22,6	1,336	24,0	4,151	3,810
68/II	MM-4	49,23	14,79	1,11	2,250	43,4	1,290	59,9	1,341	39,5	2,919	2,390
	MM-6	39,02	14,79	1,11	1,554	50,1	1,479	29,2	1,014	47,3	2,373	1,680
	MM-6a	26,43	14,79	1,11	3,001	54,5	1,937	45,6	1,748	53,2	3,976	3,610
69/I	MM-4	52,42	17,76	1,11	3,420	34,5	2,375	27,1	1,609	35,1	4,464	3,680
	MM-6	44,18	17,76	1,11	2,020	42,1	2,361	28,1	1,102	30,9	3,296	2,420
	MM-6a	43,97	17,76	1,11	3,572	17,3	2,478	20,6	2,160	22,4	4,854	4,230
69/II	MM-4	54,64	11,10	1,11	1,812	32,4	1,525	43,0	1,281	34,0	2,692	2,300
	MM-6	44,84	11,10	1,11	3,330	20,3	0,949	35,6	0,970	27,3	3,596	3,350
	MM-6a	42,22	11,10	1,11	1,915	23,7	2,706	28,2	1,762	20,1	3,754	3,350
69/III	MM-4	56,57	2,14	0,535	1,724	29,5	1,173	42,5	0,775	16,6	2,224	1,900
	MM-6	46,34	2,14	0,535	2,509	27,1	1,037	23,3	0,661	34,1	2,794	2,530
	MM-6a	44,33	2,14	0,535	1,400	27,7	1,752	32,7	0,995	25,2	2,453	2,090
70/I	MM-4	55,34	18,87	1,11	4,033	36,9	2,228	48,4	1,370	45,4	4,806	4,040
	MM-6	50,06	18,87	1,11	1,421	27,7	2,273	27,8	1,521	39,9	3,082	2,560
	MM-6a	52,45	18,87	1,11	5,344	28,3	5,539	24,1	2,657	33,2	8,142	6,010
70/II	MM-4	58,62	16,89	1,38	2,777	28,6	1,525	46,3	1,251	21,6	3,406	3,180
	MM-6	51,44	16,89	1,38	1,199	21,8	1,015	39,5	0,860	39,5	1,791	1,520
	MM-6a	51,21	16,89	1,38	1,943	29,3	1,894	31,4	1,179	38,0	2,958	2,420
70/III	MM-4	51,62	22,24	1,36	3,451	22,0	1,901	45,7	1,469	21,7	4,205	3,860

Redni broj	Mjerno mjesto	Rastojanje (m)	Ukupna količina eksploziva (kg)	Količina po intervalu usporenja (kg)	Maksimalna brzina oscilovanja po komponentama						Rezultanta (mm/s)	Stvarna rezultanta (mm/s)
					Vertikalna V _V		Transverzalna V _T		Longitudinalna V _L			
					mm/s	Hz	mm/s	Hz	mm/s	Hz		
	MM-6	45,46	22,24	1,36	2,650	37,3	2,347	36,8	1,665	34,7	3,912	3,620
	MM-6a	47,40	22,24	1,36	3,299	22,7	3,069	20,4	2,895	27,3	5,355	4,340
71/I	MM-4	49,20	23,22	1,548	3,940	23,9	2,115	44,9	2,413	30,9	5,081	4,120
	MM-6	41,14	23,22	1,548	1,949	43,2	2,428	38,9	1,284	41,2	3,368	2,440
	MM-6a	49,42	23,22	1,548	2,728	46,3	2,937	32,2	2,026	18,6	4,491	3,340
71/II	MM-4	52,95	24,77	1,548	3,657	30,1	2,731	47,5	1,862	44,2	4,929	3,680
	MM-6	43,00	24,77	1,548	3,689	46,3	3,534	39,4	1,364	50,7	5,287	4,030
	MM-6a	49,47	24,77	1,548	2,754	63,1	1,640	27,3	3,184	15,8	4,518	3,640
72/I	MM-4	46,18	23,0	1,277	2,653	52,0	2,142	56,7	1,810	62,4	3,860	3,200
	MM-6a	50,95	23,0	1,277	2,468	51,3	1,852	21,2	0,763	42,5	3,178	2,500
73/I	MM-4a	58,39	8,8	0,8	8,860	37,7	2,436	34,0	1,810	49,4	9,365	9,030
	MM-6	34,52	8,8	0,8	2,130	45,4	4,397	31,1	1,846	48,2	5,223	4,670
	MM-6a	38,30	8,8	0,8	2,935	47,1	3,280	23,8	1,921	31,9	4,802	3,810
73/II	MM-4a	55,76	7,2	0,8	3,039	34,2	1,901	36,3	2,360	40,5	4,292	4,000
	MM-6	30,26	7,2	0,8	3,170	50,5	4,127	33,9	2,354	33,5	5,711	4,620
	MM-6a	34,35	7,2	0,8	4,598	46,5	1,984	35,9	2,579	37,0	5,632	5,210
74/I	MM-4a	53,25	8,0	1,0	2,215	34,7	1,178	32,9	1,469	51,5	2,907	2,250
	MM-6	25,81	8,0	1,0	6,053	61,3	6,582	75,1	4,708	44,5	10,105	7,800
	MM-6a	30,14	8,0	1,0	6,442	65,9	2,963	34,0	4,079	20,9	8,180	6,500
75/I	MM-4a	41,97	8,0	1,142	1,288	26,7	0,803	25,8	0,734	43,4	1,686	1,440
	MM-6	36,70	8,0	1,142	1,689	45,7	1,430	29,8	1,016	42,5	2,435	1,930
	MM-6a	55,08	8,0	1,142	1,974	28,2	2,143	25,8	2,000	23,7	3,534	3,210
75/II	MM-4a	44,54	8,0	1,00	1,365	65,2	1,017	30,6	0,813	53,4	1,886	1,410
	MM-6	35,49	8,0	1,00	2,078	56,5	2,050	34,5	0,963	58,1	3,074	2,500
	MM-6a	51,98	8,0	1,00	4,442	43,6	1,587	34,2	1,947	29,1	5,103	4,520
76/I	MM-4a	48,41	11,655	0,832	1,777	30,1	0,964	38,0	0,944	40,3	2,231	1,790
	MM-6	38,58	11,655	0,832	2,182	94,1	2,913	34,6	1,311	54,4	3,868	3,290
	MM-6a	48,10	11,655	0,832	4,676	43,3	2,963	31,8	3,711	28,9	6,664	5,630

Redni broj	Mjerno mjesto	Rastojanje (m)	Ukupna količina eksploziva (kg)	Količina po intervalu usporenja (kg)	Maksimalna brzina oscilovanja po komponentama						Rezultanta (mm/s)	Stvarna rezultanta (mm/s)
					Vertikalna V _V		Transverzalna V _T		Longitudinalna V _L			
					mm/s	Hz	mm/s	Hz	mm/s	Hz		
77/I	MM-4a	35,00	3,328	0,832	1,545	66,4	0,803	57,3	0,839	59,9	1,933	1,600
	MM-6	31,88	3,328	0,832	1,611	85,2	0,890	58,1	0,722	70,6	1,977	1,680
	MM-6a	53,23	3,328	0,832	1,637	48,2	0,952	31,7	1,500	30,4	2,416	1,770
77/II	MM-4a	38,40	7,488	0,555	2,498	53,8	1,499	34,1	1,233	44,2	3,163	2,660
	MM-6	28,88	7,488	0,555	2,962	67,1	2,374	26,6	2,086	48,2	4,331	3,010
	MM-6a	48,11	7,488	0,555	5,014	43,6	2,063	30,6	2,342	37,1	5,906	5,030
77/III	MM-4a	30,29	8,232	0,555	2,189	29,9	1,472	27,6	1,049	41,8	2,838	2,440
	MM-6	27,08	8,232	0,555	4,391	66,9	1,888	105,0	1,765	94,1	5,095	4,390
	MM-6a	50,31	8,232	0,555	2,806	48,8	1,644	37,3	1,474	33,8	3,570	2,890
77/IV	MM-4a	35,09	11,952	0,919	1,623	33,8	1,124	43,0	1,102	44,4	2,261	1,840
	MM-6	24,46	11,952	0,919	3,637	47,1	2,428	50,7	1,444	29,4	4,605	4,130
	MM-6a	45,18	11,952	0,919	4,468	46,0	1,984	29,1	2,500	29,6	5,491	4,690
78/I	MM-4a	35,37	9,984	0,832	2,009	36,7	2,008	21,6	2,072	53,0	3,516	2,410
	MM-6	30,93	9,984	0,832	2,104	89,5	1,511	24,8	1,765	52,5	3,134	2,520
	MM-6a	51,66	9,984	0,832	2,780	38,0	2,063	29,4	2,184	36,9	4,093	3,150
78/II	MM-4a	38,56	9,830	0,832	1,468	28,6	1,098	35,3	0,761	24,1	1,985	1,830
	MM-6	29,24	9,830	0,832	4,651	61,4	1,403	20,6	1,230	46,0	5,020	4,720
	MM-6a	47,96	9,830	0,832	1,455	25,9	1,190	20,0	1,500	32,9	2,405	1,760
78/III	MM-4a	42,10	10,178	0,727	1,627	37,1	1,151	43,9	1,495	45,5	2,493	2,090
	MM-6	28,27	10,178	0,727	4,183	59,2	3,102	22,0	0,963	49,4	5,296	5,200
	MM-6a	44,48	10,178	0,727	3,975	51,7	1,481	35,6	3,132	34,1	5,273	4,060
79/I	MM-4a	39,67	8,880	0,740	2,885	37,2	1,713	37,1	1,574	48,8	3,706	3,440
	MM-6	36,17	8,880	0,740	2,182	40,7	2,805	28,0	1,257	57,0	3,769	2,860
	MM-6a	55,42	8,880	0,740	4,182	37,8	2,513	28,7	2,579	24,5	5,518	4,350
79/II	MM-4a	42,45	11,12	0,794	2,112	52,6	1,419	45,4	1,154	30,3	2,794	2,310
	MM-6	34,39	11,12	0,794	1,871	50,9	1,645	20,6	1,043	44,9	2,701	1,890
	MM-6a	51,66	11,12	0,794	2,260	36,8	1,508	23,8	1,395	22,7	3,054	2,360
80/I	MM-4a	60,15	5,550	0,740	0,747	42,5	0,509	44,9	0,682	52,0	1,132	0,970

Redni broj	Mjerno mjesto	Rastojanje (m)	Ukupna količina eksploziva (kg)	Količina po intervalu usporenja (kg)	Maksimalna brzina oscilovanja po komponentama						Rezultanta (mm/s)	Stvarna rezultanta (mm/s)
					Vertikalna V _V		Transverzalna V _T		Longitudinalna V _L			
					mm/s	Hz	mm/s	Hz	mm/s	Hz		
	MM-6	37,44	5,550	0,740	1,485	98,3	0,998	36,8	0,695	57,3	2,209	2,000
	MM-6a	40,42	5,550	0,740	0,935	55,9	0,847	34,7	0,895	34,4	1,547	1,140
	80/II	MM-4a	57,91	13,45	1,240	1,442	37,5	0,830	38,0	1,075	39,1	1,358
	MM-6	33,93	13,45	1,240	3,533	98,6	3,345	32,9	2,060	60,5	5,283	4,290
	MM-6a	36,93	13,45	1,240	1,481	23,5	1,640	30,6	1,816	25,0	2,860	2,320
		MM-4a	51,70	27,614	0,555	1,957	38,0	1,044	33,5	0,577	42,1	2,292
MM-6		34,44	27,614	0,555	1,429	46,0	1,592	28,2	0,963	31,9	2,346	1,680
MM-6a		43,93	27,614	0,555	1,247	37,3	1,164	22,6	1,342	24,1	2,170	1,680
	MM-4a	39,05	1,386	0,693	1,417	34,1	0,883	38,4	0,472	59,9	1,735	1,450
	MM-6	37,82	1,386	0,693	0,701	34,1	0,728	25,0	0,321	54,9	1,060	0,800
	MM-6a	57,13	1,386	0,693	1,597	27,5	0,847	32,1	0,500	28,2	1,150	1,050
	MM-4a	47,00	3,33	0,555	1,880	31,7	0,937	28,2	0,629	41,2	2,193	2,100
	MM-6	34,43	3,33	0,555	1,039	28,9	1,484	40,6	0,588	27,1	1,905	1,640
	MM-6a	47,92	3,33	0,555	1,325	26,2	0,688	22,7	1,921	27,6	2,432	2,090
	MM-4a	43,57	7,77	0,555	1,803	39,8	1,419	43,0	1,652	39,0	2,827	2,640
	MM-6	33,28	7,77	0,555	1,559	34,8	1,538	29,1	1,070	38,8	2,437	1,970
	MM-6a	50,18	7,77	0,555	1,792	48,0	1,349	25,3	1,290	28,9	2,587	1,930
	MM-6	51,02	12,480	0,555	0,520	63,8	0,539	27,5	0,455	31,4	0,876	0,570
	MM-6a	48,78	12,480	0,555	0,416	19,4	0,503	18,3	0,342	26,7	0,737	0,630
	MM-7a	20,,35	12,480	0,555	5,521	37,5	2,436	16,2	1,259	24,6	6,434	5,840
	MM-6	50,78	15,525	0,555	0,753	21,7	0,944	26,4	0,642	36,6	1,367	0,970
	MM-6a	45,49	15,525	0,555	0,753	25,7	0,979	18,1	0,579	18,1	1,364	1,030
	MM-7a	19,06	15,525	0,555	10,559	38,0	5,006	17,0	2,124	21,6	11,877	10,590
	MM-6	47,07	15,995	0,555	1,143	24,6	0,971	22,3	0,669	30,9	1,642	1,200
	MM-6a	41,51	15,995	0,555	1,844	25,0	1,138	17,0	1,474	22,7	2,621	1,890
	MM-7a	18,52	15,995	0,555	9,761	31,2	5,676	38,3	3,829	23,7	11,923	9,890
	MM-4a	44,21	2,775	0,555	1,210	37,3	0,589	31,6	0,787	37,3	1,559	1,460
	MM-6	33,85	2,775	0,555	1,793	40,3	1,699	27,3	0,829	35,9	2,605	2,050

Redni broj	Mjerno mjesto	Rastojanje (m)	Ukupna količina eksploziva (kg)	Količina po intervalu usporenja (kg)	Maksimalna brzina oscilovanja po komponentama						Rezultanta (mm/s)	Stvarna rezultanta (mm/s)
					Vertikalna V _V		Transverzalna V _T		Longitudinalna V _L			
					mm/s	Hz	mm/s	Hz	mm/s	Hz		
	MM-6a	49,28	2,775	0,555	0,883	27,2	1,481	32,9	0,684	26,5	1,855	1,490
84/I	MM-4a	46,72	3,330	0,555	1,030	40,8	0,535	31,4	0,918	35,6	1,479	1,320
	MM-6	31,82	3,330	0,555	2,208	37,6	2,239	32,4	1,016	50,0	3,305	2,610
	MM-6a	44,73	3,330	0,555	1,013	23,5	1,270	33,5	0,737	32,9	1,784	1,310
85/I	MM-4a	43,60	24,0	0,444	1,932	36,5	1,071	31,6	0,944	47,1	2,402	2,090
	MM-6	37,28	24,0	0,444	1,377	38,8	1,511	28,8	0,776	26,4	2,186	1,710
	MM-6a	53,91	24,0	0,444	1,481	33,2	1,164	27,6	1,526	28,9	2,424	1,730
86/I	MM-6	35,76	10,0	0,694	3,127	51,1	2,785	33,8	1,877	49,4	4,589	3,650
	MM-6a	39,53	10,0	0,694	2,572	27,3	2,221	20,0	1,577	26,5	3,746	3,000
86/II	MM-6	37,22	8,0	0,555	1,929	47,1	1,964	45,5	1,400	42,1	3,088	2,410
	MM-6a	37,32	8,0	0,555	2,143	28,9	1,581	34,9	1,606	18,1	3,109	2,660

BIOGRAFIJA AUTORA

Ljubica, Vasilj, Figun, rođena je 25.02.1979. godine u Prijedor, gde je završila osnovnu i srednju hemijsko-građevinsku školu i stekla zvanje građevinski tehničar za visokogradnju.

Univerzitetsku diplomu rudarskog inženjera stekla je 2003. g. na Univerzitetu u Banjoj Luci, Tehnološki fakultet Banja Luka, Rudarski odsjek Prijedor, sa ocjenom 10 na diplomskom i prosječnom ocjenom u toku studija 8,02. Diplomirala je na temu: Analiza povreda na radu u RJ "Rudnik" ZDP RiTE "Ugljevik" sa prijedlogom mjera zaštite.

U periodu od 2003 – 2004. g. je radila u RŽR "Ljubija" a.d. Prijedor, kao volonter na radnom mjestu diplomiranog inženjera rudarstva-pripravnik.

Potom do 2005.g. je radila u d.o.o. Rudarski institut Prijedor kao spoljni saradnik za rudarstvo, da bi u 2005. g. prešla na Univerzitet u Banjoj Luci, Tehnološki fakultet u Banjoj Luci, Rudarski fakultet Prijedor, gdje zasniva stalni radni odnos, kao saradnik- asistent, naučna oblast Rudarsko istraživanje mineralnih sirovina. Od maja 2009. godine zaposlena na Rudarskom fakultetu Prijedor, Univerziteta u Banjoj Luci na mjestu saradnika na užim naučnim oblastima: Podzemna eksploatacija mineralnih sirovina i Površinska eksploatacija mineralnih sirovina na predmetima: Bušenje i miniranje, Ventilacija u rudarstvu i Tehnička zaštita i regulative, gdje je i trenutno zaposlena.

Poslijediplomske studije upisala je 2005. godine na Rudarsko – geološkom fakultetu, Univerzitet u Beogradu, Rudarski odsjek, naučna oblast Rudarstvo, naučno područje Zaštita na radu i zaštita životne sredine i magistrirala 25.07.2014.godine, na temu: Zoniranje buke na površinskom kopu "Buvač" – Prijedor.

U dosadašnjem radnom iskustvu stekla je obrazovno, naučno, stručno kao i istraživačko iskustvo, učestvujući sa radovima na naučnim i stručnim skupovima i časopisima nacionalnog i međunarodnog značaja, u zemlji i inostranstvu, objavivši 21 naučni i stručni rad.

Majka dvoje djece.

Spisak radova objavljenih nakon prijave teme doktorske disertacije

Spisak naučnih radova iz teme doktorske disertacije:

1. **Lj. Figun**, S. Kostić, V. Malbašić, S. Agbaba; Definisane sigurnosne zone pri miniranju na površinskom kopu "Hardovac" Ševarlije-Doboj. VX simpozijum iz inženjerske geologije i gotehnike, Beograd 2016
2. **Lj. Figun**, S. Kostić, S. Trajković; Procena jačine potresa od miniranja u gradskoj sredini primenom veštačkih neuronskih mreža. Međunarodno naučno-stručno savetovanje zemljotresno inženjerstvo i geotehnički aspekti građevinarstva, Vrnjačka Banja 2021. s.210-220
3. S.Kostić, **Lj. Figun**; ANN and MLR based estimation of allowed blast-induced vibrations for safe constructions at Hardovac limestone quarry (Bosnia and Herzegovina). Environmental Earth Sciences (2022) 81:43, DOI: 10.1007/s12665-021-10149-z

Spisak naučnih radova iz uže naučne oblasti:

1. A.Cvjetic, **Lj. Figun**, V. Milosavljevic, U. Pantelic, A. Tomasevic; Noise management at the Buvac open pit mine. 5th International Symposium Mining and Environmental protection, Vrdnik 2015, s 410-419
2. L.Stojanovic, **Lj. Figun**, T. Jelena; Risk management on Medjedja dam on tailing storage facility, Omarska mine Prijedor. Archives for Technical Sciences 2020, 22 (1), s.11-20 Review paper. UDK: 622.343 + 669.3]: 005.71 (497.6RS); DOI: 10.7251/afts.2020.1222.011, COBISS.RS-ID8853784
3. V. Todorović, J Trivan, D. Tošić, **Lj. Figun**; Characteristics of the main fans of the active underground mines JP PEU-Resavica. Vodeći nacionalni časopis (kategorija M24), Mining and Metallurgy Engineering Bor br.1-2/2020. s.35-40. UDC622.272/.45(045)=111 ISSN:2334-8836 (printed edition) ISSN:2406-1395 (online), doi:10.5937/mmeb2002035T, Bor 2020.

Spisak stručnih radova iz uže naučne oblasti:

1. S.Sređić, **Lj.Figun**, B.Šolaja; Analiza sadržaja mangana i željeza u otpadnim vodama rudnika željezne rude u Omarskoj. IV Međunarodni kongres inženjerstvo, ekologija i materijali u procesnoj industriji, Knjiga radova, Jahorina 2015. s. 769-777
2. **Lj. Figun**, A. Cvjetić, J. Trivan; Mogućnost upravljanja bukom na PK "Buvac". II Rudarsko-geološki forum, Prijedor 2016. s. 395-404

3. J. Trivan, **Lj. Figun**, I. Rajlić; Assessment of the situation of the drainage system on the open pit of Buvač in the period from 2013 to 2016. 7th BalkanMine Congress- Proceedings, Prijedor 2017. s. 151-158
4. B. Vranješ, **Lj. Figun**, N. Trbojević; Application of the Ishikawa and RCA methods for determining the cause accidents at work in steering mininig machines. 7th BalkanMine Congress- Proceedings, Prijedor 2017. s. 359-366
5. N. Zdjelar, **Lj. Figun**, N. Cvijetić, J. Trivan; Systematization of injuries at work in „EFT Rudnik i Termoelektrana Stanari“. 7th BalkanMine Congress- Proceedings, Prijedor 2017. s. 375-382

Ostali radovi:

1. Lj.Tankosić, **Lj.Figun**; Deponovanje čvrstog otpada u opštini Prijedor i perspektive reciklaže. Zbornik radova sa I Simpozijuma o reciklažnim tehnologijama i održivom razvoju, sa međunarodnim učešćem, Soko Banja 2006. s.261-268.
2. Lj.Tankosić, J.Trivan, D.Tošić, **Lj.Figun**; Uticaj sitnih emitovanih čestica krečnjačke prašine na životnu sredinu u rudniku “Drenovača“ i mogućnost njene valorizacije. Zbornik radova sa I okruglog stola sa međunarodnim učešćem, Zaštita životne sredine u industrijskim područjima, Kosovska Mitrovica 2007. s. 166-174.
3. J.Trivan, Lj.Tankosić, D.Tošić, **Lj.Figun**; Analiza kvaliteta vode rijeke Sane na području opštine Prijedor u periodu od 1960 do 2005 godine. Zbornik radova sa skupa Ekološka istina sa međunarodnim učešćem, Sokobanja 2007. s.367-372.
4. S.Majstorović, **Lj.Figun**, Lj.Tankosić; Procjena uticaja eksploatacije krečnjaka na životnu sredinu. Zbornik radova sa IV Naučno-stručno savjetovanje iz oblasti rudarstva, Nove tehnologije i dostignuća u rudarstvu i geologiji, Trebinje 2007. s.47-52.
5. **Lj.Figun**, D.Topić, Lj.Tankosić; Mogućnost primjene trakastih transportera za transport krečnjaka sa PK “Drenovača“ do otpremnog depoa. Zbornik radova sa VII Internacionalnog simpozijuma o transportu i izvozu ISTI 08 – Sadašnje stanje i razvoj rudničkog transporta i izvoza, Tara 2008. s.148-153.
6. M.Ivković, **Lj.Figun**, I.Živojinović, S.Ivković; Optimizacija proizvodno-tehničkih parametara stubne metode otkopavanja ugljenih slojeva. Vodeći nacionalni časopis “Rudarski radovi“ br.4/2011. Bor 2011. s.65-72
7. J.Trivan, D.Tošić, **Lj.Figun**, Lj.Tankosić; Istraživanje opasnosti od iznenadnih prodora vode u podzemnim rudnicima uglja u Srbiji. Zbornik radova sa III Simpozijum sa međunarodnim učešćem “Rudrstvo 2012“, Zlatibor 2012. s 238-241

8. S.Majstorović, V.Malbašić, J.Trivan, **Lj.Figun**, M.Čelebić; Aspekti bezbjednosti i zaštite životne sredine prilikom upotrebe ANFO eksploziva u rudniku “Sase“ Srebrenica. Vodeći nacionalni časopis “Rudarski radovi“ br.2-3/2013. Bor 2013. s.81-93
9. M.Ivković, J.Miljanović, **Lj.Figun**, Ž.Kovačević; Sistematizacija povreda na radu u podzemnim rudnicima uglja u Srbiji u 2013. godini. Vodeći nacionalni časopis “Rudarski radovi“ br.3/2014. Bor 2014. s.26-35
10. A. Cvjetić, N. Lilić, **Lj. Figun**, Lj. Kolonja; Modeliranje i predikcija buke na području površinskog kopa “Buvač“. Zbornik radova sa XI Međunarodne konferencije o površinskoj eksploataciji OMC 2014, s.27-41. Jugoslovenski komitet za površinsku eksploataciju,15.-18.09.2014, ISBN 978-86-83497-21-8.