

# **Model predviđanja potresa od miniranja na površinskim kopovima primenom simulacione metode Monte Karlo i fazi logike; Model for Prediction of Blast-Induced Ground Vibrations in Open Pit Mines Using Monte Carlo Simulation Method and Fuzzy Logic.**

Milanka N. Negovanović



**Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду**

**[ДР РГФ]**

Model predviđanja potresa od miniranja na površinskim kopovima primenom simulacione metode Monte Karlo i fazi logike; Model for Prediction of Blast-Induced Ground Vibrations in Open Pit Mines Using Monte Carlo Simulation Method and Fuzzy Logic. | Milanka N. Negovanović | Универзитет у Београду | 2015-06-30 | |

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0003981>

Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду омогућава приступ издањима Факултета и радовима запослених доступним у слободном приступу. - Претрага репозиторијума доступна је на [www.dr.rgf.bg.ac.rs](http://www.dr.rgf.bg.ac.rs)

The Digital repository of The University of Belgrade Faculty of Mining and Geology archives faculty publications available in open access, as well as the employees' publications. - The Repository is available at: [www.dr.rgf.bg.ac.rs](http://www.dr.rgf.bg.ac.rs)

UNIVERZITET U BEOGRADU  
RUDARSKO - GEOLOŠKI FAKULTET

Milanka N. Negovanović

**MODEL PREDVIĐANJA POTRESA OD  
MINIRANJA NA POVRŠINSKIM  
KOPOVIMA PRIMENOM SIMULACIONE  
METODE MONTE KARLO I FAZI LOGIKE**

doktorska disertacija

Beograd, 2015

UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF MINING AND GEOLOGY

Milanka N. Negovanović

**MODEL FOR PREDICTION OF BLAST-  
INDUCED GROUND VIBRATIONS IN  
OPEN PIT MINES USING MONTE CARLO  
SIMULATION METHOD AND FUZZY  
LOGIC**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2015

## **Mentor**

dr Igor Miljanović, vanredni profesor

Uža naučna oblast: Primenjeno računarstvo i sistemsko inženjerstvo

Univerzitet u Beogradu, Rudarsko - geološki fakultet

## **Članovi komisije**

1. dr Igor Miljanović, vanredni profesor

Uža naučna oblast: Primenjeno računarstvo i sistemsko inženjerstvo

Univerzitet u Beogradu, Rudarsko - geološki fakultet

2. dr Lazar Kričak, redovni profesor

Uža naučna oblast: Eksploatacija čvrstih mineralnih sirovina i  
mehanika stena

Univerzitet u Beogradu, Rudarsko - geološki fakultet

3. dr Dragoslav Kuzmanović, redovni profesor

Uža naučna oblast: Mehanika

Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet

Datum odbrane:

# **MODEL PREDVIĐANJA POTRESA OD MINIRANJA NA POVRŠINSKIM KOPOVIMA PRIMENOM SIMULACIONE METODE MONTE KARLO I FAZI LOGIKE**

## **Rezime**

Modeliranje predviđanja potresa tla od miniranja primenom fazi logike i metode Monte Karlo zasnovano je na podacima dobijenim terenskim merenjima potresa uzrokovanih miniranjem. Promenljive modela definisane su analizom parametara bušenja i miniranja minskih serija, kao i velosigrama izmerenih potresa od miniranja. Iskorišćene su prednosti fazi logike u implementaciji mnogo većeg broja ulaznih i izlaznih veličina za modeliranje u odnosu na postojeće empirijske modele. Na osnovu identičnih podataka, dobijen je regresioni model predviđanja potresa, da bi se izvršilo testiranje novog modela. U cilju povećanja pouzdanosti modela predviđanja, izvršena je analiza izmerenih karakteristika potresa prema postojećim standardima, izračunati su spektri odziva na osnovu velosigrama, izvršeno je merenje i analiza pomeraja pukotina usled potresa od miniranja i dnevnih promena temperature i relativne vlažnosti vazduha na jednom od stambenih objekata. Tokom istraživanja, registrovan je zemljotres 03. novembra 2010. god. sa epicentrom u Kraljevu, što je omogućilo analizu velosigrama potresa uzrokovanih zemljotresom.

Testiranjem modela utvrđena je visoka pouzdanost predviđanja u odnosu na postojeći regresioni model. Uzimajući u obzir kompleksnost problema predviđanja potresa od miniranja, kao i određen stepen neizvesnosti, povezan sa karakteristikama stenskog materijala, primenjen je Monte Karlo model za određivanje učestalosti pojavljivanja kritičnih vrednosti pokazatelja potresa, za konkretne slučajeve miniranja.

Metodologija modeliranja može se primeniti pri predviđanju potresa uzrokovanih miniranjem na svim površinskim kopovima.

**Ključne reči:** model, predviđanje potresa, miniranje, površinski kop, Monte Karlo, fazi logika, regresiona analiza, FFT analiza, spektri odziva, pomeraj pukotina

**Naučna oblast:** Rudarsko inženjerstvo

**Uža naučna oblast:** Eksploatacija čvrstih mineralnih sirovina i mehanika stena

**UDK:** 519.87/.245:534.64

614.83:622.235/.271/.3 (043.3)

# **MODEL FOR PREDICTION OF BLAST-INDUCED GROUND VIBRATIONS IN OPEN PIT MINES USING MONTE CARLO SIMULATION METHOD AND FUZZY LOGIC**

## **Abstract**

Modeling the prediction of blast-induced ground vibrations using fuzzy logic and Monte Carlo method is based on data obtained by field measurements of ground vibrations induced by blasting. The variables of the model are defined by the analysis of drilling and blasting parameters of blasting rounds as well as vibration time histories of measured vibrations. The advantages of fuzzy logic in the implementation of a much larger number of input and output variables for modeling compared to the existing empirical models are applied. The regression model for the prediction of vibrations is obtained on the basis of identical data for testing the new model. In order to increase the reliability of prediction model, the analysis of measured vibration characteristics according to existing standards, the response spectra on the basis of vibration time histories as well as the measurement and analysis of crack displacement due to vibration from blasting and daily changes in temperature and relative humidity in one of the residential buildings have been carried out. During the research, the earthquake was registered on November 3<sup>rd</sup> 2010. with its epicenter in Kraljevo, which enabled the analysis of vibration time histories induced by earthquake.

Testing the model revealed the high reliability of prediction in relation to existing regression model. Taking into account the complexity of prediction of blast-induced vibrations as well as a certain degree of uncertainty associated with the characteristics of rock mass, the Monte Carlo model has been applied to determine the frequency of occurrence of ground vibration critical values for the specific blasting cases.

The methodology of modeling can be applied for the prediction of vibration from blasting in all open pit mines.

**Keywords:** model, prediction of vibrations, blasting, open pit mine, Monte Carlo, fuzzy logic, regression analysis, FFT analysis, response spectra, crack displacement

**Scientific field:** Mining Engineering

**Narrow scientific field:** Exploitation of solid mineral raw materials and rock mechanics

**UDC:** 519.87/.245:534.64

614.83:622.235/.271/.3 (043.3)

# SADRŽAJ

<b>1.0 UVOD.....</b>	<b>1</b>
1.1 PREDMET ISTRAŽIVANJA.....	1
1.2 CILJ ISTRAŽIVANJA.....	1
1.3 POLAZNE POSTAVKE U ISTRAŽIVANJIMA.....	2
1.4 NAUČNE METODE ISTRAŽIVANJA.....	2
1.5 PRIKAZ RANIJIH ISTRAŽIVANJA NA PREDMETNOM POLJU U SVETU.....	3
<b>2.0 OPŠTI DEO.....</b>	<b>8</b>
2.1 FAZE DROBLJENJA STENSKE MASE.....	8
2.1.1 Detonacija.....	8
2.1.2 Prostiranje udarnog talasa.....	9
2.1.3 Pritisak gasova.....	9
2.1.4 Odbacivanje stenske mase.....	9
2.2 MEHANIZAM EKSPLOZIJE U NEOGRANIČENOJ ČVRSTOJ SREDINI..	9
2.3 SEIZMIČKI EFEKAT MINIRANJA.....	11
2.3.1 Vrste seizmičkih talasa.....	14
2.3.2. Sinusoidalna aproksimacija vibracija od miniranja.....	18
2.4 FAKTORI KOJI UTIČU NA KARAKTERISTIKE SEIZMIČKIH TALASA UZROKOVANIH MINIRANJEM.....	21
2.4.1 Karakteristike stenske sredine i tla.....	21
2.4.2 Količina eksploziva po intervalu usporenja.....	22
2.4.3 Rastojanje od mesta miniranja.....	22
2.4.4 Specifična potrošnja eksploziva.....	23
2.4.5 Vrsta eksploziva.....	24
2.4.6 Optimalno vreme usporenja.....	24
2.4.7 Šema iniciranja.....	27
2.4.8 Prečnik minske bušotine.....	27

2.4.9 Devijacija bušenja.....	27
2.4.10 Visina etaže.....	28
2.4.11 Linija najmanjeg otpora i rastojanje između minskih bušotina.....	28
2.4.12 Probušenje minske bušotine.....	29
2.4.13 Dužina minskog čepa.....	29
2.4.14 Nagib minske bušotine.....	29
2.4.15 Broj minskih bušotina.....	29
2.4.16 Odstupanje nominalnog vremena usporenja sredstava za iniciranje.....	30
2.4.16.1 Vreme iniciranja bušotina i verovatnoća preklapanja.....	35
2.4.16.2 Vremenska analiza šeme iniciranja.....	36
2.5 MERENJE POTRESA.....	38
2.5.1 Digitalni seizmografi.....	39
2.5.1.1 Karakteristike digitalnog seizmografa Minimate Plus™ Kompanije Instantel.....	41
2.5.2 Preciznost seizmografa i kalibracija.....	43
2.5.3. Procedura postavljanja seizmografa.....	43
2.5.4 Registrovanje oscilacija.....	43
2.5.5 Interpretacija seizmograma.....	45
2.6 PREDVIĐANJE POTRESA OD MINIRANJA NA POVRŠINSKIM KOPOVIMA.....	48
2.6.1 Modeli za predviđanje potresa od miniranja.....	49
2.6.2 Kontrola potresa.....	52
2.6.2.1 Kontrola potresa pomoću regresionog modela predviđanja brzine oscilovanja.....	53
2.7 REAKCIJA OBJEKATA PRI PROLASKU SEIZMIČKIH TALASA.....	55
2.7.1 Model sa jednim stepenom slobode.....	56
2.7.1.1 Matematika modela sa jednim stepenom slobode.....	58
2.7.2 Karakteristike objekta dobijene iz izmerenog odziva na vibracije.....	59
2.7.3 Spektri odziva i pseudo brzina.....	61
2.7.3.1 Spektar odziva i tripartitni dijagram.....	62
2.7.3.2 Različiti oblici spektara odziva.....	64
2.7.3.3 Spektar odziva i važnost frekvencije.....	68



2.7.3.4 Granice spektra odziva.....	69
2.7.3.5 Prevođenje pseudo brzine u naprezanje.....	69
2.7.3.6 Spektri odziva i mogućnost pojave pukotina.....	71
2.8 EFEKTI TALASNE DUŽINE SEIZMIČKIH TALASA NA OŠTEĆENJE OBJEKATA.....	73
2.9 POSLEDICE POTRESA NA OBJEKTE.....	74
2.10 STANDARDI KOJI REGULIŠU POTRESE OD MINIRANJA.....	74
2.10.1 Noviji kriterijumi oštećenja.....	77
2.10.2 Alternativni kriterijumi nivoa vibracija od miniranja.....	78
2.10.3 Propisi Američkog Odeljenja za površinsku eksploataciju.....	79
2.10.4 Ruski standard.....	81
2.10.5 Kriterijum Akademije Nauka Rusije.....	82
2.10.6 Nemački standard DIN 4150-3 iz 1999.god.....	83
2.10.7 Standard u Velikoj Britaniji.....	85
2.10.8 Australijski standard.....	86
2.11 VIŠESTRUKO POREKLO PUKOTINA.....	87
2.12 UZROCI POJAVE PUKOTINA NA OBJEKTIMA KOJI NISU POVEZANI SA POTRESIMA OD MINIRANJA.....	89
2.13 EFEKTI POTRESA PRI KOJIMA NE NASTAJU OŠTEĆENJA.....	90
2.14 MERE SMANJENJA SEIZMIČKIH EFEKATA MINIRANJA NA POVRŠINSKIM KOPOVIMA.....	91
2.14.1 Smanjenje količine eksploziva po intervalu usporenja.....	91
2.14.2 Izbor optimalnog intervala usporenja između minskih punjenja.....	91
2.14.3 Promena šeme iniciranja.....	92
2.14.4 Primena razdvojenih minskih punjenja u bušotini.....	92
2.14.5 Smanjenje prečnika eksplozivnog punjenja.....	93
2.14.6 Smanjenje prečnika minske bušotine.....	93
2.14.7 Smanjenje dužine bušotine.....	93
2.14.8 Izbor optimalne dužine probušenja.....	94
2.14.9 Promena nagiba bušotine.....	94
2.14.10 Izbor optimalnog koeficijenta zbliženja minskih bušotina.....	95
2.14.11 Povećanje preciznosti bušenja i merenje parametara u toku bušenja.....	96

2.14.12 Praćenje stanja minske bušotine.....	99
2.14.13 Smanjenje intenziteta potresa od miniranja primenom zaštitnih ekrana.....	101
<b>3.0 METODOLOGIJA TERENSKIH ISTRAŽIVANJA.....</b>	<b>108</b>
3.1 OPIS LOKACIJE TERENSKIH ISTRAŽIVANJA.....	109
3.1.1 Geološke karakteristike ležišta "Veliki Krivelj".....	109
3.1.2 Inženjersko-geološke karakteristike ležišta.....	109
3.1.3 Fizičko-mehaničke karakteristike stena.....	110
3.1.4 Tehnologija eksploatacije na površinskom kopu "Veliki Krivelj" RTB Bor..	111
3.2 PRORAČUN PARAMETARA BUŠENJA I MINIRANJA PRI PROIZVODNOM MINIRANJU NA POVRŠINSKIM KOPOVIMA.....	116
3.3 KARAKTERISTIKE SEIZMOGRAFA PRIMENJENOG ZA PRAĆENJE POTRESA OD MINIRANJA.....	122
<b>4.0 PRIKAZ REZULTATA PRAĆENJA POTRESA OD MINIRANJA I DISKUSIJA.....</b>	<b>126</b>
4.1 SOFTVER ZA PRIKAZ PODATAKA IZMERENIH POTRESA OD MINIRANJA .....	126
4.2 SOFTVER ZA ANALIZU VELOSIGRAMA.....	132
4.2.1 Analiza frekvencija velosigrama.....	134
4.3 IZRAČUNAVANJE SPEKTRA ODZIVA.....	138
4.4 ANALIZA IZMERENIH PODATAKA PRIMENOM STANDARDA DIN 4150-3.....	144
4.5 KONTINUIRANO PRAĆENJE POMERAJA PUKOTINA NA STAMBENOM OBJEKTU U CILJU POREĐENJA UTICAJA MINIRANJA I VREMENSKIH PRILIKA.....	145
4.5.1 Pomeraj pukotine usled vibracija od miniranja.....	147
4.5.2 Pomeraj pukotina usled svakodnevnih kućnih aktivnosti.....	147
4.5.3 Pomeraj pukotine usled dugotrajnih klimatskih efekata.....	148

4.5.4 Analiza kontinuiranog daljinskog merenja pomeraja pukotina na stambenom objektu u neposrednom okruženju površinskog kopa "Veliki Krivelj" RTB Bor.....	149
4.5.4.1 Metodologija merenja.....	149
4.5.4.2 Karakteristike sistema za daljinsko kontinualno praćenje pukotina na objektu.....	150
4.5.4.3 Opis objekta i lokacija instrumenata.....	153
4.5.4.4 Rezultati merenja pomeraja pukotina od miniranja i vremenskih prilika....	156

## **5.0 PREDVIĐANJE POTRESA OD MINIRANJA FAZI I MONTE**

<b>KARLO MODELIRANJEM.....</b>	<b>172</b>
5.1 OSNOVE FAZI MODELIRANJA.....	172
5.1.1 Osnove teorije fazi skupova.....	172
5.1.1.1 Fazi skupovi.....	172
5.1.1.2 Fazi brojevi.....	174
5.1.1.3 Lingvističke promenljive.....	174
5.1.1.4 Operacije nad fazi skupovima.....	175
5.1.2 Osnovi projektovanja sistema baziranih na znanju.....	177
5.1.2.1 Baza znanja.....	178
5.1.2.2 Fazifikacija.....	179
5.1.2.3 Mehanizam zaključivanja.....	179
5.1.2.3.1 Agregacija.....	180
5.1.2.3.2 Implikacija.....	180
5.1.2.3.3 Akumulacija.....	181
5.1.3 Defazifikacija.....	181
5.1.4 Primena.....	184
5.1.4.1 Fazi kontrola.....	184
5.1.4.2 Analiza fazi podataka zasnovana na znanju.....	185
5.1.5 Fazi sistemi zaključivanja (FIS).....	186
5.1.5.1 Mamdani fazi modeli.....	188
5.1.5.1.1 Defazifikacija.....	189

5.2 PREDVIĐANJE POTRESA OD MINIRANJA PRIMENOM FAZI LOGIKE.....	191
5.2.1 Fazi model.....	196
5.2.1.1 Testiranje fazi modela.....	209
5.2.1.1.1 Predviđanje brzine oscilovanja primenom regresione analize.....	211
5.2.1.1.1.1 Model predviđanja potresa od miniranja primenom regresione analize za ukupan broj podataka.....	218
5.2.1.1.2 Uporedna analiza rezultata dobijenih merenjima i predviđanjem primenom fazi logike i regresione analize.....	222
5.3 Metoda Monte Karlo.....	225
5.3.1 Modeliranje slučajnih promenljivih.....	225
5.3.2 Primene metode Monte Karlo.....	226
5.3.3 Deterministički i stohastički procesi.....	227
5.3.4 Generisanje slučajnih brojeva.....	228
5.3.5 Osnovni principi primene metode Monte Karlo.....	230
5.4 MODEL PREDVIĐANJA POTRESA OD MINIRANJA PRIMENOM MONTE KARLO METODE.....	237
5.4.1 Monte Karlo model.....	238
5.4.1.1 Formiranje modela.....	238
5.4.1.1.1 Model višestruke linearne regresione analize za predviđanje brzine oscilovanja tla.....	239
5.4.1.2 Generisanje slučajnih ulaza.....	241
5.4.1.3 Monte Karlo simulacija.....	242
5.4.1.4 Analiza i statistička obrada rezultata Monte Karlo simulacije.....	243
<b>6.0 ZAKLJUČAK .....</b>	<b>247</b>
<b>7.0 LITERATURA .....</b>	<b>251</b>

## **PRILOZI**

## PREGLED SKRAĆENICA

USBM	Američki Biro za Rudarstvo ( <i>en. The United States Bureau of Mines</i> )
ISEE	Međunarodno Udruženje inženjera koji se bave miniranjem ( <i>en. The International Society of Explosive Engineers</i> )
FFT	Brza Furijeova Transformacija ( <i>en. The Fast Fourier Transform</i> )
SDF Model	Model sa jednim stepenom slobode ( <i>en. Single Degree of Freedom Model</i> )
PV	Pseudo brzina ( <i>en. Pseudo velocity</i> )
PSRV	Pseudo - spektralna brzina odziva ( <i>en. Pseudo - spectral response velocity</i> )
OSM	Odeljenje za površinsku eksploataciju ( <i>en. Office of Surface Mining</i> )
MWD	Merenje parametara u toku bušenja ( <i>en. Measuring While Drilling</i> )
GPS	Sistem globalnog pozicioniranja ( <i>en. Global Positioning System</i> )
RMS	Srednja kvadratna vrednost ( <i>en. Root-Mean Square</i> )
PPV	Maksimalna brzina oscilovanja tla ( <i>en. Peak Particle Velocity</i> )
FIS	Fazi sistem zaključivanja ( <i>en. Fuzzy Inference Systems</i> )
VAF	Varijansa predviđanja ( <i>en. Variance</i> )
RMSE	Koren srednje kvadratne greške ( <i>en. Root Mean Square Error</i> )
MAPE	Srednja apsolutna procentualna greška ( <i>en. Mean Absolute Percentage Error</i> )

## **1.0 UVOD**

### **1.1 PREDMET ISTRAŽIVANJA**

Predmet istraživanja doktorske disertacije vezan je za problematiku seizmičkog dejstva miniranja na površinskim kopovima, njihovog uticaja na okolne objekte i predviđanja potresa uzrokovanih miniranjem.

Pri detonaciji eksploziva dolazi do naglog oslobađanja energije, koja se delom troši na korisne oblike rada, kao što su drobljenje stenske mase, razbacivanje izdrobljene mase, ali i na zagrevanje neposredne okoline, stvaranje seizmičkih talasa i druge oblike nekorisnog rada. Kada seizmički talas naiđe na neku tačku terena tj. tla, on čestice tla u toj tački izbacuje iz ravnotežnog položaja, pri čemu one osciluju oko svog ravnotežnog položaja određeno vreme dok se ponovo ne vrate u ravnotežno stanje. Oscilovanje čestica stenskog masiva (terena ili tla) se manifestuje kao potres odnosno vibracija tla.

U rudarskoj praksi, potresi od miniranja predstavljaju veliki problem naročito ako se u blizini površinskog kopa nalaze stambeni objekti. Vlasnici objekata najčešće pojavu novih ili proširenje postojećih pukotina na svojim objektima dovode u vezu sa potresima od miniranja i iz tog razloga podnose tužbu protiv rudnika, pri čemu se problem rešava kroz dugotrajne sudske sporove. Miniranje može izazvati jače ili slabije potrese. Ukoliko intenzitet tih potresa prekorači dozvoljene granice, može doći do štetnih pa i opasnih posledica po ljude i okolne objekte.

Problem potresa je još izraženiji u slučajevima kada treba tek započeti sa miniranjem na nekom kopu, a da nije poznato kolike su dozvoljene količine eksploziva po intervalu usporenja koje treba inicirati na određenim rastojanjima kako bi se zaštitili okolni objekti od oštećenja. Tada je potrebno predvideti koliki će intenzitet potresa od miniranja biti za određene parametre bušenja i miniranja, što nije jednostavno obzirom da na intenzitet potresa izazvanog miniranjem utiče niz faktora.

### **1.2 CILJ ISTRAŽIVANJA**

Za predviđanje potresa uzrokovanih miniranjem na površinskim kopovima postoje različiti modeli. Najšire primenjivan model je model dobijen regresionom analizom kojim se definiše korelaciona veza između brzine oscilovanja tla i tri osnovna uticajna faktora: količine eksploziva po intervalu usporenja, karakteristika radne sredine i rastojanja od mesta miniranja. Cilj istraživanja je da se ispitivanjem na terenu i

analizom izmerenih podataka, formira model predviđanja potresa od miniranja na površinskim kopovima primenom tehnika mekog računarstva i metode Monte Karlo, na osnovu većeg broja ulaznih veličina i da se testira poređenjem sa postojećim regresionim modelom.

### **1.3 POLAZNE POSTAVKE U ISTRAŽIVANJIMA**

Osnovni problem predviđanja potresa uzrokovanim miniranjem je što se model predviđanja razvijen na određenom površinskom kopu ne može uopštavati zbog širokog opsega vrednosti ulaznih veličina koji utiču na tačnost modela. Karakteristike stene ili tla kao nehomogene radne sredine, variraju u širokom opsegu, pa im se kao ulaznim podacima za model ne može dodeliti jedinstvena vrednost iako su jedan od odlučujućih činilaca koji utiču na intenzitet potresa. Iz tog razloga se češće pribegava velikom broju izmerenih podataka za konkretan teren i njihovoj daljoj statističkoj obradi.

Razmatranjem literature i dosadašnjih saznanja iz ove složene oblasti, nametnula se ideja da se može izvršiti nadgradnja postojećih modela u pogledu proširenja primenljivosti.

U okviru istraživanja polazi se od hipoteze: predviđanje potresa može se matematički iskazati primenom simulacione metode Monte Karlo i fazi logike na osnovu izmerenih podataka na terenu, analize uticaja potresa na objekte i testiranja novog modela sa postojećim modelom dobijenim regresionom analizom.

### **1.4 NAUČNE METODE ISTRAŽIVANJA**

Pored opštih naučnih metoda, metode primenjene u disertaciji zasnivaju se na dosadašnjim saznanjima iz oblasti seizmičkih efekata miniranja, detaljnim razmatranjima faktora koji utiču na intenzitet potresa od miniranja, izmerenim podacima na terenu, analizi dobijenih podataka, primeni metoda Monte Karlo i fazi logike i poređenjem novog modela sa postojećim modelom dobijenim regresionom analizom.

Opšte naučne metode istraživanja u disertacije su: opservacija i analitičko-sintezne metode u toku obrade prethodnih istraživanja, matematičke metode u cilju razvoja matematičkog modela predviđanja potresa uzrokovanih miniranjem, statističke metode obrade podataka izmerenih tokom eksperimentalnog rada, analitičko-deduktivne metode u procesu matematičkog modiranja.

## 1.5 PRIKAZ RANIJIH ISTRAŽIVANJA NA PREDMETNOM POLJU U SVETU

Pri predviđanju potresa tla uzrokovanim miniranjem, primenjuju se različiti pokazatelji vibracija, kao što su brzina oscilovanja čestica tla, ubrzanje ili pomeraj. Brzina oscilovanja tla se najčešće koristi u različitim standardima kao pouzdan pokazatelj za ocenu i predviđanje oštećenja uzrokovanim potresima od miniranja. Brojni istraživači koji su se bavili proučavanjem potresa tla usled miniranja predlagali su različite modele za predviđanje maksimalne brzine oscilovanja tla primenom statističkih metoda, što je detaljnije prikazano u delu 2.6 disertacije. Jedan od prvih modela za predviđanje potresa [1] predložen je u radu *Vibration due to blasting and their effects on building structure (Vibracije od miniranja i njihov efekat na objekte)* od strane Morris 1950. godine [2] u kom je predstavljena matematička zavisnost između maksimalnog pomeraja čestica tla, kao karakteristike potresa i dva parametra miniranja: mase eksplozivnog punjenja i rastojanja od minskog polja do mernog mesta. Leconte je 1967 [1] godine, razmatrajući ponovo tehnike kontrole vibracija od miniranja, predložio da se maksimalni pomeraj u prethodnoj jednačini, zameni rezultujućom vrednosti tri komponente brzine oscilovanja čestica tla.

Među najrigoroznijim modelima za predviđanje potresa ubraja se model predložen od strane Blair i Duvall 1954. godine u Izveštaju Američkog Biroa za Rudarstvo (*en. The United States Bureau of Mines - USBM*) RI 5073 [3] pod nazivom *Evaluation of gages for measuring displacement, velocity, acceleration of seismic pulses (Evaluacija instrumenata za merenje pomeraja, brzine, ubrzanja seizmičkih impulsa)* i autora Duvall i Petkof, 1959. god. u Izveštaju Američkog Biroa za Rudarstvo USBM RI 5483 [4] *Spherical propagation of explosion-generated strain pulses in rock (Sferno prostiranje impulsnih naprezanja u steni nastalih eksplozijom)*, koji su pokušali da nađu korelaciju intenziteta seizmičkih potresa sa masom eksplozivnog punjenja i rastojanjem od mesta miniranja. Uz pretpostavke da je eksplozivno punjenje simetrična sfera, zaključili su da linearnu dimenziju treba korigovati trećim korenom mase eksplozivnog punjenja. Slične rezultate su dobili i Ambraseys i Hendron 1968.god. [5] u radu *Dynamic behaviour of rock mass (Dinamičko ponašanje stenske mase)*, kao i Dowding, 1971. godine [6] u svojoj doktorskoj disertaciji *Response of Buildings to Ground Vibrations from Construction Blasting (Odziv objekata na potrese tla pri miniranju u građevinarstvu)*.



Devine i Duvall [7] zapazili su u radu *Effect of Charge Weight on Vibration Levels for Millisecond Delayed Quarry Blast (Efekat količine eksploziva na nivoe vibracija za miniranja sa milisekundnim usporenjem na kopovima građevinsko-tehničkog kamena)* objavljenom 1963. god. da za cilindrična punjenja, rastojanja treba da budu korigovana deljenjem kvadratnim korenom količine eksploziva po intervalu usporenja. Predloženi model za predviđanje potresa od miniranja je jedan od najšire primenjivanih od strane mnogih istraživača, proizvođača i korisnika eksploziva.

Autori Davies et al. 1964. god. [8], Holmberg i Persson 1978.god. [9], Shoop i Daemen 1983.god. [10] nisu uzimali u razmatranje simetriju određenog punjenja, već su dali uopštenu jednačinu za predviđanje potresa i predstavili zavisnost između maksimalne brzine oscilovanja čestica tla, količine eksplozivnog punjenja po intervalu usporenja i rastojanja od morskog polja do mernog mesta u funkciji koeficijenata koji se dobijaju regresionom analizom i predstavljaju karakteristiku stenske sredine u kojoj se minira.

Langefors i Kilhstrom [11] u knjizi objavljenoj 1978. godine *The modern techniques of rock blasting (Moderne tehnike miniranja stena)* predstavili su svoje viđenje matematičke zavisnosti između rastojanja, količine eksploziva i brzine oscilovanja čestica tla. Matematičke zavisnosti između tri navedena parametra dali su i sledeći autori: Nicholls et al. 1971 [12] u Biltenu 656 Američkog Biroa za Rudarstvo USBM, Lundborg 1977.god. [1], Just i Free 1980. god. [1], Ghosh i Daemen 1983.god. [13], Ambraseys i Hendron 1968. god. [5], Indian Standard Institut 1973.god. [14], Gupta et al. 1987.god. [15], Pal Roy 1991.god. [16], Rai i Singh 2004.godine [17].

U knjizi *Vibrations from blasting (Vibracije od miniranja)* objavljenoj 2000. godine jedan od najznačajnijih autora koji se godinama bavi problematikom vibracija izazvanih miniranjem Siskind [18] navodi više modela predviđanja za različite stenske sredine, gde su terenskim merenjima utvrđene vrednosti koeficijenata, koje se uobičajeno daju u opštem obliku. Navedeni modeli poznati su iz ranijih istraživanja poput modela Nicholls et al. iz 1971. godine [12] iz Biltena 656 pod nazivom *Blasting Vibrations and Their Effects on Structures (Vibracije od miniranja i njihov efekat na objekte)*, kao i modela predstavljenog u Izveštaju RI 8507 Američkog Biroa za rudarstvo USBM (*en. the United States Bureau of Mines*) [19] pod nazivom *Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration From Surface Mine Blasting (Odziv objekata i oštećenje uzrokovano vibracijama tla od miniranja na površinskim kopovima)* autora Siskind

et.al. iz 1980. godine. Navodi se i model iz Izveštaja RI 9229 [20] Američkog Biroa za rudarstvo iz 1989. godine autora Siskind et al. *Comparative Study of Blasting Vibrations From Indiana Surface Coal Mines (Komparativna Studija vibracija od miniranja na površinskim kopovima uglja u Indijani)*, kao i Izveštaja *Ground Vibrations and Airblasts Monitored in Swedesburg, Pennsylvania, From Blasting at the McCoy Quarry (Vibracije tla i vazdušni udari usled miniranja praćeni na površinskom kopu građevinsko-tehničkog kamena McCoy u Svederburgu, Pensilvanija)* autora Crum et al. iz 1995. godine [21], gde je Siskind koautor. Bilten 656 kao i navedena tri Izveštaja Američkog Biroa za rudarstvo su veoma citirani u svim istraživanjima iz oblasti potresa od miniranja i poslužili su mnogim autorima kao polazna tačka za dalja istraživanja iz ove oblasti.

Navedeni empirijski modeli za predviđanje potresa od miniranja su uglavnom zasnovani na ulaznim parametrima: maksimalnoj količini eksploziva po intervalu usporenja, karakteristike radne sredine i rastojanju od morskog polja do mernog mesta. Zbog velikog broja parametara koji utiču na karakteristike i intenzitet potresa i njihove kompleksne međusobne zavisnosti, pojavljuju se sve više druge metode koje zamenjuju konvencionalne, kao što su metode zasnovane na fazi logici, metode Monte Karlo ili tehnike veštačke inteligencije.

Od ranijih istraživanja koja se odnose na primenu fazi logike u predviđanju potresa od miniranja treba izdvojiti istraživanje Fisne et al. 2010. godine [22] predstavljeno u radu *Prediction of environmental impacts of quarry blasting operation using fuzzy logic (Predviđanje uticaja miniranja na površinskom kopu građevinsko-tehničkog kamena na okolnu sredinu primenom fazi logike)*, gde je razvijen fazi model predviđanja maksimalne brzine oscilovanja čestica tla, na osnovu dva ulazna parametra, maksimalne količine eksploziva po intervalu usporenja i rastojanja od mesta miniranja do mesta merenja. Fazi skupovi su definisani Gausovim funkcijama pripadnosti. Treba napomenuti i rad autora *Ghasemi E. et al.* 2012. godine [23], koji su u radu *Development of a fuzzy model for predicting ground vibration caused by rock blasting in surface mining (Razvoj fazi modela za predviđanje potresa tla uzrokovanih miniranjem u površinskoj eksploataciji)* razvili fazi model Mamdani sistemom zaključivanja za predviđanje maksimalne brzine oscilovanja čestica tla na osnovu više ulaznih veličina: linije najmanjeg otpora, rastojanja između bušotina u redu, dužine čepa

i broja minskih bušotina, koje se iniciraju u jednom vremenskom intervalu, maksimalne količine eksploziva po intervalu usporenja i rastojanja od mesta miniranja do mesta merenja. Predloženi modeli u oba prethodna rada dali su veće koeficijente korelacije predviđanja u poređenju sa poznatim statističkim modelima. Osnovna razlika sa modelom predstavljenim u disertaciji je u ulaznim veličinama, kao i složenijim izlaznim parametrima, gde se pored maksimalne brzine oscilovanja razmatra i frekvencija, kao još jedan bitan parametar procene uticaja potresa na objekte.

Poslednjih godina, mnogi istraživači su pokušali da razviju nove modele za predviđanje potresa od miniranja primenom veštačkih neuronskih mreža u koje su uključili mnogo više ulaznih parametara koji utiču na potrese od miniranja, kao što su Singh i Singh 2005.god. [24], Khandelwal i Singh, 2006, 2007. god. [25,26], Iphar et al. 2008.god. [27], Mohamed 2009.god. [28], Khandelwal et al. 2009. god. [29], Khandelwal i Singh, 2009.god. [30], Bakhshandeh Amnieh et al. 2010.god. [31], Monjezi et al. 2010. god. [32], Verma i Singh, 2010. god. [33], Dehghani i Ataee-pour 2011. god. [34], Kamali i Ataei 2011. god. [35], Mohamed 2011. godine [36].

Orica je razvila model za upravljanje i kontrolu potresa i vazdušnih udara nastalih miniranjem na površinskim kopovima na osetljivim lokacijama blizu mesta gde se vrše rudarski radovi [37]. Model za predviđanje potresa od miniranja primenom Monte Karlo metode objedinjen je u softver za proračun parametara miniranja nazvan SHOTPlus®-i Pro [38], koji predstavlja kombinaciju inovativnog projektovanja procesa miniranja, mogućnosti simulacije i preciznog vremena usporenja primenom elektronskih detonatora. Statistički model za predviđanje potresa koji je razvila kompanija Orica primenjuje Monte Karlo metodu i koristi se više od 10 godina za kontrolu potresa i vazdušnih udara na rudnicima Australije [39]. Monte Karlo model ima više ulaznih parametara [40]: velosigram dobijen iniciranjem pojedinačnih minskih bušotina, zakon oscilovanja tla dobijen od pojedinačnih bušotina, izmerene brzine oscilovanja, vremena usporenja pri iniciranju i vremena odstupanja sredstava za iniciranje, količine minskih punjenja i geometrijski raspored minskih bušotina u odnosu na tačku merenja. Model uzima u obzir i efekat zaštitnog ekrana tj. smanjenja intenziteta potresa formiranjem pukotine presplit miniranjem. Model simulira potrese/vazdušne udare u specifičnoj tački za date parametre superpozicijom sekvenci fazno pomeranih velosigrama dobijenih od pojedinačnih minskih bušotina i daje sledeće

izlazne parametre: verovatnoću prekoračenja propisanih maksimalnih nivoa potresa, histogram očekivanih maksimalnih nivoa potresa, predviđeni velosigram u zavisnosti od vremena i spektar srednjih amplituda za tu specifičnu lokaciju. Mogućnosti navedenog modela za predviđanje potresa se još uvek usavršava na osnovu obimnih naučnih i terenskih istraživanja [41].

## **2.0 OPŠTI DEO**

Miniranje predstavlja sastavni deo tehnologije eksploatacije čvrstih mineralnih sirovina. Veliki broj rudarskih radova ne bi bio moguć ili ekonomski opravdan bez primene eksploziva. U početku primene eksploziva, nije se mnogo znalo o sporednim efektima miniranja [42]. Savremena tehnologija miniranja na površinskim kopovima danas se zasniva na drobljenju stenske mase primarnim ili proizvodnim miniranjem primenom osnovnih principa projektovanja i izbora parametara miniranja [43]. Danas se proučava ne samo primena energije eksploziva za drobljenje stene, već se razmatra i kontrola sporednih efekata miniranja [42]. Zaštita okoline se uglavnom obezbeđuje poštovanjem postojećih normi i ograničenja pri izvođenju svih vrsta miniranja na površinskim kopovima.

### **2.1 FAZE DROBLJENJA STENSKE MASE**

U procesu [43] drobljenja stenske mase mogu se izdvojiti četiri faze:

- detonacija,
- prostiranje udarnog talasa,
- ekspanzija gasova pod pritiskom i
- pomeranje (odbacivanje) stenske mase.

#### **2.1.1 Detonacija**

Faza detonacije je početna faza procesa drobljenja stenske mase. Razvojem detonacionog talasa u eksplozivu javlja se udarni pritisak na zidove bušotine u kojoj se eksploziv nalazi. Kod izduženih bušotinskih punjenja, kako detonacioni talas putuje kroz eksplozivno punjenje, tako se pomera i mesto pojave udarnog pritiska na zidove bušotine. Udarni pritisak ima maksimalnu vrednost na zidovima bušotine a zatim naglo opada po eksponencijalnom zakonu. Udarni pritisak izaziva visoka dinamična opterećenja na zidove bušotine, obično veća od čvrstoće stene, što izaziva usitnjavanje stene na zidu bušotine i proširenje zapremine bušotine. Proširenje bušotine uslovljava opadanje pritiska gasova eksplozije.

### **2.1.2 Prostiranje udarnog talasa**

Geometrija kojom se razvija udarni talas kroz stensku masu zavisi od velikog broja faktora: detonacione brzine, karakteristika stene, mesta i broja tačaka iniciranja eksploziva, oblika punjenja itd. Udarni talas na svom frontu izaziva kompresiju stenske mase u pravcu kretanja talasa sa tendencijom da sabije stensku masu. Pri tom se u pravcu normalnom na pravac kretanja talasa javljaju tangencijalni naponi koji stensku masu opterećuju na istezanje. Ukoliko pređu zateznu čvrstoću stene, mogu dovesti do stvaranja pukotina koje imaju radijalni pravac, pa se nazivaju radijalne pukotine. Zonu kompresije sledi zona razređenja u kojoj dolazi do zateznih naprežanja u pravcu kretanja talasa koja, ako su dovoljnog intenziteta, dovode do stvaranja tzv. koncentričnih pukotina [43].

### **2.1.3 Pritisak gasova**

Nakon formiranja gasovitih proizvoda reakcije pod visokim pritiskom i temperaturom, dolazi do njihovog širenja i popunjavanja proširenog prostora bušotine. Oni na zidove stenske mase vrše kvazistatički radijalni pritisak slično stanju u sudovima pod pritiskom koji oko bušotine izaziva naponsko polje. Gasovi se uvek kreću linijom najmanjeg otpora. Ukoliko između bušotine i slobodne površine postoji neka veza sa slabim otporom kao: otvorena pukotina, slabo vezana površ slojevitosti, meki proslojak ili slabo začepljena bušotina, pritisak gasova naglo opada, a time i kvalitet drobljenja i pomeranja stenske mase.

### **2.1.4 Odbacivanje stenske mase**

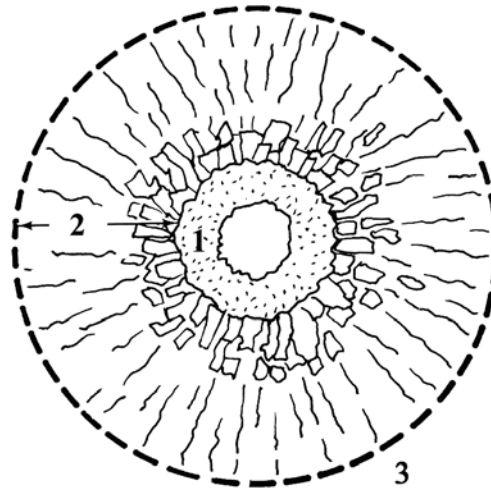
Poslednja faza u procesu drobljenja stenske mase je faza odbacivanja stenske mase. Geometrija odbacivanja stenske mase zavisi od više faktora: pritiska gasova, veličine otpora u vrhu i podu etaže, probušnja, veličine i kvaliteta čepa, postojanja mekših proslojaka, itd.

## **2.2 MEHANIZAM EKSPLOZIJE U NEOGRANIČENOJ ČVRSTOJ SREDINI**

Dejstvo eksplozije mine u homogenoj čvrstoj neograničenoj sredini [44], gde ne doseže do slobodne površine, javlja se u svim pravcima, podjednakom silom, a talas eksplozije

rasprostire se koncentrično oko minskog punjenja. To dejstvo eksplozije uslovno se deli na tri zone:

- zona sprašivanja
- zona drobljenja
- zona potresa



Slika 2-1. Zone dejstva eksplozije u neograničenoj sredini: 1- zona sprašivanja, 2 - zona drobljenja, 3 - zona elastičnih deformacija (zona potresa) [45]

Zona sprašivanja je izložena naj snažnijem dejstvu, pod čijim uticajem dolazi do zbijanja plastičnih stena i sprašivanja čvrstih stena. Pritisci izazvani eksplozijom višestruko prevazilaze (40 - 400 puta) dinamičku pritisnu čvrstoću stene i tu je najintenzivniji stepen usitnjavanja stene [43].

Zona drobljenja javlja se kao nastavak zone sprašivanja u kojoj je naprezanje znatno oslabljeno, ali još uvek dovoljno snažno da izazove stvaranje prslina i pukotina. Zona drobljenja [43] se može podeliti na dva dela: zona intenzivnog razaranja i zona smanjenog razaranja. U zoni intenzivnog razaranja javljaju se kako radijalne tako i koncentrične pukotine ili njihove kombinacije, izazvane kako dejstvom udarog talasa tako i pritiskom gasova. U zoni smanjenog razaranja pukotinski sistem je znatno ređi i uglavnom se sastoji od radijalno usmerenih pukotina.

Zona potresa [43] javlja se na još većoj udaljenosti gde su naponski talasi toliko oslabili da su u stanju da izvrše samo pomeranje čestica stenskog materijala u domenu elastičnih deformacija koje se manifestuju kao potres.

Između pomenutih zona ne postoji oštra granica već postepen prelaz iz jedne u drugu. U praksi miniranja praktičan značaj imaju samo zona sprašivanja i zona drobljenja, koje se

zajednički mogu nazvati zona razaranja. Treća zona u kojoj se vrši samo pomeranje materijalnih čestica poznata je i kao seizmička zona koja ne utiče na razaranja stenske mase, ali može biti štetna u pogledu otpornosti objekata ili stabilnosti stenskog materijala.

### **2.3 SEIZMIČKI EFEKAT MINIRANJA**

Energija eksplozije [43] se prenosi na stenski masiv u dva oblika: kao udarna energija u formi udarnog pritiska, tj. udarnog talasa i kao gasna energija (energija pritiska gasova) u formi bušotinskog pritiska. Smatra se da udarna energija čini oko 15%, a gasna energija oko 85% ukupno prenete energije eksplozije na stenu [42]. Ukupno preneti energija eksplozije u oba oblika troši se na različite efekte miniranja. Neki od ovih efekata miniranja su potrebni i energija potrošena na njih predstavlja upotrebljivu, odnosno korisnu energiju. Nasuprot njima, ostali efekti nisu produktivni, pa energija utrošena na njih predstavlja energetske gubitke.

U produktivne [43] efekte miniranja mogu se ubrojati:

- drobljenje stenske mase na licu mesta do željene granulacije i
- premeštanje izdrobljene mase i njeno slaganje sa približno željenim oblikom gomile na željenom mestu.

U neželjene i štetne efekte miniranja mogu se ubrojati:

- prekomerno drobljene stenske mase u neposrednoj okolini bušotine,
- drobljenje stenske mase iza i sa strane minskog polja,
- razletanje komada stene,
- vibracije tla,
- vazdušni udari.

Na osnovu istraživanja Berta [46] navodi da se energija preneti na stenu približno može raspodeliti na sledeće efekte prikazane u Tabeli 2-1.



Tabela 2-1. Procentualna raspodela energije prenete na stenu na različite efekte [46]

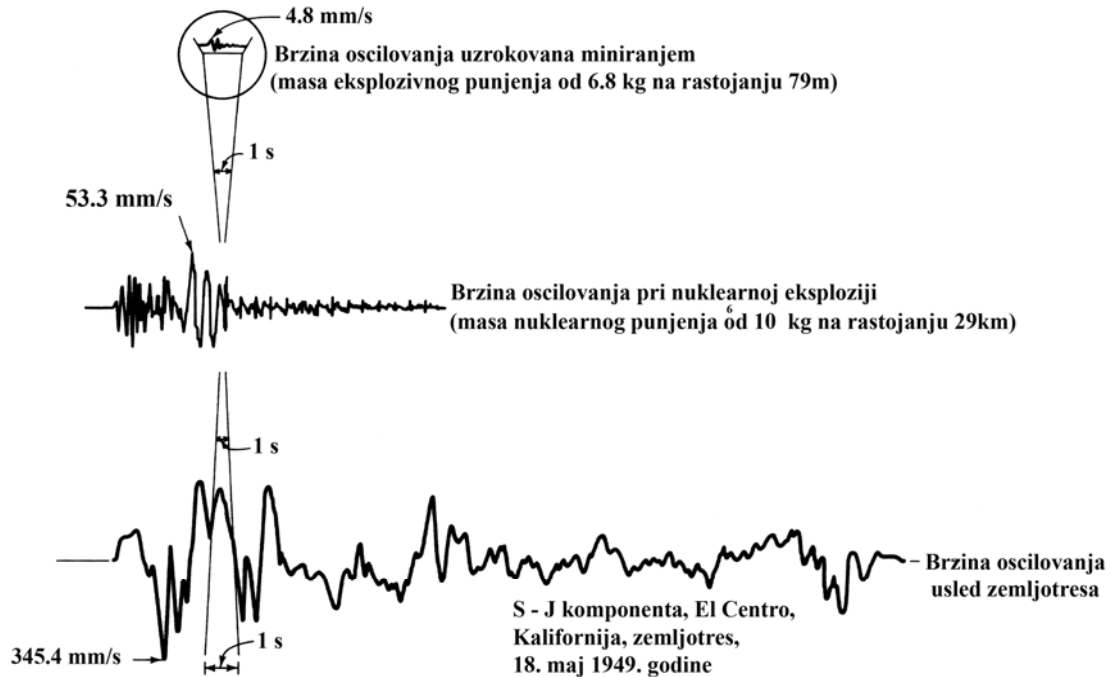
<b>Efekat</b>	<b>Procentualni udeo, (%)</b>
Formiranje pukotina oko bušotina	< 1 %
Drobljenje stene	15 %
Odbacivanje izdrobljene mase	4 %
Sprašivanje stene u blizini bušotine	1.5 - 2 %
Deformacije čvrste stene iza minskog polja	< 1 %
Razletanje komada	< 1 %
Vibracije tla	40 %
Vazdušni udari	38 - 39 %

Navedena raspodela se odnosi samo na energiju prenetu na stenu, ne i energiju nastalu usled eksplozije.

Udarni talas, koji se kreće kroz stensku masu od mesta eksplozije, na svom putu postepeno gubi energiju - slabi (izaziva sve manja naprezanja u steni) sve dok se na određenom rastojanju od mesta miniranja potpuno ne priguši, odnosno ne izgubi [43]. U okolini mesta eksplozije udarni talas ima takvu energiju da izaziva pritisna naprezanja veća od čvrstoće stenske mase na pritisak. Usled gubitka energije na većim rastojanjima može da izazove samo zatezna naprezanja veća od zatezne čvrstoće stene i konačno na znatno većim udaljenostima, samo elastične deformacije u stenskoj masi do njegovog nestajanja. Na prostoru gde izaziva stvaranje pukotina u stenskoj masi, talas ima razorni karakter, a izvan toga izaziva samo elastične deformacije stenske mase i ima karakter seizmičkog talasa [43]. Seizmički talasi se prostiru koncentrično od mesta miniranja, a njihova energija se troši na savladavanje sve većih stenskih masa sa udaljavanjem od mesta formiranja. Uprkos tome što sa povećanjem rastojanja intenzitet seizmičkih talasa slabi, potresi uzrokovani miniranjem mogu se osetiti na velikim rastojanjima [47].

Seizmičke oscilacije tla izazvane miniranjem su veoma slične oscilacijama koje izaziva zemljotres, a razlika između njih se manifestuje uglavnom u vremenu trajanja. Kod zemljotresa nastaju oscilacije koje dugo traju i u kojima je dužina perioda oscilovanja od 0.5 do 5.0 s, dok je kod miniranja dužina trajanja oscilacija znatno kraća i kreće se

od 0.004 do 0.25 s. [44]. Razlika postoji i u opsegu zastupljenih frekvencija, tj. znatno širi spektar frekvencija je zastupljen kod zapisa oscilovanja usled zemljotresa u odnosu na miniranje. Na slici 2-2. data su tri zapisa oscilovanja od miniranja, nuklearne eksplozije i zemljotresa.



Slika 2-2. Poređenje zapisa brzina oscilovanja od miniranja, nuklearne eksplozije i zemljotresa [48]

Pri prostiranju seizmičkog talasa kroz stensku masu ili tlo, čestice se izbacuju iz ravnotežnog položaja i oko njega osciluju određeno vreme do potpunog smirivanja. Oscilovanje čestica stenskog masiva (terena ili tla) se manifestuje ili oseća kao potres, odnosno vibracija tla. Dok seizmički talasi putuju znatno većim brzinama kroz stensku masu, pobuđujući oscilacije čestica u tačkama koje se nađu na njihovom putu prostiranja, oscilovanje materijalnih čestica masiva oko svog ravnotežnog položaja je daleko manjih brzina, reda mm/s - cm/s.

Na kraćim rastojanjima, potresi od miniranja mogu da oštete stambene i druge objekte uzrokujući dinamička naprezanja koja prevazilaze čvrstoću materijala, na sličan način kako se to događa sa pojavom pukotina u steni. Objekat sa manjom krutošću u odnosu na čvrstu stensku masu, može biti oštećen i na većim rastojanjima od mesta miniranja, ako miniranje nije pravilno projektovano i izvedeno [47].

Potrese od miniranja kao i njihov efekat na objekte i ljude treba predvideti, pratiti i kontrolisati, kako bi se obezbedila ekonomičnost procesa miniranja. Proces optimizacije parametara bušenja i miniranja sa aspekta potresa podrazumeva pronalaženje balansa između, sa jedne strane, prevelike rigidnosti usvajanjem strožijih kriterijuma oštećenja od potrebnih, što može dovesti do povećanja troškova miniranja i sa druge strane, razmatranjem svih faktora koji mogu dovesti do neželjenih posledica uzrokovanih potresima, a time i do oštećenja okolnih objekata, koja mogu drastično uticati na dobit proizvodnje.

### 2.3.1 Vrste seizmičkih talasa

Seizmički talasi se klasifikuju na zapreminske i površinske talase. Kod zapreminskih talasa razlikujemo dva osnovna tipa. Prvi tip predstavljaju uzdužni (longitudinalni ili kompresioni) talasi pri kojima se čestice kreću u radialnom pravcu paralelnom pravcu njihovog prostiranja, slika 2-3. Obzirom da se na taj način elastične deformacije prenose najkraćim putem i da uzdužni elastični talasi prvi stižu do mernog mesta, to se ovi talasi nazivaju još i primarni talasi i označavaju se sa  $P$ .

Brzina prostiranja uzdužnih [47] seizmičkih talasa na uzorku se može odrediti iz odnosa:

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

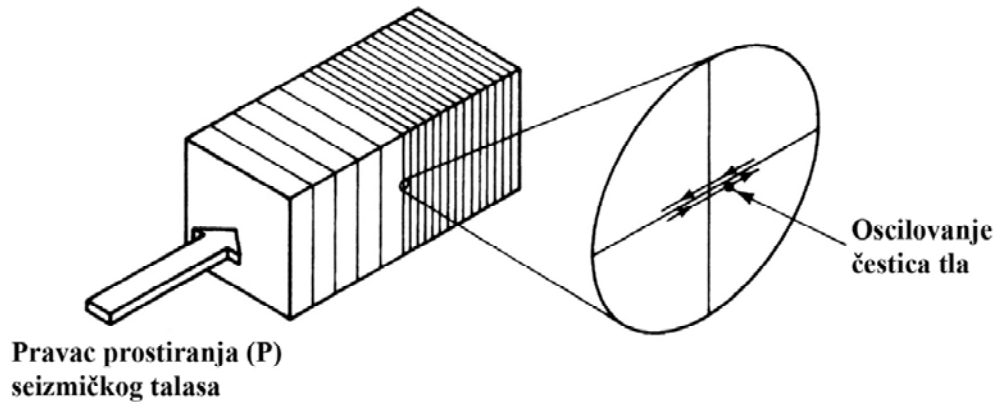
gde je :

$c_u$  - brzina prostiranja uzdužnih talasa, (m/s)

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

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

$\mu$  - Poasonov koeficijent.



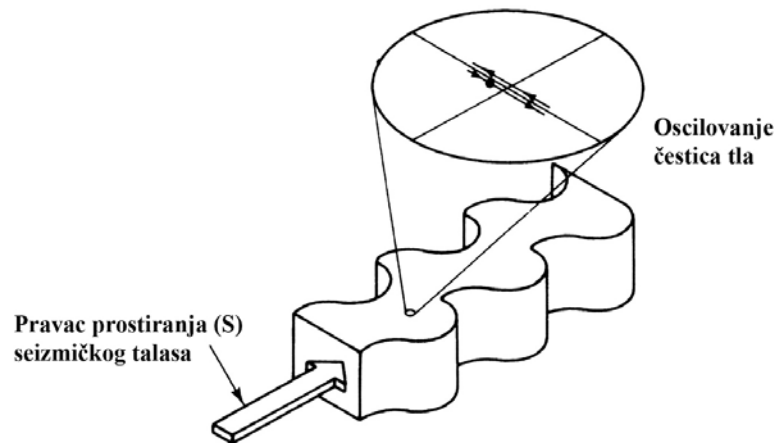
Slika 2-3. Prostiranje uzdužnih seizmičkih talasa i način oscilovanja čestica tla [48]

Brzina prostiranja uzdužnih seizmičkih talasa u steni zavisi od elastičnih karakteristika stene i njene gustine, tabela 2-2.

Tabela 2-2. Brzine prostiranja uzdužnih seizmičkih talasa kroz različite sredine [44]

Vrsta stene	$c_u$ (m/s)
granit	5000 - 5700
krečnjaci, peščari	2500 - 4500
laporac, gips	1700 - 2300
šljunak	900 - 1100
peskovito tlo	600 - 1600
glinovito tlo	500 - 1500
rastresito tlo	200 - 500
voda	1430
vazduh	340

Kada longitudinalni talas dospe do slobodne površine ili do granice sloja sa drugim fizičko - mehaničkim karakteristikama, pri upadnom uglu od  $90^\circ$  dolazi do njegovog odbijanja, pri čemu se obrazuje drugi tip zapreminskih talasa, poprečni ili transverzalni talas, kod kojeg čestice pobuđene sredine osciluju u ravni upravnoj na pravac prostiranja talasa zadržavajući međusobno rastojanje i izazivajući na taj način elastične deformacije koje su paralelne pravcu kretanja talasa, slika 2-4. Zbog ove karakteristike poprečni elastični talasi se još zovu i smičućim talasima. Njihova brzina prostiranja je manja nego kod longitudinalnih talasa, oni kasnije stižu do mernog mesta pa se ponekad zovu i sekundarni talasi i označavaju se sa  $S$ .



Slika 2-4. Prostiranje poprečnih seizmičkih talasa i način oscilovanja čestica tla [48]

Brzina prostiranja poprečnih [47] seizmičkih talasa može se odrediti iz odnosa:

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

gde je :

$c_p$  - brzina prostiranja poprečnih talasa, (m/s)

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

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

$\mu$  - Poasonov koeficijent.

Odnos brzina uzdužnih i poprečnih seizmičkih talasa iznosi:

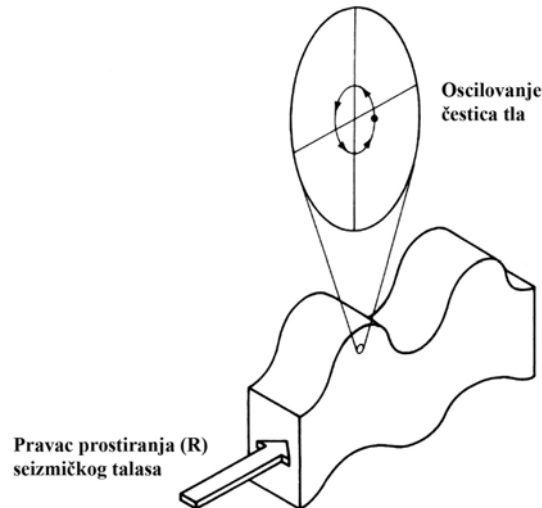
$$c_u = \sqrt{3} \cdot c_p, (m/s) \quad (2-3)$$

Uzdužni elastični talasi prostiru se kroz čvrste, tečne i gasovite sredine, a poprečni talasi samo kroz čvrste sredine.

Površinski talasi su dobili naziv po debljini sloja po kojem se prostiru i koja je približno jednaka njihovoj talasnoj dužini i u većini slučajeva iznosi 100 - 200 m, tako da se na dubini dvostruke talasne dužine, oscilovanje talasa praktično i ne oseća. Površinskih talasa ima više vrsta - tipova u zavisnosti od trajektorije kretanja čestica sredine:

1) *Talasi tipa R ili Rejli talasi* - kod ovog tipa talasa oscilovanje materijalnih čestica tla se vrši po eliptičnoj putanji, čija je glavna osa vertikalna, slika 2-5. U gornjem delu elipse, čestice se kreću u pravcu izvora, a u donjem delu od izvora eksplozije.

- 2) *Talasi tipa Q ili Lav talasi* - kod ovog tipa površinskih talasa čestice se kreću upravno na pravac prostiranja talasa, pri čemu se kretanje odvija u horizontalnoj ravni.
- 3) *Talasi tipa C* - ovaj talas nastaje kombinacijom *R* i *Q* talasa i kod njega se materijalne čestice pomeraju po dijagonalnoj putanji.



Slika 2-5. Prostiranje Rejli seizmičkih talasa i način oscilovanja čestica tla [48]

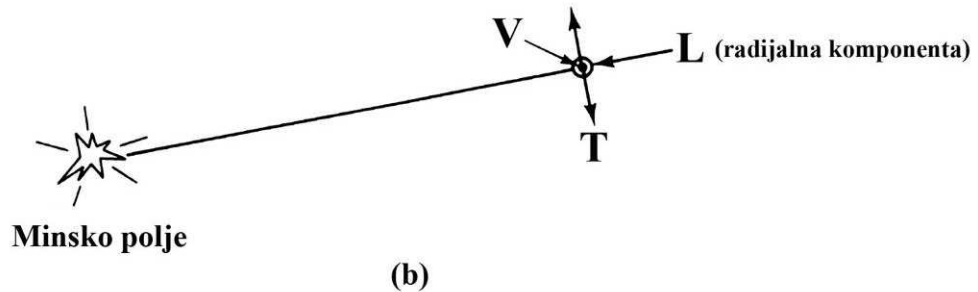
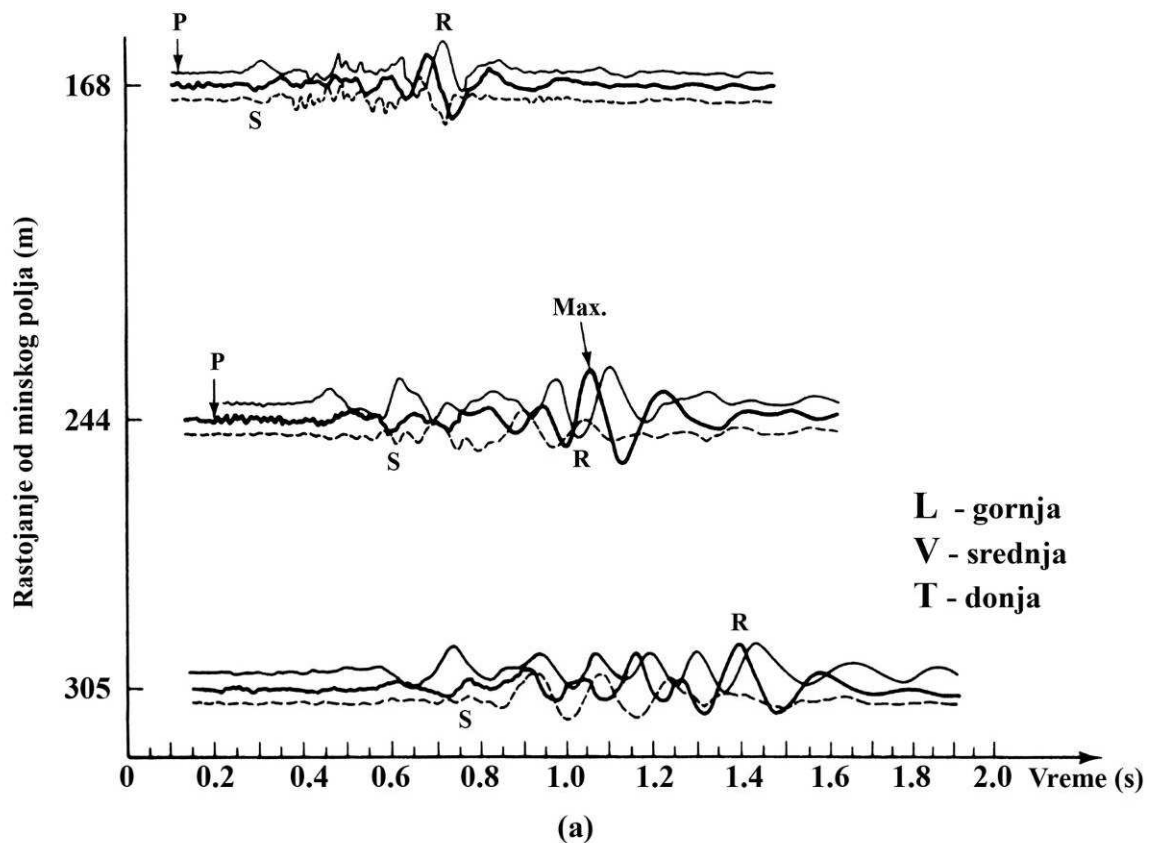
Brzina prostiranja [47] Rejli seizmičkih talasa može se odrediti prema jednačini:

$$c_R = \frac{0.86 + 1.14\mu}{1 + \mu}, (m/s) \quad (2-4)$$

gde je :

$\mu$  - Poasonov koeficijent.

Na slici 2-6, prikazan je izgled registrovanih seizmičkih talasa uzrokovanih miniranjem.



Slika 2-6. Izgled registrovanih seizmičkih talasa uzrokovanih miniranjem:  
 a) relativna magnituda i vremena pristizanja, b) P- uzdužni (longitudinalni, primarni),  
 S -poprečni (transverzalni, smičući), R - površinski Rejli talas [48]

### 2.3.2. Sinusoidalna aproksimacija vibracija od miniranja

Opšti oblik sinusoidalne aproksimacije vibracija tla uzrokovanih miniranjem, najbolje se može razumeti polazeći od jednačine za pomeraj  $u$  [49]:

$$u = U \sin (Kx + \omega t) \quad (2-5)$$

gde je:  $U$  - maksimalni pomeraj,  $K$  - konstanta - talasni broj,  $\omega$  - ugaona (kružna) frekvencija,  $t$  - vreme,  $x$  - rastojanje.

Promena pomeraja  $u$  sa rastojanjem  $x$  pri konstantnom vremenu i frekvenciji može se izraziti [49]:

$$u = U \sin (Kx + \text{const.}) \quad (2-6)$$

Ako se rastojanje na kome se talas ponavlja definiše kao talasna dužina  $\lambda$ , tada  $K$  mora biti jednako  $2\pi/\lambda$ , da bi se sinusna funkcija ponavljala svaki put kada se rastojanje  $x$ , poveća za vrednost jednaku talasnoj dužini  $\lambda$ .

S druge strane, pri konstantnom rastojanju  $x$  i talasnoj dužini  $\lambda$ , promena pomeraja  $u$  po vremenu u fiksnoj tački iznosi [49]:

$$u = U \sin (\text{const.} + \omega t) \quad (2-7)$$

Pošto se talas ponavlja nakon vremena definisanog kao period  $T$ , ugaona (kružna) frekvencija  $\omega$ , mora da bude jednaka  $2\pi/T$ , kako bi se sinusna funkcija ponovila sa napredovanjem vremena za jedan period. Frekvencija (Hz) predstavlja broj ponavljanja talasa u jednoj sekundi. Pošto period  $T$  predstavlja broj ponavljanja, frekvencija je jednaka  $1/T$ , dok ugaona (kružna) frekvencija  $\omega$  iznosi:

$$\omega = 2\pi \cdot \left(\frac{1}{T}\right) = 2\pi f \quad (2-8)$$

Talasna dužina  $\lambda$ , prema sinusoidalnoj aproksimaciji, iznosi:

$$\lambda = c \cdot T = c \cdot \left(\frac{1}{f}\right) \quad (2-9)$$

Veza između pomeraja  $u$ , brzine oscilovanja  $V$  i ubrzanja  $a$  dosta je pojednostavljena sinusoidalnom aproksimacijom, diferenciranjem jednačine (2-5), pri čemu se dobija:

pomeraj čestica tla:  $u = U \sin (Kx + \omega t)$

$$\text{brzina oscilovanja čestica tla: } \dot{u} = \frac{du}{dt} = U\omega \cos(Kx + \omega t) \quad (2-10)$$

$$\text{ubrzanje čestica tla: } \ddot{u} = \frac{d\dot{u}}{dt} = -U\omega^2 \sin(Kx + \omega t) \quad (2-11)$$

U većini slučajeva se traže apsolutne vrednosti maksimalnih pomeraja, koje se dobijaju kada je vrednost sinusne funkcije jednaka 1. U tom slučaju maksimalne vrednosti pokazatelja oscilovanja iznose:

$$\text{maksimalni pomeraj čestica tla : } u_{\max} = U \quad (2-12)$$



$$\text{maksimalna brzina oscilovanja čestica tla: } \dot{u}_{\max} = U\omega = U2\pi f = 2\pi f u_{\max} \quad (2-13)$$

$$\text{maksimalno ubrzanje čestica tla: } \ddot{u}_{\max} = U\omega^2 = U4\pi^2 f^2 = 2\pi f \dot{u}_{\max} \quad (2-14)$$

Maksimalni pomeraj, brzina oscilovanja i ubrzanje čestica tla predstavljaju tri osnovna parametra vibracija ili potresa tla značajna pri oceni intenziteta potresa. Definišu se kao:

Pomeraj ili otklon čestica tla od svog ravnotežnog položaja je rastojanje na kome se čestica udaljava od svog ravnotežnog položaja tokom oscilovanja. Jedinica za pomeraj je (mm) ili ( $\mu\text{m}$ ).

Brzina oscilovanja čestica tla je brzina pomeraja čestica tokom oscilovanja. Jedinica za brzinu oscilovanja je (cm/s) ili (mm/s).

Ubrzanje čestica tla predstavlja stepen promene brzine oscilovanja. Jedinica ubrzanja čestica tla je  $\text{mm/s}^2$  ili g (ubrzanje zemljine teže  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ).

Veličine sva tri parametra ukazuju na intenzitet sile kojom su izazvani, a time i na stepen opasnosti koje potres izaziva.

Parametri oscilacija pobuđenih miniranjem na površinskim kopovima, pri izradi tunela i u građevinarstvu kreću se u sledećem opsegu [50]:

Pomeraj	$10^{-4} - 10 \text{ mm}$
Brzina oscilovanja čestica tla	$10^{-4} - 10^3 \text{ mm/s}$
Ubrzanje čestica tla	$10 - 10^5 \text{ mm/s}^2$
Trajanje oscilovanja	$0.5 - 2 \text{ s}$
Talasna dužina	$30 - 1500 \text{ m}$
Frekvencija	$0.5 - 200 \text{ Hz}$
Naprezanje	$3 - 5\,000 \mu \text{ in / in}$

Registrovana brzina oscilovanja [51] tzv. vremenski zapis, pokazuje da za razliku od teorijske, realna nije idealno sinusoidna, mada su rezultati koji se dobijaju ovakvom aproksimacijom vrlo bliski teorijskim vrednostima, dobijenih integraljenjem.

## 2.4 FAKTORI KOJI UTIČU NA KARAKTERISTIKE SEIZMIČKIH TALASA UZROKOVANIH MINIRANJEM

### 2.4.1 Karakteristike stenske sredine i tla

Geološke i geomehaničke karakteristike stenske sredine i tla imaju veliki uticaj na karakter seizmičkih talasa. Eksperimentalna merenja su pokazala da za svaku vrstu stena brzina seizmičkih talasa varira u širokim granicama, zavisno od sastava poroznosti, vlažnosti i sl. Pored toga, brzina se menja pri povećanju dubine sloja. U homogenim i masivnim stenskim masama, seizmički talasi se prostiru u svim pravcima, dok se u složenim geološkim strukturama prostiranje razlikuje po pravcima.

Intenzitet i frekvencija seizmičkih talasa se razlikuje pri prostiranju kroz stenovite materijale ili kroz tlo. Tlo obično ima mali modul elastičnosti u odnosu na stene, pa je brzina prostiranja seizmičkih talasa manja. Frekvencija talasa se takođe smanjuje, dok se amplituda značajno povećava sa debljinom sloja.

Intenzitet seizmičkih talasa se povećanjem rastojanja smanjuje, jer se veliki deo energije troši na savladavanje trenja između čestica tla i na njihov pomeraj pa se zbog toga talasi daleko brže prigušuju. Nasuprot tome, kod nevezanih materijala amplitude oscilacije će biti znatno veće nego kod čvrstih stena, za elastični talas iste seizmičke energije.

U tačkama blizu minskog polja, na karakteristike vibracija veliki uticaj imaju faktori vezani za parametre miniranja i geometriju, dok na većim udaljenostima od minskog polja, na karakter seizmičkih talasa presudnu ulogu imaju sredine kroz koje se prostiru. Proučavanja [19] pokazuju da su frekvencije vibracija koje nastaju pri miniranju otkrivke u rudnicima uglja niže od onih koje nastaju pri miniranjima na površinskim kopovima građevinsko-tehničkog kamena, kao i pri miniranjima u građevinarstvu. Frekvencija seizmičkih talasa koji nastaju pri miniranju otkrivke na rudnicima uglja niža je od 10 Hz, što uzrokuje značajan pomeraj tla i visoke nivoe naprezanja koji izazivaju oštećenja objekata pri rezonanci sa njihovom prirodnom frekvencijom koja se kreće od 4 do 12 Hz [18].

Karakteristike stenskog masiva i tla ubrajaju se u faktore koji utiču na karakteristike seizmičkih talasa, a ne mogu se kontrolisati. Jedini uticaj koji se može postići je prilagođavanje parametara miniranja uslovima radne sredine.

#### **2.4.2 Količina eksploziva po intervalu usporenja**

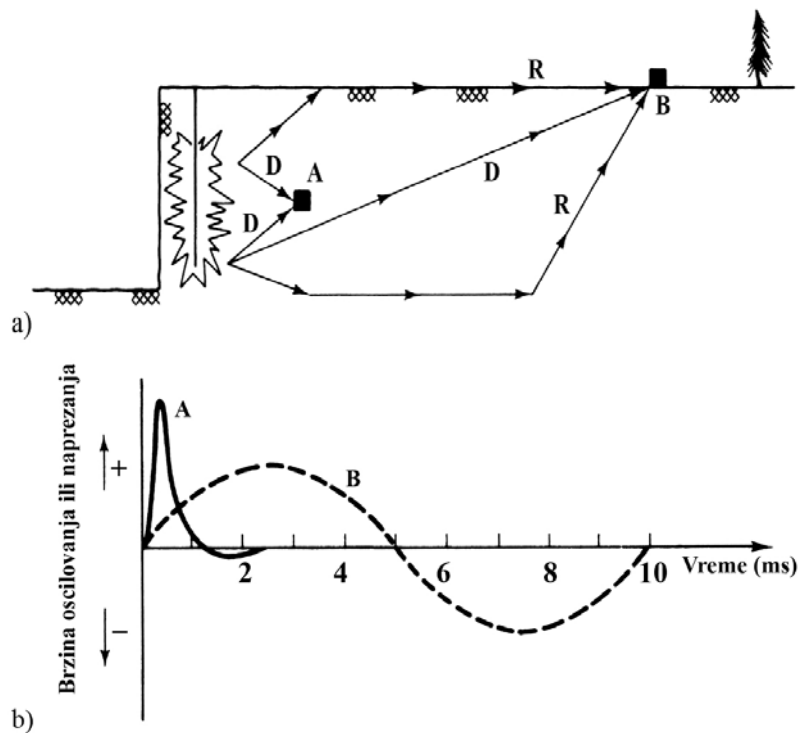
Količina eksploziva po intervalu usporenja predstavlja faktor koji se može kontrolisati i prilagođavati za konkretne uslove. Postojeći modeli predviđanja brzine oscilovanja tla zasnovani su pre svega na količini eksploziva koja se inicira u jednom intervalu usporenja.

Količinu eksploziva po intervalu usporenja određuje izbor vremena usporenja i šema iniciranja. Ukoliko se minska punjenja dele na više delova u minskoj bušotini i svako inicira sa različitim intervalom usporenja, maksimalna količina po intervalu usporenja predstavlja najveću količinu eksploziva u odnosu na preostale delove minskog punjenja, odnosno glavno punjenje koje procentualno ima najveći udeo ukupne količine eksploziva u minskoj bušotini. Ukoliko se šemom iniciranja odredi iniciranje sa različitim vremenima usporenja između svake minske bušotine, najveća količina po intervalu usporenja predstavlja ukupnu količinu eksploziva u minskoj bušotini. Izborom vremena usporenja i određenom šemom može se podesiti da u jednom intervalu usporenja bude iniciran veći broj minskih bušotina, ukoliko je to moguće.

Problem nastaje kada se usled pogrešne šeme iniciranja ili problema preklapanja vremena usporenja, nekontrolisano poveća količina eksploziva po intervalu usporenja iznad dozvoljene vrednosti.

#### **2.4.3 Rastojanje od mesta miniranja**

Pri promeni rastojanja od mesta miniranja, pored intenziteta potresa menja se i karakter potresa, tj. vibracija. Na kraćim rastojanjima dominiraju oscilacije sa visokim frekvencijama. Visokofrekventni aperiodični talas, (pojedinačni, takozvani "pik" impuls) traje 1 do 2 ms. Na većim rastojanjima eksplozijom stvoren impuls razvija se u niskofrekventni približno sinusoidni talas, tada počinju da se izdvajaju mnogo sporiji transvezalni i površinski talasi u odnosu na uzdužne (kompresione) talase, tako da je tek u tim slučajevima moguća identifikacija pojedinačnih faza. Vreme trajanja ovog impulsa je od 10 do 100 ms.



Slika 2-7. Uticaj rastojanja na karakter seizmičkih talasa od miniranja:

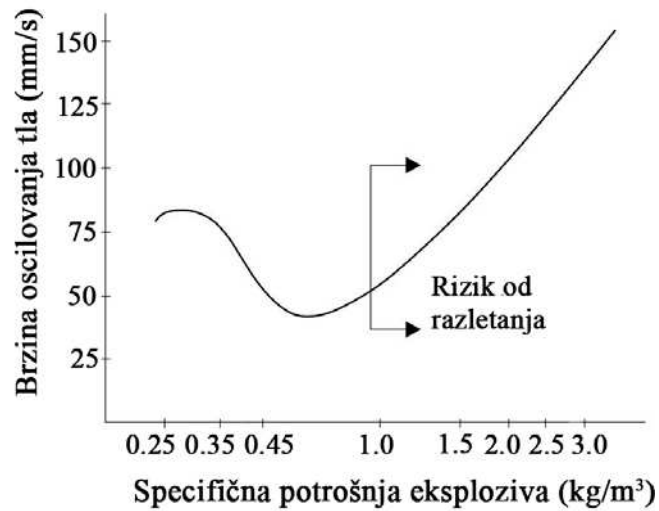
a) mesto postavljanja senzora, b) idealizovani talasi, D - direktni talasi,

R- reflektovani/odbijeni talasi [48]

Sredine kroz koje se prostiru seizmički talasi obično su heterogene. Usled toga u posmatranu tačku stižu osim talasa koji se prostiru po liniji najmanjeg rastojanja još i talasi refleksije od raznih slojeva, koji se često poklapaju sa direktnim talasima, slika 2-7.

#### 2.4.4 Specifična potrošnja eksploziva

Povećanjem specifične potrošnje eksploziva povećava se količina eksploziva u minskoj bušotini. Proučavajući uticaj specifične potrošnje eksploziva na intenzitet seizmičkih potresa, izvršena su određena ispitivanja [1] pri čemu je specifična potrošnja smanjena za 20 % od optimalne. Pri tome je došlo do povećanja intenziteta seizmičkih talasa zbog lošeg prostornog rasporeda energije, kao i stešnjenosti eksplozivnih punjenja, uzrokujući loše drobljenje stenske mase i nedovoljno pomeranje izminiranog materijala. Prema tome, uticaj specifične potrošnje je potrebno posmatrati u širem kontekstu, ne samo u pogledu seizmičkih talasa uzrokovanih miniranjem, kao što je prikazano na slici 2-8.



Slika 2-8. Uticaj specifične potrošnje eksploziva na intenzitet seizmičkih potresa [1]

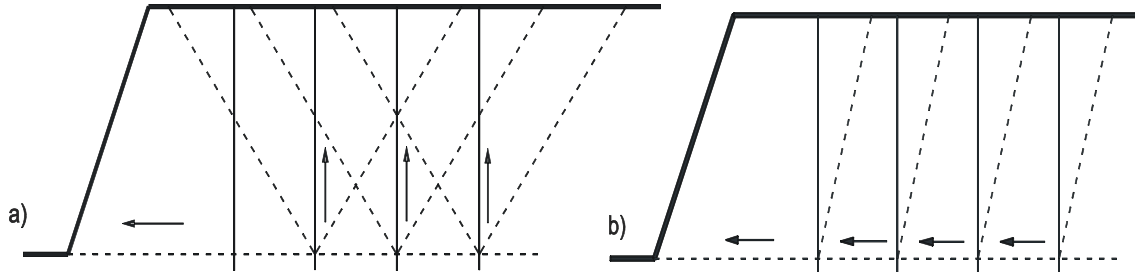
#### 2.4.5 Vrsta eksploziva

Pri izboru eksploziva važnu ulogu ima akustična impedanca stene na koju utiče brzina prostiranja uzdužnih elastičnih talasa. Najveća količina energije se iskoristi za drobljenje stene ako je akustična impedanca stene jednaka akustičnoj impedanci eksploziva. Akustična impedanca stene predstavlja koeficijent proporcionalnosti između brzine oscilovanja i nastalih naprezanja u stenskom masivu. Eksplozivi koji stvaraju manji bušotinski pritisak stvaraju i niži intenzitet seizmičkih talasa. U ovu vrstu se ubrajaju eksplozivi male gustine i brzine detonacije poput ANFO eksploziva. Poređenjem iste količine ANFO eksploziva sa Slurry eksplozivom i aluminizanim Watergel eksplozivom, intenzitet nastalih seizmičkih talasa je u prvom slučaju niži 2, a u drugom 2.4 puta [1]. Pri primeni različitih vrsta eksploziva, za određivanje optimalne količine punjenja, eksplozivi se porede sa referentnim eksplozivom, koji danas predstavlja ANFO, čija relativna težinska snaga iznosi 100.

#### 2.4.6 Optimalno vreme usporenja

Pri trenutnom iniciranju minskih punjenja sva minska punjenja u bušotinama se iniciraju istovremeno. U pogledu seizmičkog dejstva, ovaj način iniciranja manifestuje se kao jedinstven impuls potresa. Kod iniciranja sa usporenjem svako posebno inicirano punjenje ili grupa punjenja manifestuje se kao poseban impuls potresa. Na ovaj način intenzitet potresa je smanjen u odnosu na intenzitet kada bi se iniciranje izvršilo

trenutno. Pri proračunu vrednosti za optimalni interval usporenja polazi se od zahteva da eksplozija pojedinog minskog punjenja treba da otpočne pre nego što do njega stigne udarni talas eksplozije prethodnog punjenja.



Slika 2-9. Dejstvo eksplozivnog punjenja: a) trenutno iniciranje, b) milisekundno iniciranje [44]

Interval usporenja između eksplozivnih punjenja može se odnositi na nominalno vreme usporenja koje predstavlja razliku između nominalnih vremena iniciranja minskih punjenja ili na efektivno vreme usporenja, koje predstavlja razliku vremena pristizanja impulsa nastalih detonacijom eksplozivnih punjenja u minskim bušotinama po uzastopnim vremenskim intervalima. Pri iniciranju minskih punjenja u jednom redu bušotina, efektivno vreme usporenja može se odrediti prema obrascu [1]:

$$t_e = t_n - \frac{a \cdot \cos\phi}{c}, (ms) \quad (2-15)$$

gde je:

$t_n$  - nominalno vreme usporenja, (ms)

$a$  - rastojanje između bušotina u redu, (m)

$c$  – brzina prostiranja seizmičkih talasa, (m/s)

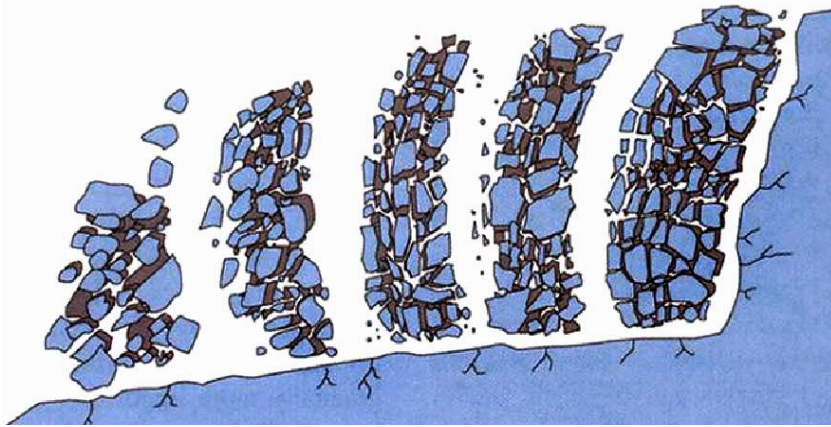
$\phi$  – ugao između uzastopno iniciranih bušotina i pozicije seizmografa, ( $^{\circ}$ )

Usporenje [43] se prema funkciji u procesu drobljenja stenske mase može klasifikovati na:

- usporenje između redova,
- usporenje u redu,
- usporenje između razdvojenih stubova eksploziva u bušotinama i
- bušotinska usporenja, koja su jednaka u svim bušotinama.

Usporenje između redova omogućuje otvaranje bušotina u narednom redu, odnosno stvaranje slobodne površine za naredni red. Da bi se slobodna površina formirala, to

vreme usporenja treba da je dovoljno dugo da se omogući razvoj pukotinskog sistema od bušotine do slobodne površine, prodor gasova u pukotinski sistem i pomeranje stenske mase na dovoljnom rastojanju, kako bi novoformirana površina bila stvarno slobodna, slika 2-10. Nedovoljno vreme usporenja uslovljava dejstvo mine u narednom redu u stešnjenim uslovima bez slobodne površine, odnosno u uslovima povećanog opterećenja, čime se smanjuje efikasnost drobljenja stenske mase i povećanja neželjenih efekata miniranja pre svega seizmičkih potresa. Obično se nastoji da se postigne pokretanje stenske mase narednog reda dok je masa odbačena prethodnim redom još u vazduhu, tako da čini štit protiv prekomernog razletanja komada iz narednog reda.



*Slika 2-10. Šematski prikaz uticaja vremena usporenja između redova na stvaranje slobodne površine narednim redovima [52]*

Usporenje u redu između susednih bušotina ima zadatak da omogući formiranje dodatne slobodne površine između bušotina i smanjenje količine eksploziva koja se u jednom trenutku inicira.

Usporenje kod razdvojenog punjenja u bušotini primenjuje se zbog ograničenja potresa miniranjem, kada je dozvoljena količina eksploziva koja se istovremeno inicira manja od količine eksploziva u bušotini. U tom slučaju se eksplozivni stub u bušotini deli na dva ili više delova koji se posebno iniciraju, sa međusobnim usporenjem i redosledom od vrha bušotine ka dnu.

Bušotinsko usporenje je usporenje karakteristično za sisteme iniciranja sa malom brzinom prenosa inicijalnog impulsa (Nonel, Polinel, itd.). U tom slučaju se u svim bušotinama stavlja isto usporenje koje ima zadatak da zadrži početak procesa rušenja dok se inicijalni impuls prenese kroz mrežu na dovoljnom rastojanju, toliko da kidanje

površinske mreže početkom pomeranja stenske mase ne može ugroziti prenos impulsa kroz minsko polje.

#### 2.4.7 Šema iniciranja

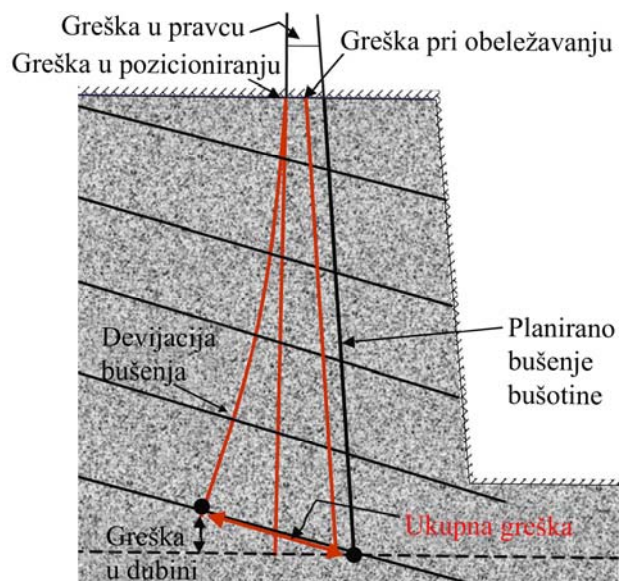
Šema iniciranja definiše redosled iniciranja minskih bušotina, time i odgovarajući redosled rušenja stenske mase, pravac odbacivanja odminiranog materijala, broj bušotina koje se istovremeno iniciraju, što direktno kontroliše nivo potresa i vreme iniciranja pojedinih bušotina, kao i ukupno vreme trajanja procesa rušenja stenskog masiva u minskom polju.

#### 2.4.8 Prečnik minske bušotine

Količina eksploziva po metru dužnom proporcionalna je kvadratu prečnika minske bušotine. Povećanje prečnika direktno utiče na povećanje količine eksploziva u minskoj bušotini. Pri velikim prečnicima, kada se eksploziv slobodno usipava u minsku bušotinu, količine eksploziva po bušotini mogu biti veoma visoke, što u slučajevima seizmičkih ograničenja može predstavljati problem.

#### 2.4.9 Devijacija bušenja

Odstupanje bušenja od željenog pravca dovodi do značajnih promena geometrijskih parametara miniranja na dnu bušotina. Prihvatljiva promena ovih parametara je do 10% u odnosu na predviđene. Zbog toga se kod bušenja za proizvodno miniranje moraju primenjivati odgovarajući instrumenti za usmeravanje pravca pribora za bušenje.



Slika 2-11. Različiti uzroci devijacije bušenja [53]



Devijacija bušotina je moguća kod bušotina malog prečnika i većih dužina, a znatno je izraženija kod kosih, odnosno nagnutih bušotina u odnosu na vertikalne. Na primer, greška ugla bušenja od  $1^\circ$  dovodi do devijacije od 35 cm na dnu bušotine čija je dužina 20 m [52].

Devijaciju mogu da uzrokuju i površine slojevitosti u stenskoj masi ako im je nagib blizak nagibu bušotina. Devijacija dovodi do: povećanih potresa od miniranja, nekontrolisane fragmentacije izminiranog materijala, mogućeg otkazivanja iniciranja zbog ukrštanja bušotina koje se iniciraju uz neodgovarajuće intervale usporenja, prevelike ili premale linije najmanjeg otpora i rastojanja između susednih bušotina, sekundarnog miniranja, povećanja troškova utovara, transporta i drobljenja, ostavljanja pragova u podu etaže koji dovode do povećanja troškova održavanja opreme.

#### **2.4.10 Visina etaže**

Da bi se postigla dobra fragmentacija i eliminisala pojava pragova u donjem delu etaže i time smanjili nivoi vibracija zbog eliminisanja stešnjenosti eksplozivnih punjenja, odnos visine etaže i linije najmanjeg otpora treba da bude veći od 2 [1].

#### **2.4.11 Linija najmanjeg otpora i rastojanje između minskih bušotina**

Prevelika linija najmanjeg otpora uzrokuje da gasovi eksplozije imaju veliki otpor drobljenju stenske mase i pomeranju izminiranog materijala na odgovarajuće rastojanje u cilju kvalitetnijeg utovara. Pri tom se deo energije eksplozije transformiše u seizmičku energiju, što dovodi do povećanja intenziteta vibracija. U slučaju kada je linija najmanjeg otpora premala, gasovi eksplozije prevelikom brzinom stižu do slobodne površine dajući dodatni impuls komadima izminiranog materijala izbacujući ih nekontrolisano, što može uzrokovati razletanje komada stene na velike udaljenosti, kao i veliki intenzitet vazdušnih udara. Rastojanje između bušotina u redu i redova minskih bušotina imaju sličan uticaj, obzirom da se u proračunu njihove vrednosti dobijaju direktno iz vrednosti linije najmanjeg otpora i koeficijenta zbliženja minskih bušotina. Treba napomenuti, da velika geometrija minskih bušotina, zahteva i veći interval usporenja pri iniciranju, koji mora da omogući da stenska masa pređe određeno rastojanje pre nego što se pokrene naredna. U suprotnom će doći do pojave stešnjenosti minskih punjenja i velikog seizmičkog efekta.

#### **2.4.12 Probušenje minske bušotine**

Ukoliko je dužina probušenja minske bušotine znatno veća od potrebne, koeficijent iskorišćenja energije u delu probušenja je vrlo mali, pa se veći deo energije prenosi u stenu u vidu seizmičkih talasa i stvaranja pukotina ispod nivoa etaže, odnosno u gornjem delu naredne etaže. Pri tome se za 20 do 30 % smanjuje efikasnost bušenja sledeće etaže, stvaraju se pukotine u gornjem delu etaže i povećava procenat negabarita.

#### **2.4.13 Dužina minskog čepa**

Osnovna uloga čepa je da omogući duže delovanje produkata eksplozije na stensku masu i obezbedi što veće iskorišćenje energije eksplozije. Efekat začepljenja u velikoj meri zavisi i od dužine minskog čepa. Kod miniranja u stenama različite čvrstoće, pri istim ostalim uslovima miniranja i istoj dužini minskog čepa, sa povećanjem pritiska čvrstoće stena, smanjuje se otpor minskog čepa potisnom dejstvu gasnih produkata eksplozije. Samim tim smanjuje se koeficijent iskorišćenja minske bušotine zbog delimičnog gubitka energije usled prevremenog izletanja čepa. Prema tome, u stenama manje čvrstoće minski čep ima veći uticaj na iskorišćenje energije, kao i na efekat miniranja. Ukoliko je dužina minskog čepa prevelika, povećava se stešnjenost minskog punjenja, samim tim i seizmički efekat može biti povećan.

#### **2.4.14 Nagib minske bušotine**

Nagib minske bušotine utiče kako na tehnologiju bušenja, tako i na efekte miniranja. Iskustva pokazuju da se sa kosim minskim bušotinama postiže bolje iskorišćenje energije eksplozije, kao i smanjenje seizmičkih efekata, naročito u podu etaže.

#### **2.4.15 Broj minskih bušotina**

Broj minskih bušotina određen je tipom i lokacijom objekata koje treba zaštititi od nastalih potresa uzrokovanih miniranjem i utvrđenom jednačinom predviđanja potresa od miniranja. Broj minskih bušotina zavisi i od karakteristika stenske mase koja se minira, kao i proračunatih parametara bušenja i miniranja, pre svega usvojene geometrije i vremena usporenja između minskih punjenja. Treba voditi računa da celokupan vremenski period oscilacija uzrokovanih miniranjem ne prelazi 2 s, jer je verovatnoća oštećenja objekata veća.

#### 2.4.16 Odstupanje nominalnog vremena usporenja sredstava za iniciranje

Pri projektovanju šeme iniciranja obično se usvajaju nominalna vremena usporenja sredstava za usporenje (električnih i neelektričnih detonatora i usporivača) uz pretpostavku da će svako minsko punjenje biti inicirano sa nominalnim vremenom usporenja. Međutim, sredstva za iniciranje, imaju određenu toleranciju, tj. odstupanje od nominalnog (deklarisanog) vremena usporenja, koje je različito od proizvođača do proizvođača [42].

Osnovni podaci [42] koji definišu vreme usporenja detonatora ili usporivača sa određenim vremenom usporenja, su:

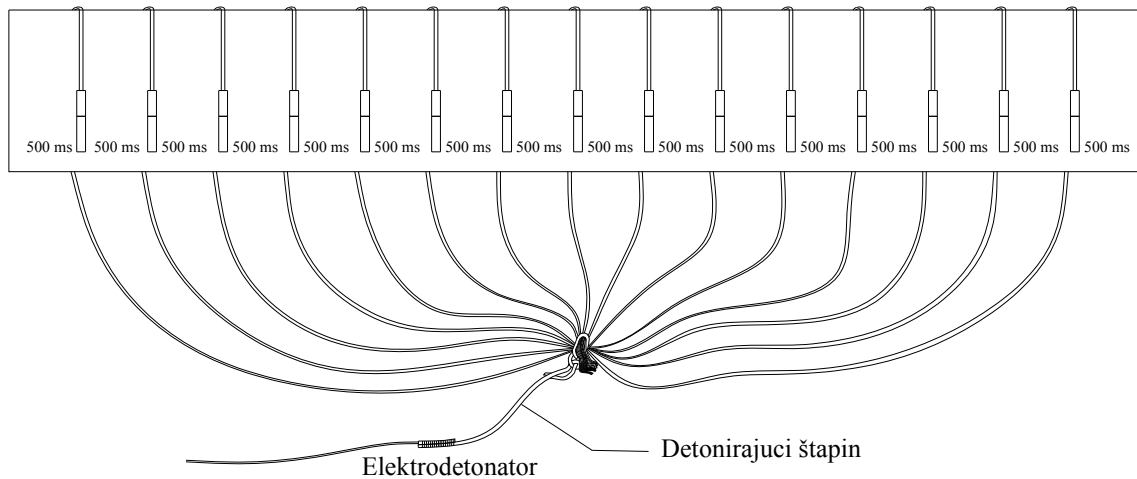
- srednja vrednost vremena usporenja  $\bar{t}$  (ms), koja može da odstupa od nominalnog usporenja,
- standardna devijacija  $\sigma$  (ms), koja definiše disperziju vremena usporenja i
- koeficijent varijacije  $v = 100 \sigma / \bar{t}$  (%) koji je mera disperzije, tj. rasturanja vremena usporenja.

Vreme usporenja sredstva za usporenje definisano je sa 95% pouzdanosti vremenskim intervalom:

$$T = \bar{t} \pm 2\sigma, \text{ (ms)} \quad (2-16)$$

U cilju određivanja odstupanja od nominalne vrednosti vremena usporenja, u okviru Centra za miniranje, Rudarsko-geološkog fakulteta u Beogradu, izvršeno je ispitivanje 15 detonatora i 15 konektora neelektričnog sistema iniciranja. Rezultati ispitivanja statistički su analizirani kako bi se utvrdila raspodela vremena usporenja.

Ispitivanje je izvršeno na sledeći način: petnaest detonatora neelektričnog sistema iniciranja istog nominalnog vremena usporenja od 500 ms povezani su paralelno i inicirani omčom detonirajućeg štapina i elektrodetonatorom, slika 2-12. Iniciranje je snimano brzom kamerom CASIO [54] sa 1200 slika u sekundi, pri čemu je naknadno analiziran vremenski trenutak inicijacije svakog pojedinačnog detonatora.

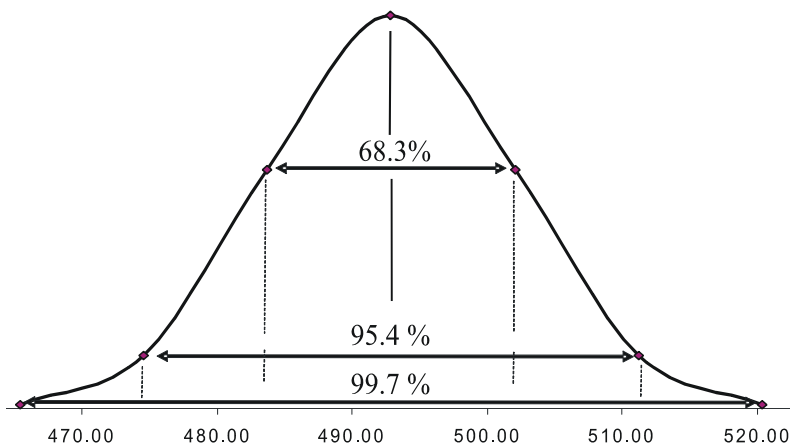


Slika 2-12. Šema ispitivanja detonatora neelektričnog sistema iniciranja sa nominalnim usporenjem od 500 ms

Rezultati ispitivanja NONEL detonatora su statistički analizirani i dobijeni su sledeći podaci:

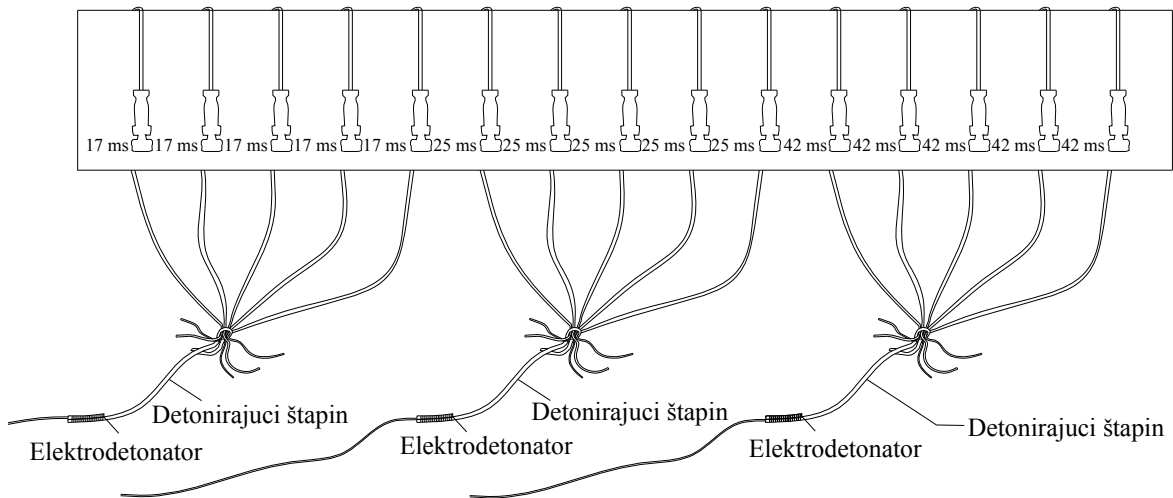
Srednja vrednost $\bar{t}$ (ms)	492.867
Standardna devijacija $\sigma$ (ms)	9.17145
Koeficijent varijacije $v$ (%)	1.86084
Vreme usporenja sa 68.3 % pouzdanosti	$492.867 \pm 9.17145$
Vreme usporenja sa 95.4 % pouzdanosti	$492.867 \pm 18.342907$
Vreme usporenja sa 99.7 % pouzdanosti	$492.867 \pm 27.51436$

Normalna raspodela vremena usporenja detonatora sa nominalnim vremenom usporenja od 500 ms prikazana je na slici 2-13.



Slika 2-13. Normalna raspodela vremena usporenja NONEL detonatora sa nominalnim vremenom usporenja od 500 ms

U drugoj seriji ispitivane su na isti način tri grupe od po 5 NONEL konektora sa nominalnim vremenima usporenja 17, 25 i 42 ms, slika 2-14.

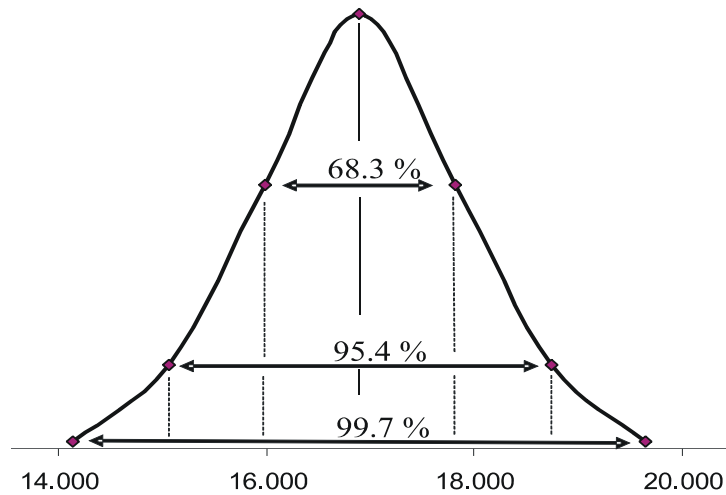


*Slika 2-14. Šema ispitivanja NONEL konektora sa nominalnim vremenima usporenja 17, 25 i 42 ms*

Rezultati ispitivanja NONEL konektora sa nominalnim usporenjem od 17 ms su statistički analizirani i dobijeni su sledeći podaci:

Srednja vrednost $\bar{t}$ (ms)	16.90
Standardna devijacija $\sigma$ (ms)	0.91651
Koeficijent varijacije $v$ (%)	5.423
Vreme usporenja sa 68.3 % pouzdanosti	$16.90 \pm 0.91651$
Vreme usporenja sa 95.4 % pouzdanosti	$16.90 \pm 1.83303$
Vreme usporenja sa 99.7 % pouzdanosti	$16.90 \pm 2.749545$

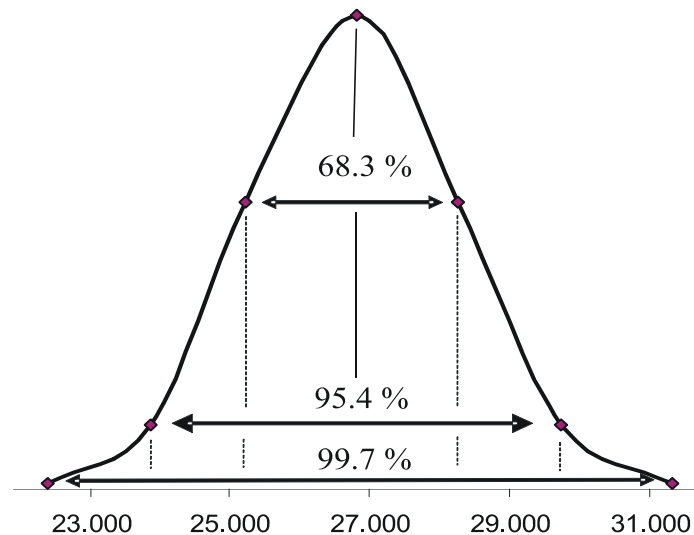
Normalna raspodela vremena usporenja NONEL konektora sa nominalnim vremenom usporenja od 17, 25 i 42 ms prikazani su na slikama 2-15, 2-16 i 2-17.



Slika 2-15. Normalna raspodela vremena usporenja NONEL konektora sa nominalnim vremenom usporenja od 17 ms

Rezultati ispitivanja NONEL konektora sa nominalnim usporenjem od 25 ms su statistički analizirani i dobijeni su sledeći podaci:

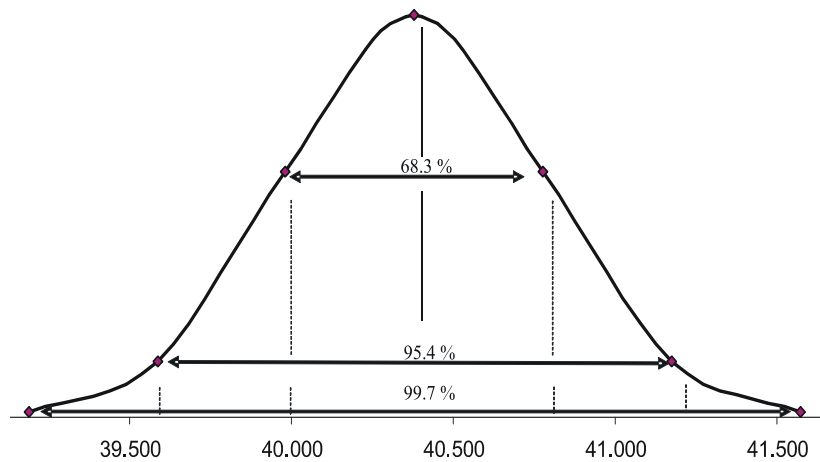
Srednja vrednost $\bar{t}$ (ms)	26.80
Standardna devijacija $\sigma$ (ms)	1.470
Koeficijent varijacije $v$ (%)	5.485
Vreme usporenja sa 68.3 % pouzdanosti	$26.80 \pm 1.470$
Vreme usporenja sa 95.4 % pouzdanosti	$26.80 \pm 2.940$
Vreme usporenja sa 99.7 % pouzdanosti	$26.80 \pm 4.410$



Slika 2-16. Normalna raspodela vremena usporenja NONEL konektora sa nominalnim vremenom usporenja od 25 ms

Rezultati ispitivanja konektora sa nominalnim usporenjem od 42 ms su statistički analizirani i dobijeni su sledeći podaci:

Srednja vrednost $\bar{t}$ (ms)	40.38
Standardna devijacija $\sigma$ (ms)	0.39699
Koeficijent varijacije $\nu$ (%)	0.9831
Vreme usporenja sa 68.3 % pouzdanosti	$40.38 \pm 0.39699$
Vreme usporenja sa 95.4 % pouzdanosti	$40.38 \pm 0.79398$
Vreme usporenja sa 99.7 % pouzdanosti	$40.38 \pm 1.19097$



Slika 2-17. Normalna raspodela vremena usporenja NONEL konektora sa nominalnim vremenom usporenja od 42 ms

Na osnovu ispitivanja na poligonu zaključeno je sledeće:

- svi detonatori i konektori imaju određenu disperziju vremena usporenja, odnosno određen interval u kome se kreće njihovo vreme usporenja,
- prosečno vreme usporenja odstupa često i znatno od nominalnog vremena usporenja,
- ukoliko bi svi brojevi detonatora bili inicirani istovremeno, vreme iniciranja jednog broja detonatora sa dužim nominalnim usporenjem može biti jednako ili kraće od nekih brojeva sa kraćim nominalnim usporenjem. To znači da njihova vremena iniciranja mogu da se preklape.

Poznavanje ovih podataka za primenjena sredstva za usporenje je vrlo bitno pri projektovanju šeme iniciranja. U našim uslovima se tim podacima ne raspolaže iz niza razloga. U tom slučaju se može usvojiti za sredstva standardnog kvaliteta kod vremenske analize šeme iniciranja, kao aproksimacija da prosečno vreme usporenja

odgovara nominalnom vremenu, a disperzija  $v = 10\%$ . Samo sredstva visoke preciznosti imaju disperziju 1-2 %, ali su ona i znatno skuplja [42].

#### 2.4.16.1 Vreme iniciranja bušotina i verovatnoća preklapanja

Tolerancija, tj. disperzija [42] vremena usporenja sredstava za usporenje u sistemima za iniciranje, dovode do odstupanja vremena iniciranja pojedinih bušotina od očekivanog. Ako se bušotina inicira samo sa jednom tačkom usporenja, onda se vreme iniciranja bušotine definiše kao i vreme usporenja sredstava za usporenje prema jednačini 2-16. Ako inicijalni impuls na putu do bušotine prođe kroz više tačaka usporenja (sredstava za usporenje), onda se parametri raspodele vremena iniciranja bušotine definišu relacijom:

$$\bar{t}_b = \bar{t}_1 + \bar{t}_2 + \dots + \bar{t}_n \quad (2-17)$$

$$\sigma_b = \sqrt{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_n^2)} \quad (2-18)$$

Ukoliko se u sistemu za iniciranje primenjuju sredstva sa jednakim vremenom usporenja, onda se gornja relacija može napisati kao:

$$T_b = \bar{t}_b \pm 2\sigma_b, \text{ (ms)} \quad (2-19)$$

Iz gornjih izraza sledi:

- za vreme iniciranja bušotina može se usvojiti normalna raspodela,
- disperzija vremena iniciranja bušotina raste sa povećanjem broja sredstava za usporenje na putu inicijalnog impulsa do bušotine.

Disperzija vremena iniciranja bušotina može da dovede do više problema i negativnih efekata u miniranju kao što su:

- smanjenje vremenskog interвала iniciranja između pojedinih bušotina ili grupa bušotina, tako da se veći broj bušotina inicira u kraćem vremenskom intervalu od željenog,
- preklapanje pojedinih bušotina, tj. promena redosleda iniciranja od predviđanog što dovodi do pogoršanja rezultata miniranja.

Verovatnoća preklapanja je najveća kod bušotina koje imaju isto srednje vreme iniciranja. U tom slučaju, posmatrano statistički, podjednaka je verovatnoća da bilo koja od njih inicira prva, pa maksimalna verovatnoća iniciranja iznosi 50 % [Konya]. Ovako određena verovatnoća preklapanja može da se shvati i kao rizik od pojave preklapanja.



Pri analizi šeme iniciranja, rizik od pojave preklapanja ne bi trebao da prelazi 5%, jer u tom slučaju treba izvršiti izmene u šemi iniciranja.

#### **2.4.16.2 Vremenska analiza šeme iniciranja**

Vremenska analiza šeme [42] iniciranja podrazumeva izračunavanje za svaku bušotinu u minskom polju:

- očekivano vreme iniciranja,
- standardnu devijaciju vremena iniciranja,
- vremenski interval iniciranja sa zadatom pouzdanošću,
- verovatnoću preklapanja između pojedinih bušotina.

Na osnovu navedenih vremenskih parametara moguće je pre sprovođenja miniranja proveriti:

- redosled iniciranja bušotina u šemi iniciranja,
- očekivano vreme usporenja između pojedinih bušotina,
- broj bušotina koji se istovremeno inicira u pojedinim intervalima ili se inicira sa vremenskim intervalom manjim od 8 ms,
- visinu rizika od preklapanja pojedinih bušotina.

Rezultati vremenske analize šema iniciranja, dobijeni primenom softvera PATTERN DESIGNER [55] u okviru Centra za miniranje, Rudarsko-geološkog fakulteta u Beogradu, predstavljeni su u Prilogu 1, 2 i 3. U Prilogu 1 je prikazana šema miniranja sa ukupno 4 reda i 15 bušotina u svakom redu. Predviđeno je da se iniciranje vrši NONEL sistemom. Usporenje između bušotina u redu iznosi 25 ms, između redova bušotina 67 ms, a bušotinsko usporenje iznosi 500 ms. Neophodno je da se šemom obezbedi iniciranje jednog minskog punjenja po vremenskom intervalu. Usvajajući da usporivači imaju disperziju  $\pm 2\%$ , a pouzdanost izračunatog intervala iniciranja bušotina iznosi 95% ( $\bar{t}_b \pm 2\sigma_b$ ), u Prilogu 1 prikazani su izračunati parametri vremenske analize šeme iniciranja.

Na osnovu podataka Priloga 1 može se zaključiti sledeće:

- ukupno vreme iniciranja serije je 1126 ms,
- pojavljuju se čak četiri slučaja gde je vremenski interval iniciranja između bušotina 1 ms što znači da postoji velika verovatnoća (preko 48 %) preklapanja bušotina i da će tako više od jedne bušotine biti inicirano istovremeno.

U Prilogu 2 predstavljen je drugi tip šeme iniciranja sa 4 reda i 14 bušotina u redu. Predviđeno je da se iniciranje vrši NONEL sistemom. Usporenje između bušotina u redu iznosi 25 ms, između redova bušotina 67 ms, a bušotinsko usporenje iznosi 500 ms. Neophodno je da se šemom obezbedi iniciranje jednog minskog punjenja po vremenskom intervalu. Usvajajući da usporivači imaju disperziju  $\pm 2\%$  i pouzdanost izračunatog intervala iniciranja bušotina od 95% ( $\bar{t}_b \pm 2\sigma_b$ ), u Prilogu 2 prikazani su izračunati parametri vremenske analize šeme iniciranja.

Na osnovu podataka Priloga 2 može se zaključiti sledeće:

- ukupno vreme iniciranja minske serije je 1897 ms,
- za celokupnu seriju od 56 bušotina ni u jednom slučaju se ne pojavljuje vremenski interval iniciranja između bušotina od 8 ms, što znači da ne postoji verovatnoća preklapanja bušotina i da će se biranjem ove šeme omogućiti iniciranje samo jedne bušotine po vremenskom intervalu usporenja. Najmanji vremenski interval između dve bušotine je 17 ms.

U Prilogu 3 predstavljen je isti tip šeme iniciranja kao u Prilogu 2 samo sa 3 reda i 20 bušotina u redu. Predviđeno je da se iniciranje vrši NONEL sistemom. Usporenje između bušotina u redu iznosi 25 ms, između redova bušotina 42 ms, a bušotinsko usporenje iznosi 500 ms. Neophodno je da se šemom obezbedi iniciranje jednog minskog punjenja po vremenskom intervalu. Usvajajući da usporivači imaju disperziju  $\pm 2\%$  i pouzdanost izračunatog intervala iniciranja bušotina od 95% ( $\bar{t}_b \pm 2\sigma_b$ ), u Prilogu 3 prikazani su izračunati parametri vremenske analize šeme iniciranja.

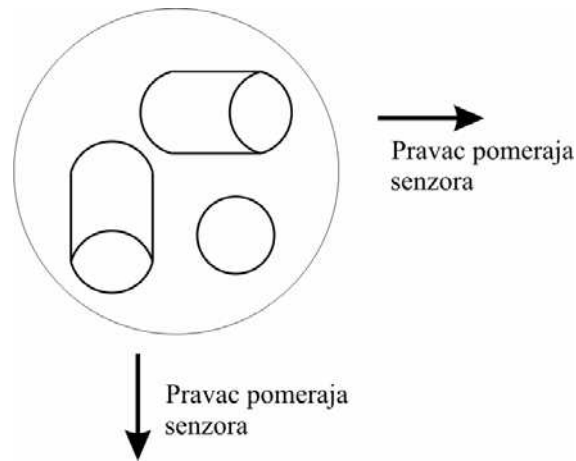
Na osnovu podataka Priloga 3 može se zaključiti sledeće:

- ukupno vreme iniciranja minske serije je 1857 ms,
- za celokupnu seriju od 60 bušotina kao i u prethodnoj šemi ni u jednom slučaju se ne pojavljuje vremenski interval iniciranja između bušotina od 8 ms, što znači da ne postoji verovatnoća preklapanja bušotina i da će se biranjem ove šeme iniciranja i smanjenjem broja redova kao i usporenja sa 67 na 42 ms, omogućiti iniciranje samo jedne bušotine po vremenskom intervalu usporenja. Najmanji vremenski interval između dve bušotine je 17 ms.

## 2.5 MERENJE POTRESA

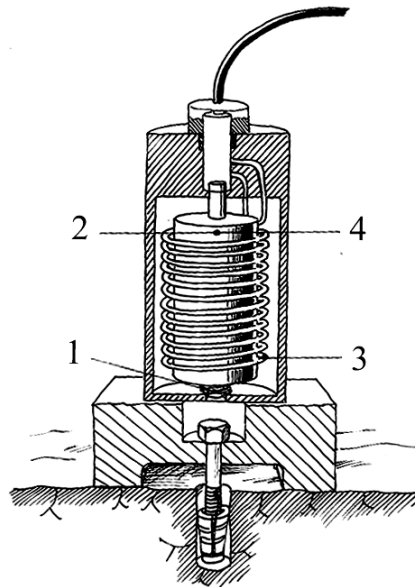
Potresi tla izazvani miniranjem mere se instrumentima zvanim seizmografi. Seizmografi su dizajnirani da vrše merenje i beleženje pomeraja tla. Sastoje se od senzora osetljivih na pomeraj, smeštenih van ili u istom kućištu, blokova obrade signala, kao i blokova za prikaz intenziteta potresa.

Senzor ili geofon se sastoji od tri nezavisne senzorske jedinice postavljene pod pravim uglom jedna u odnosu na drugu. Jedna jedinica je postavljena u vertikalnoj ravni, dok preostale dve jedinice leže u horizontalnoj ravni. Svaki senzor reaguje na pomeraj duž svoje ose. Na slici 2-18 je prikazan međusobni položaj senzorskih jedinica unutar kućišta senzora.



*Slika 2-18. Međusobni položaj senzorskih jedinica unutar kućišta senzora seizmografa [42]*

Oblik kućišta senzora se razlikuje od proizvođača do proizvođača i može biti u obliku kocke, valjka, kvadra. Obično je senzor elektromagnetni pretvarač koji konvertuje pomeraj tla u električni napon. Unutar senzora je namotaj žice koji visi u stalnom magnetnom polju. Magnet je vezan za kućište senzora i ne može da se pokreće, dok se namotaj koji visi u magnetnom polju na opruzi može slobodno kretati. Svaki pokret namotaja u odnosu na magnetno polje proizvodi električni napon proporcionalan brzini pokreta namotaja. Sa vibriranjem tla, senzor takođe vibrira, dok namotaj koji visi unutar senzora usled inercije teži da ostane nepokretan. Relativno kretanje između namotaja i magnetnog polja, rezultuje stvaranje električnog napona. Mehanizam senzora (geofona) seizmografa prikazan je na slici 2-19.



Slika 2-19. Mehanizam senzora (geofona) seizmografa: 1- opruga, 2- pokretna masa, 3- namotaj, 4- stalan magnet [56]

Rekorder je deo instrumenta koji prima impulse i pretvara ih u analogni ili digitalni zapis. Pomeraji tla mogu biti zabeleženi na nekom od medijuma. Da bi se dobio zapis sa medijuma, neophodno je posedovati sistem za reprodukovanje. Snimak može biti reprodukovan iznova sa različitim pojačanjem ili za različite tehnike analize. Mnogi mereni događaji (miniranja) mogu biti zabeleženi na nekom od medijuma koji su danas vrlo jeftini i lako dostupni.

### 2.5.1 Digitalni seizmografi

U poslednjih nekoliko godina u primeni su najčešće digitalni seizmografi. Digitalni seizmografi su u potpunosti elektronski instrumenti za merenje pomeraja tla i vazдушnih udara nastalih od miniranja. Smatraju se trećom generacijom instrumenata za praćenje potresa tla posle mehaničkih i elektromehaničkih. Dok su niske temperature i visoka vlažnost predstavljale glavni problem za elektromehaničke instrumente, sa druge strane kod digitalnih seizmografa komponente širokog raspona radnih temperatura ( $-20^{\circ}\text{C}$  do  $+80^{\circ}\text{C}$ ) omogućile su da digitalni seizmografi budu neosetljivi na surovo okruženje i grubo rukovanje. Izvor napajanja digitalnih seizmografa su baterije standardnog tipa koje su dovoljne za više meseci rada bez nadzora usled male potrošnje ugrađenih elektronskih komponenti.

Digitalni seizmografi mogu prikazivati bilo koji od osnovnih parametara oscilovanja tla, pomeraj, brzinu ili ubrzanje oscilovanja tla, ali se najčešće pri praćenjima potresa tla od miniranja meri i analizira brzina oscilovanja tla. Tri kanala seizmografa mere i beleže vrednosti tri komponente brzine oscilovanja tla (vertikalnu, longitudinalnu i transverzalnu komponentu) u tri međusobno upravna pravca, dok četvrti kanal seizmografa meri intenzitet vazдушnih udara.

Pre početka merenja potresa od miniranja, postoji mogućnost da se u seizmograf unesu i drugi podaci koji se odnose na datum i vreme miniranja, lokaciju instrumenta, broj instrumenta, naziv operatera koji vrši merenje i slično.

Seizmografi vrše snimanje podataka u diskretnim vremenskim trenucima - semplovima ili intervalima uzorkovanja. Pri tome je rezolucija uzorkovanja po pravilu  $2^n$  uzoraka (snimaka) u sekundi. Kada rezolucija iznosi 1024 snimaka u sekundi, tada seizmograf dobija 1024 podatka o brzini oscilovanja za svaku sekundu po svakom od tri upravna pravca. Rezultujuća brzina oscilovanja u nekom trenutku određuje se prema formuli:

$$V_R = \sqrt{V^2 + L^2 + T^2} \quad (2-20)$$

gde je:

$V$  - vertikalna komponenta brzine oscilovanja, (mm/s)

$L$  - longitudinalna komponenta brzine oscilovanja, (mm/s)

$T$  - transverzalna komponenta brzine oscilovanja, (mm/s).

Vrednosti sve tri komponentne brzine oscilovanja prikazuju se na ekranu. Pored prikaza na ekranu, izmereni podaci se mogu odštampati bilo direktno sa seizmografa ili sa kompjutera po prenosu i analizi podataka u odgovarajućem softveru. Savremeni seizmografi imaju mogućnost štampanja podataka u kojima su prikazane razne informacije kao što su: maksimalne vrednosti brzine oscilovanja, maksimalni pomeraj, maksimalno ubrzanje, frekvencije, maksimalnu rezultujuću brzinu oscilovanja, nivo vazдушnih udara, itd. Informacije o miniranju kao što su datum i vreme miniranja, broj miniranja, vreme, lokacija morskog polja i ostale informacije mogu takođe biti dodate odštampanom materijalu. Većina digitalnih seizmografa su autostartujuć i sa mogućnošću vršenja brze Furijeove transformacije za frekventnu analizu vibracija.

### 2.5.1.1 Karakteristike digitalnog seizmografa Minimate Plus™ Kompanije Instantel

Digitalni seizmograf Minimate Plus™ [57] prikazan na slici 2-20, ima višestruku primenu: za praćenje potresa i vazdušnih udara od miniranja, analizu miniranja blizu minskog polja, praćenje vibracija pri građevinskim radovima, pobijanju šipova, rušenju objekata, teškom transportu, seizmičkom monitoringu mostova, analizi konstrukcija, podvodnom miniranju, prikupljanju podataka sa 4 ili 8 kanala, daljinskom monitoringu, monitoringu konstrukcija. Tehničke karakteristike digitalnog seizmografa Minimate Plus™ date su u tabeli 2-3.



Slika 2-20. Digitalni seizmograf Minimate Plus™ Kompanije Instantel [57]

Tabela 2-3. Tehničke karakteristike digitalnog seizmografa Minimate Plus™ [57]

<b>Kanali</b>	Mikrofon i troaksijalni geofon ili 4 nezavisna podesiva kanala (dva mikrofona i dva troaksijalna geofona ili 8 nezavisnih kanala sa dodatnom nadogradnjom od 8 kanala)
<b>Opseg merenja</b>	do 254 mm/s
<b>Rezolucija</b>	0.127 mm/s ili 0.0159 mm/s sa ugrađenim predpojačivačem
<b>Tačnost (ISEE / DIN)</b>	+/- 5% ili 0.5 mm/s između 4 i 125 Hz / DIN 45669-1 standard
<b>Opseg frekvencije (ISEE / DIN)</b>	2 do 250 Hz, od 0 do -3 dB idealnog ravnog odgovora / 1 do 315 Hz
<b>Gustina transduktora</b>	2.13 g/cm <sup>3</sup>
<b>Maksimalna dužina kabla (ISEE / DIN)</b>	75 m /1000 m
<b>Merne skale vazдушnih udara</b>	Linearna ili A skala
<b>Opseg linearnog merenja vazдушnih udara</b>	88 do 148 dB
<b>Rezolucija linearnog merenja vazдушnih udara</b>	0.25 Pa
<b>Tačnost linearnog merenja vazдушnih udara</b>	+/- 10% ili +/- 1 dB između 4 i 125 Hz
<b>Frekventni odziv linearnog merenja vazдушnih udara</b>	2 do 250 Hz
<b>Opseg A-merenja vazдушnih udara</b>	50 do 110 dBA
<b>Rezolucija A-merenja</b>	0.1 dBA
<b>Frekventni odziv A-merenja</b>	15 do 8000 Hz
<b>Režim snimanja rekordera</b>	Ručno podešavanje, pojedinačno snimanje, kontinualno snimanje
<b>Triger merenja potresa</b>	0.127 do 254 mm/s
<b>Triger linearnog merenje</b>	100 do 148 dB
<b>Triger A-merenja</b>	55 do 110 dBA
<b>Brzina uzorkovanja</b>	1024 do 4096 uzoraka/s po kanalu (nezavisno od vremena snimanja), do 65536 uzoraka/s pri režimu merenja jednim kanalom sa naprednim softverom
<b>Vreme snimanja</b>	1 do 100 s ili napredni režim snimanja 500 s plus 0.25 s pretrig
<b>Vreme automatskog snimanja</b>	1 do 100 s ili napredni režim 500 s plus 0.25 s pretrig. Snimanje traje dok merna vrednost ne bude ispod vrednosti trigeru ili dok memorija ne bude puna
<b>Kapacitet memorije</b>	300 mernih događaja pri brzini uzorkovanja 1024 uzoraka/s
<b>Dimenzije seizmografa</b>	81 x 91 x 160 mm
<b>Masa</b>	1.4 kg
<b>Baterija</b>	Punjiva 6 V kapaciteta 210 h kontinualnog merenja
<b>Ekran</b>	4-reda x 20-karaktera, LCD
<b>Radna temperatura ekrana</b>	-10 do 50°C
<b>Radna temperatura elektronskih komponenti</b>	-20 do 55°C
<b>Daljinska komunikacija</b>	Automatski prenosi merene događaje nakon završetka snimanja preko Instantel Auto Call Home™. Tajmer monitora start/stop

### 2.5.2 Preciznost seizmografa i kalibracija

Međunarodno udruženje inženjera koji se bave miniranjem (*en. The International Society of Explosive Engineers - ISEE*) usvojilo je standarde koje moraju zadovoljavati seizmografi za praćenje potresa i vazdušnih udara od miniranja. Verzija izdata krajem septembra 1999. godine propisuje da frekventni odziv bude u opsegu 2 do 250 Hz ili boljem, kako za kanale koji mere potrese tako i za kanale koji mere vazdušne udare. Seizmograf treba da ima preciznost  $\pm 5\%$  ili  $\pm 0.5$  mm/s ili veću pri merenju potresa i  $\pm 10\%$  ili  $\pm 1$  dB ili veću pri merenju vazdušnih udara. Minimalna preciznost seizmografa usvojena je za frekventni opseg 4 - 125 Hz. Ostali zahtevi se odnose na maksimalnu zapreminsku masu senzora od  $2.40 \text{ g/cm}^3$  i brzinu uzorkovanja od  $\geq 1000$  uzoraka u sekundi po kanalu, kao i na opseg radne temperature seizmografa koji treba da iznosi -12 do  $49 \text{ }^\circ\text{C}$  [18].

### 2.5.3. Procedura postavljanja seizmografa

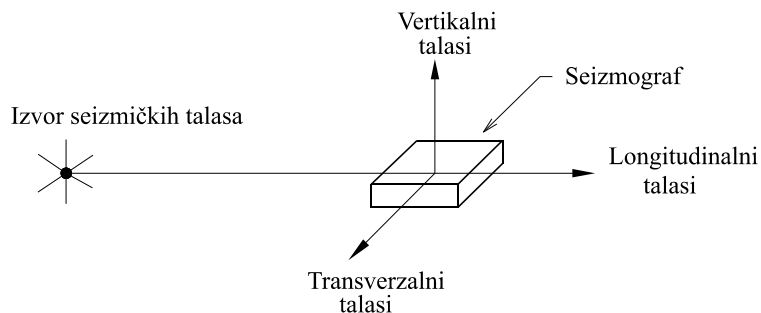
Procedura postavljanja seizmografa predstavljena je u Standardu Međunarodnog Udruženja inženjera koji se bave miniranjem pod nazivom *Praktične smernice za primenu seizmografa za merenje potresa od miniranja na terenu* (*en. Field Practice Guidelines for Blasting Seismographs*) [58]. Dodatne smernice za postavljanje akcelerometara date su u standardu ISO 5348-3 iz 1998.god. [59].

### 2.5.4 Registrovanje oscilacija

Grafik oscilovanja tla u funkciji vremena koje registruje seizmograf naziva se seizmogram. Seizmograf za merenje oscilovanja tla od miniranja najčešće prikazuje grafik brzine oscilovanja tla  $V$  u funkciji vremena koji se naziva i velosigram. Pored merenja brzine oscilovanja, gde izlazne veličine imaju jedinice mm/s, seizmografi mogu da prikazuju i grafik pomeraja tla u funkciji vremena u  $\mu\text{m}$  ili grafik ubrzanja tla u funkciji vremena u  $\text{m/s}^2$  ili g.

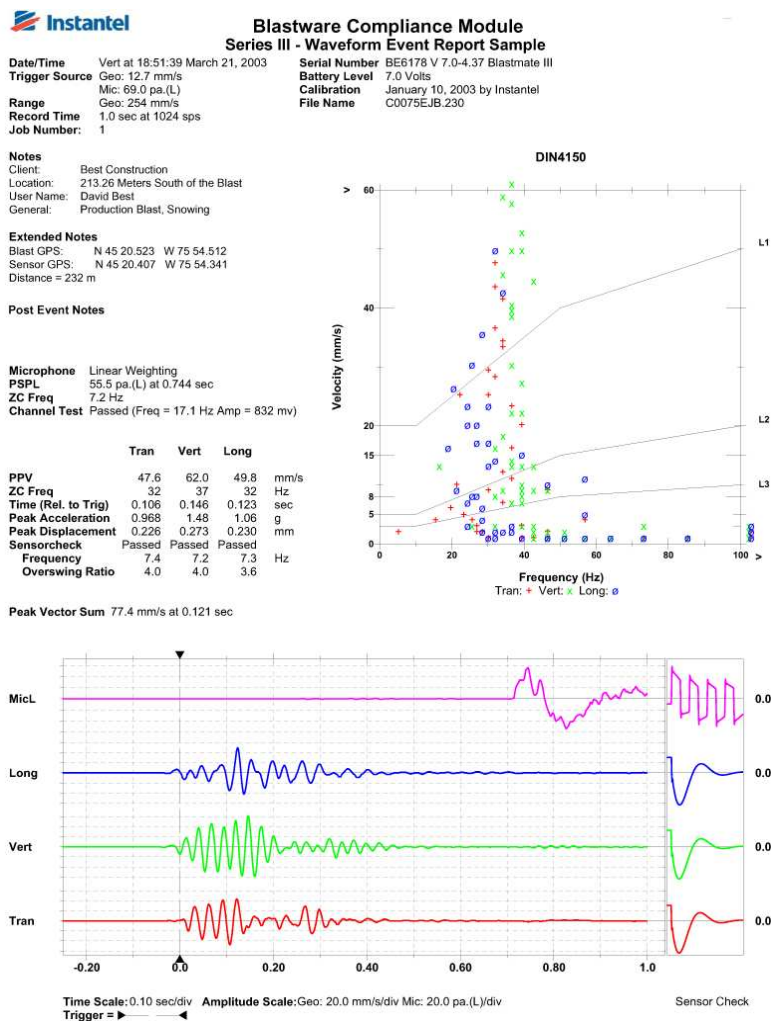
Seizmograf polariše oscilovanje tla u tri međusobno upravne komponente ( $V$ ,  $L$ ,  $T$ ), prikazane na slici 2-21. Jedna komponenta oscilacija je vertikalna, a druge dve su horizontalne (uzdužna i poprečna). Vertikalna komponenta prikazuje kretanje gore dole označena sa  $V$ , longitudinalna (ili radijalna) prikazuje kretanje duž linije koja spaja izvor i tačku registrovanja  $L$  i poprečna komponenta prikazuje kretanje pod pravim uglom u odnosu na liniju koja spaja izvor i tačku registrovanja označena sa  $T$ .





Slika 2-21. Komponente oscilovanja [42]

Savremeni digitalni seizmografi daju prikaz četiri grafika u funkciji vremena, gde tri grafika predstavljaju promenu komponenata brzine oscilovanja tla po vremenu, dok četvrti grafik predstavlja izmereni nivo vazdušnog nadpritiska. Na slici 2-22 je dat prikaz izlaznih podataka pri merenju brzine oscilovanja i vazdušnih udara primenom seizmografa Blastmate III Kompanije InstanTEL [57].



Slika 2-22. Prikaz izlaznih podataka pri merenju brzine oscilovanja i vazdušnih udara primenom seizmografa Blastmate III Kompanije InstanTEL [57]

### 2.5.5 Interpretacija seizmograma

Razvoj seizmografa i odgovarajućih kompjuterskih softvera za obradu omogućio je da se na prikazu registrovanih oscilacija pojavljuju rezultati analiza različitih parametara oscilovanja. Savremeni digitalni seizmografi omogućavaju odštampanu verziju snimljenih podataka oscilovanja, kao i mogućnost dalje obrade podataka u digitalnom obliku adekvatnim kompjuterskim softverom. Maksimalni nivo oscilacija, u slučaju merenja brzine oscilovanja tla, dobija se određivanjem apsolutne vrednosti najveće amplitude oscilovanja merene od nulte linije na bilo kom od tri grafika.

Da bi se odredila frekvencija oscilacija neophodno je da se istraži talasno kretanje na seizmogramu. Sinusoidalni talas ima iste vrednosti amplitude za pozitivnu i negativnu poluperiodu. Vreme između susednih minimuma ili maksimuma predstavlja period talasa ili vreme jedne kompletne oscilacije. Ovo je slučaj u idealnim uslovima koji obično nisu postignuti pri zapisu oscilacija.

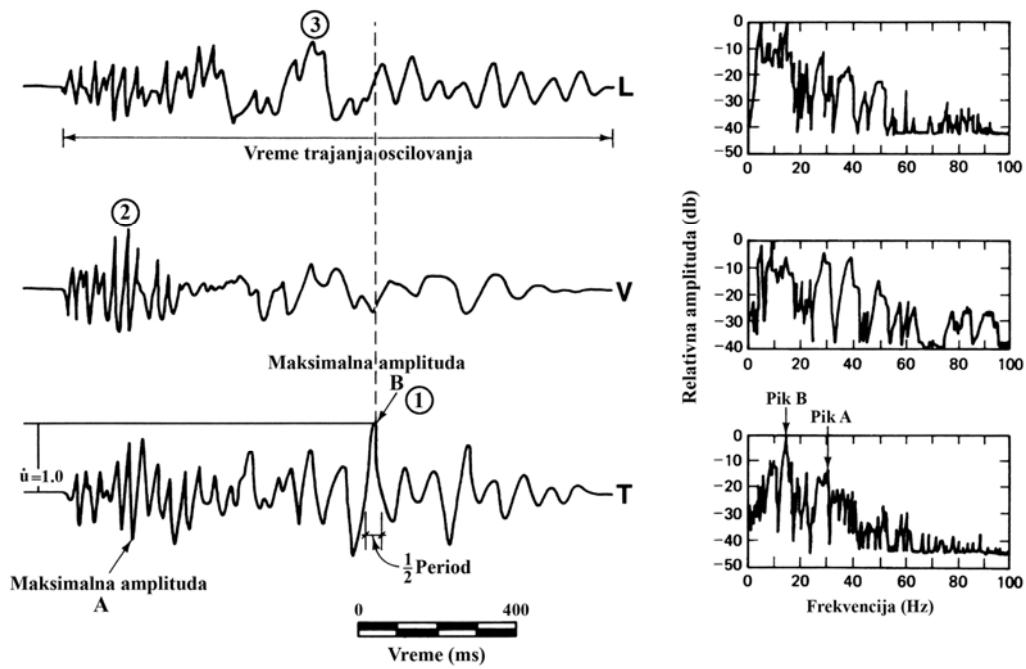
Frekvencija se određuje na osnovu perioda :

$$f = 1 / T, (\text{Hz})$$

gde je T – period oscilacija izražen u sekundama.

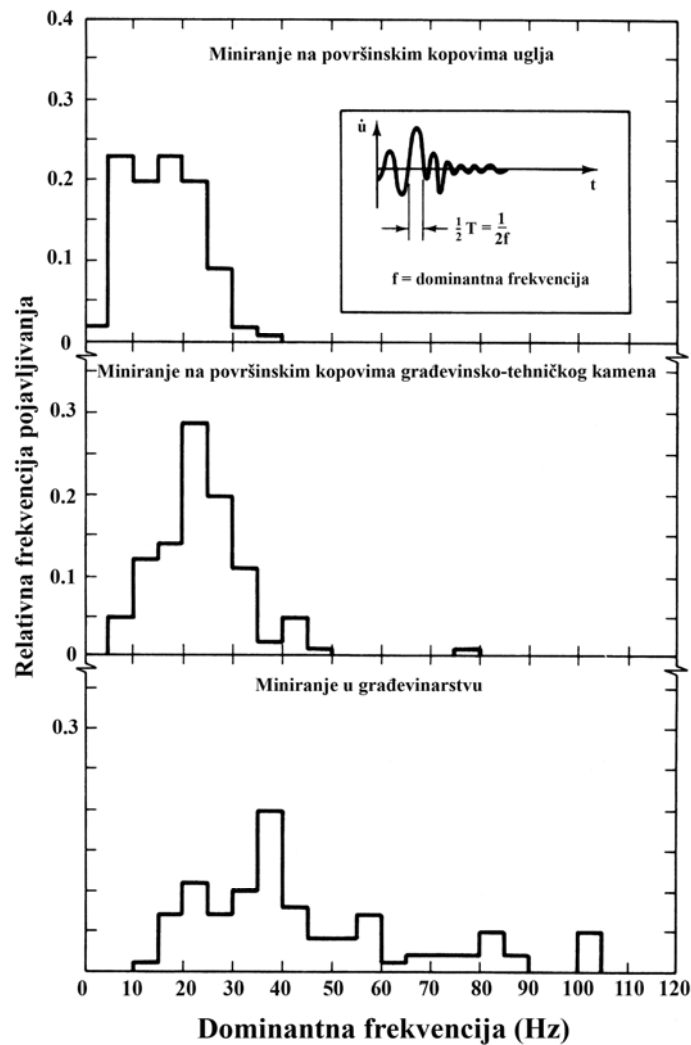
Frekvencija određena očitavanjem zapisa je visoko podložna grešci. Frekvencija oscilacija [18] može biti izračunata primenom različitih metoda uključujući FFT (*en. The Fast Fourier transform - FFT*) analizu i spektre odziva.

FFT analiza se primenjuje za izračunavanje raspodele frekvencija velosigrama kao kontinualnog spektra, ali ne daje informaciju o amplitudi samog signala. FFT analiza je korisna za obradu signala i druge vrste analize frekventnih domena. Na slici 2-23 su prikazani tipični zapisi tri komponente brzine oscilovanja i dominantne frekvencije pri miniranju na površinskim kopovima uglja.



Slika 2-23. Tipični zapisi tri komponente brzine oscilovanja i dominantne frekvencije pri miniranju na površinskim kopovima uglja [60]

Na slici 2-24, prikazano je poređenje dominantnih frekvencija oscilacija uzrokovanih različitim vrstama miniranja.



Slika 2-24. Poređenje dominantnih frekvencija oscilacija uzrokovanih različitim vrstama miniranja [19]

Spektar odziva takođe daje distribuciju frekvencija. Dowding [48] je pokazao da je spektar odziva pri prigušenju 0% proporcionalan Furijeovom spektru frekvencija.

Analize velosigrama, zasnovane na maksimalnoj brzini oscilovanja i odgovarajućoj frekvenciji, najčešće se primenjuju u različitim standardima koji propisuju maksimalno dozvoljene vibracije od miniranja u cilju zaštite objekata od oštećenja, jer su to parametri koji su u korelaciji sa pojavom kozmetičkih pukotina na objektima [12].

## 2.6 PREDVIĐANJE POTRESA OD MINIRANJA NA POVRŠINSKIM KOPOVIMA

Za uspostavljanje korelacione veze između brzine oscilovanja i osnovna tri faktora količine eksploziva, karakteristike tla (stena) i rastojanja od mesta miniranja, razvijeno je u svetu više empirijskih modela dobijenih regresionom analizom, koji se često u stručnoj literaturi nazivaju i zakon oscilovanja tla. Matematički model [43] najšire primenjen u svetu ima teorijski oblik:

$$V = K \cdot R^n, \quad (mm/s) \quad (2-21)$$

gde je:

$K, n$  - koeficijenti koje karakterišu tlo (stenu) i određuju se regresionom analizom,

$V$  - brzina oscilovanja tla, (mm/s)

$R$  - redukovano rastojanje.

Redukovano rastojanje prema Ruskoj preporuci [43] iznosi:

$$R = \frac{r}{\sqrt[3]{Q_u}}, \quad (m/\sqrt[3]{kg}) \quad (2-22)$$

gde je:

$r$  - rastojanje merne tačke od mesta miniranja, (m)

$Q_u$  - ukupna količina eksploziva u minskoj seriji, (kg)

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

Redukovano rastojanje prema preporuci zapadnih zemalja [43] određuje se iz izraza:

$$R = \frac{r}{\sqrt{Q}}, \quad (m/\sqrt{kg}) \quad (2-23)$$

gde je:

$Q$  - maksimalna količina eksploziva koja se inicira u jednom intervalu, pri čemu između dve sukcesivne inicijacije mora da postoji dovoljan vremenski interval koji onemogućuje preklapanje ili susretanje talasa.

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 mesta miniranja iste ili slične u pogledu seizmičkog ponašanja, onda će jedan model predviđanja važiti za sve pravce. Ako postoji izrazita razlika u seizmičkom ponašanju stena u raznim pravcima, onda treba utvrditi posebne modele predviđanja u pravcima objekata osetljivih na potrese.

Korelacija između izmerene brzine oscilovanja i redukovano rastojanja može da se utvrdi regresionom analizom metodom najmanjih kvadrata. Pri tome se dobija jednačina predviđanja potresa za nivo pouzdanosti od 50 %, koja omogućava verovatnoću od 50 % da se pri budućim miniranjima registruje brzina oscilovanja veća od predviđene. U cilju veće zaštite objekata, prilikom predviđanja potresa određuje se jednačina predviđanja brzine oscilovanja za nivo pouzdanosti od 95%, koja obezbeđuje verovatnoću od 95%, da izmerene brzine oscilovanja pri budućim miniranjima neće preći predviđenu vrednost. To znači da se samo 5 % izmerenih vrednosti može naći iznad ove linije.

Jednačina [49] predviđanja brzine oscilovanja tla za nivo pouzdanosti od 95% izračunava se prema sledećem obrascu:

$$V_{95} = V_{50} \cdot 10^{1.645 \cdot SE}, (mm/s) \quad (2-24)$$

gde je:

$V_{95}$  - predviđena brzina oscilovanja tla za nivo pouzdanosti od 95 %, (mm/s)

$V_{50}$  - predviđena brzina oscilovanja tla za nivo pouzdanosti od 50 %, (mm/s)

SE - standardna greška procene.

### 2.6.1 Modeli za predviđanje potresa od miniranja

Jedan od prvih modela za predviđanje potresa predložen je 1950. godine od strane Morris-a [2] i glasio je:

$$A = K \cdot \frac{\sqrt{Q}}{r}, (mm) \quad (2-25)$$

gde je:

$A$  - maksimalni pomeraj čestice tla, (mm)

$Q$  - masa eksplozivnog punjenja, (kg)

$r$  - rastojanje od minskog polja do mesta merenja, (m)

$K$  - koeficijent koji zavisi od karakteristika radne sredine i iznosi 0.57 za tvrde stene do 3.40 za nevezano tlo.

Leconte je 1967. godine predložio da se maksimalni pomeraj u prethodnom modelu, zameni rezultujućom vrednosti tri komponente brzine oscilovanja čestica tla [1]:

$$V = K_{vr} \cdot \frac{\sqrt{Q}}{r}, \quad (mm/s) \quad (2-26)$$

Među najrigoroznijim modelima za predviđanje potresa ubraja se model predložen od strane Blair i Duvall 1954. godine [3] i Duvall i Petkof-a 1959. godine [4], koji su pokušavali da nađu korelaciju intenziteta seizmičkih potresa sa masom eksplozivnog punjenja i rastojanjem od mesta miniranja. Uz pretpostavke da je eksplozivno punjenje simetrična sfera, zaključili su da linearnu dimenziju treba korigovati trećim korenom mase eksplozivnog punjenja.

Slične rezultate su dobili i Ambraseys i Hendron 1968. god. [5], kao i Dowding 1971. godine [6]. Uzimajući brzinu oscilovanja čestica tla kao karakterističan parametar potresa, intenzitet potresa je predstavljen sledećim modelom:

$$V = K \cdot \left(\frac{r}{Q^{1/3}}\right)^{-n}, \quad (mm/s) \quad (2-27)$$

gde je:

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

$Q$  - maksimalna količina eksplozivnog punjenja po intervalu usporenja, (kg)

$r$  - rastojanje od minskog polja do mesta merenja, (m)

$K, n$  – empirijski koeficijenti.

Za cilindrična punjenja, zapaženo je da rastojanje treba da bude korigovano deljenjem kvadratnim korenom količine eksploziva po usporenju [7] i na taj način definisati sledeći model predviđanja brzine oscilovanja:

$$V = K \cdot \left(\frac{r}{\sqrt{Q}}\right)^{-n}, \quad (mm/s) \quad (2-28)$$

Drugi autori poput Attewell i dr. 1964. godine [8], Holmberg i Persson 1978. godine [9], Shoop i Daemen 1983. godine [10] nisu uzimali u razmatranje simetriju određenog punjenja, već su dali uopšteni model:

$$V = K \cdot Q^a \cdot r^b, \quad (mm/s) \quad (2-29)$$

gde je:

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

$Q$  - količina eksploziva po intervalu usporenja, (kg)

$K, a, b$  - empirijski koeficijenti koji se određuju regresionom analizom za određene uslove radne sredine.

Švedska škola predvođena Langefors, Kihlstrom i Gustafsson-om [1], predstavila je odnos rastojanja, količine eksploziva i brzine oscilovanja čestica tla sledećim odnosom:

$$V = K \cdot \left[ \frac{Q}{\sqrt{r}} \right]^{1/2}, \quad (mm/s) \quad (2-30)$$

Lundborg je 1977. godine [1] na osnovu zapažanja podataka Američkog Biroa za Rudarstvo USBM [12], došao do modela predviđanja potresa  $V = f(r, Q)$  i predložio sledeću jednačinu:

$$\log V = 4.08 + 0.14 \log Q - 2.06 \log r + 0.22 \log Q \cdot \log r, \quad (mm/s) \quad (2-31)$$

što je predstavljeno trodimenzionalnom površi.

Just i Free [1] su predložili sledeći model predviđanja potresa na bazi zapažanja kontrolisanih miniranja pretpostavljajući da su zapreminski talasi dominantni i da postoji sferična divergencija:

$$V = K \cdot (r/Q^{1/3})^{-1} \cdot e^{-\alpha(r/Q^{1/3})}, \quad (mm/s) \quad (2-32)$$

Ghosh i Daemen su 1983. godine uzeli u obzir neelastičnu apsorpciju da bi razmotrili eksponencijalno opadanje brzine oscilovanja čestica tla čineći ga proporcionalnim sa  $e^{-ar}$  [13].

Američki Biro za rudarstvo je na bazi velikog broja merenja potresa pri etažnom miniranju na različitim terenima, utvrdio sledeći model predviđanja brzine oscilovanja tla:

$$V = 750 \cdot \left( \frac{r}{\sqrt{Q}} \right)^{-1.67}, \quad (mm/s) \quad (2-33)$$

U knjizi objavljenoj 2000. godine Siskind [18] navodi više modela različitih autora za predviđanje potresa od miniranja, prikazanih u tabeli 2-4.



Tabela 2-4. Modeli predviđanja potresa od miniranja [18]

Vrsta miniranja	Jednačina	Literatura
Tipično proizvodno miniranje na kopovima građevinsko - tehničkog kamena	$V=182 \cdot (r/Q^{1/2})^{-1.82}$	Bulletin 656 (Nicholls et al., 1971)
Merenja na 11 kopova krečnjaka	$V=52.2 \cdot (r/Q^{1/2})^{-1.38}$	PADER Report (Crum et al., 1995b)
Kopovi uglja, maksimalna horizontalna komponenta	$V=133 \cdot (r/Q^{1/2})^{-1.50}$	RI 8507 (Siskind et al., 1980b)
Kopovi uglja za $r/Q^{1/2} < 300$	$V=1.240 \cdot (r/Q^{1/2})^{-1.78}$	RI 8507 (Siskind et al., 1980b)
Nisko frekventni kopovi uglja	$V=138 \cdot (r/Q^{1/2})^{-1.31}$	RI 9226 (Siskind et al., 1989)
Nisko frekventne sredine za $r/Q^{1/2} < 118$	$V=187 \cdot (r/Q^{1/2})^{-1.18}$	RI 9226 (Siskind et al., 1989)
Nisko frekventne sredine za $r/Q^{1/2} > 118$	$V=40.940 \cdot (r/Q^{1/2})^{-2.31}$	RI 9226 (Siskind et al., 1989)
Jedno minsko punjenje	$V=29.2 \cdot (r/Q^{1/2})^{-1.28}$	RI 9226 (Siskind et al., 1989)

gde je:

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

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

Q – količina eksploziva po intervalu usporenja, (lb)

## 2.6.2 Kontrola potresa

Postupak kontrole potresa [43] se sastoji u sledećem:

- utvrđivanje objekata u okolini miniranja koje treba štititi od potresa,
- na bazi prirode i konstruktivnih karakteristika objekta, određivanje dozvoljene brzine oscilovanja tla na mestu objekta primenom nekog od navedenih standarda do donošenja domaćeg standarda,
- određivanje rastojanja objekta od mesta miniranja,

- izračunavanje količine eksploziva koja se istovremeno može inicirati, tako da brzina oscilovanja na mestu objekta ne prekorači dozvoljenu brzinu. Ako u okolini ima više objekata koje treba štititi, proračun treba izvršiti za sve objekte, a zatim primeniti najmanju dobijenu količinu eksploziva po jednom intervalu,
- određivanje intervala usporenja koji neće dozvoliti preklapanje potresa od različitih minskih punjenja,
- merenjem potresa izazvanih miniranjem na mestu objekta utvrditi da li brzina oscilovanja ne prelazi dozvoljenu brzinu oscilovanja objekta koji se štiti. Pri tome se u pojedinim zemljama kontroliše da rezultujuća brzina oscilovanja ne pređe dozvoljenu granicu, a u drugim da svaka komponenta brzine pojedinačno ne prekorači dozvoljenu granicu u zavisnosti od usvojenog standarda.

### **2.6.2.1 Kontrola potresa pomoću regresionog modela predviđanja brzine oscilovanja**

Postupak kontrole potresa koji se u praksi najviše primenjuje na konkretnoj lokaciji, predstavlja utvrđivanje jednačine odnosno modela predviđanja brzine oscilovanja tla merenjem i regresionom analizom podataka. Ukoliko su seizmičke karakteristike tla iste u svim pravcima, za regulisanje potresa koristi se jedan model predviđanja potresa. Ukoliko to nije slučaj, moraju se za različite pravce utvrditi i primeniti odgovarajući modeli predviđanja potresa.

Regresioni model predviđanja brzine oscilovanja ima oblik (jednačina 2-21):

$$V = K \cdot R^n, (mm/s)$$

gde je:

$K$  - koeficijent koji karakteriše tlo dobijen regresionom analizom izmerenih podataka za konkretnu oblast ili pojedini pravac za nivo pouzdanosti od 95%

$n$  - eksponent koji definiše stepen prigušenja seizmičkog talasa dobijen regresionom analizom

$R$  - redukovano rastojanje koje se određuje iz odnosa (jednačina 2-23):

$$R = \frac{r}{\sqrt{Q}}, (m/\sqrt{kg})$$

gde je:

$r$  - rastojanje od mernog mesta do minskog polja, (m)

$Q$  - maksimalna količina eksploziva po intervalu usporenja, (kg)

Postupak kontrole ili regulisanja potresa je sledeći:

- preciziraju se objekti koje treba štititi, njihovo rastojanje i dozvoljena brzina oscilovanja,
- određuje se redukovano rastojanje za dozvoljenu brzinu oscilovanja za objekat koji se štiti (za stambene objekte prema DIN 4150-3 [61] iznosi 5 mm/s):

$$R = \left( \frac{V}{K} \right)^{\frac{1}{n}}, \left( \frac{m}{\sqrt{kg}} \right) \quad (2-34)$$

Na osnovu izračunatog redukovanog rastojanja dobija se grafik maksimalno dozvoljenih količina eksploziva po intervalu usporenja u funkciji rastojanja od minskog polja do mernog mesta prema sledećem obrascu:

$$Q = \left( \frac{r}{R} \right)^2, (kg) \quad (2-35)$$

- određuje se vreme usporenja tako da pri uračunatoj toleranciji sredstava za usporenje, interval usporenja između uzastopnih minskih punjenja ne bude manje od 8 ms [19].

## 2.7 REAKCIJA OBJEKATA PRI PROLASKU SEIZMIČKIH TALASA

Pri prolasku seizmičkih [62] talasa čestice tla osciluju u istom režimu kao i sam talas. Oscilovanje tla se prenosi i na objekte koji su u njemu fundirani pa i oni počinju da osciluju. Imajući u vidu inerciju objekata, sile unutrašnjeg trenja u konstruktivnim elementima objekata i njihove elastične karakteristike, sistem tlo-objekat se može posmatrati kao prigušeni prinudni oscilator. Pri tome oscilacije tla predstavljaju pobudu, a oscilacije objekta su prinudne, to jest predstavljaju reakciju. Sistem tlo-objekat se uprošćeno može prikazati modelom sa jednim stepenom slobode (*en. Single Degree of Freedom Model - SDF Model*). Ukoliko se ovaj sistem izvede iz ravnotežnog položaja impulsnom pobudom, po prestanku delovanja uticaja sistem nastavlja da osciluje oko ravnotežnog položaja sa frekvencijom i amplitudom koja se sukcesivno smanjuje do potpunog prestanka oscilovanja. Frekvencija kojom sistem osciluje oko ravnotežnog položaja je frekvencija sopstvenih slobodnih oscilacija sistema. Smanjenje amplitude sistema definisano je veličinom koeficijenta prigušenja. Potpuno prigušeni sistem se po prestanku pobude vraća u ravnotežno stanje bez oscilovanja i ta veličina prigušenja se definiše kao kritično prigušenje. Potpuno neprigušeni sistem po prestanku pobude osciluje u beskonačnost. Za definisanje veličine prigušenja primenjuje se koeficijent prigušenja koji predstavlja odnos stvarnog i kritičnog prigušenja [62].

Ukoliko je frekvencija pobudnih oscilacija bliska frekvenciji sopstvenih slobodnih oscilacija sistema, može doći do povećanja amplitude reaktivnih, prinudnih oscilacija sistema. Ova pojava se naziva rezonanca. Veličina pojačanja definisana je faktorom pojačanja. Faktor pojačanja, samim tim i veličina pojačanja amplitude oscilovanja pri rezonanci, zavisi od bliskosti frekvencija i faktora prigušenja.

Građevinski objekti na sličan način reaguju na pobudu koju predstavlja prolazak seizmičkog talasa kroz tlo. Međutim, zbog kompleksnosti objekta koji se sastoji od više konstruktivnih elemenata elastične osobine objekta i prigušenje oscilacija objekta se ne mogu predstaviti prostim koeficijentima kao u slučaju modela. Kao i kod modela, tako i kod realnih objekata, može se govoriti o sopstvenim slobodnim oscilacijama, prigušenju oscilacija i o pojavi rezonance. Postoji matematički model proračuna frekvencije osnovnog tona sopstvenih slobodnih oscilacija objekta. Model se primenjuje pri projektovanju objekata u seizmički aktivnim područjima [62].

### 2.7.1 Model sa jednim stepenom slobode

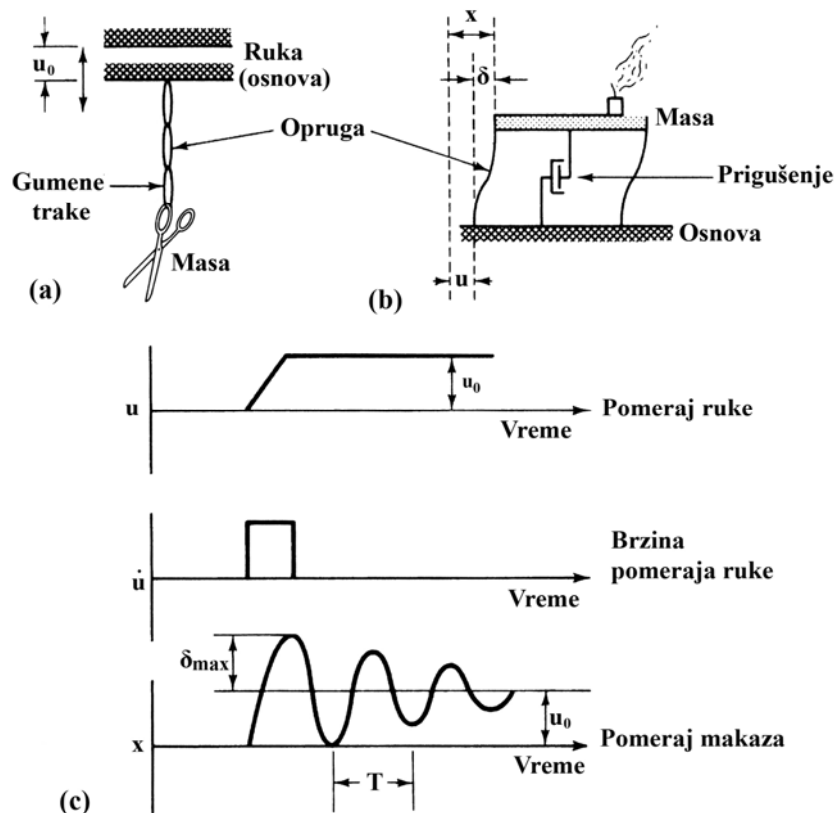
Mogućnost pojave [49] pukotina može se najbolje razmatrati u smislu odziva objekta pri prolasku seizmičkih talasa nastalih od miniranja. Jedan od faktora kritičnog odziva je suma različitih pomeraja koji se javljaju između elemenata, delova ili različitih tačaka konstrukcije usled naprezanja koja uzrokuju pojavu pukotina. Za izračunavanje diferencijalnih pomeraja koji se mogu pojaviti u elementu objekta ili celom objektu, neophodno je da se pojednostavi konstrukcija objekta, kako bi izračunavanje bilo praktičnije. Najjednostavnije karakteristike objekta koje određuju njegovo ponašanje pod opterećenjem izazvanim vibracijama su: mase glavnih komponenata, krutost glavnih komponenata i količina energije utrošene na diferencijalni pomeraj u pukotinama, spojevima i vezama. Model koji uzima u obzir dinamičku interakciju tri pojednostavljene karakteristike je SDF (*en. Single Degree of Freedom*) sistem sa jednim stepenom slobode.

Jednostavan eksperiment [49] sa makazama koje vise na nizu gumenih traka prikazan na slici 2-25a, pokazuje koliko je frekvencija vibracija od miniranja važna za kontrolu pojave pukotina na objektima. Makaze i niz traka su matematički ekvivalent masi opruge SDF modela stambenog objekta prikazanog na slici 2-25b. Svako opažanje odziva makaza može se izračunati jednačinom kretanja koja opisuje ponašanje matematičkog ekvivalenta. Ovaj matematički model je SDF sistem iz kojeg se izračunavaju spektri odziva. Pomerajem osnove makaza (ruka) naviše za  $u_0$ , makaze počinju da osciluju oko novog položaja sa smanjenjem amplitude, kako je prikazano na slici 2-25c. Kretanje ruke je ekvivalentno trajnom pomeraju tla za  $u_0$ , koje se može opisati preko brzine  $\dot{u}$ , slika 2-25c. Istezanje niza gumenih traka tokom oscilacija je relativni pomeraj  $\delta$ , koji je sličan naprezanjima objekta koji dovode do pojave pukotina. Brzina slabljenja amplitude je proporcionalna prigušenju sistema. Veće prigušenje dovodi do bržeg prekida oscilovanja. Vreme jedne oscilacije  $T$ , naziva se prirodni period sistema, koji predstavlja inverznu vrednost prirodne frekvencije ( $T=1/f$ ).

Ako se navedeni sistem razmatra kao objekat, veoma mali pomeraj nagore ili nadole predstavlja pomej  $u$ , pri čemu nema istežanja gumenih traka. Ako se sistem pomeri na identično rastojanje  $u$ , tako da se pomeraji ponove na intervalima jednakim prirodnom periodu sistema, dešava se veliko istežanje. Ovaj odziv je sličan rezonantnom odzivu objekta na nisko frekventne vibracije nastale od miniranja. Pomerajem ruke gore-dole

mnogo većom brzinom, koja predstavlja brzinu oscilovanja tla, za isto rastojanje  $u$ , frekvencijama većim od prirodne frekvencije sistema, uzrokuje se manje istezanje ili naprezanje (time i mogućnost pojave pukotina), što je karakteristično za odziv objekta pri prolasku visoko frekventnih vibracija od miniranja, koje su karakteristične za oblasti na manjim rastojanjima od minskog polja.

Matematički model sa jednim stepenom slobode gumenim trakama i makazama prikazan na slici 2-25b.



Slika 2-25. Model sa jednim stepenom slobode sa gumenim trakama i makazama, (a) model sa makazama, (b) matematički model objekta, (c) pomeraj makaza [49]

Koncentrisana masa je analogna masama glavnih komponenti objekta; opruga predstavlja krutost glavnih komponenti, a prigušivač, kroz viskoznu otpornost, modelira utrošak energije. Diferencijalni pomeraje  $\delta$  je razlika između apsolutnog pomeraja mase,  $x$  i apsolutnog pomeraja tla  $u$ .

Razmatranjem modela objekta prikazanog na slici 2-25b, koncentrisana masa je analogna masi poda realnog objekta; vertikalne opruge su analogne zidovima realnog objekta, a prigušivač apsorbira energiju na isti način na koji to rade i spojevi kod realnog objekta. Ovo poređenje pokazuje da je ponašanje objekata sa jednim ili dva

sprata i pojedinih objekata sa tri sprata, direktno analogno ponašanju SDF sistema, kada se posmatra pomeraj samo u jednom pravcu. Kada se razmatraju objekti sa više spratova, neophodno je modelirati objekat kao sistem sa više stepena slobode. Međutim, čak i takav model sa više stepena slobode, može da se idealizuje kao model sa jednim stepenom slobode, ako se traži samo jedan mod odziva.

Grafički prikaz maksimalnih odziva različitih SDF sistema sa različitim prirodnim frekvencijama na iste vibracije od miniranja zove se spektar odgovora, jer predstavlja opseg ili spektar odziva različitih sistema na isto pobuđivanje.

### 2.7.1.1 Matematika modela sa jednim stepenom slobode

Jednačina pomeraja sistema [49] sa jednim stepenom slobode usled pobude tla iznosi:

$$m\ddot{x} + c_1\dot{\delta} + k\delta = 0 \quad (2-36)$$

gde je:  $\ddot{x}$  - apsolutno ubrzanje mase  $m$ ,  $c_1$  - koeficijent prigušenja,  $\dot{\delta}$  - brzina pomeraja mase u odnosu na tlo,  $k$  - linearna konstanta opruge,  $\delta$  - relativni pomeraj između tla i mase.

Ukoliko se za relativan pomeraj napiše  $\delta = x - u$  (gde  $u$  predstavlja pomeraj tla, a  $x$  ukupni pomeraj tla sa objektom), tada se prethodna jednačina može napisati kao:

$$m\ddot{\delta} + c_1\dot{\delta} + k\delta = -m\ddot{u} \quad (2-37)$$

Kružna prirodna frekvencija neprigušenog masa-opruga sistema  $p$ , je jednaka

$$p = \sqrt{k/m}. \text{ Procenat kritičnog prigušenja } \beta \text{ je jednak } \frac{c_1}{2\sqrt{m \cdot k}}. \text{ Ukoliko se masa izvede}$$

iz ravnotežnog položaja, ona se veoma brzo vraća u stanje ravnoteže kada je koeficijent prigušenja  $c_1$  jednak  $2\sqrt{mk}$ . Pri ovom uslovu se može reći da je sistem "kritično prigušen".

Kružna prirodna frekvencija prigušenog sistema  $p_d$  je jednaka  $p\sqrt{1-\beta^2}$ .

Jednačina 2-37 se može napisati kao:

$$\ddot{\delta} + 2\beta p\dot{\delta} + p^2\delta = \ddot{u} \quad (2-38)$$

u odnosu na procenat kritičnog prigušenja  $\beta$  i kružnu prirodnu frekvenciju  $p$  gde  $\ddot{u}(t)$  predstavlja ubrzanje tla.

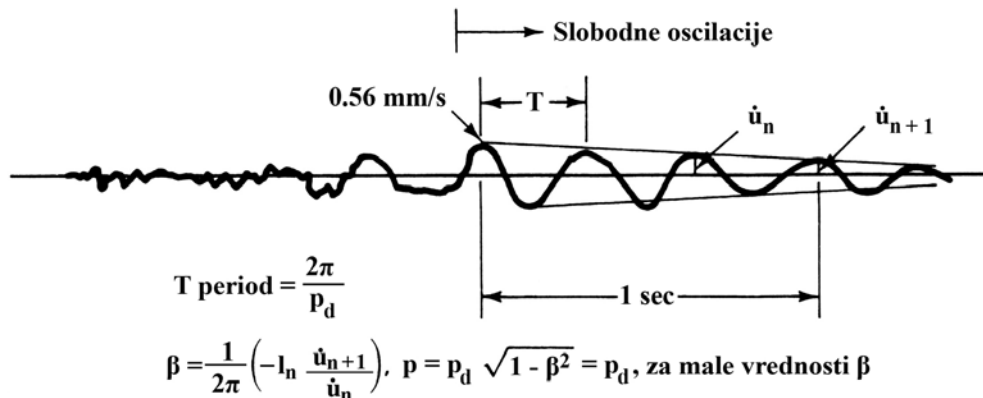
Ako su poznate neprigušena prirodna frekvencija objekta  $p$  i procenat kritičnog prigušenja  $\beta$ , nije potrebno da se definišu vrednosti  $m$ ,  $k$  i  $c_1$  da bi se objekat precizno modelirao.

Dinamičke karakteristike sistema  $p$  i  $\beta$  se mogu tačnije izmeriti iz grafičkog prikaza slobodnih vibracija odziva objekta u funkciji vremena, a nakon toga odrediti vrednosti  $m$ ,  $k$  i  $c_l$  za odgovarajući sistem. Izmereni parametri automatski ulaze u proračun faktora koji se teško kvantifikuju, kao što je stepen fiksiranosti greda (koji utiču na vrednost  $k$ ), kao i koeficijent prigušenja  $c_l$ .

### 2.7.2 Karakteristike objekta dobijene iz izmerenog odziva na vibracije

Prirodna frekvencija i prigušenje objekta može se odrediti iz odziva slobodnih oscilacija nakon pobuđenja objekta, gde prirodna frekvencija objekta predstavlja broj oscilacija objekta u sekundi, dok je prigušenje objekta proporcionalno brzini slabljenja (opadanja) oscilacija tokom slobodnih oscilacija [49].

Na slici 2-26 prikazane [49] su slobodne oscilacije odziva objekta na vibracije. Zapis brzine oscilovanja po vremenu zabeležen je na poslednjem spratu šestospratnog objekta u horizontalnom pravcu paralelnom kraćoj osi objekta.



Slika 2-26. Slobodne oscilacije odziva objekta na vibracije [48]

Prigušen prirodni period prvog moda oscilacija označen je sa  $T$ . Period se preko neprigušene kružne prirodne frekvencije  $p$  može izraziti na sledeći način:

$$T = \frac{2\pi}{p_d} = \frac{2\pi}{p\sqrt{1-\beta^2}} \quad (2-39)$$

gde je:  $p_d$  - prigušena kružna prirodna frekvencija,  $\beta$  - procenat kritičnog prigušenja.

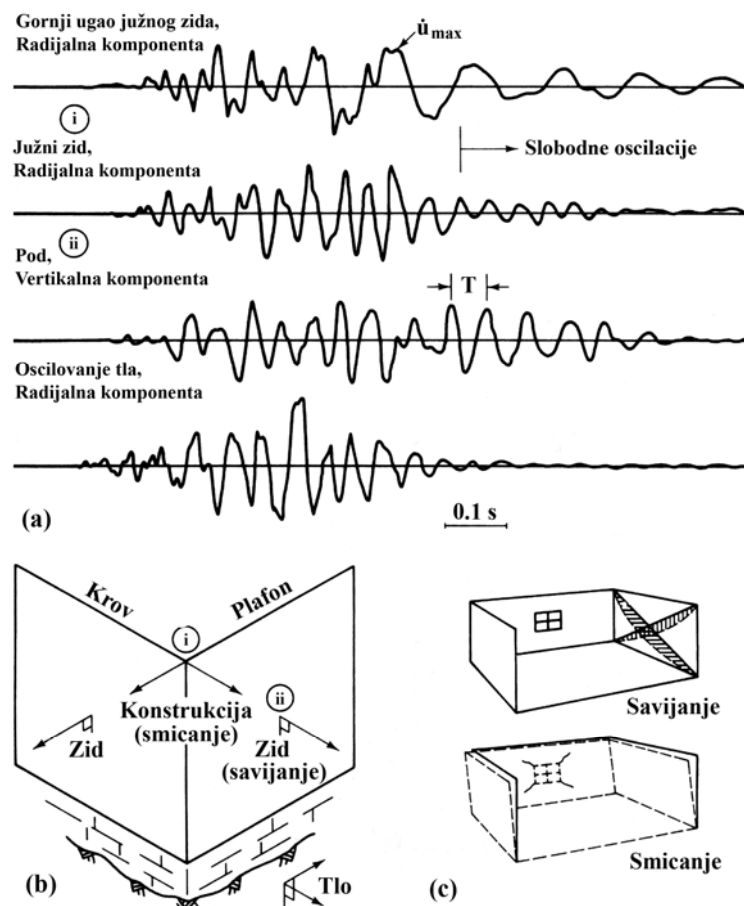
Procenat kritičnog prigušenja se može odrediti prema slabljenju slobodnih oscilacija objekta pomoću odnosa:



$$\beta = \frac{1}{2\pi} = \left( -\ln \frac{\dot{u}_{n+1}}{\dot{u}_n} \right) \quad (2-40)$$

gde su:  $\dot{u}_n$  i  $\dot{u}_{n+1}$  dve sukcesivne amplitude oscilacija [63].

Objekti se sastoje od mnogo komponenata, od kojih su najvažniji zidovi i skeletna konstrukcija objekta. Odziv zidova i skeletne konstrukcije objekta na isto miniranje, upoređeni su na slici 2-27. Odziv skeletne konstrukcije meren je senzorom montiranim u uglu (i) objekta, kako je prikazano na slici 2-27b, a odziv zida senzorom montiranim na sredini zida (ii). Oba senzora mere apsolutni pomeraj. Pomeraji skeletne konstrukcije objekta u uglu povezani su sa distorzijom usled smicanja i torzije, dok su pomeraji mereni na sredini zida povezani sa savijanjem samo tog zida, slika 2-27c.



Slika 2-27. Odziv skeletne konstrukcije i zida objekta: a) pomeraj, b) montiranje senzora (i, ii) i pravci osetljivosti, c) smicanje skeletne konstrukcije i savijanje zida [48]

Kako je prikazano na slici 2-27a, zid i skelet nastavljaju da osciluju slobodno nakon prolaska vibracija tla. Pomeraji zida imaju veću amplitudu nego pomeraji skeleta i

pojavljuju se na većim frekvencijama tokom slobodnih oscilacija. Detaljna proučavanja [64, 65] 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. Pikovi odziva pomeraja sa slike 2-27a naglo slabe tokom slobodnog odziva. Što je veće slabljenje amplitude, to je veće prigušenje objekta. Proučavanja su pokazala da se opseg prigušenja kreće od 2 do 10 % od kritičnog.

Ako odziv objekta na vibracije tla nije meren,  $p$  i  $\beta$  se mogu odrediti iz fizičkih karakteristika objekta. Prirodna frekvencija objekta se može odrediti iz sledećeg odnosa [49]:

$$p = 2\pi \sqrt{\frac{L}{0.05 \cdot h}} \quad (2-41)$$

gde je:  $L$  - širina objekta,  $h$  - visina objekta [66].

Jednačina 2-41 se može još pojednostaviti pri čemu se dobija:

$$p = \frac{2\pi}{0.1N} \quad \text{ili} \quad f = \frac{1}{0.1N} \quad (2-42)$$

gde je:  $N$  - broj spratova objekta.

Prema jednačini 2-42,  $f$  ima vrednost 10 Hz za jednospratne i 5 Hz za dvospratne objekte.

### 2.7.3 Spektri odziva i pseudo brzina

Da bi se razlikovali različiti [49] tipovi potresa tla, kao i mogućnost pojavljivanja pukotina na objektima, neophodno je uporediti njihov efekat na širokom spektru objekata. Poređenje omogućava spektar odziva, koji se može izračunati iz jednačine 2-38. Rešenje jednačine 2-38 daje relativni pomeraj u bilo kom trenutku, na osnovu Dijamelovog integrala zapisa apsolutnog ubrzanja tla po vremenu:

$$\delta(t) = -\frac{1}{p\sqrt{1-\beta^2}} \int_0^t \ddot{u}(\tau) e^{-\beta p(t-\tau)} \sin[p_d(t-\tau)] d\tau \quad (2-43)$$

gde su:  $\delta$  i  $\dot{\delta}$  jednaki 0 za  $t(0)$ , [67].

Jednačina 5-6 daje relativni pomeraj odziva SDF sistema na osnovu zapisa ubrzanja oscilovanja tla po vremenu, pri čemu je  $\beta$  - procenat kritičnog prigušenja,  $p$  - kružna frekvencija,  $\ddot{u}$  - ubrzanje oscilovanja tla.

Ukoliko se kao ulaz želi uzeti zapis brzine oscilovanja po vremenu, kako je uobičajeno kod miniranja, tada veza između  $\dot{u}$  i relativnog pomeraja  $\delta$  može da se nađe parcijalnim integraljenjem jednačine (2-43), tako da je rezultujuća jednačina:

$$\delta(t) = -\int_0^t \dot{u}(\tau) e^{-\beta p(t-\tau)} \left[ \cos[p_d(t-\tau)] - \frac{\beta}{\sqrt{1-\beta^2}} \sin[p_d(t-\tau)] \right] d\tau \quad (2-44)$$

gde  $\delta$  i  $\dot{\delta}$  iznose 0 za  $t_0$ .

Kada se zapis brzine oscilovanja tla po vremenu, kompjuterski obradi po jednačini 2-44, dobija se vremenski zapis sličan onom dobijenom sa gornjeg ugla odziva objekta prikazanom na slici 2-27a. Množenjem maksimalnog relativnog pomeraja  $\delta_{max}$  izračunatog zapisa relativnih pomeranja po vremenu sa kružnom prirodnom frekvencijom objekta  $p$  (ili  $2\pi f$ ) dobija se pseudo brzina  $PV$  (en. *Pseudo velocity - PV*):

$$PV = 2\pi f \cdot \delta_{max} = p \delta_{max}$$

Drugi autori [65] je zovu pseudo - spektralna brzina odziva (en. *Pseudo -spectral response velocity - PSRV*). Ovakva pseudo brzina predstavlja blisku aproksimaciju relativne brzine  $\dot{\delta}$ , ukoliko je impuls  $\delta_{max}$  približno sinusoidalan.

### 2.7.3.1 Spektar odziva i tripartitni dijagram

Na slici 2-28 prikazane su pseudo brzine spektra odziva [49] dobijene iz vrednosti maksimalnog relativnog pomeraja  $\delta_{max}$  nekoliko različitih SDF sistema pobuđenih potresima tla od jednog miniranja na površinskom kopu sa sedam intervala usporenja. Ako se potresi tla  $\dot{u}(t)$  kompjuterski obrade dva puta, za dve različite komponente istog objekta, skeletne konstrukcije prirodne frekvencije 10 Hz i zida prirodne frekvencije 20 Hz, po jednačini 2-44 sa konstantnom vrednosti  $\beta$  od 3%, dobiće se dve vrednosti  $\delta_{max}$ .

Pri prvom proračunu za skeletnu konstrukciju prirodne frekvencije 10 Hz, odnosno prirodne kružne frekvencije  $p = 2\pi(10)$ , dobija se vrednost maksimalnog relativnog pomeraja:

$$\delta_{max} = 0.25 \text{ mm } (0.01 \text{ in})$$

Maksimalni relativni pomeraj  $\delta_{max}$  se pretvara u pseudo brzinu  $PV$  na sledeći način:

$$PV_{10} = p \delta_{max} = 2\pi(10)(0.25) = 15.7 \text{ mm/s } (0.62 \text{ in/s}) \quad (2-45)$$

koja predstavlja tačku 1 na dijagramu prikazanom na slici 2-28a.

Pri istom proračunu za zid objekta prirodne frekvencije 20 Hz, odnosno prirodne kružne frekvencije  $p = 2\pi(20)$ , dobija se vrednost maksimalnog relativnog pomeraja:

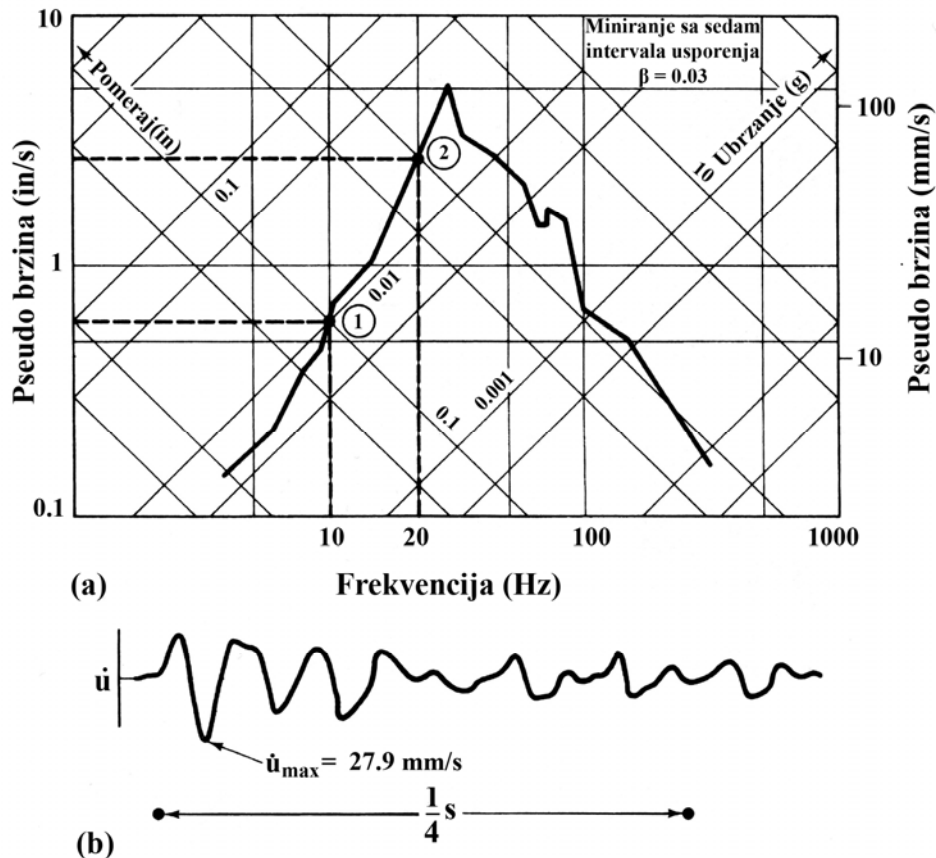
$$\delta_{\max} = 0.5 \text{ mm (0.02 in)}$$

odnosno pseudo brzine  $PV$ :

$$PV_{20} = 2\pi(20)(0.5) = 63.5 \text{ mm/s (2.5 in/s)} \quad (2-46)$$

koja predstavlja tačku 2 na dijagramu prikazanom na slici 2-28a.

Ako se potresi tla od miniranja kompjuterski obrade više puta za različite vrednosti  $f$  i konstantno  $\beta$ , dobijene vrednosti pseudo brzine obrazuju punu liniju na grafiku 2-28a.



Slika 2-28. Konstruisanje spektra odziva: (a) spektar odziva, (b) odgovarajući zapis brzine oscilovanja tla po vremenu [48]

Spektar odziva prikazan na slici 2-28 prikazuje se na četveroosnom tripartitnom dijagramu. Osa maksimalnog relativnog pomeraja  $\delta$  na dijagramu raste naviše ka gornjem levom uglu, čije vrednosti predstavljaju količnik pseudo brzine  $PV$  sa  $2\pi f$ . Osa

na dijagramu koja raste ka gornjem desnom uglu je osa pseudo ubrzanja (*en. Pseudo acceleration - PA*), čije se vrednosti dobijaju množenjem pseudo brzine sa  $2\pi f$ . *PA* i *PV* se zovu pseudo ubrzanje i pseudo brzina jer predstavljaju sinusoidalne aproksimacije. Međutim, ova pojednostavljena približno aproksimiraju apsolutno ubrzanje mase i relativnu brzinu sistema pri malim vrednostima  $\beta$  [67].

Tripartitni dijagram je izuzetno koristan za brzu interpretaciju kvazi pomeraja, jer grafički predstavlja matematičku interakciju frekvencije i maksimalne amplitude. Kod prvog sistema sa prirodnom frekvencijom 10 Hz, sistem reaguje na miniranje prema slici 2-28a, gde je maksimalno pseudo ubrzanje *PA* jednako:

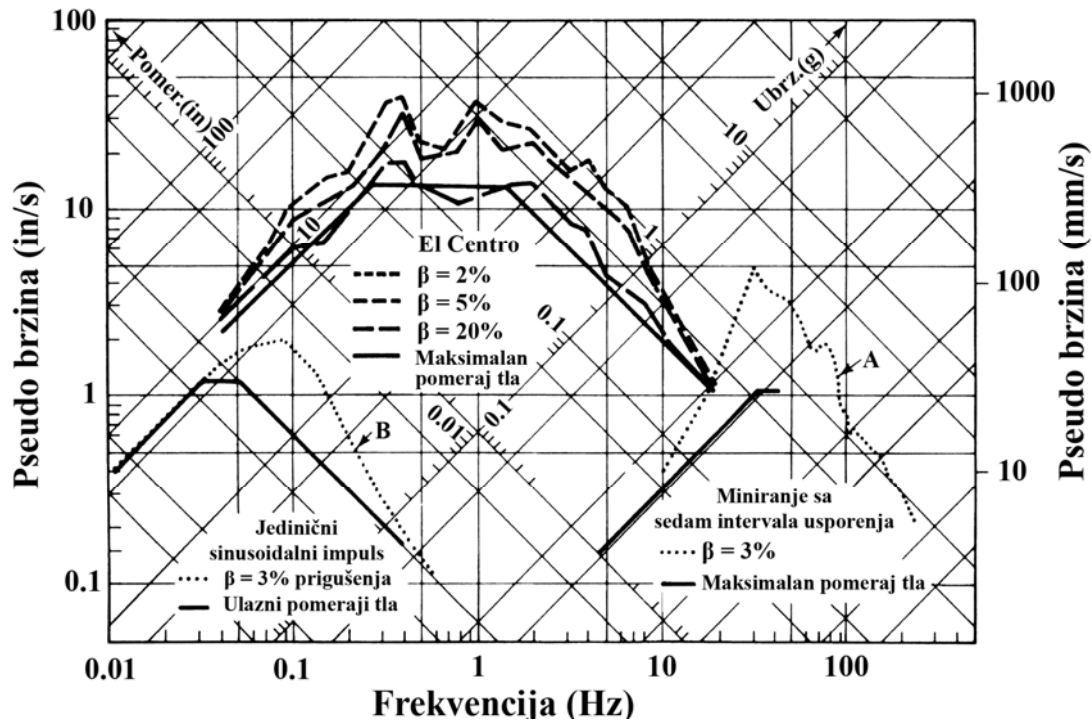
$$PA = p^2 \delta_{\max} = 4\pi^2 (100)(0.01) = 39.5 \text{ in/s}^2 = 0.1 \text{ g} \quad (2-47)$$

Ovi maksimumi mogu da se očitaju direktno sa tripartitnog dijagrama ako se nanesu samo  $\delta_{\max}$  i  $f$ .

### 2.7.3.2 Različiti oblici spektara odziva

Na slici 2-29 prikazane su vrednosti [48] pseudo brzine spektra odziva sa 3% kritičnog prigušenja, predstavljene krivom A na dijagramu, izračunate iz horizontalne komponente potresa tla od miniranja na površinskom kopu sa sedam intervala usporenja na rastojanju od 72 m. Interval između usporenja iznosio je 34 ms, sa količinom eksploziva po intervalu usporenja od 90 kg (200 lb). Kriva B na dijagramu predstavlja spektar odziva za prigušenje 3% izračunat iz poluimpulsa ubrzanja harmonijskog oscilovanja

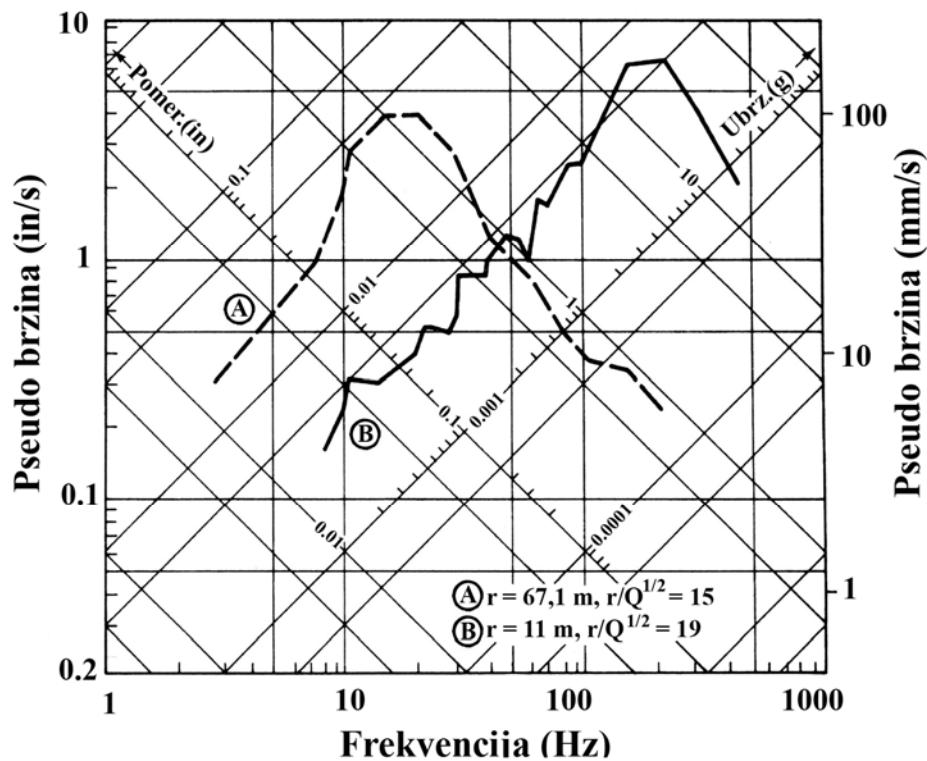
$$[f = 0.01 \text{ Hz}, \ddot{u} = 0.001 \text{ g}, \dot{u} = 30.4 \text{ mm/s} (1.5 \text{ in/s}) \text{ i } u = 15.2 \text{ cm} (6 \text{ in})].$$



Slika 2-29. Spektri odziva pri zemljotresu, jednom sinusoidalnom impulsu i miniranjuna površinskom kopu sa sedam intervala usporenja ( $\beta = 3\%$ ) [48]

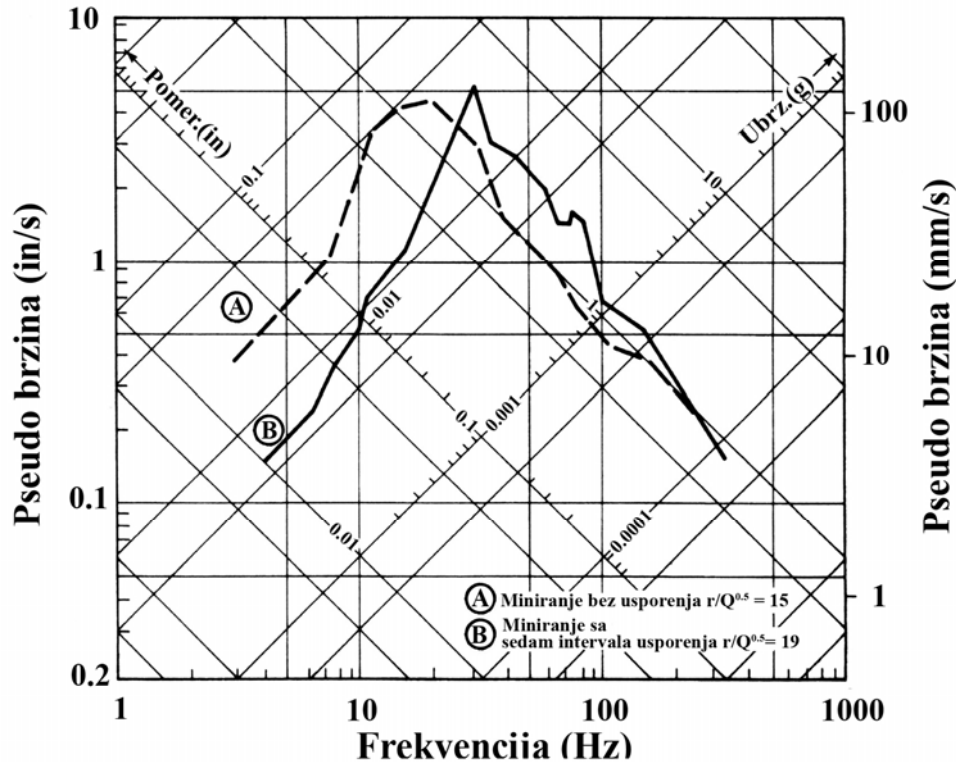
Najjači i najširi spektar odziva na dijagramu je dobijen od zemljotresa sa epicentrom u Imperial Valley 1940. godine, izmerenom u mestu El Centro u Kaliforniji. Poređenje spektara odziva od potresa nastalih usled zemljotresa, miniranja i harmonijskog impulsa, pokazuje da miniranje daje spektar odziva koji je sličniji harmonijskim vibracijama u odnosu na zemljotres, koji daje širok opseg frekvencija. Takođe, dominantna frekvencija potresa od miniranja je obično veća nego kod vibracija nastalih od zemljotresa.

Sa povećanjem rastojanja od mesta miniranja  $r$ , glavna frekvencija spektra odziva se smanjuje. Kao primer može se navesti dijagram na slici 2-30, izračunat na osnovu zabeleženih potresa od miniranja na različitim rastojanjima od minskog polja.



Slika 2-30. Promena spektra odziva sa promenom rastojanja od minskog polja ( $\beta = 3\%$ ) [48]

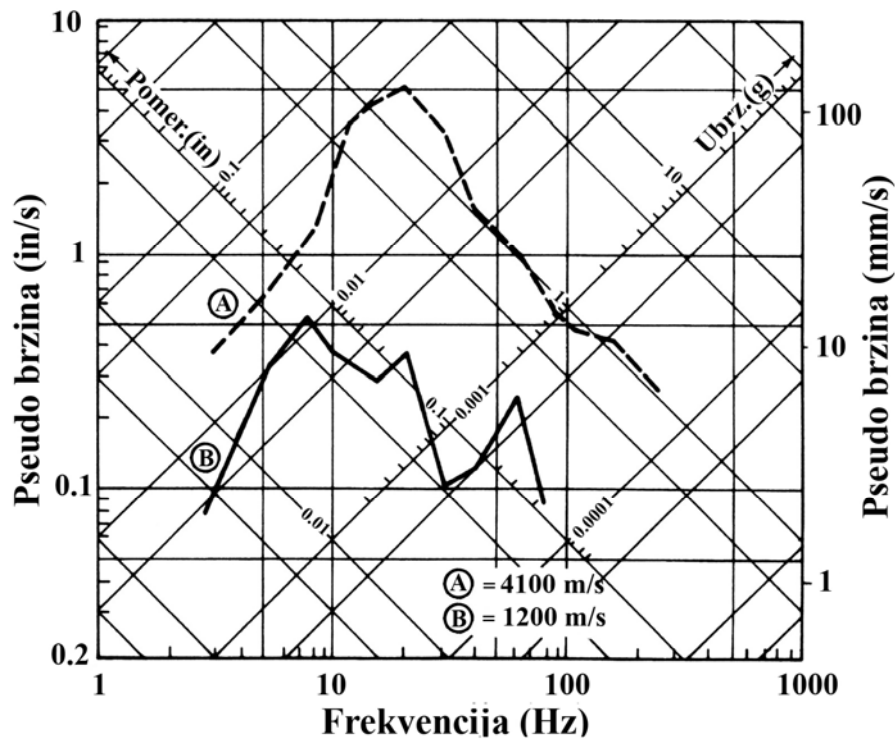
Ako su izmereni potresi tla nastali iniciranjem većeg broja punjenja na konstantnim intervalima usporenja, pikovi spektra odziva odgovaraju intervalima usporenja. Ovaj fazni pomeraj se može videti na slici 2-31, gde su spektri odziva izračunati za pomeraje merene na istom apsolutnom rastojanju od minskog polja i istim količinama eksploziva po intervalu usporenja. Jedina razlika je u tome što su kod jednog miniranja eksplozivna punjenja inicirana istovremeno, dok je kod drugog postojalo sedam intervala usporenja. Interval usporenja je bio 34 ms što odgovara frekvenciji  $1/0.034 = 29 \text{ Hz}$ . Na osnovu toga, pik spektra odziva je pomeren sa 20 Hz, koliko je iznosio kod istovremenog iniciranja, na 30 Hz kod iniciranja eksplozivnih punjenja sa više intervala usporenja.



Slika 2-31. Promena spektra odziva u odnosu na broj intervala usporenja pri iniciranju ( $\beta = 3\%$ ) [48]

Uticao različitih brzina prostiranja uzdužnih elastičnih talasa kroz tlo ( $c_u = 1200 \text{ m/s} = 4000 \text{ ft/s}$ ) i stene ( $c_u = 4100 \text{ m/s} = 13000 \text{ ft/s}$ ) na opseg glavnih frekvencija spektra odziva, može se posmatrati poredeći spektre odziva na slici 2-32. Spektri odziva su izračunati na osnovu izmerenih pomeraja tla zabeleženih pri miniranjima sa istovremenim iniciranjem minskih punjenja i sličnim redukovanim rastojanjima. Glavna frekvencija prostiranja talasa kroz stenu na rastojanjima većim od 30 m, kretala se u opsegu od 20 do 100 Hz, dok je pri prostiranju kroz tlo opseg bio od 6 do 50 Hz.





Slika 2-32. Promena spektra odziva u odnosu na brzinu prostiranja uzdužnih seizmičkih talasa ( $\beta=3\%$ ) [48]

### 2.7.3.3 Spektar odziva i važnost frekvencije

Na slici 2-29 se može videti da kod sistema sa prirodnom frekvencijom  $f$  ( $f = p/2\pi$ ) znatno većom od 10 Hz, krive odziva konvergiraju ka maksimalnom ubrzanju tla, dok za sisteme sa prirodnom frekvencijom znatno manjom od 0.1 Hz, krive odziva konvergiraju ka maksimalnom pomeraju tla, u odnosu na dominantne frekvencije oscilovanja tla  $f_d$  u slučaju El Centro zemljotresa. Slično opažanje se može primeniti kod sistema sa visokim i niskim vrednostima  $f/f_d$  pri proučavanju odziva na vibracije od miniranja. Konvergencija krivih odziva sistema se može objasniti razmatrajući kompoziciju sistema gde je odnos prirodne frekvencije sistema  $f$  i dominantne ulazne frekvencije potresa od miniranja  $f_d$ , izuzetno velik ili mali [49].

Relativno visoka ulazna frekvencija se pojavljuje kada je sopstvena frekvencija objekta  $f$  sa leve strane spektra odziva sistema na vibracije od miniranja (oblasti blizu minskog polja). Ova situacija može biti idealizovana kao slučaj kada se velika masa prikači na veoma elastičnu oprugu. Zbog male prirodne frekvencije sistema u odnosu na ulaznu frekvenciju vibracija (mala vrednost  $f/f_d$ ), masa sistema ne reaguje sve dok ne prođe

pik pomeraja. U tom momentu, relativni pomeraj između mase i tla postaje jednak maksimalnom pomeraju tla [49].

S druge strane spektra odgovora, situacija sa relativno niskom ulaznom frekvencijom (visoka vrednost  $f/f_d$ ), može se idealizovati kada se mala masa prikači na vrlo krutu oprugu. Pošto je vrlo mali pomeraj potreban opruzi da prenese dovoljno sile da preovlada silu reakcije mase usled inercije, pomeraj tla ne može pomeriti oprugu bez delovanja na masu. Tako se sa povećanjem odnosa  $f/f_d$ , relativni pomeraj približava nuli, masa se pomera zajedno sa vibracijom tla, a ubrzanje mase se izjednačava sa ubrzanjem tla. Na taj način se objašnjava da se relativni pomeraj istog objekta pri dejstvu različitih vibracija od miniranja menja sa promenom ulazne dominantne frekvencije vibracija tla  $f_d$ . Pošto relativni pomeraj uzrokuje pojavu pukotina na objektu, tako i ulazna dominantna frekvencija vibracija od miniranja utiče na mogućost pojave pukotina [49].

#### 2.7.3.4 Granice spektra odziva

Pri malim vrednostima  $f/f_d$  ( $0.04 < f < 0.4$  Hz u slučaju El Centro zemljotresa) [49] spektar odziva je približno paralelan maksimalnom ulaznom pomeraju tla. Ovaj deo spektra odziva se zove *granica pomeraja*, jer odziv može da bude aproksimiran kao faktor pojačanja  $A_\delta$ , pomnožen sa maksimalnim pomerajem tla,  $u$ . Pri malim vrednostima  $f/f_d$  ( $2 < f < 10$  Hz u slučaju El Centro zemljotresa) spektar odziva je približno paralelan maksimalnom ulaznom ubrzanju tla. Ovaj deo spektra odziva se zove *granica ubrzanja*, jer odziv može biti aproksimiran faktorom pojačanja  $A_a$ , pomnožen sa maksimalnim ubrzanjem tla,  $\ddot{u}$ . Unutrašnja oblast spektra se zove *granica brzine*, jer obuhvaćeni deo spektra odziva može biti aproksimiran faktorom pojačanja,  $A_v$ , pomnožen sa maksimalnom brzinom pomeraja tla,  $\dot{u}$  [49].

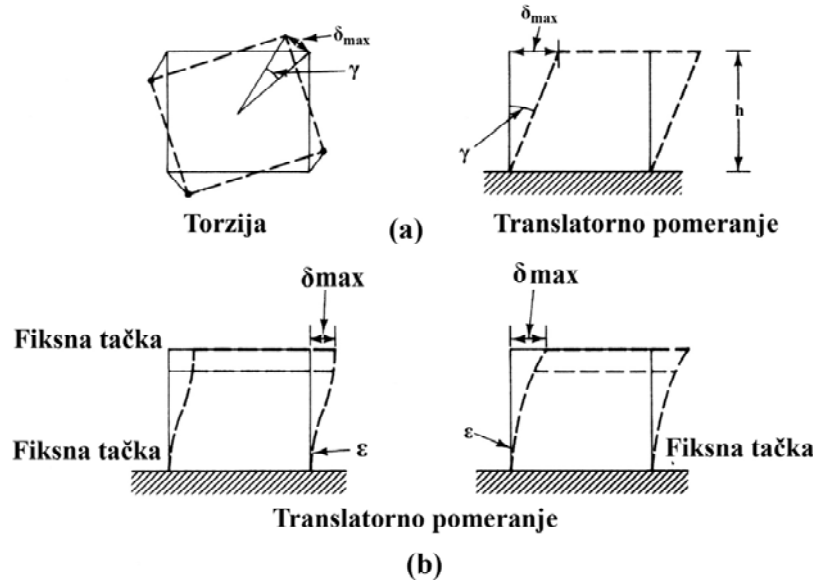
#### 2.7.3.5 Prevođenje pseudo brzine u naprezanje

Pošto je pojava pukotina na objektima uzrokovana relativnim pomerajem ili naprezanjem, neophodno je prevesti pseudo brzine spektra odziva u naprezanje. To se postiže na dva načina. Prvo se pseudo brzina mora prebaciti u relativni pomeraj, preko sledećeg obrasca [49]:

$$\delta_{\max} = \frac{PV}{2\pi f_p} \quad (2-48)$$

gde je:  $f_p$  - prigušena prirodna frekvencija objekta. Za tipične objekte  $f_p \approx f$ .

Kao što je prikazano na slici 2-33,  $\delta_{max}$  je razlika između maksimalnog pomeraja objekta i pomeraja tla, pa je nastalo naprezanje funkcija oblika deformacije povezane sa  $\delta_{max}$ . Smicanje i/ili translacija skeletne konstrukcije objekta, rezultuje naprezanje na smicanje  $\gamma$ , dok savijanje zidova koje prati smicanje, stvara naprezanje na zatezanje  $\varepsilon$  u zidu, slika 2-33a.



Slika 2-33. Naprezanje i oblici deformacije: a) smicanje skeletne konstrukcije objekta, b) savijanje zidova [48]

Naprezanje na smicanje predstavlja ugao promene koji za male uglove iznosi:

$$\gamma_{max} = \frac{\delta_{max}}{h} = \frac{\tau_{max}}{G} \quad (2-49)$$

gde je:  $\tau_{max}$  - maksimalni napon na smicanje,  $G$  - modul elastičnosti na smicanje, [68].

Naprezanje na savijanje [68] prikazano na slici 2-33b, može se izračunati prema teoriji grede kao:

$$\varepsilon_{max} = \frac{\sigma_{max}}{E} = \frac{M_{max} d}{EI} \quad (2-50)$$

gde je:  $M$  - maksimalni moment,  $d$  - rastojanje od neutralne ose do spoljne površine grede (debljina zida),  $E$  - Jungov modul elastičnosti,  $I$  - moment inercije grede.

Maksimalni moment [68] se može izračunati iz obrasca:

$$M_{max} = \frac{\delta_{max} 6EI}{l^2} \quad ili \quad \frac{\delta_{max} 3EI}{l^2} \quad (2-51)$$

gde je:  $l$  - dužina grede.

Naprezanje na savijanje zida se izračunava zamenom jednačine 2-51 u jednačinu 2-50:

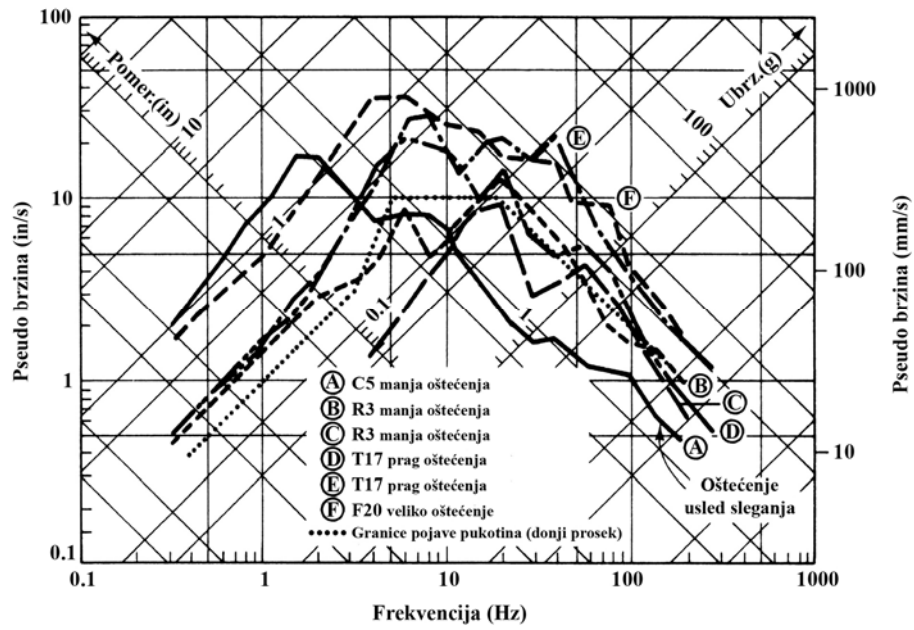
$$\varepsilon_{\max} = \frac{\delta_{\max} 6d}{l^2} \quad \text{ili} \quad \frac{\delta_{\max} 3d}{l^2} \quad (2-52)$$

### 2.7.3.6 Spektri odziva i mogućnost pojave pukotina

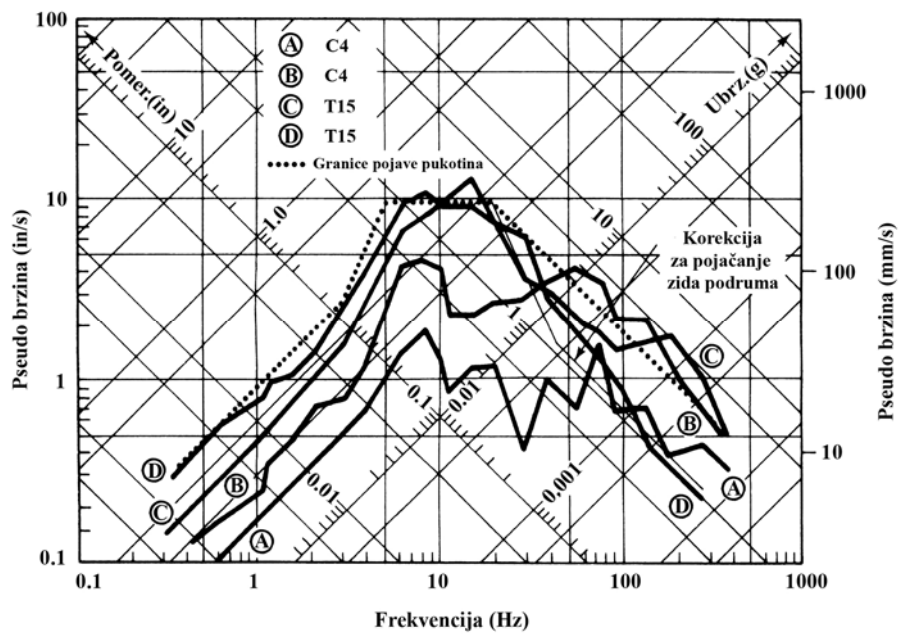
Ranija istraživanja pseudo brzina spektara odziva potresa od miniranja [6, 69] vršena su u cilju određivanja graničnih vrednosti pri kojima dolazi do pojave pukotina u objektima. Spektri odziva prikazani na slikama 2-34 i 2-35 izračunati su na osnovu velosigrama dobijenih istraživanjem Edwards and Northwood 1960. godine u Kanadi [70]. Sva miniranja sa minskim punjenjima iniciranim istovremeno u tlu prouzrokovala su pojavu pukotina u zidovima podruma. Nakon toga se spektri pseudo brzina počinju nazivati spektri odziva ili jednostavno spektri.

Pošto je ustanovljeno da je moguće odrediti granice pri kojima dolazi do pojave pukotina u zidovima temelja, spektri odziva su kasnije izračunati za mnogo novijih slučajeva miniranja od strane istraživača Američkog Biroa za rudarstvo [19], pri čemu je izvršeno i korigovanje graničnih sigurnosnih nivoa potresa od miniranja. Ispitivanja su pokazala da se granice spektara odziva potresa uzrokovanih miniranjem pri kojima dolazi do pojave pukotina razlikuju u odnosu na materijal zida, kao i da su različite pri istom materijalu zida.

Nedostatak metode spektra odziva da objedini sva ispitivanja u jednu graničnu vrednost potresa od miniranja ne iznenađuje. Sistem sa jednim stepenom slobode (SDF), koji je osnova spektra odziva, ne uključuje parametre koji se odnose na početna stanja naprezanja u materijalima zida. Tako SDF sistem ne uzima u obzir širok opseg odziva koji dovode do pojave pukotina u zidovima istog materijala. Prema tome, čak i kada se razmatraju spektri pri kojima dolazi do pojave pukotina u različitim materijalima (betonski blok, gipsana ploča i dr.) doći će do pojave širokog opsega spektara pri kojima je došlo do pojave pukotina. Ipak, spektri odziva su korisni za analizu potresa tla od miniranja jer pokazuju da potresi od miniranja sa značajno različitim dominantnim frekvencijama uzrokuju pojavu pukotina na istom objektu pri različitim brzinama oscilovanja tla.



Slika 2-34. Spektri odziva povezani sa pojavom pukotina na zidu podruma ( $\beta=3\%$ ) [6]



Slika 2-35. Spektri odziva pri kojima nije došlo do pojave pukotina ( $\beta=3\%$ ) [6]

## 2.8 EFEKTI TALASNE DUŽINE SEIZMIČKIH TALASA NA OŠTEĆENJE OBJEKATA

Talasna dužina [71] seizmičkog talasa određuje se prema sledećem obrascu:

$$\lambda = c / f, \text{ (m)} \quad (2-53)$$

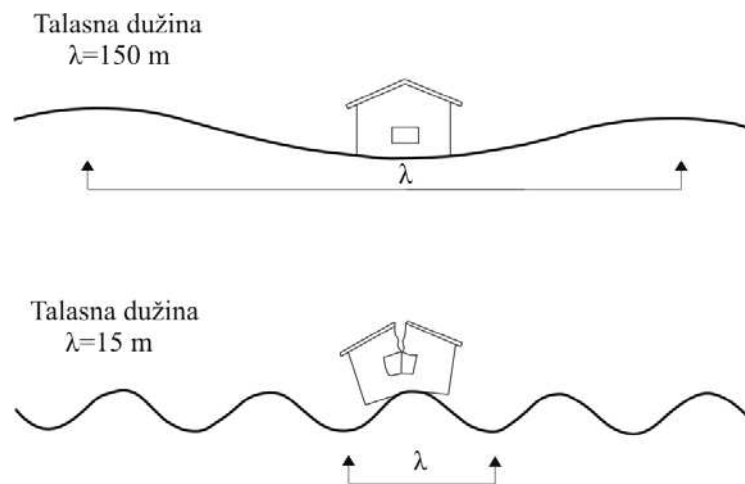
gde je:

$\lambda$  - talasna dužina kretanja fronta talasa, (m)

c - seizmička brzina fronta talasa kroz stenski materijal, (m/s)

f - frekvencija, (Hz).

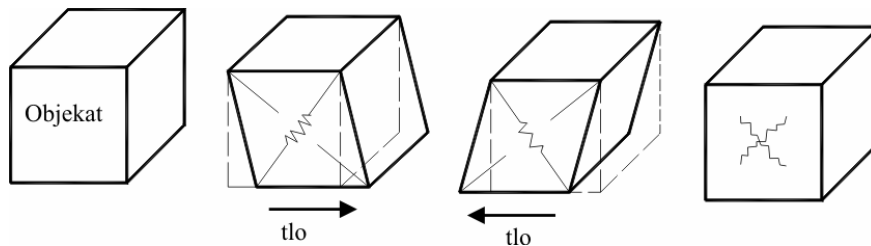
Ukoliko je talasna dužina seizmičkog talasa mnogo veća od dimenzija objekta, pri prolasku seizmičkog talasa ceo objekat se pomera sa talasom bez pojave oštećenja, bar pri umerenim brzinama oscilovanja tla. Ukoliko je talasna dužina talasa mnogo manja od dimenzija objekta, tada su pomeraji suviše mali da izazovu oštećenja osim u slučaju ekstremno visokih brzina oscilovanja tla. U slučaju poklapanja talasne dužine seizmičkog talasa i dimenzija objekta, objekat prati talasno kretanje tla, što može dovesti do oštećenja čak i pri umereno visokim brzinama oscilovanja tla [47].



Slika 2-36. Efekat talasne dužine na rizik od oštećenja [71]

## 2.9 POSLEDICE POTRESA NA OBJEKTE

Pukotine [42] koje nastaju na objektima usled dejstva zemljotresa manjeg intenziteta imaju karakterističan izgled pukotina nastalih od vibracija tzv. "X" pukotina. Izgled pukotine je rezultat činjenice da se osnova objekta pomera zajedno sa pomerajem tla, dok gornji delovi objekta zaostaju usled inercije. Objekat se deformiše iz pravilnog pravougaonog oblika u oblik paralelograma, sa jednom dijagonalom izduženom, a drugom sabijenom. Ako izduženje pređe čvrstoću materijala na istežanje, nastaje pukotina u materijalu. Sa promenom smera oscilovanja, ista pojava će se desiti suprotnoj dijagonali objekta, jer će tada biti izložena istežanju, a druga sabijanju. Izgled obe pukotine formira tzv. "X" pukotinu, slika 2-37.



Slika 2-37. Vibraciona ili „X“ pukotina [42]

Potresi od miniranja pri niskim frekvencijama i velikim amplitudama mogu takođe da uzrokuju velika naprezanja na objektima, kao i pojavu pukotina sličnog oblika. Međutim, pri utvrđivanju porekla pukotina na objektima, treba imati u vidu da „X“ pukotina ne mora biti posledica samo procesa miniranja, već treba razmotriti i druge uzroke.

## 2.10 STANDARDI KOJI REGULIŠU POTRESE OD MINIRANJA

Problem potresa [42] od miniranja istražuje se već dugi niz godina. Prvo značajno istraživanje je započeo Američki Biro za rudarstvo (USBM), 1930. godine i objavio ga 1942. godine u Biltenu 442 pod nazivom „Seizmički efekti miniranja na rudnicima građevinsko-tehničkog kamena“ [72].

Thoenen i Windes [72] su u okviru Američkog Biroa za rudarstvo (USBM) u Biltenu 442 definisali tri zone uticaja potresa od miniranja u zavisnosti od pokazatelja ubrzanja:

- sigurna zona – manje od 0.1 g
- zona upozorenja – između 0.1 i 1.0 g

- zona oštećenja – preko 1.0 g

Crandell F.J. [73] je u svom radu pod nazivom „Vibracije tla usled miniranja i njihov efekat na objekte“ u Časopisu „Journal of the Boston Society of Civil Engineers“, 1949. godine u zavisnosti od pokazatelja energije kojeg je predstavio kao odnos:

$$ER = (a / f)^2 \quad (2-54)$$

gde je:

a- ubrzanje, (ft/s)

f- frekvencija, (Hz)

i definisao tri zone uticaja potresa od miniranja:

- sigurna zona – ER manje od 3
- zona upozorenja – ER između 3 i 6
- zona oštećenja – ER preko 6.

Pokazatelj energije ima dimenziju brzine potresa tla i kada je  $ER=1$ , to je ekvivalent brzini potresa tla od 1.9 in/s (4.8 cm/s).

Langefors, Westerberg i Kihlstrom [74] su u svom radu „Vibracije tla pri miniranju“ Delovi I-III, u publikaciji „Water Power“, 1958. godine definisali nivoe oštećenja u zavisnosti od brzine oscilovanja tla:

- bez oštećenja – manje od 2.8 in/s (7.1 cm/s)
- fine prsline – 4.3 in/s (10.9 cm/s)
- pojava pukotina – 6.3 in/s (16.0 cm/s)
- ozbiljna oštećenja – 9.1 in/s (23.1 cm/s)

Edwards i Northwood [75] su u svojoj Studiji „Eksperimentalne studije uticaja miniranja na objekte“, National Research Council, Ottawa, Canada, 1959. godine definisali dve zone uticaja potresa od miniranja u zavisnosti od pokazatelja brzine oscilovanja tla:

- sigurna zona – manje od 2.0 in/s (5.1 cm/s)
- zona oštećenja – od 4.0 do 5.0 in/s (10.2 do 12.7 cm/s)

Nicholls, Johnson i Duvall [12] su u Biltenu 656, Američkog Biroa za rudarstvo, 1971. godine, „Vibracije od miniranja i njihov uticaj na objekte,“ definisali dve zone uticaja potresa od miniranja u zavisnosti od brzine potresa tla:



- sigurna zona – manje od 2.0 in/s (5.1 cm/s)
- zona oštećenja – preko 2.0 in/s (5.1 cm/s)

Bilten 656 predstavlja sintezu istraživanja u okviru Američkog Biroa za rudarstvo, kao i radova brojnih drugih istraživača. U navedenom Biltenu, brzina oscilovanja čestica tla se smatra najpogodnijom merom potencijalnog oštećenja. Kriterijum sigurnosti od vibracija naveden u Biltenu 656 glasi:

*Kriterijum sigurnosti od vibracija je zasnovan na merenjima pojedinačnih komponenti brzine oscilovanja čestica tla i ako bilo koja komponenta brzine pređe 2 in/s (5.1 cm/s), do oštećenja će verovatno doći.*

Prema Biltenu 656, štetu predstavlja pojavljivanje finih naprslina u malteru. Pošto je brzina oscilovanja čestica tla navedena kao mera oštećenja, postala je takođe i mera sigurnosti. Ako će se oštećenje verovatno pojaviti iznad 2 in/s (5.1 cm/s), onda je ispod te vrednosti sigurno, pa je to razlog što je brzina oscilovanja čestica tla od 2 in/s (5.1 cm/s), postala granica sigurnosti. Mnogi propisi su bili zasnovani na toj vrednosti.

Dodatni nivoi vibracija zasnovani na rezultatima drugih istraživanja izneti u Biltenu 656 su:

- Prag oštećenja (4 in/s = 10.2 cm/s):
  - otvaranje starih pukotina,
  - formiranje novih pukotina,
  - pomeranje slobodnih predmeta.
- Manja oštećenja (5.4 in/s = 13.7 cm/s):
  - otpadanje maltera,
  - slomljeni prozori,
  - fine naprslinae u zidovima,
  - nema slabljenja konstrukcija objekata.
- Velika šteta (7.6 in/s = 19.3 cm/s):
  - velike naprslinae u zidovima,
  - pomeranje sprege temelj - noseći zidovi,
  - ozbiljna slabljenja u konstrukciji objekata.

### 2.10.1 Noviji kriterijumi oštećenja

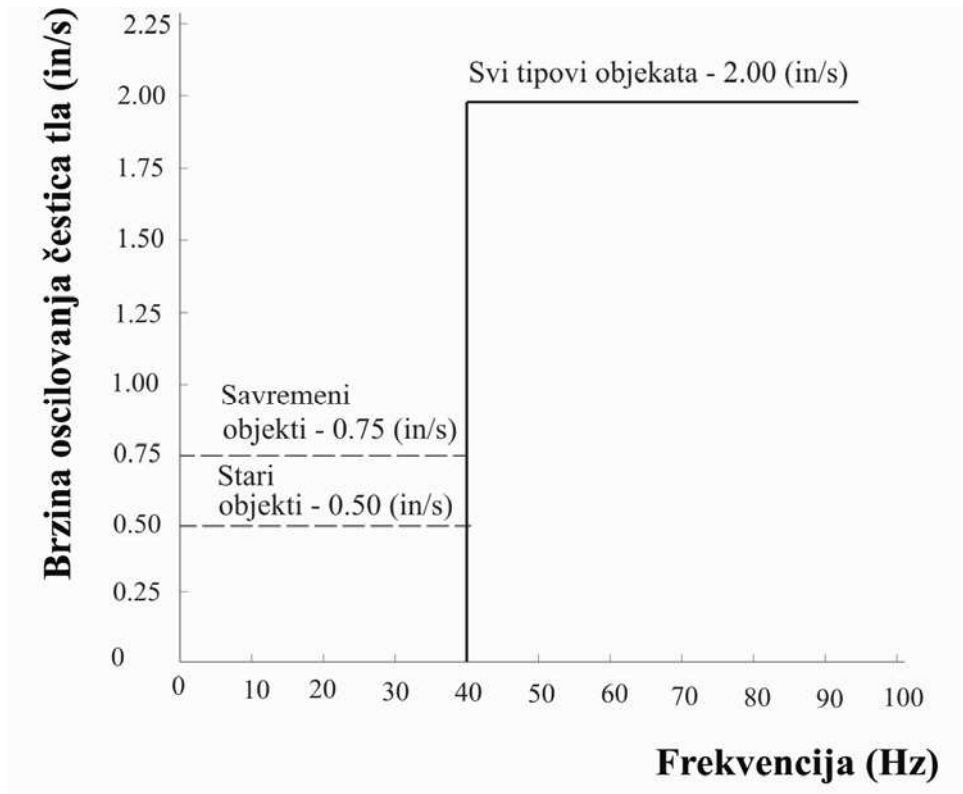
U Izveštaju RI 8507 [19] Američkog Biroa za rudarstvo (USBM) 1980. godine, izneta su najnovija istraživanja o miniranju na površinskim kopovima. Utvrđeno je da objekti imaju frekvencije sopstvenih oscilacija koje se obično kreću u rasponu 5-20 Hz. Frekvencije vibracija uzrokovanih miniranjem u ovom opsegu mogu dovesti do odziva objekata usled rezonance i do povećanja pomeraja i naprezanja, što je predstavljalo veliki problem.

Frekvencija je postala važan faktor u proceni mogućeg oštećenja od vibracija. Pre ovoga, granica sigurnosti je bila brzina oscilovanja čestica tla nezavisno od frekvencije. Pored toga, Američki Biro za rudarstvo je izvršio obimna merenja unutar objekata što se pokazalo kao dobar pristup, pošto tu postoji problem pojave pukotina na malteru. Ranija istraživanja vibracija objekata dala su dosta oskudne rezultate, pošto je akcenat stavljen na merenja potresa tla daleko od objekata.

Prag oštećenja koji se navodi u Izveštaju RI 8507 [19], definisan je kao “kozmetičko oštećenje najpovršnijeg tipa unutrašnjih naprslina, koje se javlja u svim objektima nezavisno od miniranja”. Sigurnosni nivo vibracija je definisan kao nivo pri kome ne nastaju unutrašnje naprsline ili druga oštećenja na objektima. Sigurnosni nivoi vibracija navedeni u RI 8507 dati su u tabeli 2-5 i slici 2-38. Ovi kriterijumi su zasnovani na 5% verovatnoće oštećenja.

*Tabela 2-5. Sigurnosni nivoi vibracija prema RI 8507 [19]*

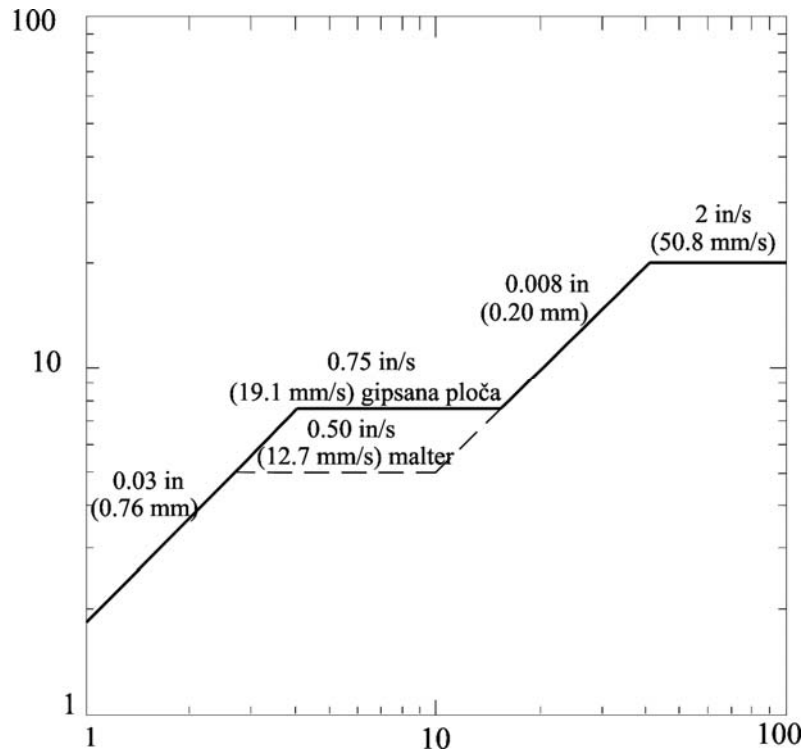
Vrsta objekata	f < 40 Hz	f > 40 Hz
Noviji objekti	0.75 in/s (1.9cm/s)	Svi tipovi objekata 2 in/s (5.1 cm/s)
Stariji objekti	0.50 in/s (1.27cm/s)	



Slika 2-38. Sigurni nivoi vibracija prema RI 8507 [19]

### 2.10.2 Alternativni kriterijumi nivoa vibracija od miniranja

Kao dodatak navedenim standardima, u Izveštaju RI 8507, predstavljeni su i "Alternativni kriterijumi nivoa vibracija od miniranja", koji koriste pomeraj i brzinu oscilovanja čestica tla u odnosu na nekoliko specifičnih frekventnih opsega, prikazanih na grafikonu (slika 2-39). Ovi kriterijumi su podstakli razvoj instrumenata za istovremeno merenje pomeraja, brzine, ubrzanja, frekvencije i rezultujuće vrednosti sve tri komponente brzine oscilovanja, što do tada nije moglo.



Slika 2-39. Alternativni kriterijumi nivoa vibracija od miniranja [19]

U Izveštaju RI 8896 [76] „Efekti ponovnih miniranja na objekat od drvene skeletne konstrukcije“ Američkog Biroa za rudarstvo objavljenom 1984. godine, navodi se da se pojavljivanje kozmetičkih pukotina povećava kada brzina oscilovanja čestica tla prelazi 1.0 in/s (2.5 cm/s). Zapaženo je da kućne aktivnosti ljudi unutar objekta, promene temperature i vlažnosti uzrokuju naprezanja, koja su jednaka brzini oscilovanja čestica tla od 1.2 in/s (3.0 cm/s) do 3.0 in/s (7.6 cm/s).

### 2.10.3 Propisi Američkog Odeljenja za površinsku eksploataciju

Odeljenje za površinsku eksploataciju (*en. Office of Surface Mining - OSM*) [19], je modifikovalo predložene kriterijume Američkog Biroa za rudarstvo, za primenu na površinskim kopovima i predložilo sledeće propise date u Tabeli 2-6:

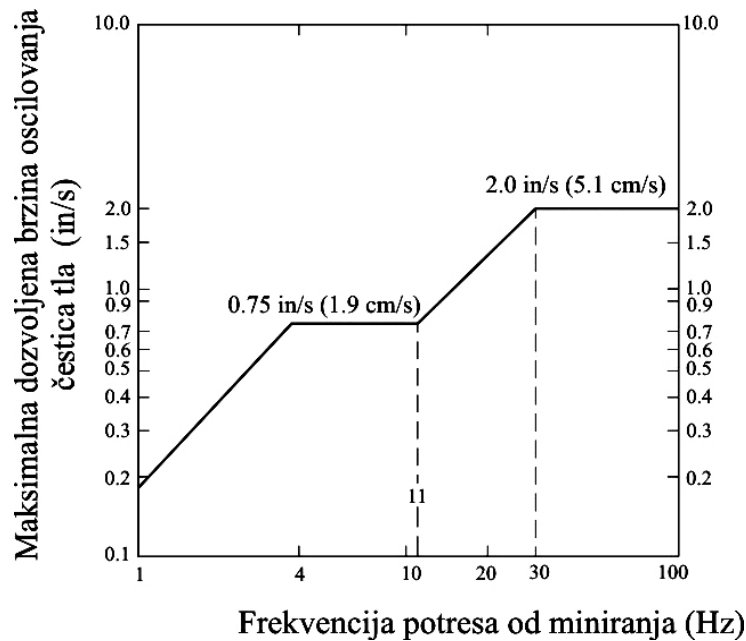
Tabela 2-6. Dozvoljeni nivoi potresa tla prema Američkom Odeljenju za površinsku eksploataciju (OSM)

Rastojanje od mesta miniranja		Maksimalna dozvoljena brzina oscilovanja čestica tla		Redukovano rastojanje koje treba da se usvoji pri izvođenju miniranja bez merenja vibracija	
(ft)	(m)	(in/s)	(cm/s)	$R_{(ft/\sqrt{lb})}$	$R_{(m/\sqrt{kg})}$
0 - 300	0 - 91.4	1.25	3.2	50	22.6
301 - 5000	91.7 - 1524	1.00	2.5	55	24.9
> 5000	> 1524	0.75	1.9	65	29.4

Kao što se može videti u Tabeli 2-6, veća vrednost brzine oscilovanja čestica tla je dozvoljena na manjim rastojanjima u odnosu na veća. Razlozi su sledeći: prvo vibracije visoke frekvencije prigušuju se brže sa povećanjem restojanja nego nisko frekventne vibracije, pošto nisko frekventne vibracije duže traju, drugo sa nisko frekventnim vibracijama objekti mogu ući u rezonancu.

Na manjim rastojanjima preovlađuju vibracije visokih frekvencija. Sa povećanjem rastojanja, visoko frekventne vibracije se prigušuju ili nestaju, dok nisko frekventne vibracije preovlađuju. Objekti imaju karakteristike odziva na vibracije nižih frekvencija. Ako se poklope sopstvena frekvencija objekta i frekvencija potresa tla, dolazi do rezonance i do oštećenja objekta usled velike brzine oscilovanja čestica tla. Zato je na većim rastojanjima dozvoljena niža brzina oscilovanja čestica tla od 0.75 in/s (1.9 cm/s) i veće redukovano rastojanje  $R=65$  (Američki sistem jedinica odnosno 29.4 za SI sistem), dok je na manjim rastojanjima dozvoljena veća brzine oscilovanja čestica tla od 1.25 in/s (3.2 cm/s) i manje redukovano rastojanje  $R=50$  (Američki sistem jedinica odnosno 22.6 za SI sistem).

Na slici 2-40 prikazani su alternativni kriterijumi nivoa vibracija od miniranja prema Američkom Odeljenju za površinsku eksploataciju (OSM). Kako se može videti sa slike 2-40, opseg dozvoljene brzine oscilovanja od 2 in/s (5.1 cm/s) počinje od frekvencije 30 Hz, dok u Izveštaju RI 8507 Američkog Biroa za rudarstvo počinje od 40 Hz.



Slika 2-40. Alternativni kriterijumi nivoa vibracija od miniranja Američkog Odeljenja za površinsku eksploataciju (OSM) [19]

Potresi tla na frekvencijama od 2 do 10 Hz su opasni za objekte jer se najveći deo energije prenosi na objekte. Ovo je posledica vlastitih (rezonantnih) slobodnih oscilacija objekata koje su unutar opsega od 10 Hz, [51]

#### 2.10.4 Ruski standard

Ruski standard klasifikuje objekte po značaju (važnosti) u četiri klase kako je prikazano u Tabeli 2-7 [51]. Objekte deli u 6 grupa prema konstruktivnim karakteristikama i za njih propisuje dozvoljene brzine oscilovanja, prema tabeli 2-8.

Tabela 2-7. Klasifikacija objekata po značaju

Grupa	Opis
I - klasa	Objekti i građevine od opšte društvenog značaja, istorijski i arhitektonski spomenici, objekti u čijoj blizini je po pravilu miniranje zabranjeno
II - klasa	Objekti industrijske namene velikih razmera, sa vekom trajanja 20 - 30 god, kao cevovodi, izvozna okna, bazeni, objekti i građevine stambene namene sa velikim brojem ljudi, javne zgrade, domovi kulture, pozorišta...
III - klasa	Objekti industrijske i službene namene manjih razmera po prostoru ne više po tri sprata, građevine stambene namene sa manjim brojem ljudi.
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.

Tabela 2-8. Dozvoljene brzine oscilacija po klasama objekata

Redni broj	Karakteristike objekta	Dozvoljene brzine oscilovanja (mm/s)		
		II	III	IV
1.	Građevine i objekti industrijske namene i stambeni objekti sa armirano - betonskom ili metalnom skeletom konstrukcijom obloženi pločama ili ispunjeni lakim materijalom, antiseizmički ojačani. Kvalitet izgradnje dobar, bez odstupanja od projektnih rešenja. Deformacije u konstruktivnim elementima.	50	70	100
2.	Građevine i objekti sa armirano - betonskom ili metalnom skeletom konstrukcijom, sa lakom ispunom bez antiseizmičkih ojačanja. Deformacije u konstruktivnim elementima.	20	50	70
3.	Građevine gde je materijal za ispunu cigla ili kamen. Novi ili stari objekti sa zidovima od cigli ili blokova bez seizmičkih ojačanja. Kvalitet izrade dobar, bez oštećenja zidova.	15	30	50
4.	Građevine koje imaju pukotine u materijalu ispune i prsline u skeletnoj konstrukciji. Objekti od cigle i blokova sa naprslinama u nosećim zidovima u obliku kosih pukotina, pukotina u uglovima itd.	5	10	20
5.	Građevine koje imaju pukotine u skeletu i narušene veze između pojedinih elemenata. Objekti od cigle i blokova sa oštećenjima u nosećim zidovima u obliku kosih pukotina, pukotina u uglovima itd.	5	10	20
6.	Građevine sa oštećenim armirano - betonskom skeletnom konstrukcijom, korozijom armature, krupne pukotine u materijalu ispune. Objekti sa znatnim pukotinama u nosećim zidovima i narušenim vezama između spoljašnjih i unutrašnjih zidova. Građevine od panela.	3	5	10

### 2.10.5 Kriterijum Akademije Nauka Rusije

Seizmička skala Akademije nauka Rusije [51], koja se koristi za ocenu potresa izazvanih miniranjem prikazana je u tabeli 2-9.

Tabela 2-9. Kriterijumi prema Akademiji Nauka Rusije

Brzina oscilovanja V (cm/s)	Stepen seizmičkog intenziteta	O P I S D E J S T V A
do 0.20	I	Dejstvo se oseća samo instrumentalno
0.2 – 0.4	II	Dejstvo se samo u nekim slučajevima oseća kada je potpuna tišina
0.4 – 0.8	III	Dejstvo oseća veoma mali broj ljudi ili samo oni koji ga očekuju
0.8 – 1.5	IV	Dejstvo oseća mnogi ljudi, čuje se zveket prozorskih stakala
1.5 – 3.0	V	Osipanje maltera, oštećenja na objektima u slabom stanju
3.0 – 6.0	VI	Pojava finih prslina u malteru, oštećenje na objektima koje već imaju razvijene deformacije
6.0 – 12.0	VII	Oštećenje na objektima u dobrom stanju, pukotine u malteru, delovi maltera opadaju fine prsline u zidovima, pukotine na zidanim pećima, rušenje dimnjaka
12.0 – 24.0	VIII	Znatne deformacije na građevinama, pukotine u nosećoj konstrukciji i zidovima, veće pukotine u pregradnim zidovima, padanje fabričkih dimnjaka, padanje plafona
24.0 – 48.0	IX	Rušenje građevina, veće pukotine u zidovima, raslojavanje zidova, obrušavanje nekih delova zidova
veća od 48.0	X - XII	Veća razaranja, stropošavanje čitavih konstrukcija itd.

### 2.10.6 Nemački standard DIN 4150 – 3 iz 1999.god. [61]

Zahvaljujući mnogobrojnim merenjima brzine oscilovanja na temeljima objekata, dobijene su iskustvene vrednosti, koje služe kao osnova za procenu kratkotrajnih vibracija na objekte. Za ovakvu procenu uzima se najveća vrednost (maksimalna vrednost)  $|V|_{i,max}$  od tri pojedinačne komponente  $i = x,y,z$  brzine oscilovanja na temelju ( $V_i$ ).

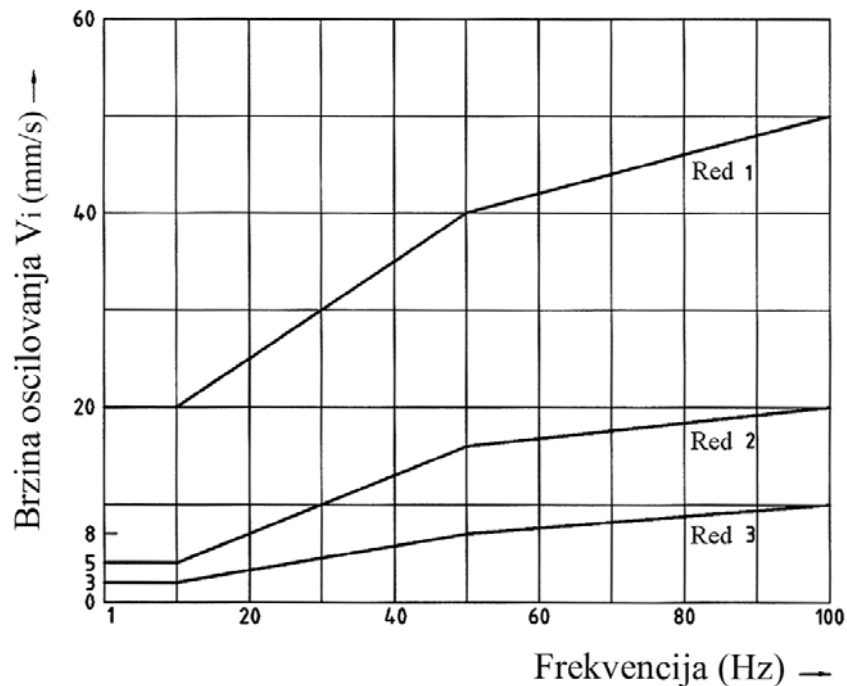
Od izuzetnog značaja za procenu su i oscilacije u području najviše tavanice koja se oslanja na spoljne zidove. Za osnovu se uzima najveća vrednost horizontalnih pojedinačnih komponenti. Merenjem oscilacija na ovom mestu dobija se reakcija građevine na pomeraj temelja.



U tabeli 2-10 i slici 2-41, date su granične vrednosti za  $V_i$ , na temelju i na tavanici za različite tipove objekata. Ukoliko nisu prekoračene granične vrednosti prema tabeli 2-10, prema dosadašnjem iskustvu, nema nastanka štete u smislu smanjenja upotrebne vrednosti usled delovanja vibracija. Ukoliko postoje oštećenja, uzroke treba tražiti na drugom mestu. Ukoliko su prekoračene granične vrednosti prema tabeli 2-10, ne sledi automatski i nastanak štete. Kod većih prekoračenja neophodno je dalje detaljnije istraživanje.

Tabela 2-10. Granične vrednosti za brzinu oscilovanja  $V_i$  za procenu dejstva kratkotrajnih vibracija na objekte [61]

Red	Tip objekta	Granične vrednosti brzine oscilovanja $V_i$ (mm/s)			
		Temelj Frekvencije			Ravan tavanice
		1-10 (Hz)	10-50 (Hz)	50-100 (Hz)*	Sve frekvencije
1	Zanatski, industrijski i objekti slične konstrukcije	20	20 - 40	40 - 50	40
2	Stambeni objekti i njima po konstrukciji ili po nameni slične građevine	5	5 - 15	15 - 20	15
3	Objekti koji zbog svoje posebne osetljivosti na vibracije ne potpadaju pod kategorije red 1 ili 2 (npr. spomenici pod zaštitom)	3	3 - 8	8 - 10	8
* Kod frekvencija iznad 100 Hz uzima se granična vrednosti za najmanje 100 Hz					



Slika 2-41. Grafički prikaz graničnih vrednosti iz tabele 2-10 [61]

Pri klasifikaciji frekventnih opsega datih u tabeli 2-10, mora se uzeti u obzir svaka frakvencija koja se pojavljuje u području merodavnih vrednosti brzine oscilovanja, kako bi se u procenjivanju sa naročitom pažnjom uzele u obzir niske frekvencije.

### 2.10.7 Standard u Velikoj Britaniji

Britanski standard [77] BS 7385: Deo 2: iz 1993. godine daje smernice o nivoima vibracija iznad kojih bi objekti mogli biti oštećeni. Razmatra se samo direktni efekat vibracija na objekte, pošto se drugi mahanizmi razlikuju. Prema standardu BS 7385, oštećenje se klasifikuje kao kozmetičko (pukotine debljine ljudske kose), malo oštećenje (formiranje velikih pukotina) ili veliko oštećenje (oštećenje strukturnih elemenata objekta).

Vrednosti navedene u standardu su povezane samo sa pragom kozmetičkog oštećenja, obično u materijalima obloge zida ili plafona. Granice prelaznih vibracija iznad kojih se može pojaviti kozmetičko oštećenje, predstavljene su u tabeli 2-11. Nivoi vibracija su navedeni u smislu maksimalne brzine oscilovanja tla u opsegu frekvencija od 4-15 Hz i preko 15 Hz, izmerene na osnovi objekta po bilo kojoj od upravnih osa.

Tabela 2-11. Nivoi prelaznih vibracija iznad kojih se mogu pojaviti kozmetička oštećenja objekata prema Britanskom standardu 7385: Deo 2-1993 [77]

Tip objekta	Maksimalna komponenta brzine oscilovanja tla (mm/s)	
	4-15 Hz	preko 15 Hz
Objekti od armiranog betona ili objekti sa skeletnom konstrukcijom. Industrijski i teški komercijalni objekti.	50 mm/s na 4 Hz i preko	
Nearmirani objekti ili objekti sa lakom skeletnom konstrukcijom. Stambeni ili lakši komercijalni objekti.	15 mm/s na 4 Hz do 20 mm/s na 15 Hz	20 mm/s na 15 Hz do 50 mm/s na 40 Hz i preko

### 2.10.8 Australijski standard

Australijski standard [78] klasifikuje objekte u tri kategorije. Maksimalno dozvoljne brzine oscilovanja tla, prema ovom standardu date su u tabeli 2-12.

Tabela 2-12. Granične vrednosti brzine oscilovanja prema Australijskom standardu [78]

Klasa objekta		Maksimalno dozvoljena brzina oscilovanja $V_{max}$ (mm/s)
1.	Stambeni objekti sa manje spratova, komercijalni objekti koji nisu uključeni u klasu 2	10
2.	Komercijalni i industrijski objekti ili ojačane armirano betonske ili čelične konstrukcije	25
3.	Višespratni objekti, bolnice, brane ili objekti od istorijskog značaja gde ne postoji naznačena granična brzina	5

## 2.11 VIŠESTRUKO POREKLO PUKOTINA

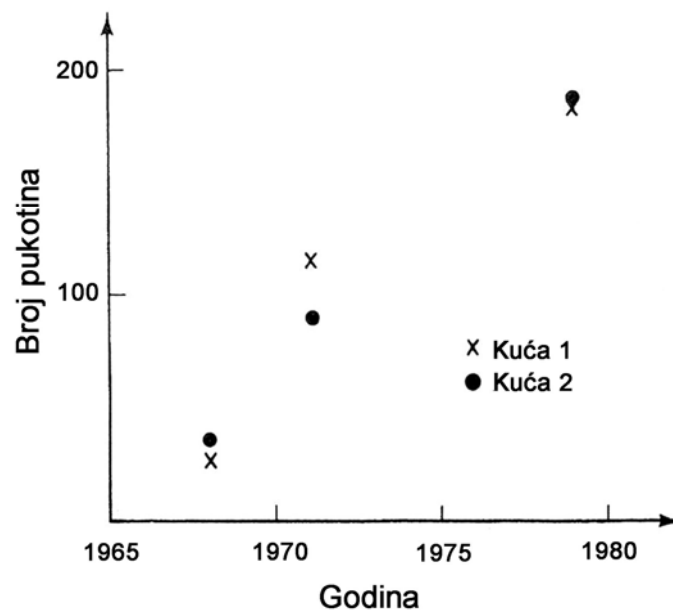
Više autora [72, 79, 80] predstavilo je istraživanja o višestrukome poreklu pukotina. U glavnom [48], pukotine nastaju usled:

- različitog toplotnog širenja,
- strukturnog preopterećenja,
- hemijskih promena u malteru, cigli, gipsanim malteru i finom malteru,
- skupljanja i širenja drveta,
- zamora i starenja obloge zida,
- različitog sleganja temelja.

Vremenom, svi gore navedeni uzroci verovatno utiču na pojavu pukotina u zidovima, bilo da su strukture podložne neuobičajeno velikim vibracijama ili ne.

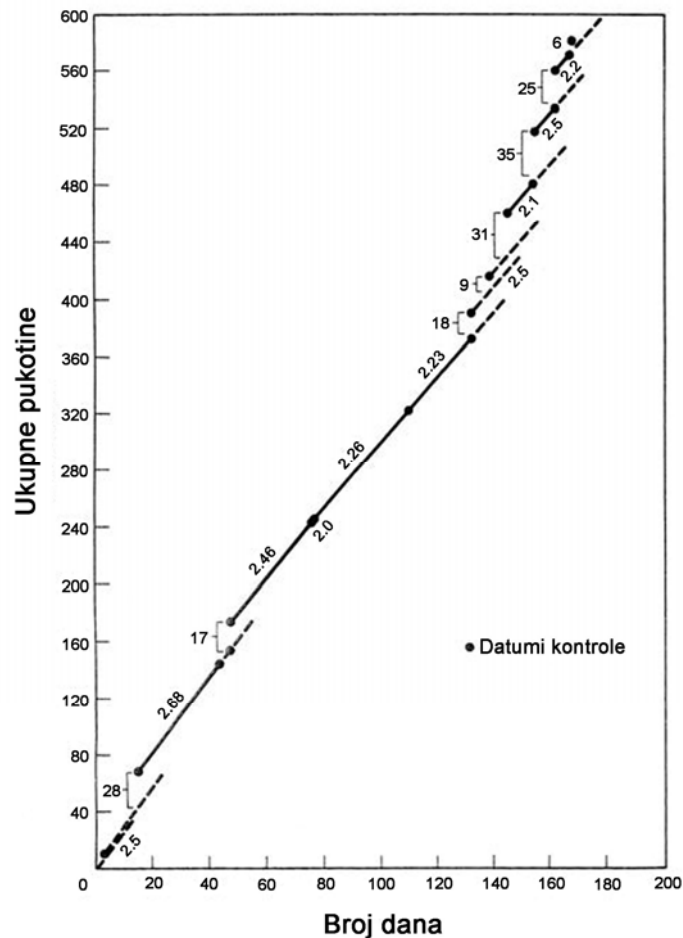
Postoje tri važne pojave povezane sa gore navedenim uzrocima koje komplikuju problem. Prva, objekti se šire i skupljaju posebno duž predisponiranih postojećih oslabljenja (pukotina). Sezonsko širenje i skupljanje duž tih pukotina ponovo će dovesti do toga da se na popravljenim i prefarbanim površinama pojave iste pukotine za nekoliko godina. Druga, deformacija objekta koja uzrokuje pojavu pukotina takođe stvara koncentraciju napona, koja može smanjiti otpor obloge kuće prema pucanju pod dejstvom vibracija. Treća, možda i najvažnija, je da se pukotine na objektima pojavljuju prirodno usled starenja objekta. Iz tog razloga je važno da se pre svakog događaja pri kojem se prate uzroci pojave pukotina, izvrši prethodna inspekcija objekta, gde će biti zabeleženo i dokumentovano početno stanje objekta.

Studija Holmberg et al. [81] razvila je podatke za dokumentovanje prirodne brzine pojave pukotina bez pobuđivanja vibracijama. Pukotine su praćene na dva stambena objekta, tri puta između 1968 i 1980. Broj zapaženih pukotina predstavljen je na dijagramu u funkciji vremena, prikazanom na slici 2-42. Na dijagramu se može zapaziti da se približno 12 do 13 novih pukotina pojavilo godišnje na ovim objektima. Očigledno, brzina pojave pukotina zavisi od tipa objekta i menja se od objekta do objekta.



Slika 2-42. Pojave pukotine sa starenjem objekta [81]

Istraživanje Wall-a 1966. godine [82] na 43 jednospratna objekta izgrađena od betonskih blokova definisalo je njihovu prirodnu brzinu pojave pukotina, prikazanu na slici 2-43. na pustinjskoj klimi sa dnevnim temperaturnim razlikama većim od 19 °C. Zabeležene su nove, umerene pukotine (definisane kao lako raspoznatljive ili povezane sa ljuštenjem ili raspadanjem) i jasni produžeci starih pukotina. Skupljene pukotine su ignorisane. Zapažen je prosek od 2.5 nove pukotine po danu za ukupno 43 objekta. Tako je prosečan objekat u ovoj grupi pretrpeo približno 1.7 novih pukotina svakog meseca. Ova brzina pojave pukotina je slična onoj od 1.4 koje je zapazio Holmberg, [48].



Slika 2-43. Brzina pojave pukotina kod zidanih objekata u Mercury, Nevada.

Tačke predstavljaju datume kontrole [82]

## 2.12 UZROCI POJAVE PUKOTINA NA OBJEKTIMA KOJI NISU POVEZANI SA POTRESIMA OD MINIRANJA

Pojava pukotina [42] na zidovima i plafonima objekata je uobičajena pojava i u slučajevima kada nema miniranja u neposrednom okruženju. Postoje mnogi uzroci koji dovode do pojave pukotina počev od loše gradnje objekta do različitih naprezanja iz okruženja usled temperaturnih oscilacija, promene vlažnosti, dejstva vetra i dr. Neki od uzroka pojave pukotina na objektima koji nisu povezani sa potresima od miniranja su:

- gradnja objekta na nekonsolidovanom tlu,
- temelj nije na dubini većoj od nivoa mržnjenja tla,
- loše dimenzionisanje širine temelja u odnosu na opterećenje,
- stubovi podruma nemaju posebne potpore,

- nedovoljno cementa u betonu,
- prljav pesak ili šljunak u betonu,
- grede i nosači su nezaštićeni od truljenja usled vlage,
- postavljanje podnih greda jednim krajem na zidanu a drugim na drvenu konstrukciju,
- drvene grede za potporu zidanog dela postavljene iznad otvora konstrukcije,
- mržnjenje maltera, gipsanog maltera ili betona pre kompletnog vezivanja,
- drenaža vode sa krova nije odvedena dalje od temelja,
- podne grede nisu spojene,
- potporni stubovi premali,
- nosači previše laki,
- izostavljena podna podloga,
- drveni zidovi konstrukcije nisu uvezani radi ujednačavanja naprezanja
- loš materijal korišćen u malteru,
- tanak sloja maltera,
- letve postavljene preblizu,
- nedostatak metalnih ojačanja maltera u uglovima
- nedostatak metalnih ojačanja na spojevima drvene i zidane konstrukcije
- malter nanet direktno na dimnjak
- malter nanet na letve koje su previše suve,
- previše cementa u malteru,
- malter nije kvašen do kraja vezivanja,
- drenaža podterena nije izvedena dalje od zidova
- podne grede previše razmaknute
- drvene grede previše razmaknute između stubova
- nisu upotrebljene duple grede ispod delova bez potpore,
- premalo upotrebljenih eksera,
- kose grede previše lake i previše razmaknute.

### **2.13 EFEKTI POTRESA PRI KOJIMA NE NASTAJU OŠTEĆENJA**

Efekti potresa [42] koji ne uzrokuju oštećenja na objektima, ali su uznemirujući i alarmantni za osobe koje ih osećaju i čuju su:

- vibriranje zidova i podova i stvaranje buke,
- zvečanje cevi i instalacija,
- zvečanje labavih objekata, tanjira i sl.,
- klizanje objekata po stolu i policama i pad usled ponovnih podrhtavanja,
- ljuljanje lusteri i visećih predmeta,
- talasanje i oscilacija vode,
- pojačana buka unutar objekta u odnosu na spoljnu buku,
- uznemirujuće vibracije prisutnih osoba unutar objekta.

## **2.14 MERE SMANJENJA SEIZMIČKIH EFEKATA MINIRANJA NA POVRŠINSKIM KOPOVIMA**

U cilju smanjenja seizmičkih efekata miniranja na površinskim kopovima, mogu se preduzeti sledeće mere:

### **2.14.1 Smanjenje količine eksploziva po intervalu usporenja**

Smanjenje seizmičkih efekata miniranja na površinskim kopovima može se postići smanjenjem količine eksploziva koja se inicira u jednom vremenskom intervalu. Modelima za predviđanje potresa utvrđuje se maksimalna količina eksploziva koja se sme inicirati po intervalu usporenja. Pri razmatranju smanjenja količine eksploziva po intervalu usporenja treba primeniti prvo one mere koje ne utiču mnogo na povećanje troškova. Ukoliko se ne postiže veliki efekat, treba primeniti mere koje zahtevaju veća ulaganja. Smanjenje količine eksploziva može se postići: promenom šeme iniciranja, razdvajanjem minskog punjenja i iniciranjem svakog punjenje posebno sa različitim vremenom usporenja, smanjenjem prečnika minskog punjenja, smanjenjem prečnika bušotine, smanjenjem dužine minske bušotine i dr.

### **2.14.2 Izbor optimalnog intervala usporenja između minskih punjenja**

U pogledu seizmičkog dejstva, kod iniciranja minskih punjenja sa usporenjem, svako posebno inicirano punjenje ili grupa punjenja se manifestuje kao poseban impuls potresa. Na ovaj način intenzitet potresa je smanjen u odnosu na intenzitet kada bi se iniciranje izvršilo trenutno. Proračunati parametri bušenja i miniranja treba da omogućavaju da svaka minska bušotina ima optimalnu liniju najmanjeg otpora, kako bi se izbegla stešnjenost minskih punjenja i na taj način smanjili seizmički efekti



miniranja. Primenom iniciranja minskih punjenja sa usporenjem, mogu se formirati dodatne slobodne površine i na taj način omogućiti svakom punjenju da ima proračunatu adekvatnu liniju najmanjeg otpora. Uopšte, pri miniranju serija sa više redova minskih bušotina, stešnjenost minskih punjenja se može izbeći većim vremenom usporenja između redova bušotina u odnosu na interval usporenja između minskih bušotina u jednom redu.

### **2.14.3 Promena šeme iniciranja**

Upravljanje dejstvom eksplozije najjednostavnije se postiže pravilnim izborom šeme iniciranja. Savremene šeme milisekundnog iniciranja koriste se za sniženje seizmičkog efekta, povećanje stepena usitnjavanja stena, dobijanje potrebnog oblika gomile odminiranog materijala i postizanje drugih neophodnih rezultata miniranja. U pojedinim slučajevima za smanjenje intenziteta seizmičkih efekata miniranja dovoljna je samo promena šema iniciranja minske serije. Na taj način se postiže sprečavanje preklapanja pojedinih minskih punjenja i smanjenje količine eksploziva koja se inicira u jednom vremenskom intervalu. Promena šeme iniciranja predstavlja prvi korak pri razmatranju smanjenja seizmičkih efekata, jer nema mnogo uticaja na tehnologiju eksploatacije i troškove proizvodnje.

### **2.14.4 Primena razdvojenih minskih punjenja u bušotini**

Smanjenje seizmičkog efekta može se postići smanjenjem količine eksploziva koja se inicira u jednom vremenskom intervalu razdvajanjem minskog punjenja u bušotini na dva ili više dela i iniciranjem svakog punjenja posebno sa određenim intervalom usporenja. Sa aspekta seizmičkog dejstva, svako posebno inicirano razdvojeno punjenje manifestuje se kao poseban impuls potresa. Na ovaj način intenzitet potresa se smanjuje u odnosu na iniciranje ukupne količine eksplozive u bušotini u jednom vremenskom intervalu. Iniciranje razdvojenih minskih punjenja se vrši tako što se prvo inicira gornje pa zatim donje punjenje jedne bušotine. Razdvajanje minskih punjenja postiže se međučepovima, koji mogu biti vazdušni međuprostor ili međuprostor od inertnog materijala (nabušeni materijal, pesak i dr.). Ukoliko se minsko punjenje u bušotini deli na dva dela jednim međučepom, odnos glavnog i razdvojenog punjenja iznosi 60:40% ili 70:30% ukupne količine eksploziva u minskoj bušotini.

#### **2.14.5 Smanjenje prečnika eksplozivnog punjenja**

Optimalan prečnik eksplozivnog punjenja kod proizvodnog miniranja, za određenu vrstu eksploziva, podrazumeva onaj prečnik koji sa najmanjim troškovima obezbeđuje potreban stepen usitnjavanja stenske mase. To je najveći prečnik koji omogućuje željenu granulaciju. Pri potpunom punjenju minske bušotine do visine čepa (mehanizovano punjenje NALIM sistemom) koeficijent popunjenosti iznosi jedan i u tom slučaju je najveća količina eksploziva po metru dužnom. Smanjenjem prečnika eksplozivnog punjenja povećava se zazor između stuba eksplozivnog punjenja i zida minske bušotine, čime se smanjuje bušotinski pritisak, a time i seizmički efekat. Međutim, treba voditi računa o tome da se kod proizvodnog miniranja na površinskim kopovima sa smanjenjem prečnika eksplozivnog punjenja ispod optimalne vrednosti smanjuje i kvalitet drobljenja stenske mase.

#### **2.14.6 Smanjenje prečnika minske bušotine**

Smanjenjem prečnika minske bušotine pri konstantnim vrednostima ostalih parametara dolazi do smanjenja količine eksploziva po metru dužnom odnosno količine eksploziva u minskoj bušotini. Smanjenjem prečnika bušenja smanjuje se geometrija miniranja, omogućava se bolji prostorni raspored energije i bolje usitnjavanje stenske mase. Pri izboru određene garniture za bušenje, proizvođač za određeni tip čekića, pribora i krune za bušenje propisuje opseg prečnika koji se može bušiti za određenu radnu sredinu. Svako veće odstupanje odnosno smanjenje prečnika u većoj meri povlači za sobom drugi tip krune za bušenje čekića, pribora, čekića za bušenje a ponekad i promenu celokupne garniture za bušenje, što može dovesti do velikih dodatnih troškova proizvodnje. Smanjenjem prečnika neophodno je ponovo proračunati parametre miniranja, prilagoditi geometriju miniranja, vreme usporenja, šemu iniciranja i dr. Smanjenje geometrije miniranja uslovljava veću dužinu bušotina po jedinici minirane mase, odnosno veće troškove bušenja, dok manja količina eksploziva u bušotini uslovljava veću potrošnju sredstava za iniciranje. Promena prečnika predstavlja meru smanjenja seizmičkih efekata koja zahteva tehno-ekonomsku opravdanost pre primene.

#### **2.14.7 Smanjenje dužine bušotine**

Smanjenjem dužine minske bušotine smanjuje se količina eksploziva u bušotini. Dužina minske bušotine se određuje u funkciji visine etaže, dužine probušenja i ugla

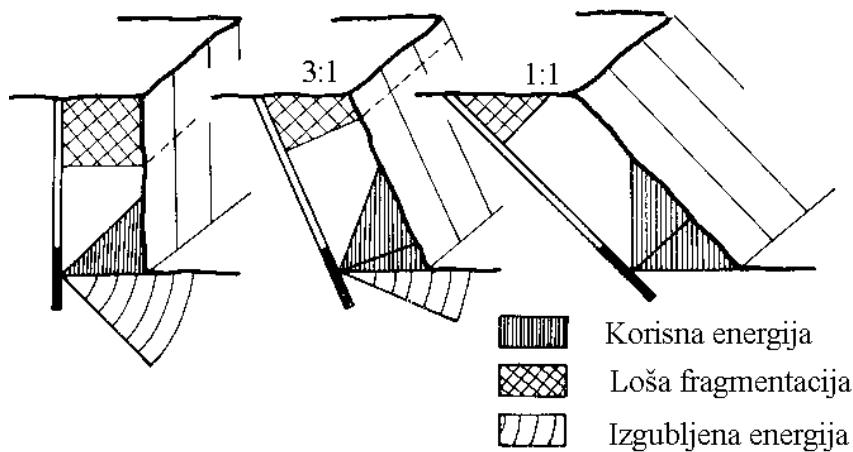
bušenja. Manje smanjenje dužine minske bušotine postiže se smanjenjem dužine probušenja ili povećanjem ugla bušenja. Smanjenje dužine minske bušotine u većoj meri, postiže se smanjenjem visine etaže. Podelom etaže na više manjih etaža menja se geometrija miniranja i drugi parametri poput vremena usporenja, utiče se na izabranu tehnologiju eksploatacije jer se mora prilagoditi i druga oprema za utovar i transport. Pri tome je neophodno izvršiti dodatne pripreme radove, izraditi pristupne puteve, useke otvaranja, premestiti mehanizaciju itd. Smanjenje visine etaže predstavlja jednu od mera koja bitno utiče na proizvodne troškove i primenjuje se samo u izuzetnim slučajevima kada se mora izvršiti zaštita objekata od izuzetnog značaja i kada nijedna druga mera smanjenja seizmičkih efekata miniranja nije dala željeni rezultat.

#### **2.14.8 Izbor optimalne dužine probušenja**

Probušenje ispod nivoa etaže treba da bude optimalne dužine da bi se sprečilo slabo iskorišćenje energije eksplozije u donjem delu etaže. Previše mala dužina probušenja dovodi do pojave etažnih neravnina – pragova, dok prevelika dužina može dovesti do povećanja seizmičkog efekta miniranja zbog stešnjenosti minskih punjenja. Optimalna dužina probušenja treba da iznosi 0.15 do 0.25 linije najmanjeg otpora, 10 do 15 % visine etaže tj. 10 do 15 prečnika minske bušotine [44].

#### **2.14.9 Promena nagiba bušotine**

U cilju smanjenja seizmičkih potresa potrebno je razmotriti promenu nagiba minskih bušotina. Kod kosih minskih bušotina linija najmanjeg otpora je konstantna duž cele visine etaže, čime se postiže ujednačena raspodela energije eksploziva u stenskoj masi. Kose minske bušotine imaju niz drugih prednosti: manje oštećenje vrha etaža iza bušotina, veća stabilnost etažnih kosina kod raspucalih stenskih masa, veća količina minirane mase po bušotini, bolje usitnjavanje stenske mase (manje krupnih frakcija iz područja čepa).



Slika 2-44. Veće iskorišćenje energije u podu etaže kod kosih u odnosu na vertikalne minske bušotine [71]

Primenu kosih minskih bušotina na površinskom kopu treba razmotriti i sa drugih aspekata sem sa aspekta potresa, jer kose bušotine imaju i određene nedostatke: teže održavanje ušća bušotine na željenom mestu, teškoće u održavanju geometrije tj. pravca i paralelnosti bušotina, češće zaglavljivanje pribora za bušenje i izraženije vibracije pribora za bušenje, povećanje dužine bušenja za istu zapreminu stenske mase, kao i otežano punjenje bušotina kod malih uglova nagiba i primene patroniranih eksploziva.

#### 2.14.10 Izbor optimalnog koeficijenta zbliženja minskih bušotina

Koeficijent zbliženja minskih bušotina (odnos rastojanja između bušotina u redu i linije najmanjeg otpora) direktno utiče na horizontalno pokretanje stenske mase napred odnosno unazad, na stvaranje pukotina iza minske serije, količinu blokova iz zone čepa minske bušotine, razbacivanje stenske mase i na kvalitet usitnjavanja. U praksi se najčešće reguliše promenom rasporeda i redosleda intervala iniciranja. Za smanjenje seizmičkih efekata, koeficijent zbliženja minskih bušotina treba da bude veći od jedan, ako je to moguće obzirom na geologiju radne sredine [44]. Linija najmanjeg otpora i rastojanje između bušotina su osnovni parametri koji definišu geometriju miniranja. Sa aspekta kvaliteta drobljenja, postoji određeni opseg u kojem je vrednost linije najmanjeg otpora optimalna. Smanjenjem linije najmanjeg otpora povećava se broj bušotina koje treba izbušiti, a samim tim se uvećavaju i troškovi bušenja i miniranja. U tom slučaju je potrebno sprovesti ekonomsku analizu opravdanosti smanjenja geometrije miniranja u cilju smanjenja seizmičkog efekta miniranja.

### 2.14.11 Povećanje preciznosti bušenja i merenje parametara u toku bušenja

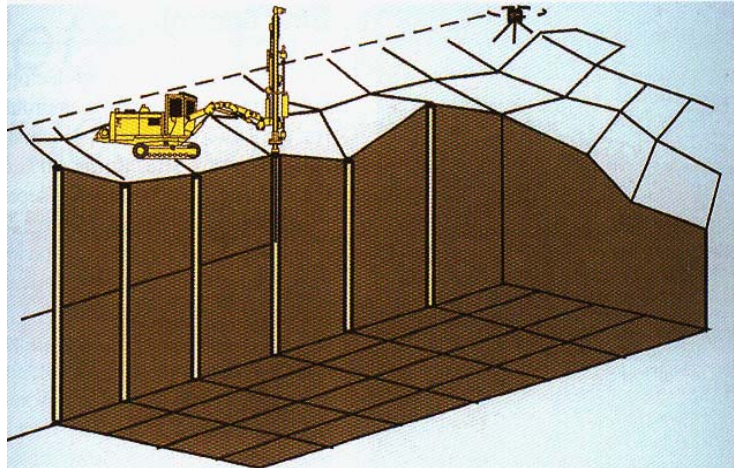
Minske bušotine treba da se buše po projektovanoj šemi. Samom procesu bušenja prethodi obeležavanje mreže minskih bušotina prema proračunatim parametrima. Proces bušenja mora da se kontroliše, kako bi se izbegla devijacija bušenja i upoznale sve činjenice vezane za karakter radne sredine. Na taj način se smanjuju negativni efekti miniranja u smislu pojave nekontrolisane raspucalosti stenske mase iza poslednjeg reda minske serije, stešnjenosti mina usled nepravilnosti bušenja čime se povećava seizmički efekat, razletanje komada izminiranog materijala i sl. Danas je bušenje minskih bušotina znatno olakšano primenom savremenih garnitura za bušenje minskih bušotina poput "pametnih" garnitura za bušenje (*en. Smart Rig*) kompanije Atlas Copco [83] prikazane na slici 2-45 kao i postupka merenja parametara u toku bušenja (*en. Measuring While Drilling –MWD*).



Slika 2-45. "Pametna" garnitura za bušenje (*Smart Rig*) ROC D7C kompanije Atlas Copco sa opremom za prigušenje buke za približno 10 dB[83]

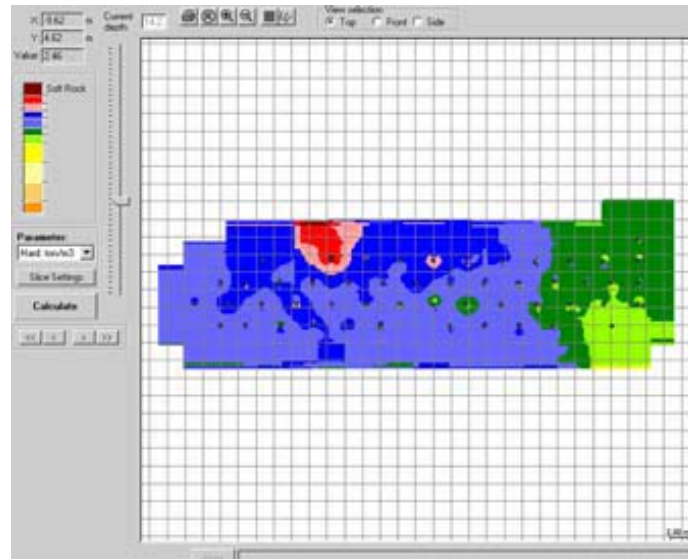
SmartRig [83] predstavlja kompjuterizovan sistem upravljanja namenjen za sve vrste automatizacije kako u jednostavnijim tako i u naprednijim bušilicama. Hardver je projektovan tako da radi u svim vremenskim uslovima, a sam softver se može nadograditi na licu mesta. Sistem ima ugrađene funkcije praćenja i snimanja podataka zajedno sa podrškom za dijagnostikovanje i pronalaženje grešaka. Garnitura za bušenje je opremljena prijemnikom za lasersko pozicioniranje polazne ravni bušenja tako da

daje tačnu referentnu visinu i na taj način omogućava da se sve bušotine buše do iste dubine. Automatsko podešavanje ugla bušenja smanjuje vreme podešavanja i mogućnost da rukovaoc pogreši u podešavanju. Proces bušenja se prati sistemom detekcije koji automatski može da prekine bušenje u slučaju da se detektuje neki kvar ili lom.



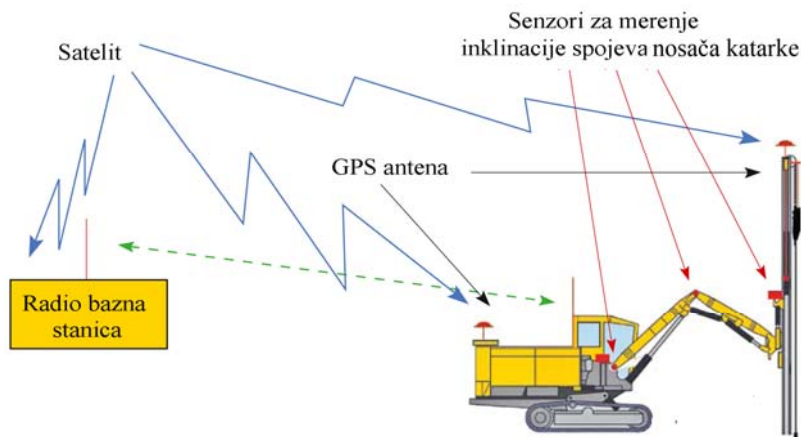
*Slika 2-46. Prednosti primene laserskog pozicioniranja polazne ravni bušenja pri bušenju minskih bušotina na etaži [83]*

Merenje u toku bušenja (MWD) [83] predstavlja hardver i softver za snimanje i interpretaciju podataka bušenja i unapređen prikaz geomehaničkih karakteristika stenskog masiva. Brojni parametri kao što su: dubina bušenja, brzina bušenja, osna sila, radni pritisci beleže se na određenim intervalima u toku bušenja i na taj način se dobijaju ulazni podaci za analizu karakteristika stenskog masiva. Za svaku bušotinu, beleže se takođe i podaci kao što su: datum, vreme, dužina bušenja, ugao bušenja i tip bušilice. Podaci dobijeni merenjem tokom bušenja se mogu prikazati po profilima sa karakteristikama stena prikazanim različitim bojama, pri čemu se dobija mapa tipova i kvaliteta stenske mase, bez ometanja celokupnog procesa proizvodnje, pošto se beleženje podataka vrši tokom samog bušenja.



Slika 2-47. Mapa različitih kvaliteta stenske mase dobijena primenom merenja u toku bušenja (MWD) [83]

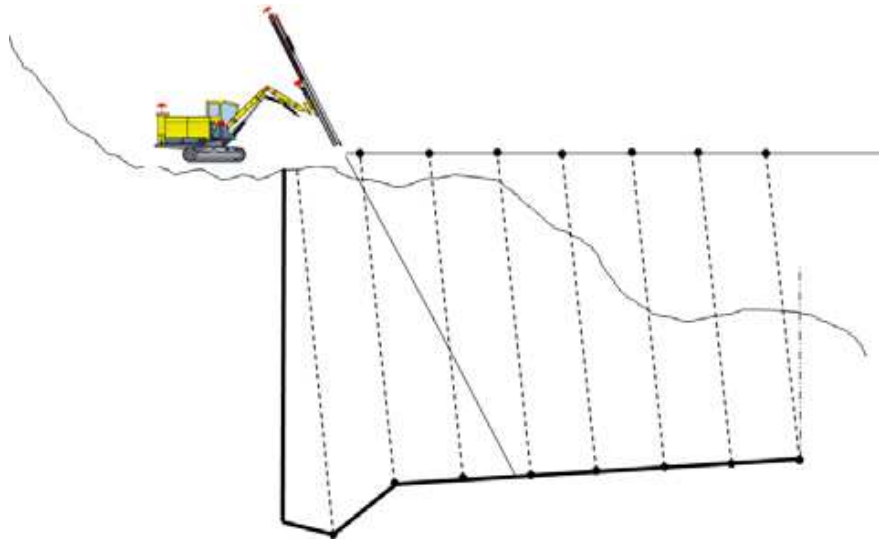
Navigacioni sistem garniture za bušenje omogućava navođenje uz tačnost od oko 5 cm. Sa navigacionim sistemom nije potrebno obeležavati bušotine, a tačnost je tolika da su sve bušotine međusobno paralelne čime se postiže bolja fragmentacija, manji procenat negabarita i niži seizmički efekat.



Slika 2-48. Sistem navigacije "pametne" garniture za bušenje [83]

Pomoću parametara prikazanih na displeju, rukovaoc garniture za bušenje navodi bušilicu do tražene pozicije, pri tom kompjuter prikazuje informaciju o mestu i uglu katarke tačno iznad tačke započinjanja bušenja, čime se smanjuje vreme podešavanja. Projektovana mreža minskih bušotina se može preko memorijske kartice preneti na garnituru za bušenje, čime se skraćuje vreme podešavanja, dovodi do optimalnih

rezultata bušenja i miniranja, kvalitetnije fragmentacije i smanjenja ukupnih troškova proizvodnje.



*Slika 2-49. Šematski prikaz primene sistema navigacije bušilice za podešavanje ugla i dužine bušenja prilikom izrade trase puta [83]*

#### **2.14.12 Praćenje stanja minske bušotine**

Praćenje stanja minske bušotine može da doprinese smanjenju devijacije, kao i dobijanju značajnih podataka o rasporedu pukotina u stenskom masivu u kojem se vrši bušenje minskih bušotina. To se može postići spuštanjem video sonde unutar bušotine, koja u svakom momentu daje informaciju o dubini, azimutu i nagibu, dok snimci sonde daju značajne podatke o unutrašnjem stanju minske bušotine, pravcima usmeravanja pukotina, eventualnom postojanju šupljina i kaverni, što značajno olakšava sam proces punjenja bušotine eksplozivom. Video sonda takođe može pomoći i prilikom zaglave bušaćeg pribora kada je onemogućeno dalje punjenje minske bušotine eksplozivom usled zarušavanja zidova bušotine.

Na slici 2-50 dat je prikaz vodootporne video sonde, tehničko rešenje Centra za miniranje, Rudarsko-geološkog fakulteta [84]. Sonda vrši video inspekciju a zatim i prikaz geofizičkih parametara bušotine neposredno pre postavljanja eksplozivnog punjenja. Ispunjava sve zahteve u pogledu kompleksnih uslova koji postoje u bušotini, oblika bušotine, dimenzija, nagiba, strukture terena itd. Sonda je zaštićena od mehaničkih oštećenja s obzirom da su zidovi bušotina nepravilnog oblika sa mogućnošću obrušavanja. Kućište sonde ima spoljni prečnik 50 mm, a dužinu 500 mm, tako da mali prečnik sonde zadovoljava uslove primene u bušotinama sa širokim

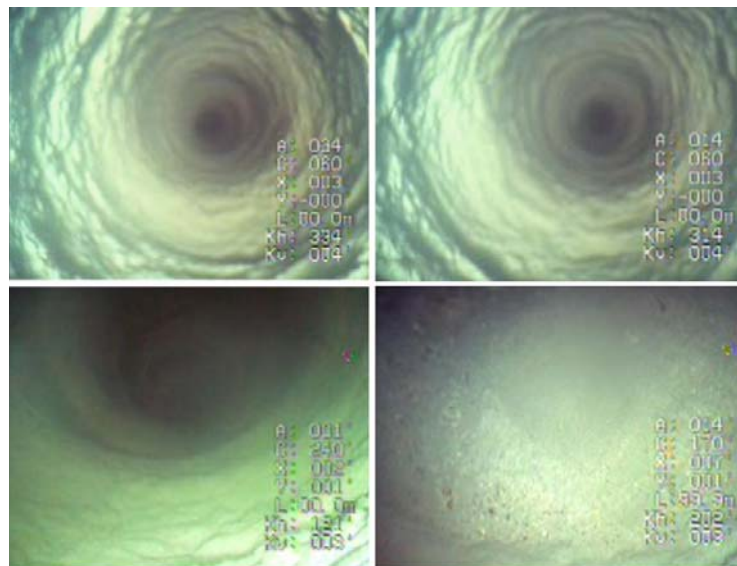


rasponom prečnika. Kamera u sondi snima detalje bušotine iz svih uglova po horizontalnoj osi 360°, a po vertikalnoj osi 90°. Video sonda može da se primeni do dubine od 100 m.



Slika 2-50. Vodootporna video sonda [84]

Na slici 2-51 prikazani su snimci stanja zidova i dna minskih bušotina primenom vodootporne video sonde. Sa snimaka minskih bušotina vodootpornom video sondom mogu se videti značajni podaci o stanju minske bušotine, pravcima usmeravanja pukotina, eventualnom postojanju šupljina i kaverni, što značajno olakšava sam proces punjenja bušotine eksplozivom.



Slika 2-51. Snimci stanja zidova i dna minskih bušotina primenom vodootporne video sonde [84]

### 2.14.13 Smanjenje intenziteta potresa od miniranja primenom zaštitnih ekrana

Ukoliko nijedna od mera smanjenja seizmičkog efekta ne daje zahtevane rezultate, seizmički efekat se može smanjiti izradom zaštitnog ekrana između objekta koji se štiti i minskog polja. Izrada zaštitnog ekrana je mera koja zahteva veća ulaganja i primenjuje se samo u izuzetnim slučajevima kada se vrši miniranje u osetljivim zonama ili kada se planira dugoročna eksploatacija pa su troškovi izmeštanja okolnih objekata veći od troškova izrade ekrana.

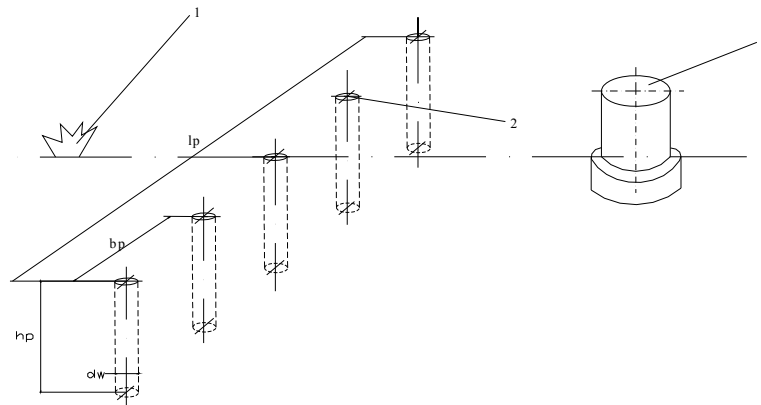
Zaštitni ekrani predstavljaju diskontinuitete izrađene u stenskom masivu, između minskog polja i objekata koje treba štiti, u cilju smanjenja intenziteta seizmičkih talasa u oblasti iza ekrana. Pri tome se istovremeno teži kako povećanju efikasnosti drobljenja stenskog masiva, tako i smanjenju štetnog dejstva seizmičkih talasa ne samo na objekte koji se nalaze u zaštitnoj zoni, već i na masiv u neposrednoj zoni miniranja.

Ekrani su objekti čijom se izgradnjom uspostavljaju dve zone:

1. zona koja se teži zaštititi od seizmičkih potresa,
2. zona u kojoj dolazi do povećanja efekta miniranja.

Dele se na:

1. ekrane u vidu pukotina,
2. ekrane u vidu sloja rastrešene stenske mase,



Slika 2-52. Položaj zaštitnog ekrana: 1- mesto miniranja, 2- ekran, 3- objekat koji se štiti ( $h_p$ -dubina bušotine ekrana,  $b_p$ -rastojanje između bušotina ekrana,  $l_p$ -dužina ekrana,  $d_w$ -prečnik bušotine ekrana) [85]

Ekranizacija tankim slojem rastrešene stenske stene omogućava smanjenje seizmičkog efekta, a ekranizacija ekranima u vidu pukotina doprinosi povećanju efikasnosti drobljenja.

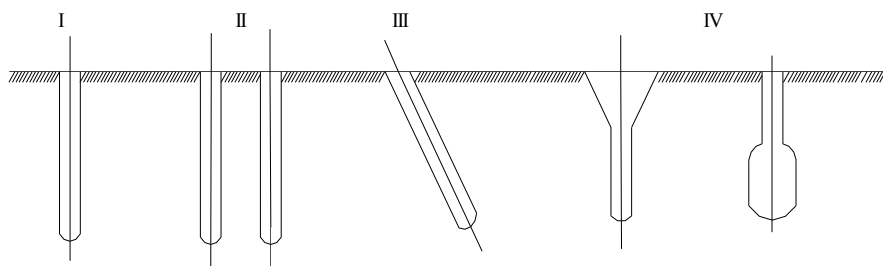
Eksperimentalna istraživanja [85] su pokazala da postavljanjem ekrana dolazi do smanjenja seizmičkih potresa u “zaštitnoj zoni” i do povećanja efekta miniranja u “zoni miniranja”. Efikasnost ekrana zavisi od načina izrade (ekran u vidu sloja rastrešene stenske mase ili ekran u vidu pukotina), od položaja ekrana, širine, dubine i dužine ekrana, talasne otpornosti stenskog masiva koji se minira, rastojanja od minskog polja do objekta koji se štiti. Ekranu imaju ulogu preraspodele impulsa i energije talasa pri eksploziji. Ovom preraspodelom može se upravljati, menjajući parametre ekrana, čime se menjaju parametri procesa refleksije i difrakcije talasa od površine ekrana. U zoni čuvanja navedene veličine smanjuju se za 15 do 90 %.

Ekranu mogu biti izrađeni primenom mehanizacije mehaničkim putem ili metodama miniranja. Mogu biti kontinualni ili diskontinualni. Diskontinualni tip ekrana izrađuje se miniranjem reda izbušenih bušotina na određenom međusobnom rastojanju. Miniranjem se dobija pukotina u vidu diskontinuiteta u stenskom masivu odgovarajućeg poprečnog preseka.

Smanjenje jačine seizmičkih talasa uzrokovanih miniranjem pomoću ekrana postiže se na sledeći način. Sa približavanjem seizmičkog talasa ekranu, deo njegove energije se odbija kroz masiv (zbog međusklopa “šupljina - stena”). Količina odbijene energije zavisi od odnosa akustične impedance tla i vazduha. Energija talasa značajno se rasipa i u međuprostoru bušotina zbog prostiranja kroz raspucali i oslabljen sloj. Postoje dve metode izgradnje zaštitnih ekrana:

- 1) bliže minskom polju (privremeni ekran),
- 2) direktno ispred objekta koji treba da bude zaštićen (stalni ekran).

Ekran može da sadrži jedan red ili više redova, može biti vertikalalan ili pod uglom, sa proširenim gornjim ili donjim delom, (slika 2-53).



*Slika 2-53. Tipovi zaštitnih ekrana: I - ekran sa jednim redom bušotina, II - ekran sa više redova bušotina, III - ekran sa kosim bušotinama, IV - ekran sa proširenjima u gornjem ili donjem delu bušotine [85]*

Proučavanja efektivnosti zaštitinih ekrana u obliku redova bušotina na modelu pri istim uslovima kao na terenu, pokazala su da smanjenje intenziteta elastičnog talasa iza ekrana zavisi od prečnika bušotina, rastojanja između bušotina u redu, rastojanja između ekrana i izvora talasa ili objekta koji se štiti. U tabeli 2-13 prikazane su vrednosti koeficijenta smanjenja intenziteta talasa  $\eta$  dobijene ispitivanjima na modelu za različite parametre ekrana. U eksperimentima se pokazalo da koeficijent  $\eta$  raste kada je prečnik bušotina približno jednak talasnoj dužini talasa.

Tabela 2-13. Vrednosti koeficijenta smanjenja intenziteta talasa  $\eta$  dobijene ispitivanjima na modelu za različite parametre ekrana [85]

$A_{01}, \text{mm}$	$A_{02}, \text{mm}$	$A_{03}, \text{mm}$	$b, \text{mm}$	$\eta_1$	$\eta_2$	$\eta_3$
6	14	30				
$A_1, \text{mm}$	$A_2, \text{mm}$	$A_3, \text{mm}$				
1.5	4	4.5	10	4	3.5	6.7
2	6	10	12	3	2.34	3
3	6	18	14	2	2.34	1.67
3	8	18	16	2	1.75	1.67
4	9	22.5	18	1.5	1.56	1.34
4	9.5	21	20	1.5	1.48	1.43
4	10	20	22	1.5	1.4	1.5
4	11	23	24	1.5	1.27	1.3
5	11	26	26	1.2	1.27	1.15
4	10	24	28	1.5	1.4	1.25
4	9	24	30	1.5	1.56	1.25
4.5	11	25	32	1.33	1.27	1.2
4	10	24	32	1.5	1.4	1.25
5	11	27	36	1.2	1.27	1.11
5	11	27	38	1.2	1.27	1.11
4.5	11.5	21.5	40	1.33	1.32	1.39
5	11.5	27	26	1.2	1.22	1.39

*Napomena:*  $A_{01}, A_{02}, A_{03}$  - amplitude talasa bez ekrana;  $A_1, A_2, A_3$  - amplitude talasa sa ekranom;  $L_p = 280 \text{ mm}$  - dužina ekrana duž fronta talasa,  $b$  - širina ekrana,  $\eta$  - smanjenje koeficijenta intenziteta vibracija koji predstavlja odnos brzine oscilovanja čestica tla ispred i iza zaštitnog ekrana.

Ispitivanja su pokazala da rastojanje između bušotina ekrana značajno utiče na promenu intenziteta talasa koji prolaze kroz ekran. Optimalno rastojanje između bušotina ekrana je jednako dvostrukom prečniku bušotine, dok ekran sa rastojanjem između bušotina koje je četiri puta veće od prečnika bušotine ekrana, nema nikakav efekat na intenzitet talasa.

Terenskim ispitivanjima [85] 88 probnih miniranja sa eksplozivnim punjenjima 0.2 - 5 kg postavljenim na dubini 1- 4.5 m i ekranima izrađenim miniranjem sledećih parametara: prečnik bušotina ekrana 0.11 - 0.35 m, rastojanje između bušotina ekrana 0.8 - 2 m, dužina ekrana 9 - 22.5 m i dubina ekrana 2 - 4.5 m, jasno su uočena dva faktora koji utiču na intenzitet talasa pri miniranju ispred i iza ekrana: smanjenje njihovog intenziteta usled prisustva ekrana i povećanje intenziteta usled prolaska talasa kroz zonu zaostale deformacije tla formirane tokom izrade ekrana miniranjem. Sa približavanjem talasa ovoj zoni, brzina oscilovanja čestica tla se povećava i nakon prolaska kroz red bušotina ekrana pada dostižući maksimalni koeficijent smanjenja od  $\eta = 2.85$ . Zapaženo je da veličina "senke" iza ekrana (efikasna zona zaštitnog ekrana) koja utiče na energiju miniranja i na period talasa vibracija, zavisi od dimenzija ekrana duž fronta talasa i dubine ekrana.

Proučavajući efekat zaštitnih ekrana na parametre seizmičkih talasa nastalih pri miniranju, zapažena je veza između perioda vibracija [85] iniciranog talasa  $T$ , prečnika bušotine ekrana  $d_w$  i efektivnosti ekrana  $\eta$ :

$$\eta = 1.34 \cdot \left(\frac{d_w}{T}\right)^{0.22} \quad (2-55)$$

Za proučavanje efekta rastojanja bušotina ekrana (koje se kretalo u opsegu od 1 do 2 m) na brzinu oscilovanja čestica tla, praćena su dva slučaja. U prvom je zaštitni ekran postavljen ispred eksplozivnog punjenja mase 14 kg, a u drugom ispred objekta koji se štiti. Zapaženo je da se najbolji efekat smanjenja brzine oscilovanja čestica tla postiže za slučaj kada je ekran postavljen ispred eksplozivnog punjenja, pri čemu je rastojanje između bušotina ekrana tri puta veće od prečnika bušotine ekrana, dok je u drugom slučaju, kada je ekran postavljen ispred objekta koji se štiti, rastojanje između bušotina ekrana imalo manji uticaj na promene parametara seizmičkih talasa nastalih pri miniranju.

Pri razmatranju optimalnog rastojanja na kom ekran treba da se postavi ispred eksplozivnog punjenja, ispitivana su dva slučaja. Kod prvog miniranja, zaštitni ekran je postavljen na 13 m od punjenja i nalazio se izvan zone rezidualne deformacije tla, čije su dimenzije razmotrene i iznose 9.5 m, dok je kod drugog miniranja, ekran postavljen na granici zone rezidualne deformacije (na udaljenosti 8 m od punjenja). Utvrđeno je da osim smanjenja intenziteta talasa u prvom miniranju za oko 1.6 puta, kod drugog miniranja je došlo do dodatnog smanjenja brzine čestica tla za još 1.4 puta, jer je ekran postavljen na granici rezidualne deformacije tla. Treba naglasiti, da bilo koje povećanje rastojanja između mesta miniranja i mesta ekrana, pri nepromenjenim navedenim parametrima, uslovljava smanjenje vrednosti koeficijenta  $\eta$  iza ekrana, usled povećanja perioda vibracija sa udaljenošću i usled difrakcije talasa [85].

Pri određivanju dubine bušotina u ekranu, treba razmatrati karakteristike prostiranja zapreminskih i površinskih talasa kroz masiv sa povećanjem dubine i prostiranjem različitih talasa kroz ekran. Istraživanja prostiranja talasa pri miniranju kroz stenski masiv pokazuju da se prostiranje površinskih talasa značajno smanjuje sa povećanjem dubine. Obzirom da su površinski talasi štetniji za objekte od zapreminskih, intenzitet talasa može se naglo smanjiti formiranjem plitkih ekrana na putu prostiranja talasa.

Sa povećanjem dubine, smanjuje se amplituda zapreminskih seizmičkih talasa. Da bi se smanjio intenzitet zapreminskih talasa, sem dubine, značajnija je kosina ekrana tj. formiranje nagnutog ekrana odmah neposredno pored objekta koji se štiti, tako da objekat ulazi u "geometrijsku senku" zone zaštite. Pri eksperimentalnim i terenskim istraživanjima, koeficijent smanjenja izražen u brzinama oscilovanja tla bio je 1.5 – 2, a odnos  $\lambda_w / d_w \approx 50$  ( $\lambda_w$  - talasna dužina,  $d_w$  - prečnik bušotine ekrana).

Kada se razmatra postavljanje zaštitnog ekrana ispred objekta koji se štiti potrebno je definisati sledeće parametre:

- 1) izbor glavnih parametara seizmičkog talasa (brzina i frekvencija) blizu objekta koji se štiti, kao i izbor oblasti u kojoj će se postaviti zaštitni ekran,
- 2) određivanje dozvoljene brzine oscilovanja tla za objekat koji se štiti,
- 3) izbor dužine ekrana duž fronta talasa, tako da objekat koji se štiti padne unutar "senke" zone ekrana,
- 4) utvrđivanje širine ekrana (prečnika bušotine ekrana).

Teorijska i laboratorijska istraživanja omogućila su da se opiše proces uzajamnog delovanja talasa naprezanja i seizmičkih talasa, kao i mehanizam drobljenja stena eksplozijom pri različitim šemama i metodama ekranizacije. Za ocenu kriterijuma efikasnosti razrađenog metoda istovremeno su uzeti stepen drobljenja izminirane mase i ekraniziranje (sniženje seizmičkog efekta) u miniranim i zaštićenim zonama. Izvođenje teorijskih istraživanja i laboratorijskih eksperimenata omogućili su određivanje osnovnih zakonitosti razaranja (obrazovanje i razvoj pukotina) pri ekraniziranju, izvođenje konačne ocene ekraniziranja u zavisnosti od metode (ekran u vidu sloja rastrešene stenske mase ili ekran u vidu pukotine). U zavisnosti od geometrijskih i energetskih parametara ekrana (položaja, širine, dubine ekrana, dužine talasa naprezanja, rastojanja od mesta eksplozije do tačke posmatranja iza i ispred ekrana), omogućeno je određivanje rezultujućeg naprezanja i zbirnog pomeraja stenske, brzine pomeraja stenske mase u blizini slobodnih površina, izračunavanje preraspodele specifičnog impulsa i gustine protoka energije pri uzajamnom dejstvu eksplozivnih talasa sa ekranima i utvrđivanje mogućnosti upravljanja tim procesom putem promene parametara ekranizacije. Pri ekranizaciji prethodno formiranom pukotinom, relativno uvećanje impulsa i energije za 25-30% nadmašuje odgovarajući impuls i energiju pri ekranizaciji slojem razrušenog masiva. U zaštićenoj zoni ove veličine se snižavaju na 15-90% [85].

Na taj način pri ekranizaciji talasa nastalih usled miniranja dolazi do preraspodele formiranih impulsa i energije. Tim preraspodelama može se upravljati menjajući parametre kompleksnih ekrana, a kao rezultat toga menjaju se parametri procesa refleksije i difrakcije od površine ekrana.

Smanjenje [85] energetskih parametara procesa (pri maksimalnom stepenu ekranizacije u zaštićenoj zoni) iznosi:

- 1) za ekran u vidu sloja rastrešene stenske mase: brzina oscilovanja čestica tla - 60%, specifični impuls - 90%, energija talasa naprezanja - 72%,
- 2) za ekran u vidu pukotine: brzina oscilovanja čestica tla - 40%, specifični impuls - 56%, energija talasa naprezanja - 80%.

Relativna promena impulsa i energije u zaštićenoj zoni stena za dva tipa ekrana, iznosi u proseku pri miniranju čvrstih stena 50-60% i stena srednje čvrstine 30-40% [85].

Ako se sniženje seizmičkih efekata javlja kao opredeljujući faktor, onda je za kvalitetan ekran celishodno primeniti sloj rastrešene stene, koji omogućava smanjenje seizmičkog efekta na označenoj površini u zoni iza ekrana. U slučajevima, kada je neophodno umanjiti gustinu obrazovanja pukotina u zaštitnoj zoni, za kvalitetan ekran preporučuje se primena ekrana u vidu prethodno formirane pukotine. U oba slučaja brzina oscilovanja čestica, specifični impuls i energija talasa naprezanja značajno se umanjuju. To je uslovljeno refleksijom, prelamanjem i apsorpcijom u ekranu, kao i difrakcijom talasa naprezanja od površine ekrana.



### 3.0 METODOLOGIJA TERENSKIH ISTRAŽIVANJA

Terenska istraživanja [86] izvršena su na površinskom kopu bakra "Veliki Krivelj", RTB Bor u periodu od avgusta do novembra 2010. godine. Prilikom istraživanja, primenjena su iskustva i saznanja dobijena na Projektu Tehnološkog razvoja Ministarstva nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije TR17013 [87].

Uzimajući u obzir karakteristike digitalnih seizmografa, automatskog startovanja u trenutku kada potresi pređu unapred zadanu vrednost brzine oscilovanja (triger), seizmografi su podešeni na konstantni monitoring potresa od miniranja u navedenom periodu. Da bi se prikupilo što više relevantnih podataka za obradu i analizu, bilo je neophodno pratiti veći broj miniranja na različitim lokacijama primenom više seizmografa. U Prilogu 4 prikazane su lokacije mernih instrumenata, kao i položaji minskih polja na kojima su izvedena miniranja tokom navedenog vremenskog perioda.

Lokacije seizmografa su određene prema potrebi da se najugroženiji objekti, koji se nalaze u neposrednoj blizini površinskog kopa, zaštite od eventualnih budućih oštećenja uzrokovanih potresima od miniranja. Određena merna mesta su bila uslovljena žalbama vlasnika objekata, koji su zahtevali konstantno praćenje uticaja potresa od miniranja na konkretnom stambenom objektu. Rastojanja od mernih mesta do minskih polja određena su primenom GPS (*en. global positioning system*) sistema.

Tokom istraživanja, registrovan je zemljotres 03. novembra 2010. godine, jačine 5.4 stepeni Rihterove skale sa epicentrom u Kraljevu. Potresi su registrovani seizmografima na dva merna mesta, što je omogućilo uporednu analizu potresa nastalih kao posledica miniranja i zemljotresa. U Prilogu 4 prikazane su lokacije mernih instrumenata, kao i položaji minskih polja na kojima su izvedena miniranja tokom navedenog vremenskog perioda.

Na jednom od objekata, pored postavljenih seizmografa za registrovanje potresa, postavljen je sistem za kontinuirano daljinsko merenje pomeraja pukotina. Uporedo sa merenjem pomeraja pukotina, merena je spoljna i unutrašnja temperatura i relativna vlažnost vazduha.

Kombinacija instrumenata omogućila je praćenje i analizu rezultata potresa od miniranja i zemljotresa, kao i pomeraja pukotina usled dnevnih promena temperature i relativne vlažnosti vazduha, potresa od miniranja i zemljotresa, kao i svakodnevnih kućnih aktivnosti.

### **3.1 OPIS LOKACIJE TERENSKIH ISTRAŽIVANJA**

#### **3.1.1 Geološke karakteristike ležišta "Veliki Krivelj"**

Ležište bakra "Veliki Krivelj" [88] nalazi se na oko 3 km horizontalnog rastojanja severno od centra Bora i pripada porfirskim ležištima velikih razmera, koja su formirana u dubini, u i oko magmatskih stena porfirne strukture, a karakteriše se štokverkn-impregnacionim varijetetom rude i zonalnim rasporedom hidrotermalnih alteracija. Porfirna mineralizacija bakra je smeštena u zoni izgrađenoj dominantno od hidrotermalno izmenjenih andezitskih stena, dugoj preko 2 km, maksimalne širine oko 700 m (prosečna širine 400 m), koja zaleže ka jugozapadu. Položaj ove zone kontrolisan je longitudinalnim rasedima pravca pružanja SZ-JI. Vertikalni interval mineralizacije je veći od 800 m. Ležište u horizontalnom preseku ima ovalan oblik, izdužen u pravcu SSZ-JJI, dok u poprečnom preseku ima oblik manje više izometričnog tela. Bitna karakteristika ležišta je da se pri povećanju dubine ne smanjuje sadržaj bakra u rudnom telu. Prelaz od orudnjenih ka slabomineralizovanim ili sterilnim hidrotermalno promenjenim stenama je postupan, sem istočne granice rudnog tela koja je tektonska, odnosno duž koje je postrudnom tektonikom rudonosni kompleks Velikog Krivelja navučena na seriju peščara i krečnjaka.

Rudno telo je smešteno u hidrotermalno promenjenim gornje krednim vulkanskim stenama andezitskog sastava, a delom i u magmatskim stenama porfirne strukture – tzv. malim intruzijama (kvarcdiorit-porfiritima). U istočnom delu ležišta, nešto šire rasprostranjenje imaju peliti (tufovi, laporci, tufiti), a lokalno se javljaju i krečnjaci. U domenu ležišta često su prisutni dajkovi andezita i u manjoj meri dacita. Od mlađih intruzivnih stena posebno su značajni dioriti, kao i njihovi žični ekvivalenti kvarcdioritporfiriti. U gornjim nivoima mineralizovanog prostora razvijena je oksidaciona zona (do 30 - 50 m ispod površine terena). Ispod ove zone nalazi se zona sekundarnog sulfidnog obogaćenja, čiji vertikalni interval iznosi oko 30 m (ponekad i 70 m). Dubinski intervali ovih zona (oksidacije i cementacije) uslovljeni su lokalno prisutnom tektonikom.

#### **3.1.2 Inženjersko-geološke karakteristike ležišta**

Inženjersko-geološke karakteristike ležišta Veliki Krivelj [88] zavise od litološkopetroloških karakteristika stenske mase i tektonskih odnosa unutar ležišta i

bliže okoline. Od svih petroloških članova hidrotermalno izmenjene stene imaju najviše rasprostranjenje u okviru samog ležišta. Nastanak hidrotermalno izmenjene zone i ležišta "Veliki Krivelj" povezan je sa tektonskim procesima laramijske faze. Prerudna, rudna i postrudna tektonika uslovile su pojavu raznih sistema pukotina i raseda. Tako nastali diskontinuiteti uticali su da hidrotermalni procesi nastave dalje promene fizičko-mehaničkih karakteristika stene. Neke alteracije su uticale na znatno smanjenje vrednosti parametara fizičko-mehaničkih karakteristika, a neke su čak poboljšale kvalitet stene. Silifikovani andeziti, po vrednostima parametara fizičko-mehaničkih karakteristika, su slični impregnacionim rudnim telima. Monoliti silifikovanih andezita su kompaktni, čvrsti i ispresecani mrežastim pukotinama i prslinama. Pukotine su uglavnom kratke i ispunjene silicijom. Kaolinisani andeziti u svežem stanju imaju relativno očuvanu porfirsku strukturu i srednje vrednosti čvrstoće na pritisak i smicanje. Međutim, mnogo su češće partije kaolinisanog andezita koji sa inženjersko-geološkog gledišta predstavlja nepovoljnu radnu sredinu. Pri formiranju kosina etaža, kaolinisani andeziti su jako nepostojani i duž površi pukotina raseda i dolazi do odronjavanja i klizanja stenske mase.

### **3.1.3 Fizičko-mehaničke karakteristike stena**

Podaci o fizičko - mehaničkim karakteristikama stena prikazani su u Tabeli 3-1 [89, 90, 99].

Tabela 3-1. Fizičko - mehaničke karakteristike stena

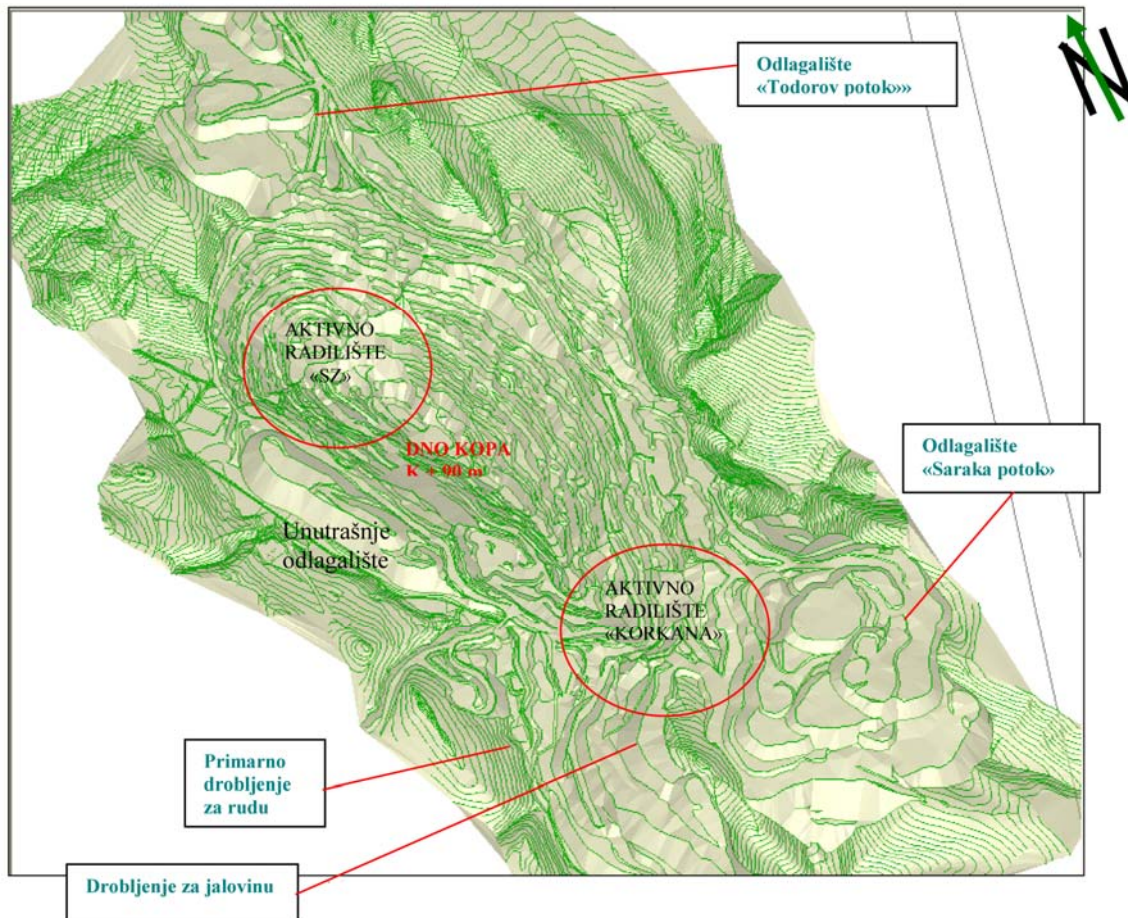
Vrsta stene	Vrste ispitivanja	Horizont +320	Horizont +260	Horizont +160
		Srednja vredost	Srednja vredost	Srednja vredost
1	2	3	4	5
Hidrotermalno izmenjene stene	zapreminska masa $\gamma$ (t/m <sup>3</sup> )	2.506	2.563	2.643
	čvrst na pritisak $\sigma_c$ (kN/m <sup>2</sup> )	31 193.6	63 150.0	67 512.9
	čvrst na zatezanje $\sigma_i$ (kN/m <sup>2</sup> )	3 468.2	9 040.7	6 982.9
	kohezija $c$ (kN/m <sup>2</sup> )	5 578.2	12 986.7	12 264.3
	ugao unutrašnjeg trenja $\varphi$ (°)	53°	46°	52°
Hornblenda biotitski andezit	zapreminska masa $\gamma$ (t/m <sup>3</sup> )	2.615	2.563	2.667
	čvrst na pritisak $\sigma_c$ (kN/m <sup>2</sup> )	84 655.0	89 001.7	73 230.0
	čvrst na zatezanje $\sigma_i$ (kN/m <sup>2</sup> )	6 885.0	10 352.5	8 786.7
	kohezija $c$ (kN/m <sup>2</sup> )	13 600.0	16 625.0	14 066.7
	ugao unutrašnjeg trenja $\varphi$ (°)	54°	51°	50° 30'
Kvarcdiorit porfiriti	zapreminska masa $\gamma$ (t/m <sup>3</sup> )	2.543	2.545	2.517
	čvrst na pritisak $\sigma_c$ (kN/m <sup>2</sup> )	42 520.0	68 165.0	40 730.0
	čvrst na zatezanje $\sigma_i$ (kN/m <sup>2</sup> )	5 567.5	7 967.5	4 693.3
	kohezija $c$ (kN/m <sup>2</sup> )	7 650.0	13 300.0	8 200.0
	ugao unutrašnjeg trenja $\varphi$ (°)	51°	51°30'	52°
Skarnovi i skarnoidi	zapreminska masa $\gamma$ (t/m <sup>3</sup> )			2.568
	čvrst na pritisak $\sigma_c$ (kN/m <sup>2</sup> )			48 950.0
	čvrst na zatezanje $\sigma_i$ (kN/m <sup>2</sup> )			6 075.0
	kohezija $c$ (kN/m <sup>2</sup> )			9 625.0
	ugao unutrašnjeg trenja $\varphi$ (°)			

### 3.1.4 Tehnologija eksploatacije na površinskom kopu "Veliki Krivelj" RTB Bor

Osnovna delatnost površinskog kopa "Veliki Krivelj" je eksploatacija rude bakra. Eksploatacije rude i raskrivke odvija se u dva zahvata: zahvat Korkana – radovi na raskrivanju i zahvat Severozapad – eksploatacija rude [88]. Prema operativnom planu fizičkog obima proizvodnje, radovi na kopu, u junu 2006. godine, odvijaju se na dva radilišta:

- Korkana i
- severozapad.

Na slici 3-1 dat je 3D prikaz stanja površinskog kopa "Veliki Krivelj" iz 2010. godine [88].



Slika 3-1. 3D prikaz stanja površinskog kopa "Veliki Krivelj" iz 2010. godine [88]



Slika 3-2. Površinski kop "Veliki Krivelj"

Geometrijski parametri površinskog kopa "Veliki Krivelj" prikazani su u Tabeli 3-2.

Tabela 3-2. Geometrijski parametri površinskog kopa "Veliki Krivelj" [88]

<b>Geometrijski parametri površinskog kopa</b>	<b>Vrednosti</b>
Visina radne etaže	15 m
Ugao kosine radne etaže	70°
Ugao kosine završne etaže	32 - 39°
Potrebna širina transportnih puteva	15 – 25 m
Minimalna širina etažne ravni radne etaže	30 – 42.2 m
Minimalna završna širina etažnih ravni	13.06 – 18.55 m
Minimalna širina useka otvaranja	34.5 m

Za otkopavanje korisne mineralne sirovine i jalovine na površinskom kopu "Veliki Krivelj" predviđena je diskontinualna tehnologija eksploatacije, koja sadrži sledeće tehnološke faze: bušenje, miniranje, utovar, transport, odlaganje, odvodnjavanje, pomoćne tehnološke postupke.

Bušenje minskih bušotina za primarno miniranje vrši se bušilicama na principu rotaciono-udarnog bušenja sa trokonusnim ozubljenim krunama. Za primarno bušenje na površinskom kopu koriste se bušilice Bucyrus Erie 45-R (Tabela 3-3) i 60-R na elektro pogon. Bušotine se buše pod uglom od 90°. Prečnik bušenja 251 mm, a brzina bušenja 14 m/s [88].

Tabela 3-3. Tehničke karakteristike bušilice „Bucyrus Erie“ 45-R [92]

<b>Prečnik bušenja</b>	171 -279 mm
<b>Prečnik šipki za bušenje</b>	197 mm
<b>Radna masa bušilice</b>	68 t
<b>Dužina bušilice sa spuštenim tornjem</b>	16.28 m
<b>Dužina bušilice sa podignutim tornjem</b>	10.97m
<b>Visina bušilice sa podignutim tornjem</b>	17.53 m
<b>Visina bušilice sa spuštenim tornjem</b>	4.30 m
<b>Širina bušilice</b>	5.94 m
<b>Dužina gusenice bušilice</b>	5.59 m
<b>Širina članaka gusenice bušilice</b>	0.90 m
<b>Podizanje tornja bušilice</b>	dva hidraulična cilindra
<b>Ugao bušenja</b>	0° - 30° od vertikale
<b>Tip kompresora</b>	Allis - Chalmers 12 - L
<b>Pritisak vazduha kompresora</b>	276 kPa
<b>Kapacitet kompresora</b>	27.81 m <sup>3</sup> /min
<b>Pritisak na krunu</b>	31 752 kg
<b>Hidraulično podizanje</b>	24 948 kg
<b>Pogonska energija</b>	Trofazna, 60Hz, 2400/4160 V
<b>Snaga motora jednosmerne struje (rotacioni pogon)</b>	37 kW/460 V
<b>Snaga motora naizmjenične struje (veliki kompresor)</b>	112 kW
<b>Snaga motora naizmjenične struje (vodena pumpa kompresora)</b>	0.7 kW/460 V
<b>Snaga motora naizmjenične struje (ventilator hladnjaka kompresora)</b>	3.7 kW /460V
<b>Snaga motora naizmjenične struje (mazalica velikog kompresora)</b>	0.19 kW/460 V
<b>Snaga motora naizmjenične struje (pomoćni kompresor)</b>	5.6 kW/460V
<b>Snaga motora naizmjenične struje (osvetljenje i komande)</b>	120V
<b>Kapacitet transformatora</b>	75 kVA



*Slika 3-3. Bušenje minskih bušotina rotaciono-udarnom bušilicom Bucyrus Erie na površinskom kopu "Veliki Krivelj" RTB Bor*

Tehnološka faza miniranja odvija se u skladu sa Rudarskim Projektima [89, 93]. Za primarno miniranje na površinskom kopu koriste se ANFO smeše i SLURRY eksplozivne smeše koje se spravljaju mehanizovanim putem i direktno doziraju u minske bušotine [94]. Za sekundarno miniranje koriste se klasični eksplozivi u patronama sa praškastom konzistencijom. Minersko-tehničke karakteristike eksplozivnih smeša date su u Tabeli 3-4. Sistem iniciranja detonirajućim štapinom zamenjen je neelektričnim sistemom iniciranja NONEL sa dvojnim milisekundnim usporenjem tipa "Nonel Dual Delay".

*Tabela 3-4. Minersko-tehničke karakteristike eksplozivnih smeša [88]*

<b>Karakteristike</b>	<b>ANFO</b>	<b>Majdanit 15</b>
Gustina (kg/dm <sup>3</sup> )	0.90	1.06 - 1.25
Brzina detonacije (m/s)	3300	3700
Gasna zapremina (l/kg)	890	835
Toplota eksplozije (kJ/kg)	3559	3115
Kritičan prečnik (mm)	50 -60	100
Inicijacija	80 g pentolita	360 g pentolita



### **3.2 PRORAČUN PARAMETARA BUŠENJA I MINIRANJA PRI PROIZVODNOM MINIRANJU NA POVRŠINSKIM KOPOVIMA**

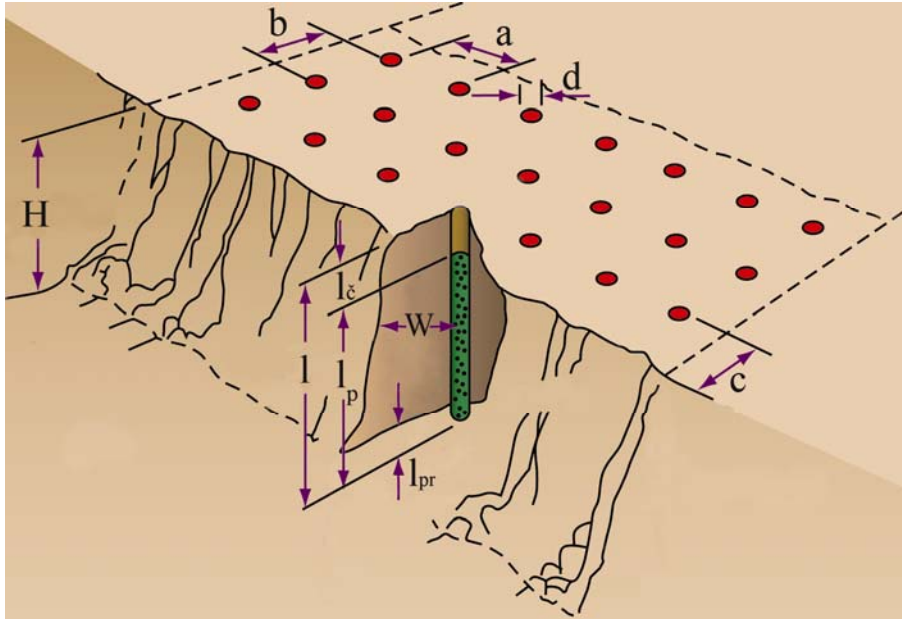
Pri proizvodnom miniranju stenskog materijala postoji jasan zahtev za granulometrijskim sastavom. To podrazumeva stvaranje uslova za postizanje maksimalnih iskorišćenja mehanizacije za utovar, transport, drobljenje uz najniže troškove eksploatacije. Metoda miniranja dubokim manskim bušotinama je najrasprostranjenija metoda dobijanja čvrstih mineralnih sirovina. Razvoj ove metode uslovljen je uvođenjem u eksploataciju opreme za bušenje kojom se postižu dubine do nekoliko desetina metara, sa velikim izborom prečnika i nagiba bušotina. Za ovu metodu miniranja koriste se vertikalne i kose bušotine.

Za postizanje projektovanog kapaciteta određene granulacije uz kontrolu pratećih efekata miniranja, potrebno je usaglasiti tri grupe parametara:

1. količinu energije eksploziva potrebnu za željeni stepen drobljenja stenske mase,
2. prostorni raspored energije u manskim polju,
3. vremenski raspored saopštavanja energije masivu, definisan šemom iniciranja i vremenima usporenja.

Pored pravilno odabranog eksploziva, od velike je važnosti i određivanje tj. usklađivanje parametara miniranja. Cilj određivanja odgovarajućih parametara je da se maksimalno poveća iskorišćenje energije eksplozije uz smanjenje negativnih efekata miniranja, među kojima je i seizmički efekat.

Na slici 3-4 predstavljeni su parametri bušenja i miniranja vertikalnih manskim bušotinama za metodu miniranja dubokim manskim bušotinama pri proizvodnom miniranju.



Slika 3-4. Parametri bušenja i miniranja vertikalnih minskih bušotina za metodu miniranja dubokim minskim bušotinama pri proizvodnom miniranju [95]

U Tabeli 3-5. su prikazani obrasci za proračun parametara bušenja i miniranja za metodu miniranja dubokim minskim bušotinama [44].

Tabela 3-5. Obrasci za proračun parametara bušenja i miniranja kod metode miniranja dubokim minskim bušotinama [44]

Parametar	Obrazac
Prečnik minske bušotine	$d = k \cdot D_s, (mm)$ $d = 100 - 150 \sqrt[4]{Q_{god}}, (mm)$
Prečnik patrone eksploziva	$d_p = d / 1.3, (mm)$
Specifična potrošnja eksploziva	$q = q_1 \cdot s \cdot v \cdot \frac{e}{g} \cdot d, (kg / m^3)$ $q = \frac{70}{A} \sqrt[3]{f}, (kg / m^3)$
Dužina probušenja	$l_{pr} = 10 - 15\% H, (m)$ $l_{pr} = 10 - 15 d, (m)$ $l_{pr} = 0.15 - 0.25 W, (m)$
Dužina vertikalne minske bušotine	$l = H + l_{pr}, (m)$
Dužina kose minske bušotine	$l = \frac{H}{\sin \alpha} + l_{pr}, (m)$
Količina eksploziva po metru dužnom	$p = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \cdot \Delta \cdot \rho, (kg / m)$
Linija najmanjeg otpora minske bušotine za šahovski raspored bušotina	$W = (25 - 35) d, (m)$
Linija najmanjeg otpora vertikalne minske bušotine	$W = \frac{\sqrt{0.56 p^2 + 4 q m p H l} - 0.75 p}{2 q m H}, (m)$
Linija najmanjeg otpora kose minske bušotine	$W = \frac{\sqrt{0.25 p^2 + 4 q m p H l} - 0.5 p}{2 q m H}, (m)$
Rastojanje između bušotina u redu	$a = m \cdot W, (m)$
Rastojanje između redova minskih bušotina	$b = 0.85 \cdot W$ - vertikalne minske bušotine $b = W$ - kose minske bušotine $b = a \cdot 0.87$ - trougaoni raspored minskih bušotina
Zapremina prizme obrušavanja od jedne minske bušotine	$V = a \cdot W \cdot H, (m^3)$ - za prvi red bušotina $V = a \cdot b \cdot H, (m^3)$ - za drugi redove
Količina eksplozivnog punjenja u minskoj bušotini	$Q = q \cdot V, (kg)$
Dužina minskog čepa	$l_{\epsilon} = (0.75 - 1.0) \cdot W, (m)$ $l_{\epsilon} = (20 - 40) \cdot d, (m)$
Dužina stuba eksplozivnog punjenja	$l_p = (H + l_{pr}) - l_{\epsilon}, (m)$ $l_p = Q / p, (m)$
Optimalni interval usporenja za milisekundna višeredna miniranja	$t = (1.5 - 2.0) A_x \cdot W, (ms)$ $t = 2 \cdot W \cdot \sqrt{\gamma / q}, (ms)$

gde je:

k - koeficijent proporcionalnosti koji zavisi od stepena drobljenja stene (0.1 - za teško drobljive stene, 0.2- za srednje teško drobljive stene, 0.3- za lako drobljive stene)

D - maksimalne dozvoljene veličine komada, (mm)

$Q_{\text{god}}$  - godišnja proizvodnja površinskog kopa, ( $10^6 \text{ m}^3$ )

$\Delta$  - gustina eksploziva ( $\text{g/cm}^3$ )

$q_1 = \sigma_c / 2000$  – koeficijent otpornosti stene,

$\sigma_c$  - čvrstoća na pritisak stene, ( $\text{dN/cm}^2$ )

$2000 \text{ dN/cm}^2$  - prosečna vrednost pritiskne čvrstoće granita (etalon),

s - koeficijent strukture stenske mase, (0.7-2.0)

v - koeficijent stešnjenosti mine, (jedna slobodna površina  $v = 2.5$ , dve slobodne površine  $v = 1.0$ , podno etažna bušotina  $v = 1.3$ ),

$A_1 = 480 \text{ cm}^3$  radna sposobnost eksploziva po Trauclu za etalon eksploziv (V-100),

A - radna sposobnost upotrebljenog eksploziva,

$e = A_1/A$  koeficijent radne sposobnosti,

g - koeficijent zbijenosti eksplozivnog punjenja,

d - koeficijent stepena začepljenosti bušotine ( 1.0 pri "normalnoj" izradi i 0.9 pri slabijoj izradi čepa),

f - koeficijent čvrstoće stena,

H - visina etaže, (m)

$\alpha$  - ugao nagiba minske bušotine prema horizontalnoj ravni, ( $^\circ$ )

$\rho$  - koeficijent popunjenosti bušotine (jednak 1 ako se eksploziv usipava slobodno u bušotinu, a ako se puni patronama eksploziva onda iznosi  $\rho = d_p^2/d^2$ ),

m - koeficijent zbliženja bušotina,

$A_x$  - koeficijent koji karakteriše radnu sredinu, (3 za čvrste stene do 6 za meke stene),

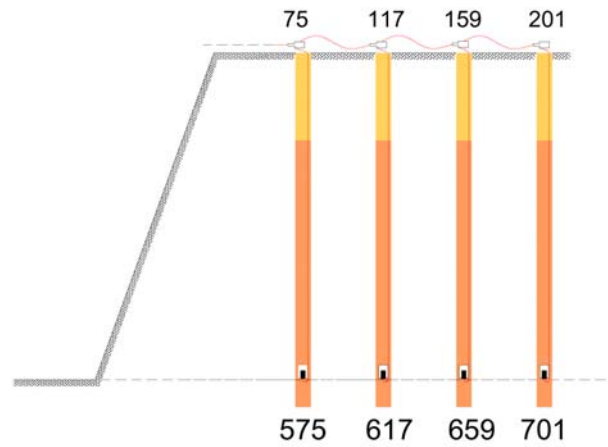
$\gamma$  - zapreminska masa stene, ( $\text{g/cm}^3$ ).

U Tabeli 3-6 prikazani su parametri bušenja i miniranja na površinskom kopu "Veliki Krivelj" RTB Bor za hidrotermalno izmenjeni andezit, kvarcdiorit porfiririt i hornblenda biotitski andezit, koji su potvrđeni u dosadašnjoj eksploataciji [93].

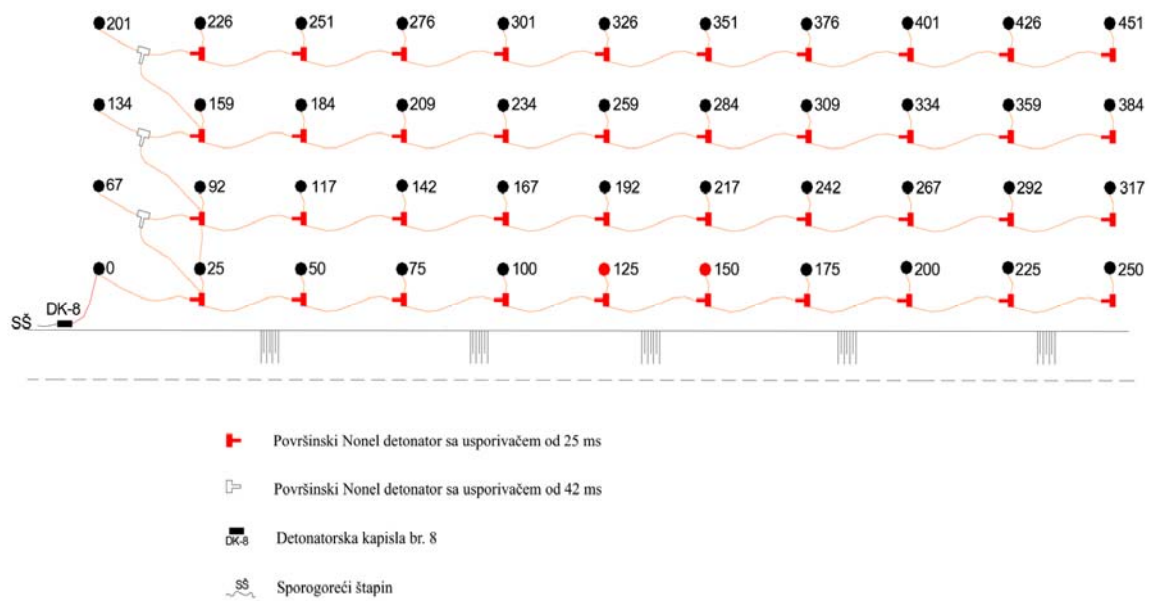
Tabela 3-6. Parametri bušenja i miniranja na površinskom kopu "Veliki Krivelj" RTB Bor za navedene vrste stena [93]

Karakteristika	Hidrotermalno izmenjeni andezit	Kvarcdiorit porfirit	Hornblenda biotitski andezit
Visina etaže $H$ (m)	15	15	15
Ugao bušenja $\alpha$ (°)	90	90	90
Prečnik minske bušotine $d$ (m)	0.251	0.251	0.251
Prečnik eksplozivnog punjenja $dp$ (m)	0.251	0.251	0.251
Srednji prečnik odminirane mase $d_{sr}$ (m)	0.572	0.476	0.324
Brzina prostiranja uzdužnih talasa $c_u$ (m/s)	2500	2500	3200
Tip eksploziva	Majdanit -15	ANFO	Majdanit -15
Specifična potrošnja eksploziva $q$ (kg/m <sup>3</sup> )	0.537	0.612	0.653
Dužina minske bušotine $l$ (m)	18.30	17.60	18.00
Količina eksploziva po m' $p$ (kg/m')	57.15	44.53	57.15
Linija najmanjeg otpora pri dnu $W$ (m)	7.80	6.50	8.00
Rastojanje između bušotina u redu $a$ (m)	11.47	9.10	9.20
Rastojanje između između redova bušotina $b$ (m)	5.76	4.80	5.91
Količina eksploziva u bušot. u I - redu $Q$ (kg)	700.72	525.40	689.23
Količina eksploziva u bušot. u ost. redovi. $Q$ (kg)	532.17	400.98	532.57
Dužina eksplozivnog punjenja u I - redu $lp$ (m)	12.26	11.80	12.06
Dužina eksplozivnog punjenja u ost. redovima $lp$ (m)	9.31	9.00	9.32
Zapremina prizme obrušavanja od jedne minske bušotine I - red. $V$ (m <sup>3</sup> )	1341.99	887.25	1104.00
Zapremina prizme obrušavanja od jedne minske bušotine u ost. redovima $V$ (m <sup>3</sup> )	991.01	655.20	815.58
Prosečna proizvodnja po m bušotine (m <sup>3</sup> /m)	60.55	41.60	50.65
Vreme formiranja dopunskih slob. površina	12.98	12.29	15.79

Na slici 3-5 prikazano je iniciranje bušotina NONEL sistemom sa usporenjem između redova od 42 ms. Šema iniciranja za masovna miniranja na etažama data je na slici 3-6.



Slika 3-5. Konstrukcija minskog punjenja i iniciranje Nonel sistemom sa usporenjem između redova od 42ms [88]



Slika 3-6. Šema iniciranja Nonel sistemom za masovna miniranja na etažama [88]

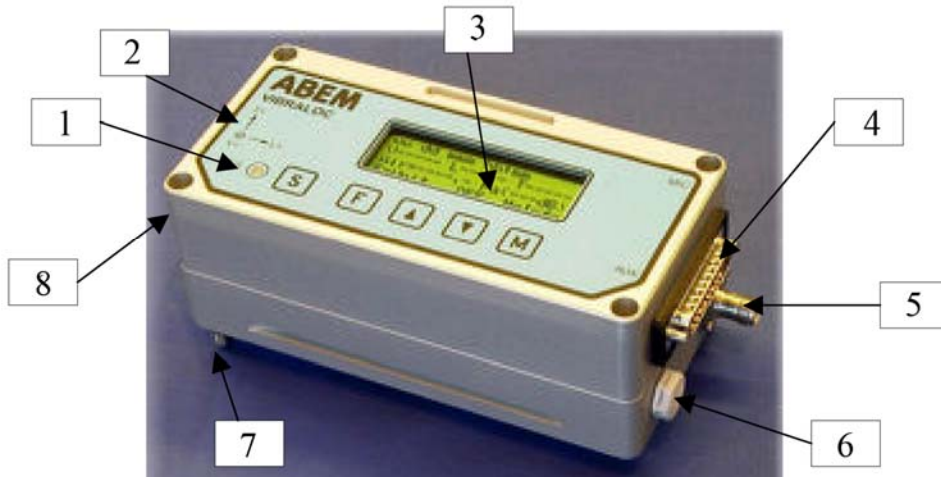
### 3.3 KARAKTERISTIKE SEIZMOGRAFA PRIMENJENOG ZA PRAĆENJE POTRESA OD MINIRANJA

Za merenje potresa od miniranja primenjeni su digitalni seizmografi tipa Vibraloc [96], švedskog proizvođača ABEM, (slika 3-7)



Slika 3-7. Seizmograf Vibraloc, ABEM [96]

Vibraloc [96] je instrument za merenje vibracija i vazdušnog nadpritiska proizvođača ABEM iz Švedske. Opremljen je troaksijalnim sistemom senzora (geofona). Snimanje nivoa vazdušnog nadpritiska se vrši četvrtim kanalom priključenjem mikrofona. Pri svakom merenju daje podatke o sve tri komponentne brzine oscilovanja ( $V$ ,  $L$ ,  $T$ ) i nivou vazdušnog nadpritiska (ako se meri). Može da memoriše i do 1000 merenja. Analiza podataka vrši se standardnim PC softverom za daljinsku kontrolu i prenos podataka do PC, prikaz, obradu, interpretaciju, filtriranje i analizu. Pored standardnog, postoji i opcioni softver za prikaz i detaljnu analizu velosigrama. Konstrukcija instrumenta data je na slici 3-8. U tabeli 3-7 prikazane su karakteristike instrumenta Vibraloc švedske firme ABEM.



Slika 3-8. Konstrukcija seizmografa Vibraloc: 1- LED signalizacija za snimanje, 2- oznaka za pozitivno usmerenje svakog geofona, 3- LCD, 4- AUX priključak za spoljno napajanje i triger, 5- priključak za mikrofon, 6- ventilator, 7- zavrtnjevi za nivelisanje, 8- serijski broj [96]



Slika 3-9. Prikaz izmerenih podataka na displeju [96]



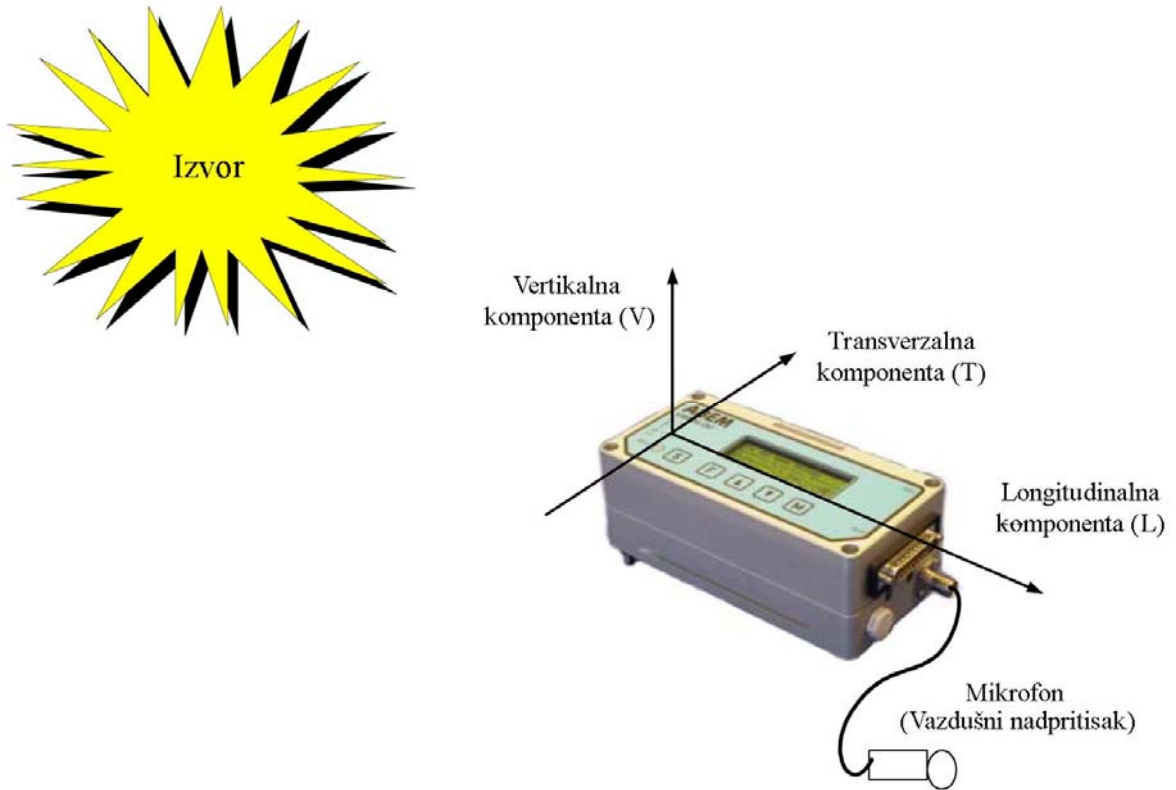
Slika 3-10. Mikrofon za merenje vazdušnog nadpritiska [96]



Tabela 3-7. Karakteristike instrumenta Vibraloc švedske firme ABEM [96]

<b>Broj kanala</b>	3 kanala geofona, 1 kanal mikrofona za merenje vazdušnog nadpritiska
<b>Standardni senzori</b>	3 ugrađena senzora
<b>Opcioni senzori</b>	1 mikrofon za vazdušni nadpritisak otporan na vremenske prilike
<b>Opseg frekvencija</b>	2-250 Hz (-3 dB)
<b>Dužina snimanja</b>	Fiksna dužina ili automatski mod 2 - 100 s, produžava se automatski do 1 - 1000 s
<b>Mod snimanja</b>	Mod maksimalne vrednosti, mod događaja
<b>Pretrig</b>	0.5 s
<b>Frekvencije uzorkovanja</b>	Po izboru: 100, 500, 1000, 2000 ili 4000 Hz
<b>Opseg merenja</b>	+/- 250 mm/s
<b>Rezolucija</b>	Bolja od 0.02 mm/s do 31 mm/s, bolja od 0.1 mm/s do 250 mm/s
<b>Nivo trigera</b>	Po izboru: 0.2 - 200 mm/s
<b>Memorija</b>	Najviše 800 događaja
<b>Napajanje interno</b>	Dve alkalne LR20 baterije, lako izmenljive
<b>Dužina trajanja interne baterije</b>	2 - 3 nedelje na 20 °C
<b>Opseg radne temperature</b>	-20 °C do + 60 °C
<b>Displej</b>	LCD, 4 x 20 karaktera
<b>Tastatura</b>	5 tastera za jednostavnu navigaciju u sistemu menija
<b>Dimenzije (W x L x H)</b>	86 x 178 x 67 mm
<b>Masa</b>	1.75 kg uključujući baterije
<b>Standardni PC softver</b>	Softver za daljinsku kontrolu i prenos podataka do PC, za prikaz, obradu, interpretaciju, filtriranje i analizu prikupljenih podataka
<b>Opcioni PC softver</b>	Softver za prikaz i detaljnu analizu velosigrama

Seizmografi su postavljeni prema uputstvima proizvođača, tako da longitudinalna komponenta prikazuje izmerene brzine oscilovanja tla u pravcu izvora potresa odnosno morskog polja. Merene su sve tri komponente brzine oscilovanja (vertikalna, longitudinalna i transverzalna komponenta) kao i frekvencije oscilovanja. Vazdušni nadpritisak nije meren tokom terenskih istraživanja.



Slika 3-11. Postavljanje seizmografa u odnosu na izvor vibracija [96]

#### **4.0 PRIKAZ REZULTATA PRAĆENJA POTRESA OD MINIRANJA I DISKUSIJA**

Instrument za merenje potresa od miniranja (seizmograf) VIBRALOC [96] Švedske firme ABEM ima dva prateća softvera:

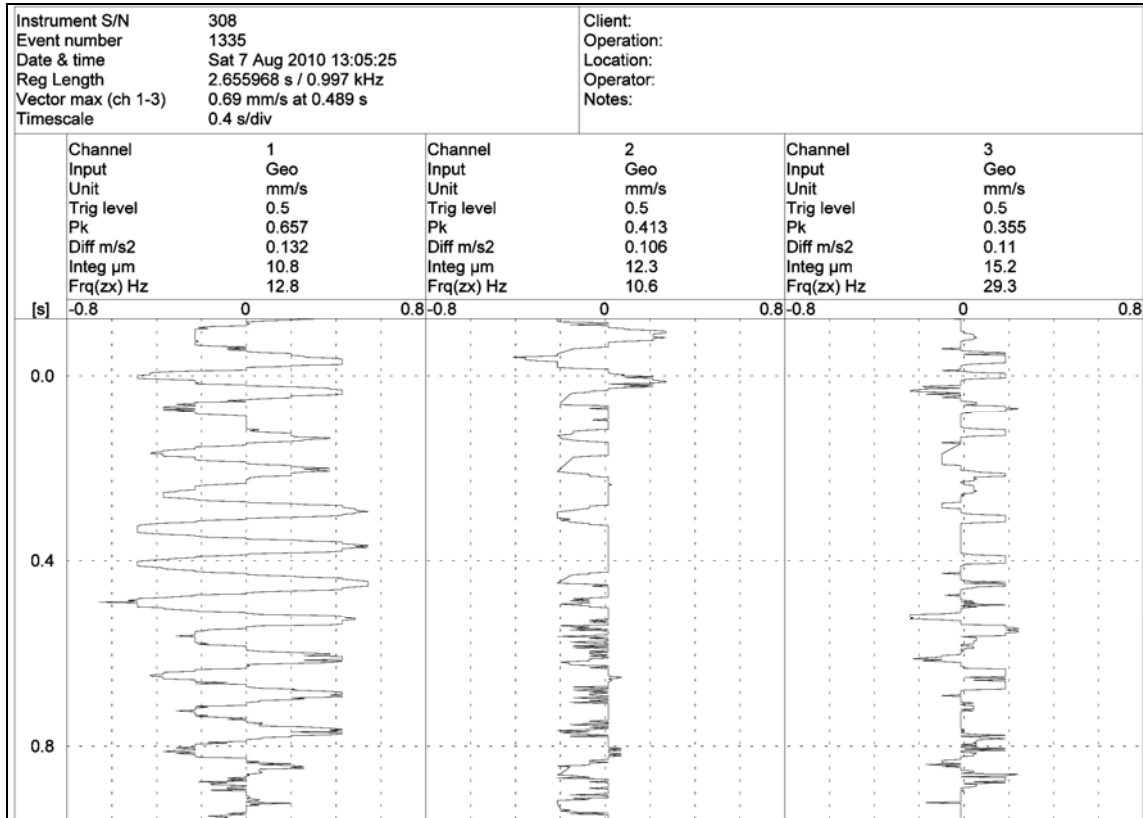
- softver za prikaz podataka izmerenih potresa od miniranja i
- softver za analizu velosigrama.

#### **4.1 SOFTVER ZA PRIKAZ PODATAKA IZMERENIH POTRESA OD MINIRANJA**

Softver za prikaz podataka izmerenih potresa od miniranja je softver prilagođen za Windows operativni sistem PC računara, koji pruža mogućnost: prikaz podataka dobijenih merenjem potresa primenom Vibraloc seizmografa, zumiranje, podešavanje razmere, merenje vremena, kao i štampanje određenog prikaza podataka u kolor ili crno belo verziji.

Na prikazu podataka izmerenih potresa od miniranja moguće je očitati osnovne podatke o datumu i vremenu merenja, broju instrumenta, broju mernog događaja, podatke o operateru, klijentu kod koga je vršeno merenje, vremenske dužine beleženja potresa, maksimalne rezultujuće vrednosti sve tri komponente brzine oscilovanja. Za svaki kanal merenja posebno se ispisuju velosigrami i daju sledeći podaci: redni broj kanala, vrsta senzora (geofon ili mikrofon), nivo trigera (donji prag brzine oscilovanja pri kojem se aktivira beleženje vrednosti brzina oscilovanja), vrednost ubrzanja ( $m/s^2$ ), pomeraja u ( $\mu m$ ) i frekvencije za maksimalnu brzinu oscilovanja.

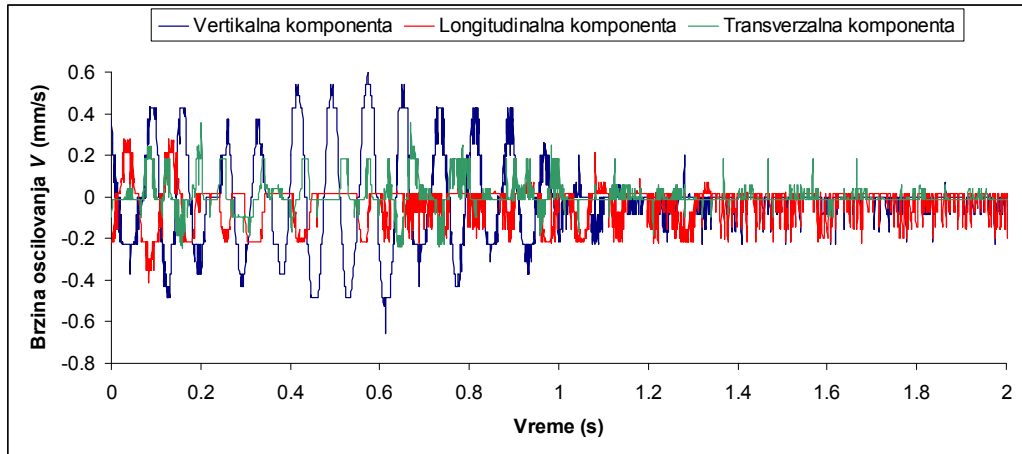
Na slici 4-1 dat je prikaz odštampanih podataka izmerenih potresa od miniranja primenom VIBRALOC [96] seizmografa. U Prilogu 5 dati su odštampani velosigrami izmerenih potresa pri konkretnim miniranjima, primenom seizmografa ABEM, Vibraloc.



Slika 4-1. Izgled odštampanog prikaza podataka izmerenih potresa od miniranja primenom VIBRALOC seizmografa [96]

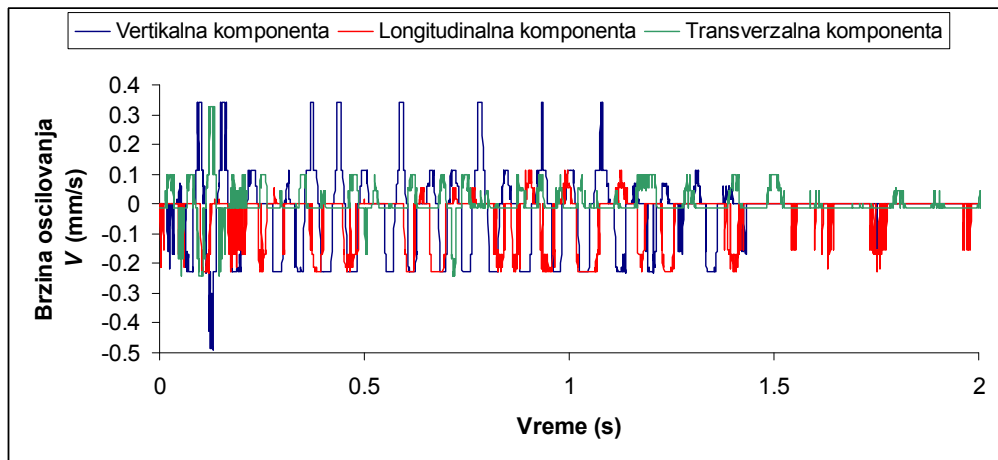
Softver pruža mogućnost prikaza i štampanja podataka pojedinačnih ili svih kanala na grafiku standarda USBM/OSM [19] ili DIN 4150-3 [61] za procenu dejstva vibracija od miniranja na objekte.

Na slikama od 4-2 do 4-9 prikazani su velosigrami registrovanih potresa od miniranja i zemljotresa dobijeni eksportovanjem i obradom podataka u Excelu. Na slici 4-2 prikazani su velosigrami vertikalne, longitudinalne i transverzalne komponente brzine oscilovanja izmerene pri miniranju 07.08.2010. u 13:05 h na mernom mestu MM1 (Prilog 4) pri maksimalnoj količini eksploziva po intervalu usporenja 330 kg i rastojanju 1425 m.



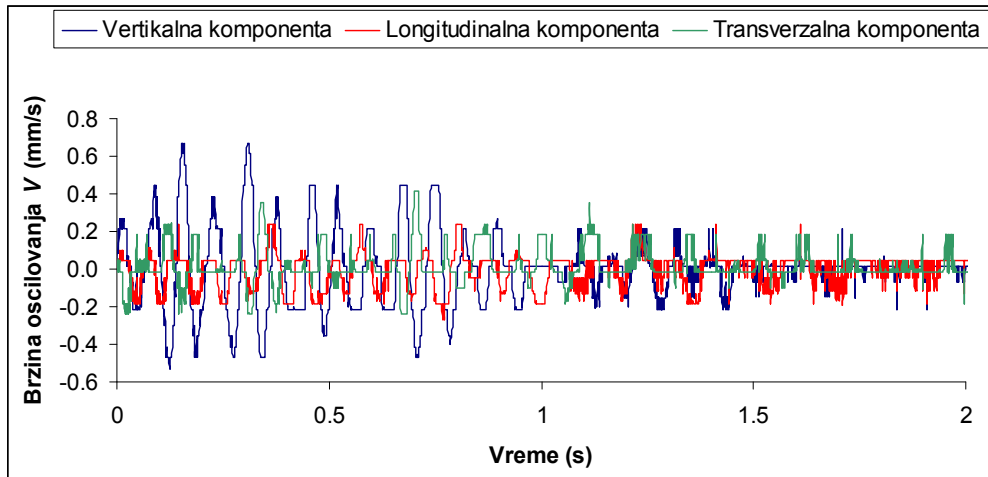
Slika 4-2. Velosigrani vertikalne, longitudinalne i transverzalne komponente brzine oscilovanja izmerene pri miniranju 07.08.2010. u 13:05 h [97]

Na slici 4-3 prikazani su velosigrani vertikalne, longitudinalne i transverzalne komponente brzine oscilovanja izmerene pri miniranju 18.08.2010. u 14:21 h na mernom mestu MM1 (Prilog 4) pri maksimalnoj količini eksploziva po intervalu usporenja 300 kg i rastojanju 1347 m.



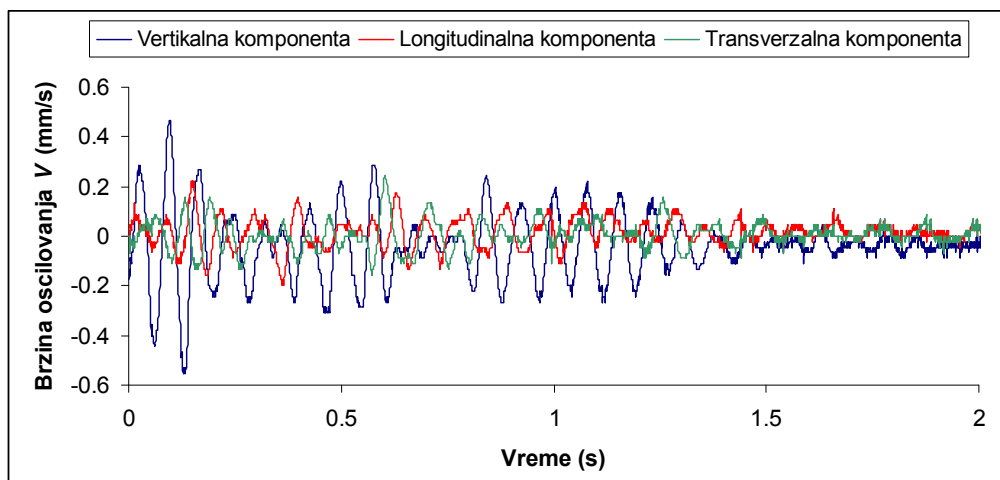
Slika 4-3. Velosigrani vertikalne, longitudinalne i transverzalne komponente brzine oscilovanja izmerene pri miniranju 18.08.2010. u 14:21 h

Velosigrani vertikalne, longitudinalne i transverzalne komponente brzine oscilovanja izmerene pri miniranju 23.08.2010. u 13:42 h na mernom mestu MM1 (Prilog 4) pri maksimalnoj količini eksploziva po intervalu usporenja 300 kg i rastojanju 1285 m, prikazani su na slici 4-4.



Slika 4-4. Velosigrama vertikalne, longitudinalne i transverzalne komponente brzine oscilovanja izmerene pri miniranju 23.08.2010. u 13:42 h

Na slici 4-5 prikazani su velosigrama vertikalne, longitudinalne i transverzalne komponente brzine oscilovanja izmerene pri miniranju 14.09. 2010. u 13:19 h na mernom mestu MM1 (Prilog 4) pri maksimalnoj količini eksploziva po intervalu usporenja 360 kg i rastojanju 1364 m.



Slika 4-5. Velosigrama vertikalne, longitudinalne i transverzalne komponente brzine oscilovanja izmerene pri miniranju 14.09.2010. u 13:19 h

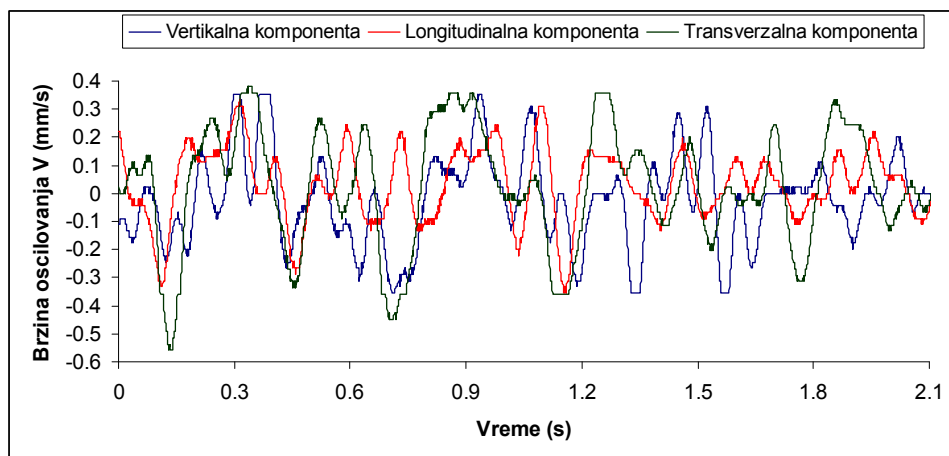
Tokom istraživanja, registrovan je zemljotres 03. novembra 2010. godine, jačine 5.4 stepeni Rihterove skale sa epicentrom u Kraljevu. Potresi su registrovani seizmografima na dva merna MM1 i MM11, (Prilog 4). U Tabeli 4-1 prikazane su vrednosti tri komponente brzine oscilovanja  $V$ ,  $L$ ,  $T$  (mm/s), frekvencije  $f$  (Hz), pomeraja i ubrzanja,

kao i rezultantne brzine oscilovanja  $V_R$  (mm/s), izmerene pri zemljotresu 03.11.2010. na navedenim mernim mestima.

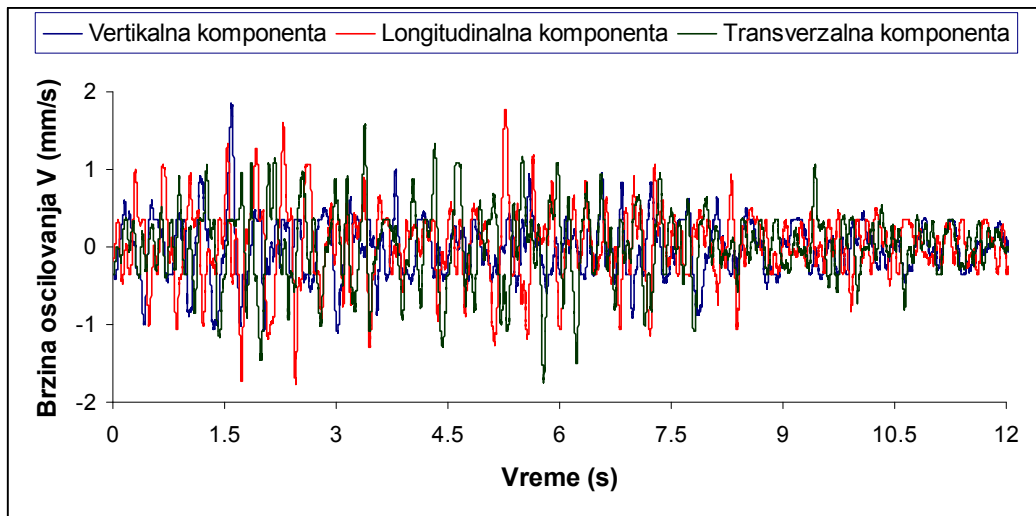
Tabela 4-1. Podaci registrovanog zemljotresa sa mernih mesta MM1, MM11, (Prilog 4)

Izmerene vrednosti	Merno mesto MM1		Merno mesto MM11	
	03.11.2010. 01h 57 min 3s	03.11.2010. 01h 57 min 9s	03.11.2010. 01h57min 29s	03.11.2010. 01h 57 min 59s
$V$ (mm/s)	0.355	1.862	2.543	0.429
$f_v$ (Hz)	4.05	3.54	3.99	3.08
$u_v$ ( $\mu\text{m}$ )	27.7	86.7	197	28.7
$a_v$ ( $\text{m/s}^2$ )	0.0387	0.127	0.114	0.0677
$L$ (mm/s)	0.355	1.773	4.770	0.441
$f_L$ (Hz)	7.91	3.64	4.74	3.58
$u_L$ ( $\mu\text{m}$ )	17.5	94.4	158	45.2
$a_L$ ( $\text{m/s}^2$ )	0.0276	0.149	0.195	0.0852
$T$ (mm/s)	0.560	1.746	3.609	0.654
$f_T$ (Hz)	6.08	5.04	3.2	4.05
$u_T$ ( $\mu\text{m}$ )	31.4	81.7	213	48.8
$a_T$ ( $\text{m/s}^2$ )	0.0335	0.134	0.152	0.0815
$V_R$ (mm/s)	0.62	2.16	5.91	0.68

Na slikama 4-6 i 4-7 prikazane su vertikalna, longitudinalna i transverzalna komponenta brzine oscilovanja tla izmerene pri zemljotresu 03.11.2010.god. u 01h 57min 3s i 01h 57min 9s na mernom mestu MM1, (Prilog 4).

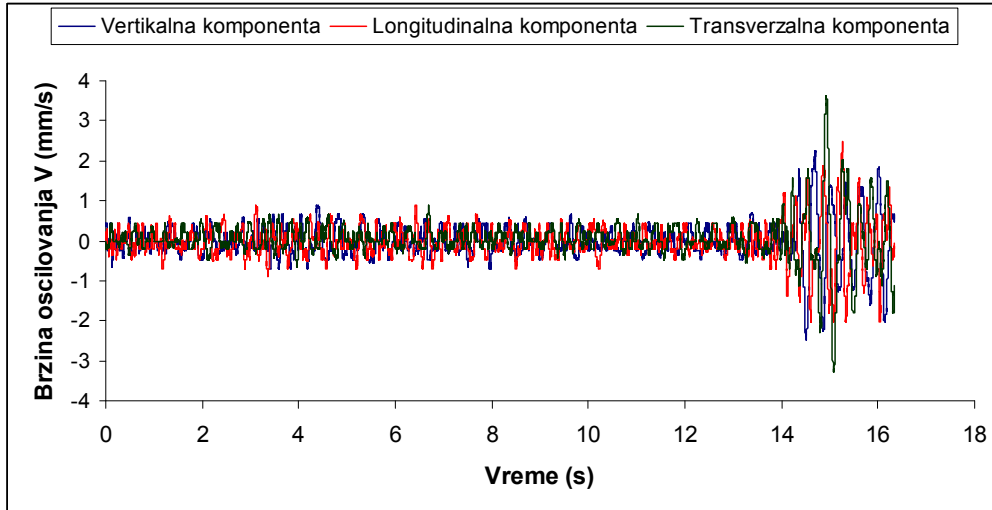


Slika 4-6. Vertikalna, longitudinalna i transverzalna komponenta brzine oscilovanja tla izmerene pri zemljotresu 03.11.2010.god. u 01h 57min 3s



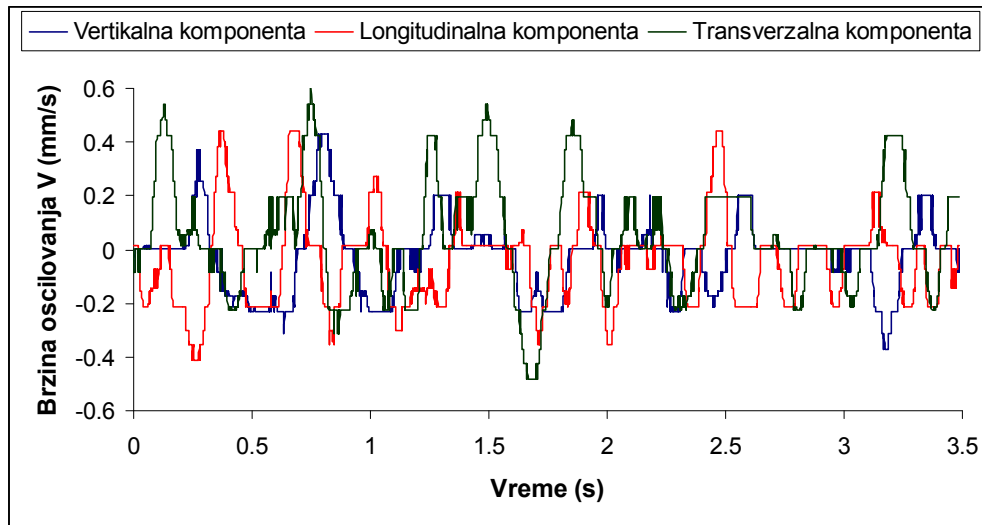
Slika 4-7. Vertikalna, longitudinalna i transverzalna komponenta brzine oscilovanja tla izmerene pri zemljotresu 03.11.2010.god. u 01h 57min 9s

Vertikalna, longitudinalna i transverzalna komponenta brzine oscilovanja tla izmerene pri zemljotresu 03.11.2010.god. u 01h 57min 29s i 01h 57min 59s na mernom mestu MM11, (Prilog 4), prikazane su na slikama 4-8 i 4-9.



Slika 4-8. Vertikalna, longitudinalna i transverzalna komponenta brzine oscilovanja tla izmerene pri zemljotresu 03.11.2010.god. u 01h 57min 29s





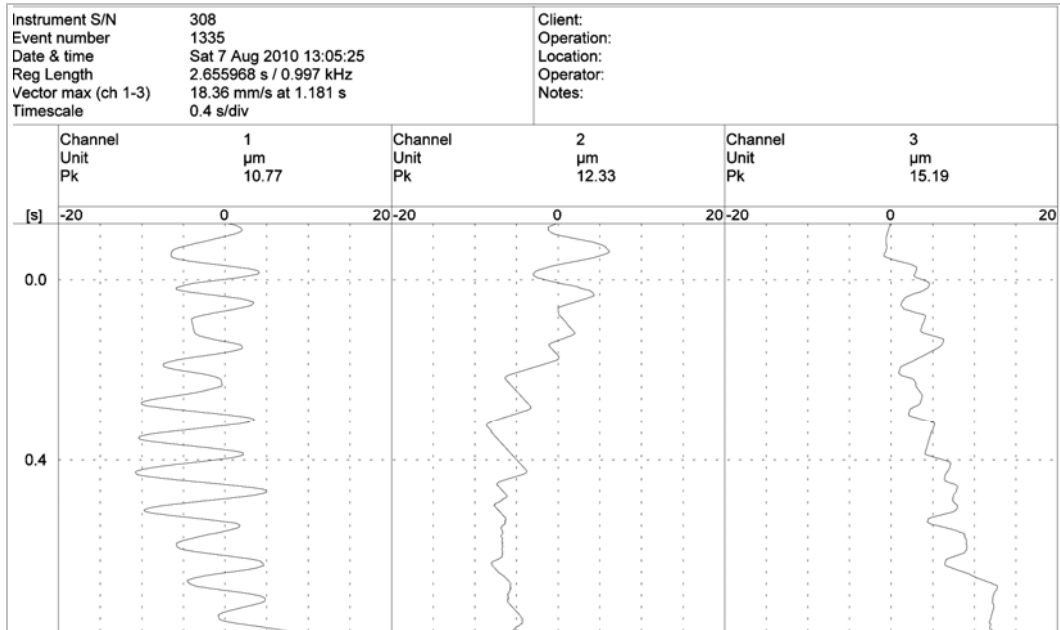
Slika 4-9. Vertikalna, longitudinalna i transverzalna komponenta brzine oscilovanja tla izmerene pri zemljotresu 03.11.2010.god. u 01h 57min 59s

Kao što je prikazano na navedenim slikama, oscilacije uzrokovane miniranjem i zemljotresom se razlikuju po intenzitetu, frekvenciji i dužini trajanja samog procesa. Dužina velosigrama od zemljotresa prelazi 10 s, dok se kod miniranja kreće oko 2 s. Izmerena frekvencija oscilacija uzrokovanih zemljotresom je daleko manja 3.2 - 7.91 Hz u odnosu na frekvencije oscilacija pri miniranju. U Prilogu 6 prikazani su odštampani velosigrama izmerenih brzina oscilovanja usled zemljotresa primenom seizmografa ABEM, Vibraloc (*Napomena: Vreme zemljotresa na originalnom zapisu je veće za jedan sat, jer je u međuvremenu počelo zimsko računanje vremena*).

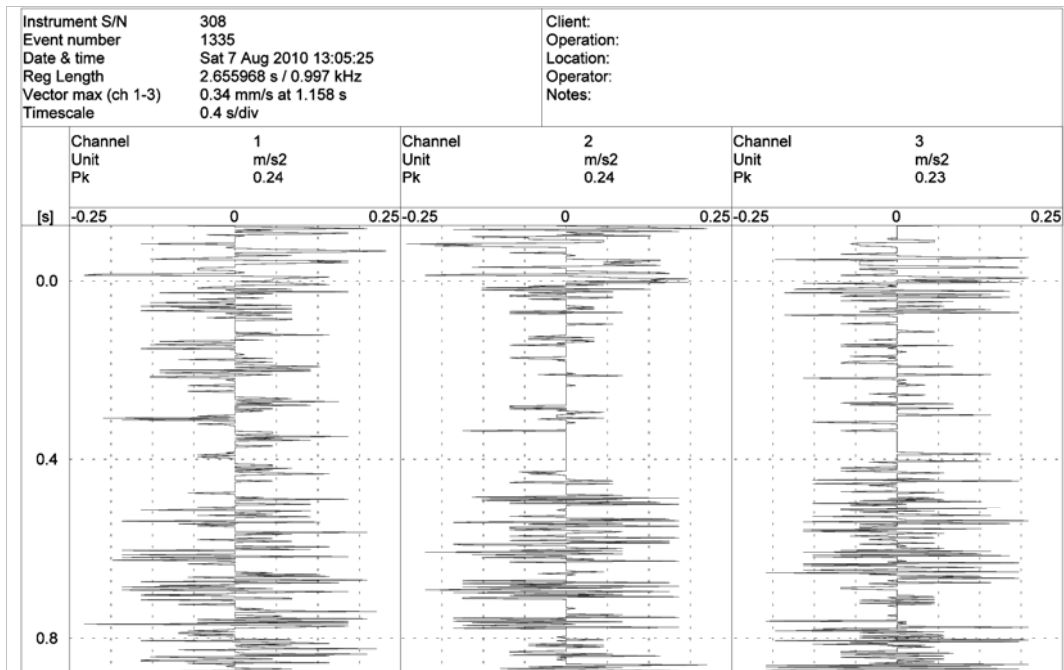
#### 4.2 SOFTVER ZA ANALIZU VELOSIGRAMA

Softver za analizu velosigrama omogućava analizu vremenskog i frekventnog domena velosigrama, kao i prikaz i štampanje analiziranih podataka. Softver pruža mogućnost integraljenja velosigrama po vremenu pojedinačnih ili svih kanala, prikaz i štampanje pomeraja u funkciji vremena u  $\mu\text{m}$ , kao i diferenciranje velosigrama po vremenu pojedinačnih ili svih kanala i prikaz i štampanje ubrzanja u funkciji vremena u  $\text{m/s}^2$ .

Na slici 4-10 predstavljen je izgled odštampanih prikaza pomeraja u funkciji vremena dobijen integraljenjem velosigrama po vremenu, dok je na slici 4-11 predstavljen izgled odštampanih prikaza ubrzanja u funkciji vremena dobijen diferenciranjem velosigrama po vremenu, primenom softvera za analizu.



Slika 4-10. Izgled odštampanog prikaza pomeraja u funkciji vremena dobijen integraljenjem velosigrama po vremenu primenom softvera za analizu



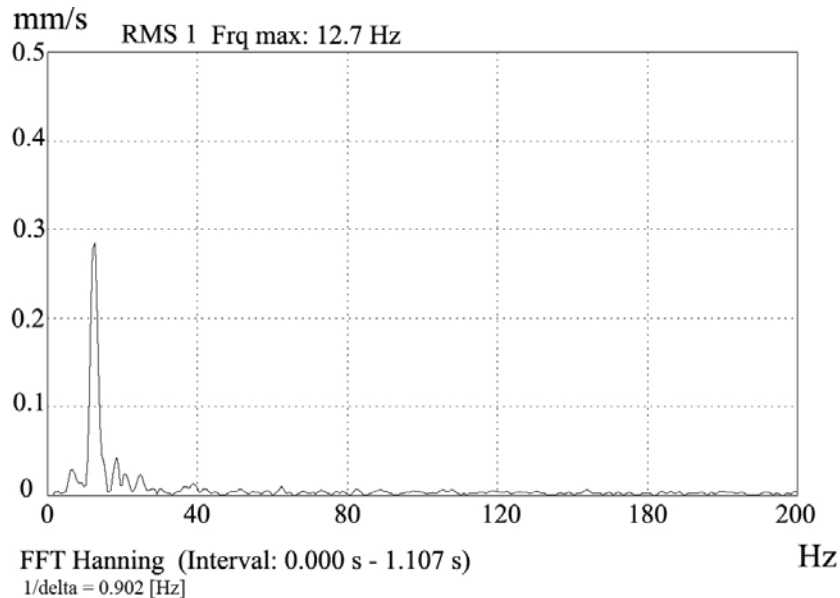
Slika 4-11. Izgled odštampanog prikaza ubrzanja u funkciji vremena dobijen diferenciranjem velosigrama po vremenu primenom softvera za analizu

#### 4.2.1 Analiza frekvencija velosigrama

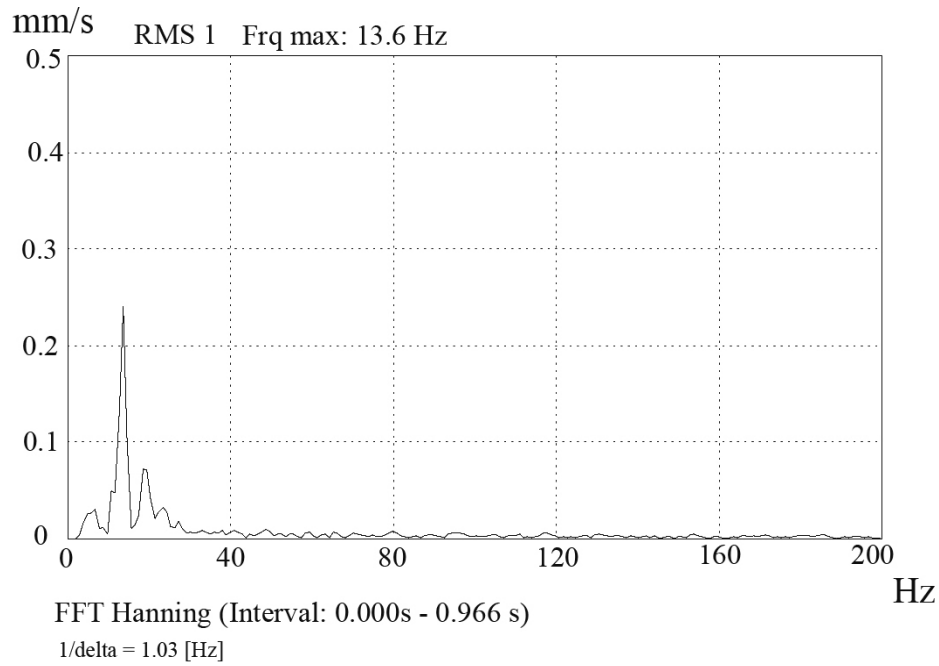
Analiza frekvencija izvršene su softverom za analizu velosigrama. Dominantne frekvencije su dobijene FFT (*en. Fast Fourier Transformation*) analizom svih velosigrama dobijenih terenskim merenjima. FFT analiza je izvršena primenom softvera za analizu velosigrama proizvođača seizmografa VIBRALOC [96]. Softver pruža mogućnost FFT analize velosigrama sva tri kanala posebno, kao i četvrtog kanala kojim se mere vazdušni udari.

Pre analize, neophodno je odrediti vremenski interval na velosigramu koji treba da se analizira. Softver pruža mogućnost izbora određene analize. Standard DIN 4150-3 preporučuje da se FFT analiza vrši metodom Hanning.

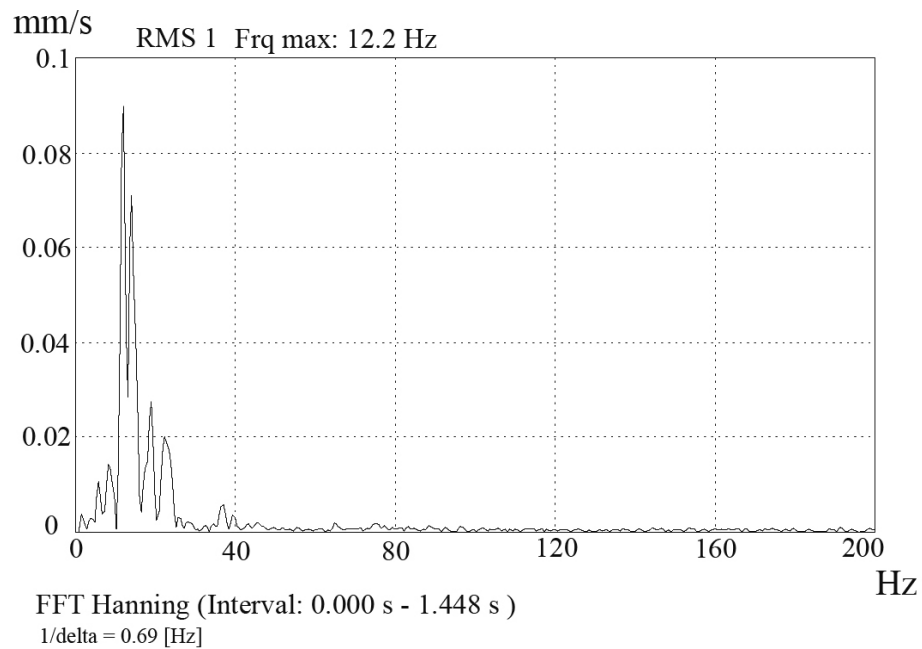
Vrednost dominantne frekvencije na dijagramu frekvencija neprekidnog, sinusoidalnog signala, očitava se kao maksimalna vrednost koja odgovara RMS (srednje kvadratnoj vrednosti (*en. root-mean square - RMS*)) vrednosti nivoa signala. Ako signal sadrži dve ili više sinusoidalne komponente sa različitim frekvencijama, moguće je odrediti njihove relativne amplitude na FFT spektru. FFT analiza daje spektar frekvencija iste jedinice kao i signal. Na slikama 4-12, 4-13, 4-14 prikazane su dominantne frekvencije vertikalnih komponenti brzine oscilovanja tla izmerenih pri miniranjima 07.08.2010, 23.08. 2010. i 14.09. 2010. godine na mernom mestu MM1 (Prilog 4).



Slika 4-12. Dominantna frekvencija vertikalne komponente brzine oscilovanja tla izmerene pri miniranju 07.08.2010. god. u 13:05 h

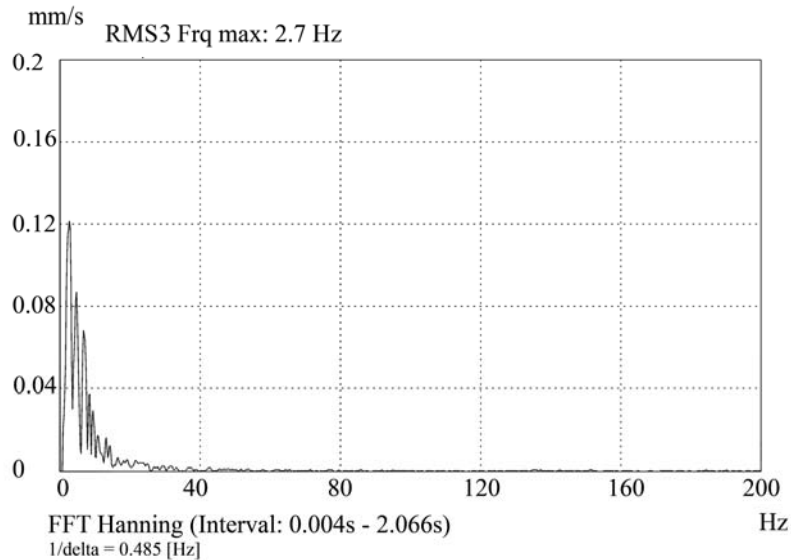


Slika 4-13. Dominantna frekvencija vertikalne komponente brzine oscilovanja tla izmerene pri miniranju 23.08.2010.god. u 13:42 h



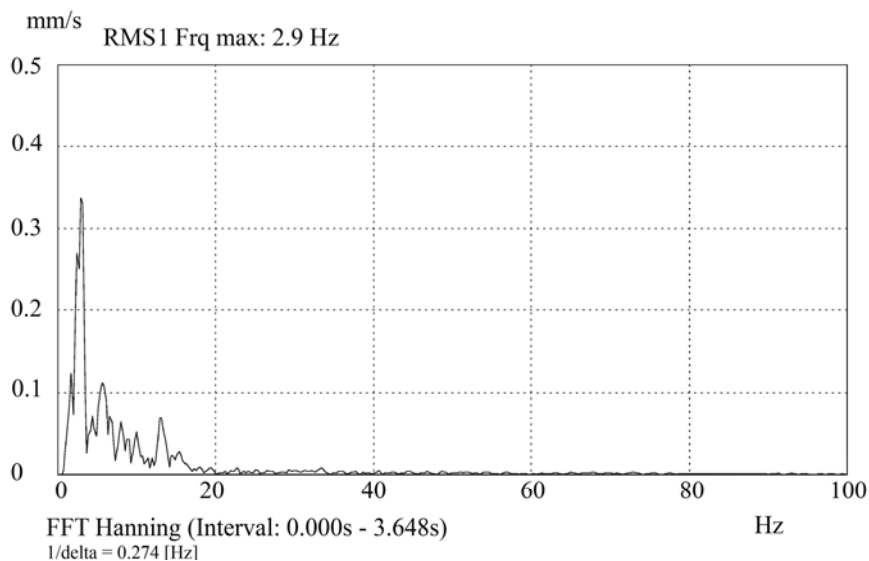
Slika 4-14. Dominantna frekvencija vertikalne komponente brzine oscilovanja tla izmerene pri miniranju 14.09.2010. god. u 13:19 h

Na slici 4-15 je prikazana dominantna frekvencija transverzalne komponente brzine oscilovanja tla izmerene pri zemljotresu 03.11.2010. god u 01h 57min 3s na mernom mestu MM1 (Prilog 4).



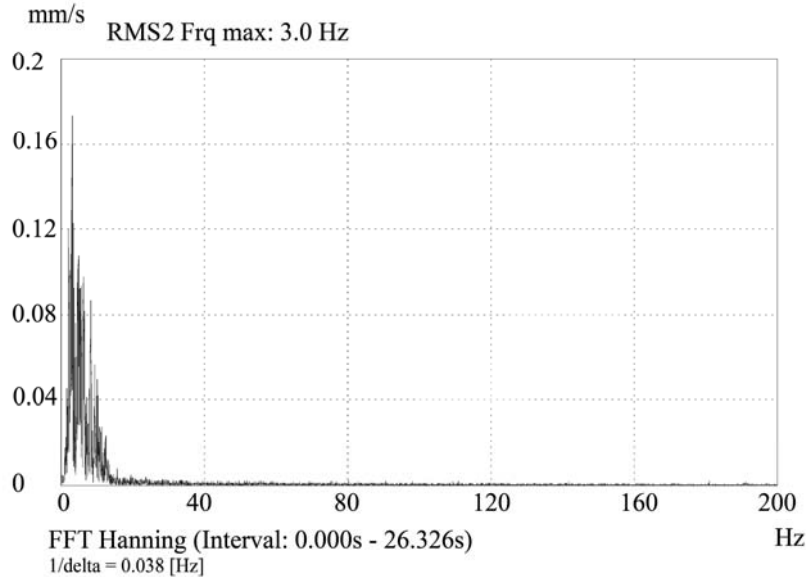
*Slika 4-15. Dominantna frekvencija transverzalne komponente brzine oscilovanja tla izmerene pri zemljotresu 03.11.2010. god. u 01h 57min 3s*

Dominantna frekvencija vertikalne komponente brzine oscilovanja tla izmerene pri zemljotresu 03.11.2010.god u 01h 57min 9s na mernom mestu MM1 (Prilog 4), prikazana je na slici 4-16.



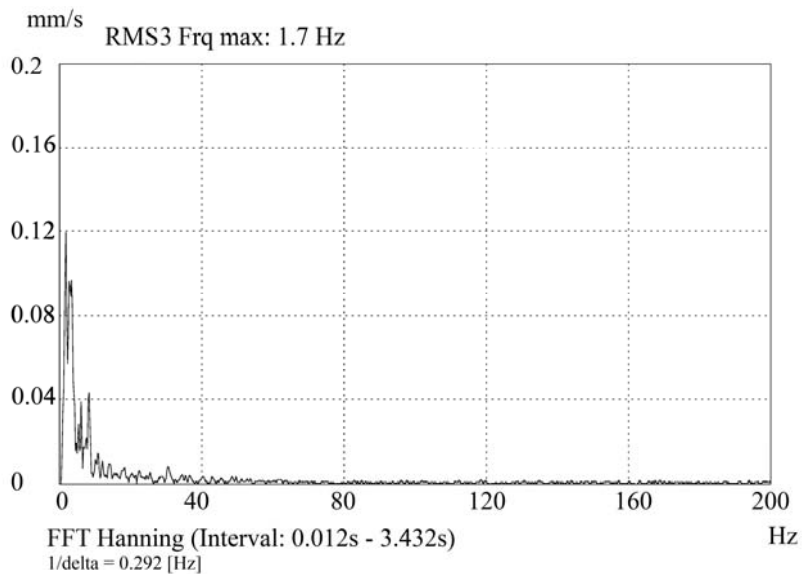
*Slika 4-16. Dominantna frekvencija vertikalne komponente brzine oscilovanja tla izmerene pri zemljotresu 03.11.2010. god. u 01h 57min 9s*

Na slici 4-17 je prikazana dominantna frekvencija longitudinalne komponente brzine oscilovanja tla izmerene pri zemljotresu 03.11.2010. godine u 01h 57min 29s na mernom mestu MM11, (Prilog 4).



*Slika 4-17. Dominantna frekvencija longitudinalne komponente brzine oscilovanja tla izmerene pri zemljotresu 03.11.2010. godine u 01h 57min 29s*

Na slici 4-18 prikazana je dominantna frekvencija transverzalne komponente brzine oscilovanja tla izmerene pri zemljotresu 03.11.2010. godine u 01h 57min 59s na mernom mestu MM11 (Prilog 4).

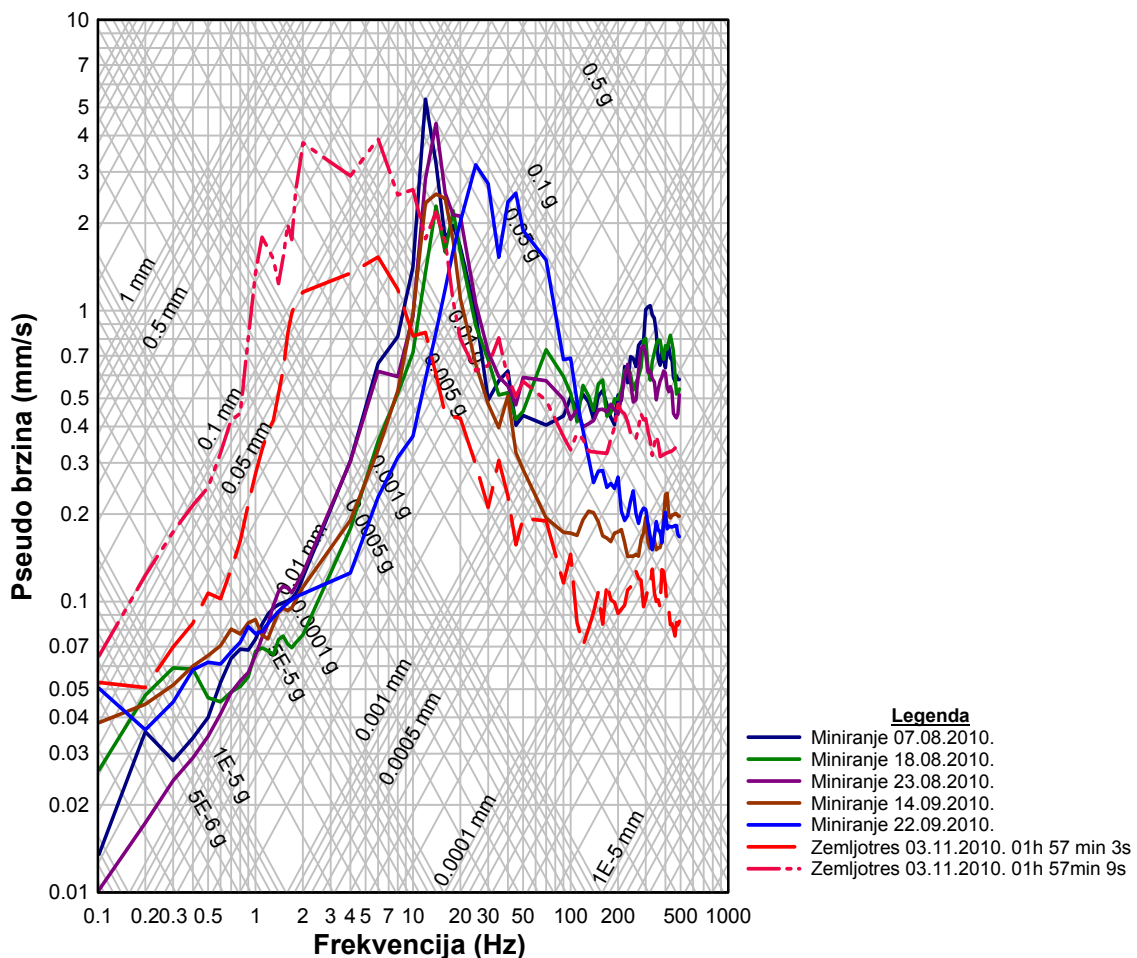


*Slika 4-18. Dominantna frekvencija transverzalne komponente brzine oscilovanja tla izmerene pri zemljotresu 03.11.2010. godine u 01h 57min 59s*

### 4.3 IZRAČUNAVANJE SPEKTRA ODZIVA

Za dobijanje spektra odziva objekta primenjena je SDF analiza, gde se polazi od pretpostavke da se objekat može predstaviti kao jedan ili više jednostavnih sistema masa–opruga, slično sistemima sa jednim stepenom slobode. Spektar odziva se izračunava na osnovu velosigrama izmerenih brzina oscilovanja. Poznavanjem ili pretpostavkom prirodne frekvencije sistema, amplituda odziva se očitava direktno sa grafika spektra odziva.

Na slici 4-19 prikazani su spektri odziva pri potresima od miniranja i zemljotresa, dobijeni na osnovu velosigrama sa mernog mesta MM1 (Prilog 4) pri prigušenju 3% od kritičnog, izračunati primenom softvera NUVIB [98], grafički predstavljeni primenom softvera DPlot [99].



Slika 4-19. Spektri odziva pri potresima od miniranja i zemljotresa, ( $\beta = 3\%$ )

Kriva spektra odziva, prikazana na slici 4-19, pri miniranju 07.08.2010. god. u 13.05 h. dobijena je na osnovu velosigrama vertikalne komponente brzine oscilovanja. Minska

serija se sastojala od 62 minske bušotine sa minskim punjenjima bez razdvajanja, a iniciranje je vršeno NONEL sistemom sa usporenjem površinskih konektora 25 ms i 42 ms i bušotinskim usporenjem 500 ms. Maksimalna količina eksploziva po intervalu usporenja iznosila je 330 kg, dok su potresi registrovani na mernom mestu udaljenom 1425 m od minskog polja (MM1, Prilog 4). Vertikalna komponenta brzine oscilovanja je bila maksimalna od tri komponente oscilovanja i iznosila je 0.66 mm/s (slika 4-2), dok je dominantna frekvencija dobijena FFT analizom iznosila 12.7 Hz (slika 4-12).

Kriva spektra odziva pri miniranju 18.08.2010. u 14.21 h dobijena je na osnovu velosigrama vertikalne komponente brzine oscilovanja. Maksimalna količina eksploziva po intervalu usporenja iznosila je 300 kg, dok je rastojanje između minskog polja i mernog mesta MM1 (Prilog 4) iznosilo 1347 m. Minska serija se sastojala od 43 minske bušotine, a iniciranje je vršeno NONEL sistemom sa usporenjem površinskih konektora 25 ms i 42 ms i bušotinskim usporenjem 500 ms. Vertikalna komponenta brzine oscilovanja je bila maksimalna od tri komponente oscilovanja i iznosila je 0.49 mm/s (slika 4-3), dok je dominantna frekvencija dobijena FFT analizom iznosila 14.1 Hz.

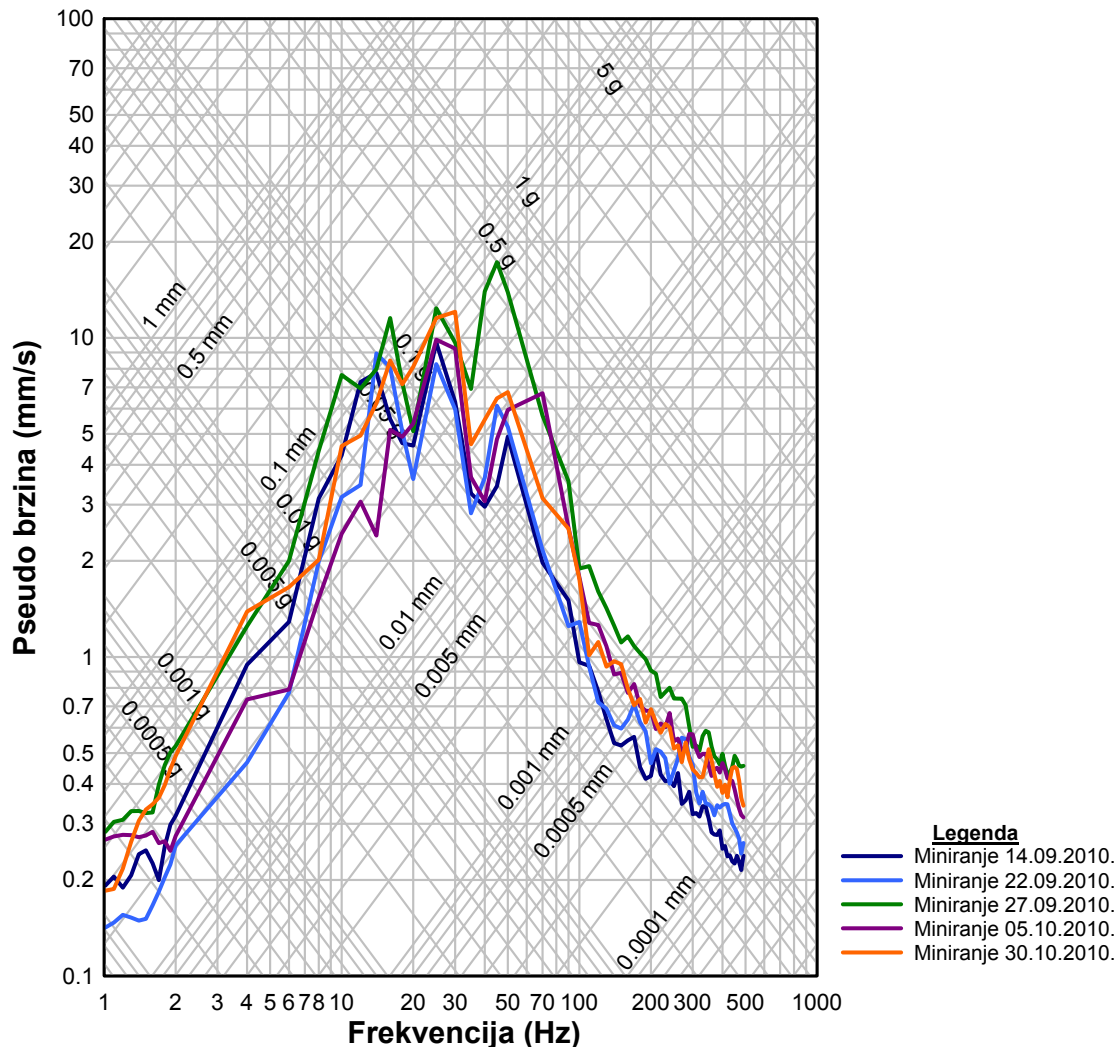
Kriva spektra odziva, prikazana na slici 4-19, pri miniranju 23.08.2010. u 13.42 h dobijena je na osnovu velosigrama vertikalne komponente brzine oscilovanja. Maksimalna količina eksploziva po intervalu usporenja iznosila je 300 kg, dok je rastojanje između minskog polja i mernog mesta MM1 (Prilog 4) iznosilo 1285 m. Minska serija se sastojala od 45 minskih bušotina sa minskim punjenjima bez razdvajanja, a iniciranje je vršeno NONEL sistemom. Vertikalna komponenta brzine oscilovanja je bila maksimalna od tri komponente oscilovanja i iznosila je 0.70 mm/s (slika 4-4), dok je dominantna frekvencija dobijena FFT analizom iznosila 13.6 Hz (slika 4-13).

Kriva spektra odziva pri miniranju 14.09.2010. u 13:19 h (slika 4-19) dobijena je na osnovu velosigrama vertikalne komponente brzine oscilovanja. Maksimalna količina eksploziva po intervalu usporenja iznosila je 360 kg, dok je rastojanje između minskog polja i mernog mesta MM1 (Prilog) iznosilo 1364 m. Minska serija se sastojala od 47 minskih bušotina sa minskim punjenjima bez razdvajanja, a iniciranje je vršeno NONEL sistemom. Vertikalna komponenta brzine oscilovanja je bila maksimalna od tri komponente oscilovanja i iznosila je 0.60 mm/s (slika 4-5), dok je dominantna frekvencija dobijena FFT analizom iznosila 12.2 Hz (slika 4-14).



Kriva spektra odziva pri miniranju 22.09.2010. u 11:52 h dobijena je na osnovu velosigrama vertikalne komponente brzine oscilovanja. Maksimalna količina eksploziva po intervalu usporenja iznosila je 420 kg, dok je rastojanje između minskog polja i mernog mesta MM1 (Prilog ) iznosilo 1465 m. Minska serija se sastojala od 46 minske bušotine sa minskim punjenjima bez razdvajanja, a iniciranje je vršeno NONEL sistemom. Vertikalna komponenta brzine oscilovanja je bila maksimalna od tri komponente oscilovanja i iznosila je 1.0 mm/s, dok je dominantna frekvencija dobijena FFT analizom iznosila 27.3 Hz.

Na slici 4-20 prikazani su spektri odziva dobijeni na osnovu velosigrama izmerenih potresa od miniranja sa mernog mesta MM3 (Prilog 4) pri prigušenju 3% od kritičnog.



Slika 4-20. Spektri odziva pri potresima od miniranja, ( $\beta = 3\%$ )

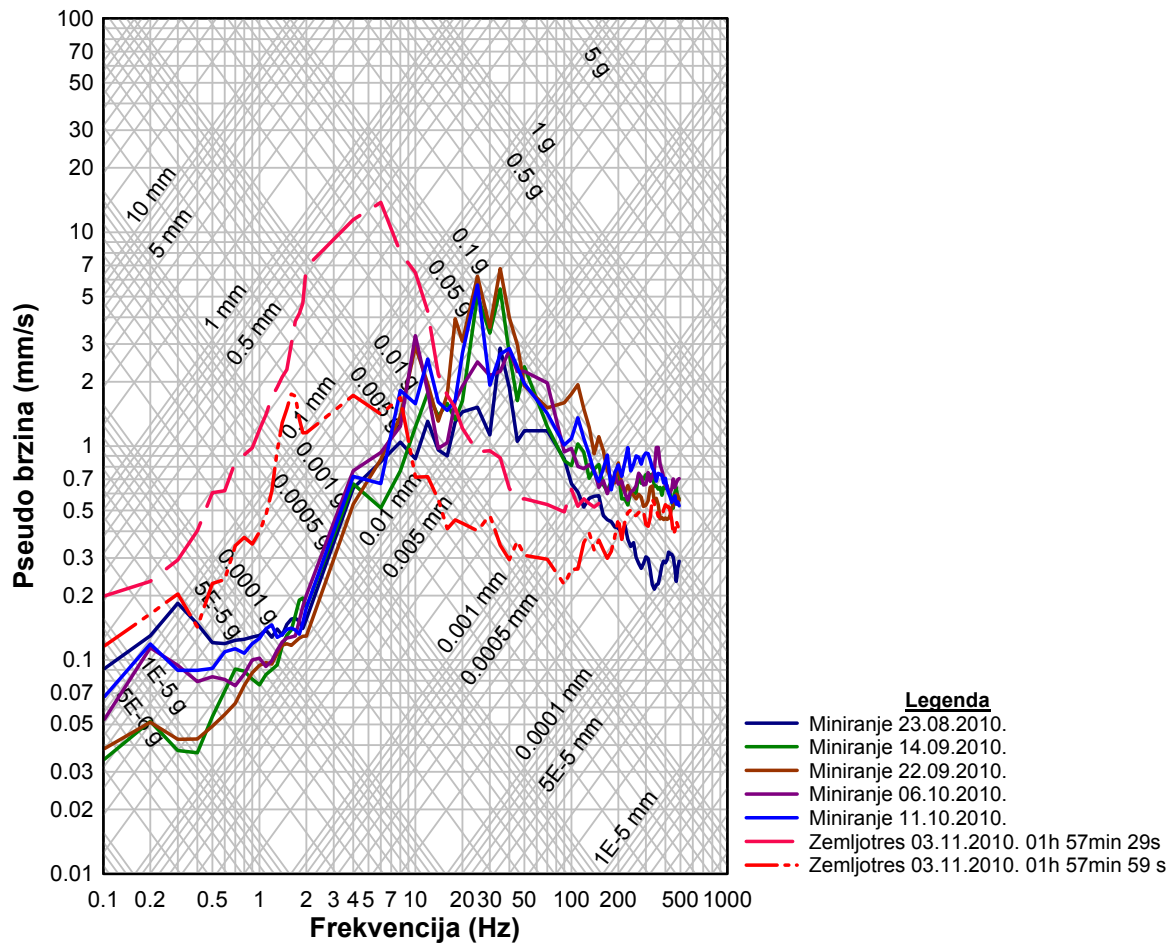
U Tabeli 4-2 prikazane su maksimalne količine eksploziva po intervalu usporenja  $Q$  (kg), rastojanja od minskih polja do mernog mesta  $r$  (m), maksimalne brzine oscilovanja

$V_{max}$  (mm/s), izmerene frekvencije za maksimalne komponente brzine oscilovanja  $f$  (Hz) i izračunate dominantne frekvencije dobijene FFT analizom  $f_d$  (Hz) za navedena miniranja. Minska punjenja su inicirana NONEL sistemom sa usporenjima između svake minske bušotine. Broj bušotina u minskoj seriji dat je u Tabeli 4-2.

Tabela 4-2. Podaci miniranja za merno mesto MM3, (Prilog 4)

Datumi miniranja	Maksim. količina eksp. po int. usp. Q (kg)	Rastoj. r (m)	Maksim. brzina oscilovanja $V_{max}$ (mm/s)	Frekv. f (Hz)	Dominant. frekvenc. $f_d$ (Hz)	Broj buš. u minskoj seriji
14.09.10.	360	520	2.53	20.8	14.6	47
22.09.10.	420	550	1.85	29.3	14.8	46
27.09.10.	360	435	3.57	31.7	13.1	24
05.10.10.	360	445	2.70	21.2	27.2	43
30.10.10.	360	454	2.88	22.7	29.9	66

Na slici 4-21 su prikazani spektri odziva pri potresima od miniranja i zemljotresa dobijeni na osnovu velosigrama sa mernog mesta MM11 (Prilog 4) pri prigušenju 3% od kritičnog.



Slika 4-21. Spektri odziva pri potresima od miniranja i zemljotresa ( $\beta = 3\%$ )

U Tabeli 4-3 su prikazane maksimalne količine eksploziva po intervalu usporenja  $Q$  (kg), rastojanja od minskih polja do mernog mesta  $r$  (m), maksimalne brzine oscilovanja  $V_{max}$  (mm/s), izmerene frekvencije za maksimalne komponente brzine oscilovanja  $f$  (Hz) i izračunate dominantne frekvencije dobijene FFT analizom  $f_d$  (Hz) za navedena miniranja. Minska punjenja su inicirana NONEL sistemom sa usporenjima između svake minske bušotine. Broj bušotina u minskoj seriji dat je u Tabeli 4-3. Podaci izmerenih brzina oscilovanja tla i frekvencija pri zemljotresu dati su u Tabeli 4-3.

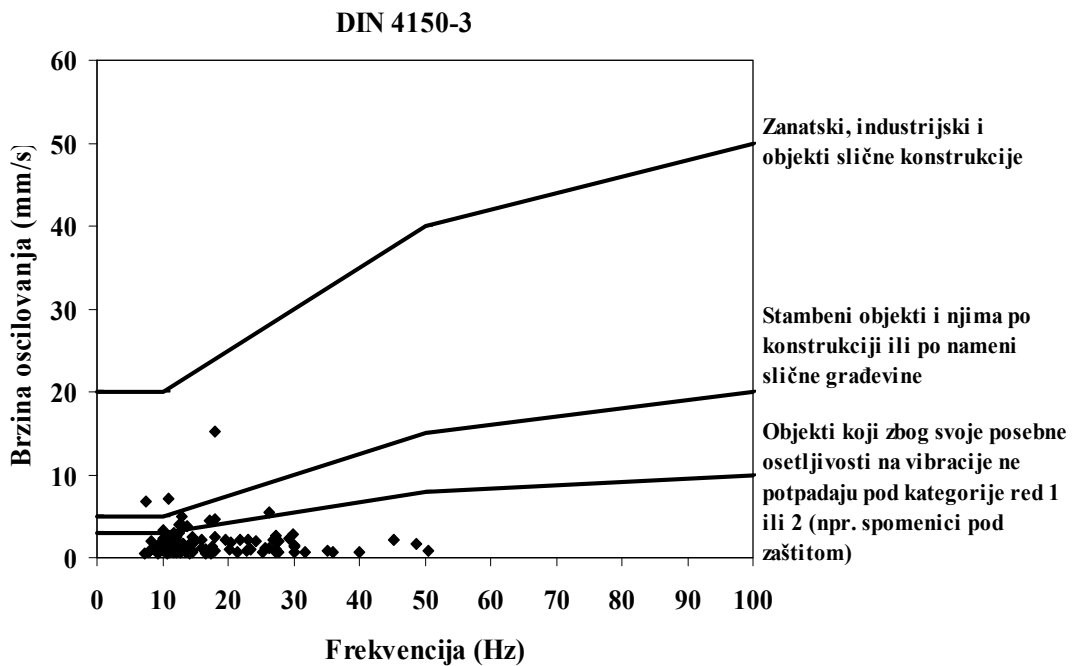
Tabela 4-3. Podaci miniranja za merno mesto MM11 (Prilog 4)

Datumi miniranja	Maksim. količina eksp. po int. usp. Q (kg)	Rastoj. r (m)	Maksim. brzina oscilovanja $V_{max}$ (mm/s)	Frekv. f (Hz)	Dominant. frekvenc. $f_d$ (Hz)	Broj buš. u minskoj seriji
23.08.10.	300	755	0.74	12.2	11.0	45
14.09.10.	360	755	0.88	26.5	35.1	47
22.09.10.	420	705	1.11	33.5	25.6	46
06.10.10.	360	715	0.90	10.4	10.7	37
11.10.10.	420	770	0.94	22.7	23.4	30

Kako je prikazano na slikama 4-19, 4-20, 4-21, najširi spektar odziva na dijagramu je dobijen pri potresima uzrokovanih zemljotresom koji se dogodio 03. novembra 2010.god. sa epicentrom u Kraljevu izmerenim na mernim mestima MM1, MM11, (Prilog 4). Poređenje spektara odziva na potrese uzrokovane zemljotresom i miniranjem, pokazuje da miniranje daje spektar odziva koji je sličniji harmonijskim oscilacijama u odnosu na zemljotres, koji daje širok opseg frekvencija. Takođe, dominantna frekvencija vibracija uzrokovanih miniranjem je veća u odnosu na one nastale usled zemljotresa. Maksimalni relativni pomeraji spektra odziva na potrese od zemljotresa su najveći upravo za male dominantne frekvencije ulaznih vibracija. Uzimajući u obzir istraživanja [64,65] koja su pokazala da se prirodne frekvencije skeletne konstrukcije objekta kreću u opsegu od 5 do 10 Hz, potresi od zemljotresa mogu predstavljati veliku opasnost po oštećenje objekata, zbog činjenice da objekat može biti u rezonanciji sa vibracijama uzrokovanih zemljotresom.

#### 4.4 ANALIZA IZMERENIH PODATAKA PRIMENOM STANDARDA DIN 4150-3

Ukupno 117 podataka o vrednostima maksimalnih brzina oscilovanja i frekvencija, dobijenim kontinuiranim praćenjem potresa od miniranja na svim mernim mestima tokom 63 miniranja, uneti su na dijagram standarda DIN 4150-3 [61] koji se primenjuje za procenu dejstva kratkotrajnih vibracija od miniranja na objekte različitih kategorija.



Slika 4-22. Prikaz svih podataka na dijagramu dozvoljenih brzina oscilovanja propisanih standardom DIN 4150-3 [61]

Kao što se može videti sa slike 4-22, većina podataka zadovoljava standard DIN 4150-3 [61] za stambene objekte. U tri slučaja vrednosti su prešle propisanu granicu. U prvom slučaju maksimalna brzina oscilovanja iznosila je 15.2 mm/s, izmerena na mernom mestu MM5 (Prilog 4) blizu konture površinskog kopa na rastojanju 85 m od minskog polja, pri maksimalnoj količini eksploziva po intervalu usporenja od 390 kg. Analizirana frekvencija je iznosila 17.9 Hz. Druga dva slučaja, zabeležena su na mernom mestu MM9, (Prilog 4) koje se takođe nalazi na rastojanju manjem od najbližeg stambenog objekta MM3 (Prilog 4).

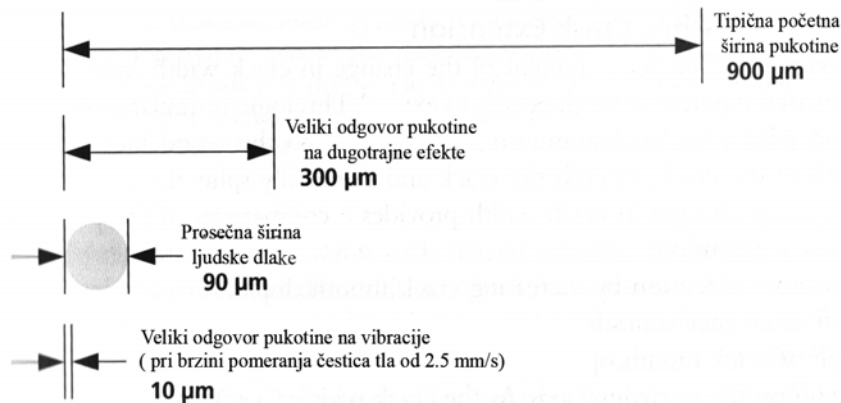
#### **4.5 KONTINUIRANO PRAĆENJE POMERAJA PUKOTINA NA STAMBENOM OBJEKTU U CILJU POREĐENJA UTICAJA MINIRANJA I VREMENSKIH PRILIKA**

Seizmički potresi predstavljaju jedan od štetnih efekata miniranja i često glavni uzrok žalbi vlasnika objekata, lociranih u neposrednoj blizini površinskih kopova, koji najčešće tvrde da je pojava pukotina na objektu posledica upravo miniranja. Napredak u senzorskoj tehnologiji i kompjuterizovanom prikupljanju podataka omogućava danas da se strah od pojave pukotina usled vibracija ukloni time što će se direktno meriti reagovanje same pukotine [100].

Merenje reakcije pukotine bi trebalo da upotpuni, ali ne i zameni merenje potresa tla, upravo zbog činjenice da su svi trenutni propisi i standardi zasnovani na brzini oscilovanja i frekvenciji. Merenje reakcije pukotine ima nekoliko prednosti. Prvo, reakcija pukotina koje su vidljive vlasnicima direktno se mere. Drugo, potresi tla su komplikovani, pa se time izbegava njihova kompleksna veza sa oštećenjem. Treće i najvažnije, reakcija pukotina na vibracije se može uporediti sa onim uticajima koji su dugotrajni i koji se ne mogu lako registrovati kao što su vremenske promene [100].

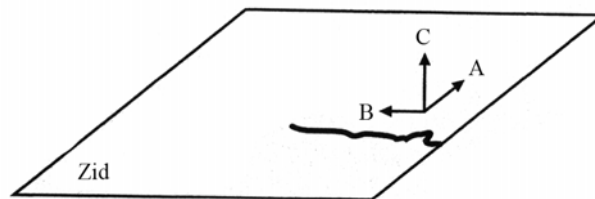
Razlika između pojava koje nastaju kao posledica delovanja uzroka vibracione prirode i vremenskih promena je u tome što se efekti vremenskih promena pojavljuju sporije i bez buke. Zato ih vlasnici objekata ne mogu detektovati. Ali uz pomoć novih tehnika merenja reakcije pukotina, vlasnicima objekata je omogućeno da sagledaju pomeraje pukotina usled vremenskih promena. Takođe mogu da vide da pojava pukotina na objektu usled vibracija ne mora biti toliko velika kao prilikom delovanja "tihih uzročnika" koji su produkt ekstremnih promena vlage, temperature, jakih vetrova i oluja, suša i dr. Iako su navedeni efekti nečujni i ne mogu se primetiti, ne znači da njihovo delovanje ne može biti aktivno i veliko.

Mikrometerska reakcija (pomeraj) pukotina danas se mere autonomnim sistemima za daljinsko praćenje pukotina. Reakcija pukotine se meri u smislu pomeraja pukotine tj. promene širine pukotine, a ne ukupne širine. Obzirom da se meri promena širine, a ne apsolutna širina, reakcija pukotine može biti pozitivna i negativna. [101]. Reakcija pukotine je obično veoma mala, ali može dostići nekoliko prečnika ljudske dlake kao je prikazano na slici 4-23.



Slika 4-23. Poređenje reakcije pukotine na potrese od miniranja i dugotrajne vremenske efekte [100]

Pod odzivom ili pomerajem pukotine podrazumeva se otvaranje i zatvaranje pukotine. Meri se upravno na pravac pružanja pukotine u ravni zida ili plafona na kome se nalazi pukotina i to je pravac *A* na slici 4-24.

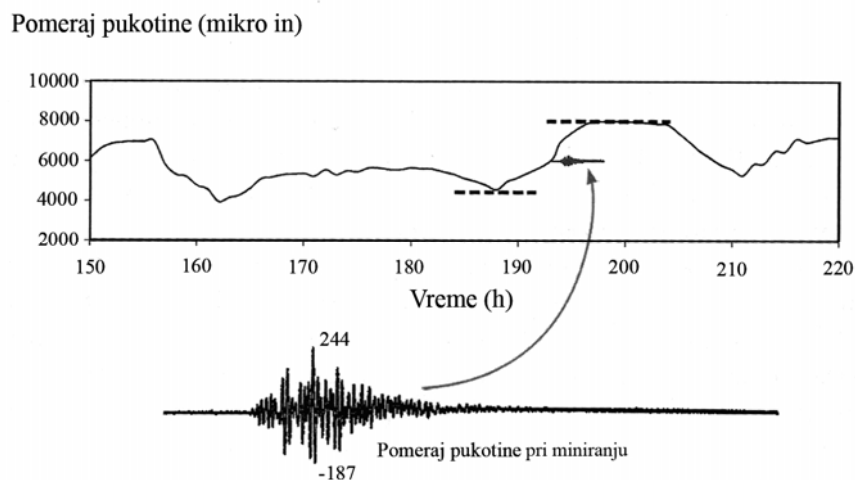


Slika 4-24. Pravac *A* je pravac otvaranja i zatvaranja pukotine [100]

Iako je poželjno da se mere sva tri pravca mogućeg odziva (*A*, *B*, *C*), merenja su pokazala da je jedan pravac dominantan. Mikrometarski senzori pomeraja moraju da reaguju na pomeraje reda veličine 1/10 mikrometara. Loger mora da ima mogućnost da beleži ovu promenu odgovora senzora automatski. Drugim rečima, sistem mora da ima sposobnost da istovremeno meri kako dinamičke ili prelazne tako i dugotrajne pomeraje pukotine, bez ljudske intervencije. Na sreću pomeraj pukotine usled vibracionog pobuđivanja objekta traje samo nekoliko sekundi i može se registrovati između merenja dugotrajnih pomeraja pukotine.

#### 4.5.1 Pomeraj pukotine usled vibracija od miniranja

Odgovor pukotine na vibracije od miniranja traje od 1/10 sekunde do nekoliko sekundi. Tačno je da pukotine reaguju na vibracije od miniranja, ali taj odgovor se javlja samo dok postoji potres tla, on nije stalan i mnogo je manji od dugotrajnih odgovora pukotine na klimatske promene [100]. Na slici 4-25 prikazano je poređenje reakcije pukotine na potrese tla od miniranja i na dnevne promene temperature. Čak i u ovom slučaju gde su potresi veliki (10 mm/s), reakcija pukotine iznosi 1/6 reakcije na dnevne promene temperature.



Slika 4-25. Poređenje reakcije pukotine na potrese tla od 10 mm/s uzrokovane miniranjem i reakcije na dnevne promene temperature [102]

#### 4.5.2 Pomeraj pukotina usled svakodnevnih kućnih aktivnosti

Praćenje pomeraja pukotine usled svakodnevnih kućnih aktivnosti veoma je važno, jer može biti i veće od pomeraja pukotine nastalih od potresa uzrokovanim miniranjem. Reagovanje pukotine na kućne aktivnosti i spoljne efekte može da se podudara sa onim nastalim od vibracija, pa ovo istovremeno delovanje daje kombinaciju zapisa pomeraja, gde je potrebno razdvojiti od kog izvora je koji zapis. U tabeli 4-4 prikazano je poređenje nivoa naprezanja nastalih usled kućnih aktivnosti, dnevnih promena temperature/vlažnosti i miniranja. Hodanje i udaranje petom izvođeno je na podu blizu instrumenata montiranih na okolnim zidovima. Vrata su zalupljena blizu zida na kome je montiran instrument za merenje naprezanja.



Tabela 4-4. Poređenje nivoa naprezanja nastalih usled kućnih aktivnosti, dnevnih promena i usled miniranja [76]

Pojave koje uzrokuju opterećenje	Mesto <sup>a</sup>	Mikronaprezanje ( $\mu$ in/in)	Odgovarajući stepen miniranja <sup>b</sup>	
			in/s	mm/s
Dnevne promene temperature/vlažnosti	K <sub>1</sub>	149	1.2	30.0
	K <sub>2</sub>	385	3.0	76.0
<b>Kućne aktivnosti</b>				
Hodanje	S <sub>2</sub>	9.1	0.03	0.8
Lupanje petom	S <sub>2</sub>	16.0	0.03	0.8
Skakanje	S <sub>2</sub>	37.3	0.28	7.1
Lupanje vratima	S <sub>1</sub>	48.8	0.50	12.7
Zakucavanje eksera	S <sub>12</sub>	88.7	0.88	22.4

<sup>a</sup> K<sub>1</sub> i K<sub>2</sub> postavljeni su preko spoja dve gipsane ploče

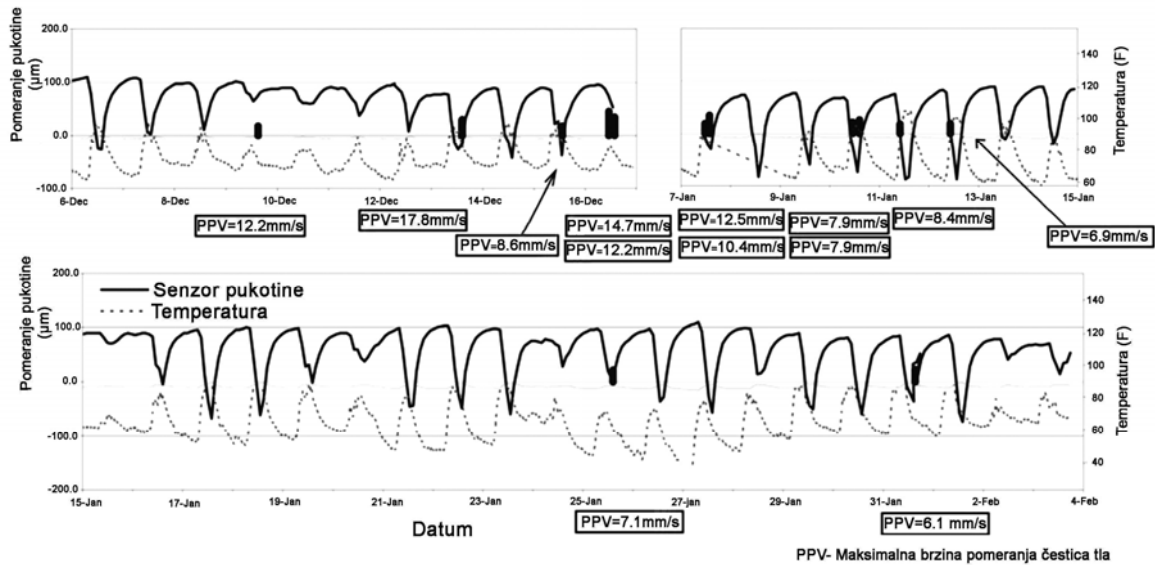
<sup>b</sup> Ekvivalent miniranja zasnovan je prema liniji naprezanja u odnosu na vibraciju tla.

Kao što se može videti iz tabele 4-4, dnevne promene temperature i vlažnosti uzrokuju velika naprezanja u materijalu zida, koja mogu da dovedu do pojave pukotina u malteru, bez uticaja drugih faktora [48].

#### 4.5.3 Pomeraj pukotine usled dugotrajnih klimatskih efekata

Razvoj kompjuterizovanog, digitalnog snimanja, automatskog, daljinskog upravljanja i temperaturno kalibrisanih/kompenzovanih senzora, omogućilo je dugotrajno praćenje pomeraja pukotina uzrokovano klimatskim efektima sa velikom brzinom uzorkovanja i visokom rezolucijom, što ranije nije bilo moguće. Iako pomeraji pukotina praćeni tokom dužeg perioda veoma variraju, uvek postoje ciklični pomeraji uzrokovani dnevnom promenom temperature, nedeljni pomeraji uzrokovani promenom vlažnosti/temperature i sezonski pomeraji pukotina [100]. Slika 4-26 prikazuje poređenje pomeraja pukotine usled vibracija od miniranja (vertikalni barovi) sa cikličnim dugotrajnim pomerajima pukotine usled temperaturnih promena (puna linija). Kako je prikazano na slici 4-26, puna linija pomeraja pukotine u korelaciji je sa tačkastom linijom koja pokazuje promenu temperature. Brzina oscilovanja tla usled miniranja (*en. peak particle velocity - PPV*) od 17.8 mm/s u pravcu paralelnom zidu sa pukotinom, koja prelazi dozvoljenu granicu za 40% (12.7 mm/s dozvoljena brzina

oscilovanja tla pri miniranju u Americi), nije uzrokovala pomeraj pukotine veći od onih nastalih dnevnim promenama temperature [103].



Slika 4-26. Poređenje pomeraja pukotine usled potresa od miniranja (vertikalni barovi) sa cikličnim dugotrajnim pomerajima pukotine (puna linija) usled temperaturnih promena (tačkasta linija) [103]

#### 4.5.4 Analiza kontinuiranog daljinskog merenja pomeraja pukotina na stambenom objektu u neposrednom okruženju površinskog kopa "Veliki Krivelj" RTB Bor

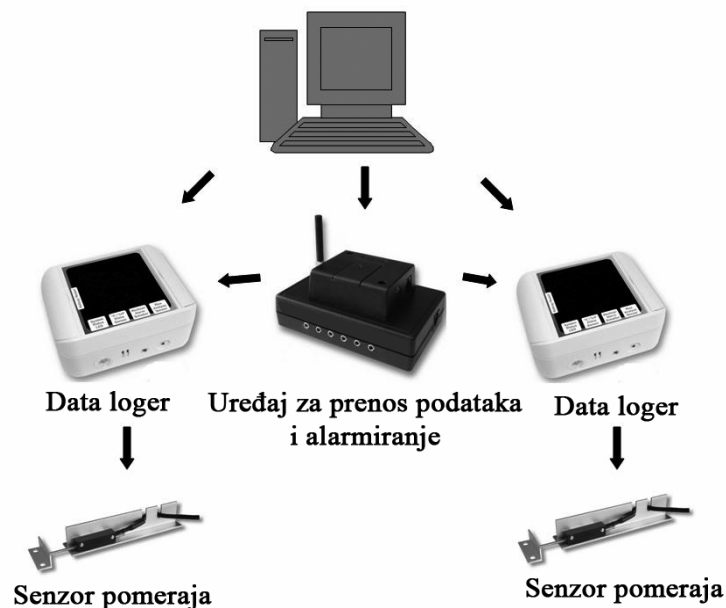
##### 4.5.4.1 Metodologija merenja

Pomeraj pukotine je praćen kontinualno u periodu od početka avgusta do početka novembra 2010. godine. Uporedo sa merenjem pomeraja pukotina, merena je istovremeno spoljna i unutrašnja temperatura i relativna vlažnost vazduha. Interval uzorkovanja za temperaturu, relativnu vlažnost vazduha i pomeraj pukotina je bio u opsegu 1 do 2 min. Za vreme pojedinih miniranja, pomeraj pukotina je meren direktno sa intervalom uzorkovanja od 1 s i aktiviranim brzim MIN/MAX režimom rada, gde sistem beleži pomeraje pukotine 100 puta u sekundi i ispisuje svake sekunde minimalne i maksimalne vrednosti pomeraja unutar tog intervala. Da bi se dobio zapis pomeraja pukotine od svakodnevnih kućnih aktivnosti, izvršena su merenja pomeraja pukotina sa intervalom uzorkovanja od 1 s i aktiviranim MIN/MAX režimom rada pri koračanju neposredno pored senzora 1 i 2, kao i pri zalupljivanju vrata, da bi se utvrdio koliki je njihov uticaj na pomeraj pukotina.

Uporedo sa praćenjem pomeraja pukotina, mereni su i potresi od miniranja pomoću dva četvorokanalna instrumenta za merenje vibracija [96] mernog opsega  $\pm 250$  mm/s i opsega frekvencije 2-250 Hz. Triger oba instrumenta za merenje vibracija bio je podešen na 0.5 mm/s. Kombinacija instrumenata je omogućila beleženje potresa od miniranja, kao i pomeraja pukotina usled dnevnih promena temperature/relativne vlažnosti vazduha i vibracija od miniranja. Rastojanja od instrumenata do minskih polja su određivana primenom GPS sistema. Od 18. avgusta 2010. godine, samo drugi instrument za merenje potresa je merio konstantno vibracije od miniranja tokom celog perioda praćenja.

#### 4.5.4.2 Karakteristike sistema za daljinsko kontinualno praćenje pukotina na objektu

Sistem (slika 4-27) primenjen za daljinsko kontinuirano praćenje pukotina na objektu sastojao se od dva data logera, dva senzora pomeraja i uređaja za slanje podataka putem e-mejla i alarmiranje putem SMS ili e-mejla [104].



Slika 4-27. Sistem za daljinsko kontinualno praćenje pomeraja pukotina na objektu [105]

Senzori su montirani na zid zavrtnjevima upravno na duži pravac pukotine u ravni zida. Povezivanje senzora sa data logerima vršeno je putem kablova.



Slika 4-28. Senzor pomeraja [104]

U samim data loggerima se nalaze senzori za merenje temperature i relativne vlažnosti vazduha. Povezivanjem logera sa kompjuterom i podešavanjem parametara merenja softverom proizvođača, sistem automatski počinje da meri, a logeri beleže podatke po unapred zadatom vremenskom intervalu. Osim što ima normalan režim rada, sistem se može podesiti tako da beleži minimalne i maksimalne vrednosti temperature, relativne vlažnosti i pomeraja pukotine unutar zadatog intervala. Time se broj čitanja u istom intervalu znatno povećava. Pri ovom režimu rada i intervalu merenja od 1 s, sistem analizira pomeraje pukotine 100 puta u sekundi i ispisuje minimalne i maksimalne pomeraje po unapred zadatom intervalu.



Slika 4-29. Data logger sa ugrađenim sensorima za merenje temperature i relativne vlažnosti vazduha [104]

Osim podešavanja parametara rada logera (mernog intervala, automatskog početka i kraja vremenskog intervala merenja ili cikličnog beleženja, podešavanja trigera alarma za obaveštavanje putem SMS-a i e-mejla, min/max režim beleženja i dr.), softver ima niz mogućnosti grafičke obrade podataka, eksportovanja u druge aplikativne programe i sl.

Karakteristike data logera [104]:

- Memorija data logera do 64 000 čitanja
- Merni i interval beleženja (1 s do 24 h) koji se podešava PC softverom
- Opseg merenja senzora pomeraja: 10 mm (+/- 5mm)
- Rezolucija senzora pomeraja: 2.5 $\mu$ m
- Mogućnost aktiviranja min/max režima rada sa frekvencijom beleženja do 100 Hz
- Opseg merenja senzora temperature vazduha: - 20°C do 70°C
- Opseg merenja senzora vlage: 0% rH do 100 % rH
- Rezolucija senzora temperature i vlage: 0.1 °C/0.1 %rH
- Tačnost merenja senzora temperature: <0.4 °C na 20 °C
- Tačnost merenja senzora vlage: <3.0 %rH između 20 % rH i 80 % rH
- Po izboru: senzori temperature i vlage < 1.8 % rH i < 0.3 °C
- Dugotrajna stabilnost senzora temperature : <0.04 °C godišnje
- Dugotrajna stabilnost senzora vlage: <0.5 % rH godišnje

U okviru sistema se nalazi i uređaj za prenos podataka i alarmiranje, slika 4-30. Uređaj je bežičan, potpuno automatizovan sa mogućnošću slanja podataka i alarmiranja. Kada je uređaj povezan sa data logerima, prikupljeni podaci se šalju e-mejlom u vidu atačmenta po unapred podešenom intervalu slanja. Uređaj takođe ima dva nezavisna ulaza alarma, koji u slučaju problema rada sistema šalju upozorenje SMS-om ili e-mejlom.



Slika 4-30. Uređaj za prenos podataka i alarmiranje [104]

Podešavanje uređaja (učestalost prenosa podataka, brojevi mobilnih telefona na koje se šalju upozorenja putem SMS-a, e-mejl adrese na koje se šalju upozorenja i podaci, SMTP (*en. Simple Mail Transfer Protocol*) server koji će se primenjivati i dr. ) vrši se softverom.

Karakteristike uređaja za prenos podataka i alarmiranje [104]

- Potpuno automatizovano slanje izmerenih podataka putem e-mejla
- Datum i vreme početka slanja kao i učestalost slanja potpuno podesivi
- Mogućnost povezivanja dva data logera
- Dva ulaza za e-mejl i/ili SMS alarm

#### 4.5.4.3 Opis objekta i lokacija instrumenata

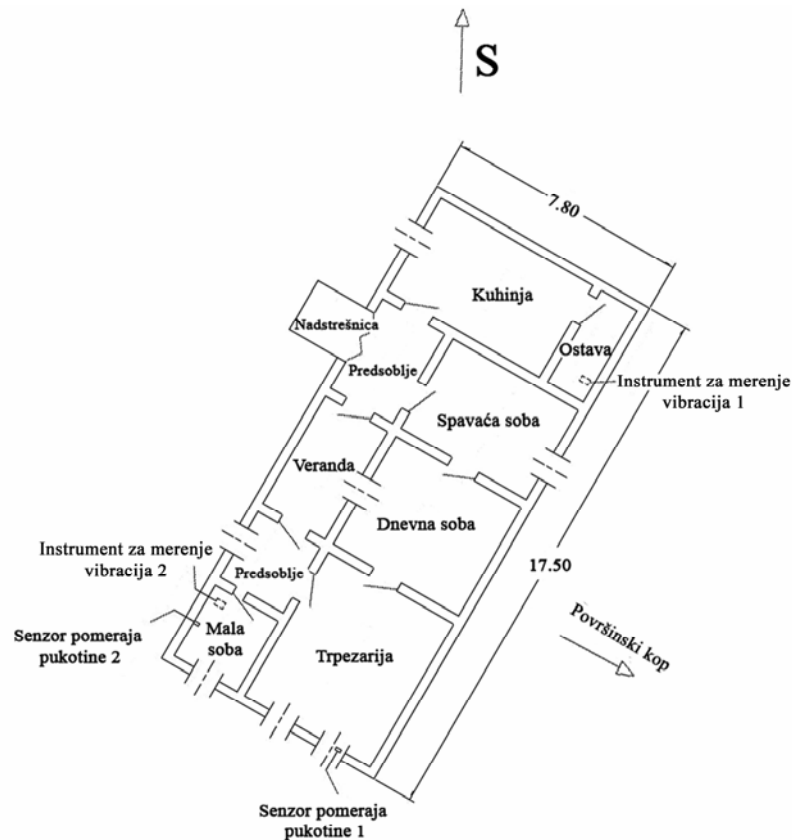
Objekat na kome je praćen pomeraj pukotina, prikazan na slici 4-31. Nalazi se na 950 m od završne konture površinskog kopa "Veliki Krivelj", RTB Bor. Izgrađen je 1932. godine, a dograđen 1960. godine. Stambeni objekat je dimenzija u osnovi 7.80 x 17.50 m. Zidovi podruma su izrađeni od lomljenog kamena, a zidovi prizemlja od pune opeke. Međuspratna konstrukcija iznad podruma je od drvenih greda, a ispuna od opeke ozidane u svodu između greda. Plafon iznad prizemlja je karatavan. Krovna konstrukcija je drvena sa četvorovodnim krovom, a krovni pokrivač crep.



*Slika 4-31. Stambeni objekat na kome je praćen pomeraj pukotina [106]*

Daljinsko kontinualno praćenje pomeraja pukotina na objektu vršeno je istovremeno sa merenjem potresa pomoću dva višekanalna instrumenta za merenje vibracija

(seizmografa) tipa Vibraloc švedskog proizvođača ABEM [96]. Položaji senzora pomeraja i instrumenata za merenje vibracija prikazani su na slici 4-32. Jedan mikrometerski senzor pomeraja je postavljen na pukotinu zida ispod prozora trpezarije na jugozapadnoj strani kuće (pukotina 1), dok je drugi postavljen na pukotinu zida sobice na zapadnoj strani kuće (pukotina 2). Jedan instrument za merenje potresa od miniranja postavljen je ispod ostave na istočnoj strani kuće (MM2, Prilog 4), dok je drugi postavljen na podu podruma u zapadnom delu kuće (MM1, Prilog 4).



*Slika 4-32. Položaji senzora za merenje pukotina i instrumenata za merenje potresa na objektu [105]*

Na slikama 4-33 i 4-34 prikazani su položaji i način postavljanja senzora pomeraja na pukotini 1 i 2.



Slika 4-33. Pukotina 1 sa spoljne strane kuće (levo) i položaj senzora na pukotini 1 (desno)[105]



Slika 4-34. Pukotina 2 sa spoljne strane kuće (levo) i položaj senzora na pukotini 2 (desno)

Način postavljanja instrumenata za merenje potresa prikazani su na slici 4-35.

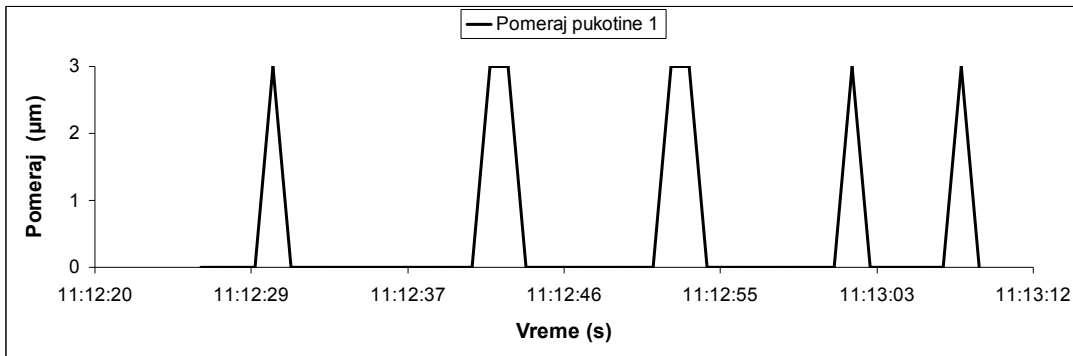


Slika 4-35. Način postavljanja instrumenata za merenje vibracija

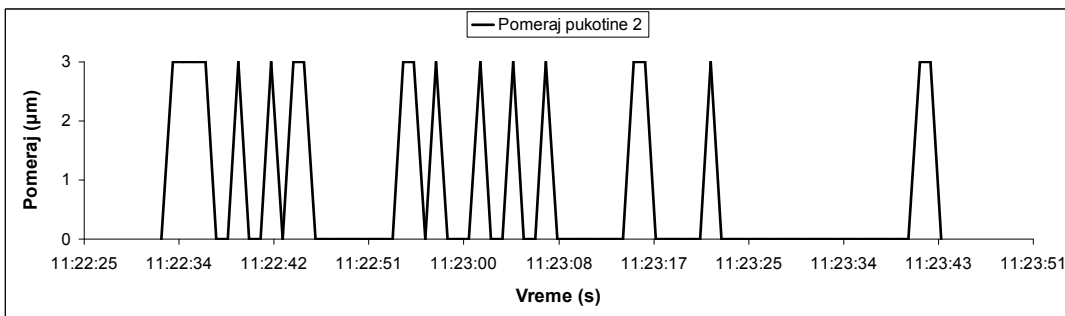


#### 4.5.4.4 Rezultati merenja pomeraja pukotina od miniranja i vremenskih prilika

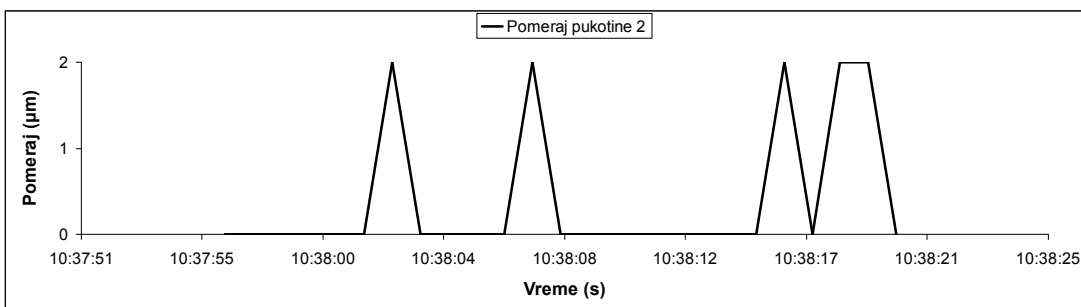
Izmereni pomeraji pukotina pri svakodnevnim kućnim aktivnostima prikazani su na slici 4-36, 4-37 i 4-38. Kako je prikazano na graficima, najveća zabeležena vrednost pomeraja pukotina iznosi 3  $\mu\text{m}$ .



Slika 4-36. Pomeraj pukotine 1 dobijen merenjem prilikom koračanja neposredno pored senzora 1



Slika 4-37. Pomeraj pukotine 2 dobijen merenjem prilikom koračanja neposredno pored senzora 2



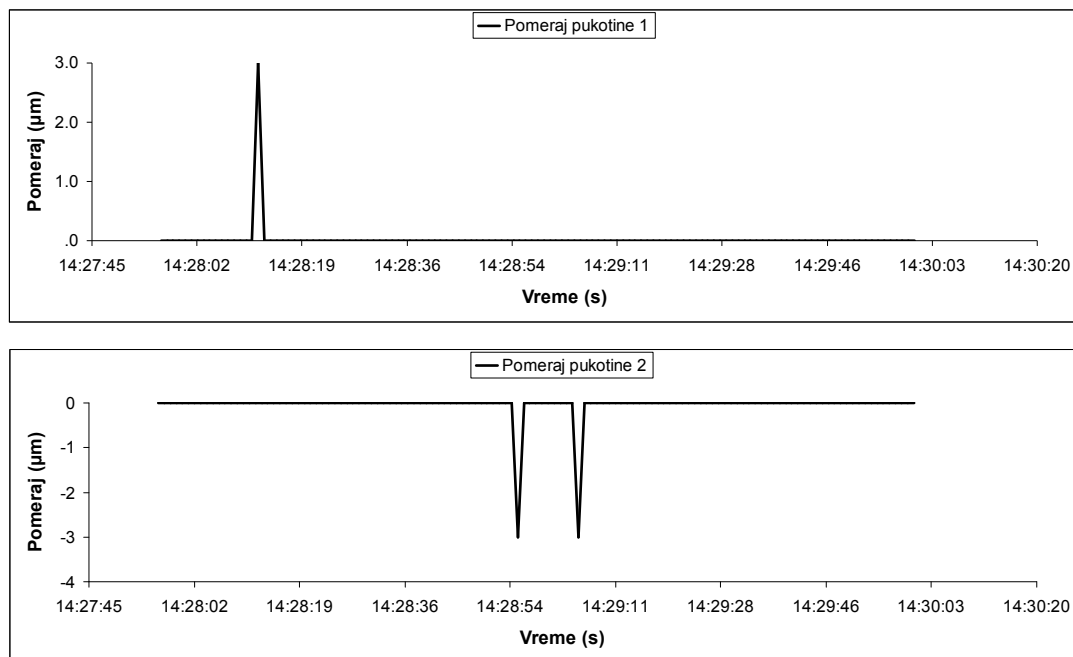
Slika 4-38. Pomeraj pukotine 2 dobijen prilikom zalupljivanja vrata u sobici

Pri miniranjima na površinskom kopu "Veliki Krivelj" izvedenim 04., 06 i 07. 08. 2010. za date maksimalne količine eksploziva po intervalu usporenja i rastojanja, instrumenti za merenje vibracija 1 i 2 izmerili su vrednosti prikazane u Tabeli 4-5.

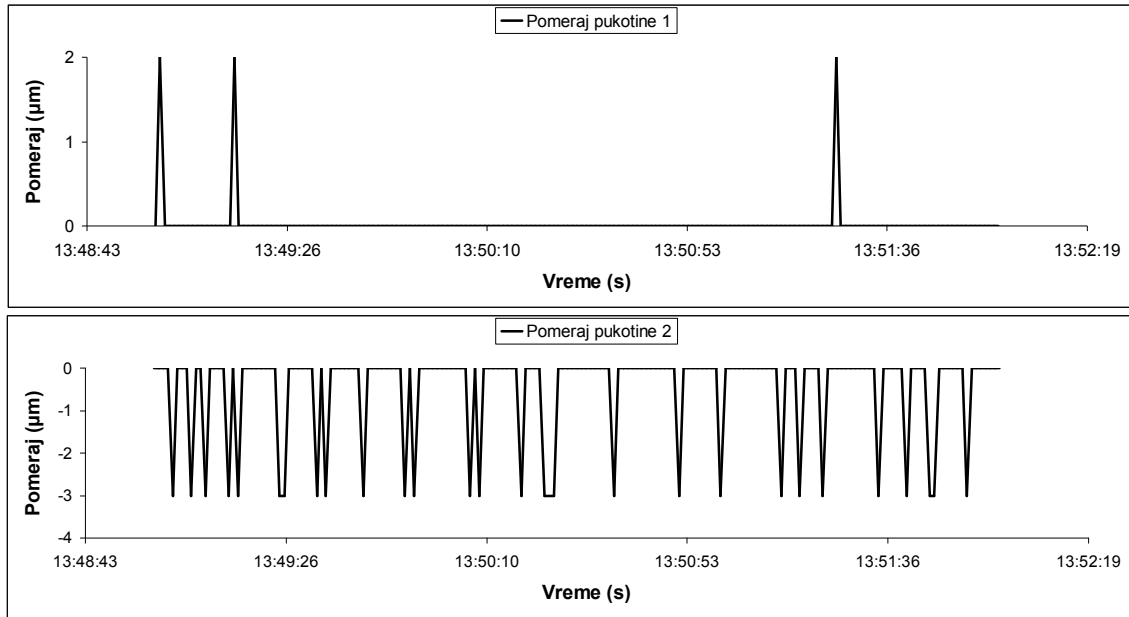
Tabela 4-5. Izmerene vrednosti maksimalne brzine oscilovanja i frekvencije pri miniranjima izvedenim 04., 06 i 07. 08. 2010.

	Datum i vreme miniranja	Instrument za merenje vibracija 1	Instrument za merenje vibracija 2	Frekvencija (Hz)
Količina eksploziva po intervalu usporenja $Q$ (kg)	04.08. 14:28 h	330	330	
	06.08. 13:49 h	270	270	
	07.08.13:05 h	330	330	
Rastojanje $r$ (m)	04.08. 14:28 h	1415	1415	
	06.08. 13:49 h	1247	1248	
	07.08.13:05 h	1425	1425	
Brzina oscilovanja $V$ (mm/s)	04.08. 14:28 h	< 0.5	< 0.5	-
	06.08. 13:49 h	< 0.5	< 0.5	-
	07.08.13:05 h	< 0.5	0.66	12.8
Brzina oscilovanja $L$ (mm/s)	04.08. 14:28 h	< 0.5	< 0.5	-
	06.08. 13:49 h	< 0.5	< 0.5	-
	07.08. 13:05 h	< 0.5	0.41	10.6
Brzina oscilovanja $T$ (mm/s)	04.08. 14:28 h	< 0.5	< 0.5	-
	06.08. 13:49 h	< 0.5	< 0.5	-
	07.08.13:05 h	< 0.5	0.36	29.3

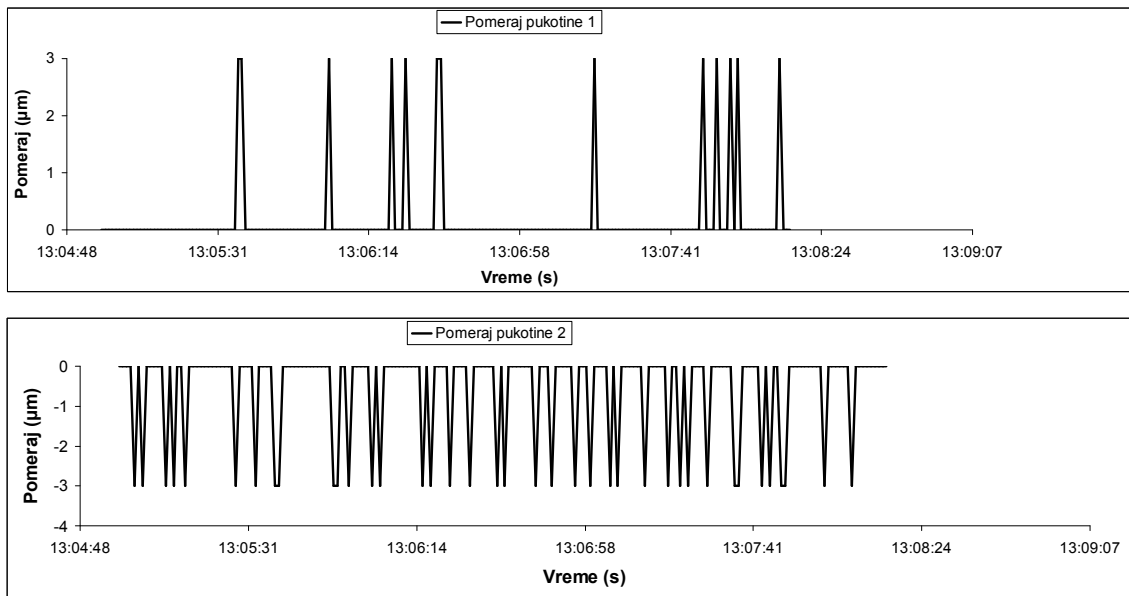
Na slikama 4-39, 4-40 i 4-41 prikazani su grafici pomeraja obe pukotine izmereni pri navedenim miniranjima.



Slika 4-39. Pomeraji pukotine 1 i 2 pri miniranju izvedenom 04.08.2010. u 14:28 h [105]



Slika 4-40. Pomeraj pukotine 1 i 2 pri miniranju izvedenom 06.08.2010. u 13:49h [105]

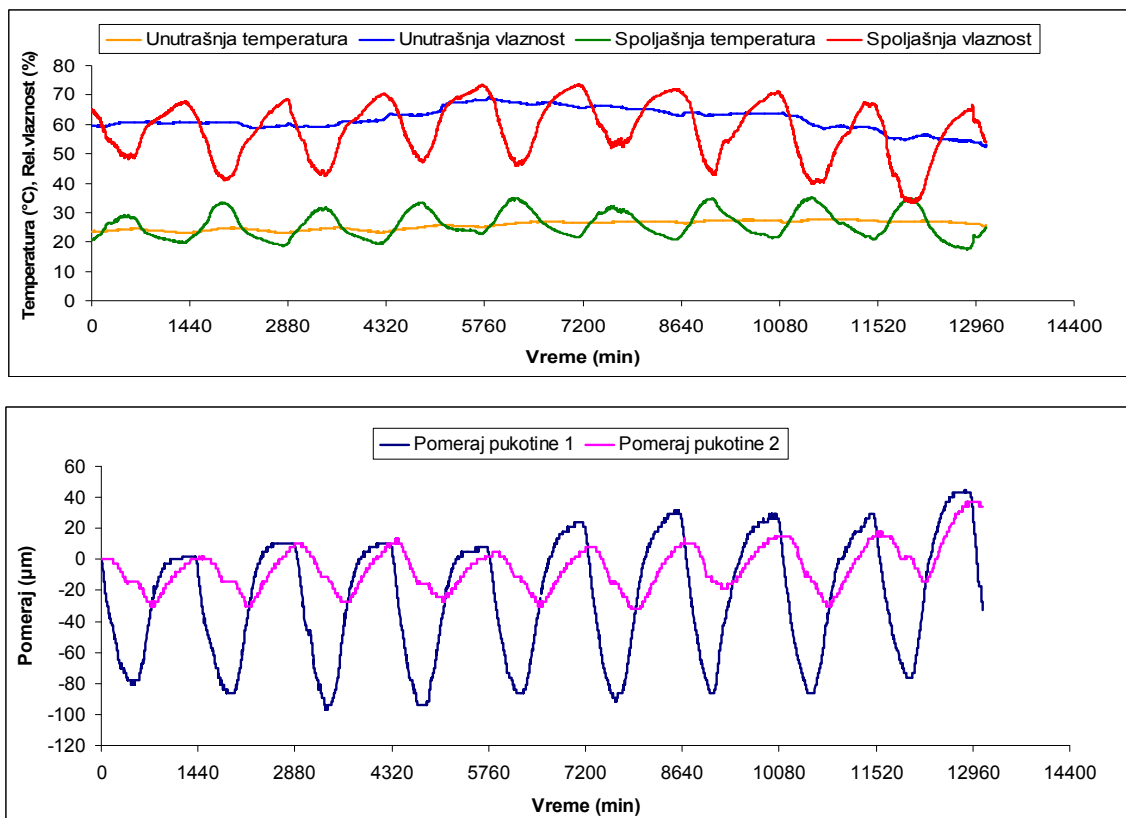


Slika 4-41. Pomeraj pukotine 1 i 2 pri miniranju izvedenom 07.08.2010. u 13:05 h [105]

Kako je prikazano na grafiku na slici 4-39, pomeraj pukotina 1 i 2 pri miniranju izvedenom 04.08.2010. iznosio je 3  $\mu\text{m}$ . Pomeraj pukotine 1 pri miniranju izvedenom 06.08.2010. iznosio je 2  $\mu\text{m}$ , a pukotine 2, 3  $\mu\text{m}$ , što se može videti sa grafika na slici 4-40. Pri miniranju 07.08.2010. pomeraj pukotina 1 i 2 iznosio je 3  $\mu\text{m}$ , (slika 4-41).

Znatno veći pomeraj obe pukotine, izazvale su razlika u promeni temperature i relativne vlažnosti. Tokom celokupnog vremena osmatranja, vrednosti spoljne temperature i relativne vlažnosti varirale su između  $-2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  i  $35.7^{\circ}\text{C}$  i  $31.9\%$  i  $88.3\%$  redom. Prosečna spoljna temperatura je iznosila  $16.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a relativna vlažnost vazduha  $63.4\%$ . U ovom periodu unutrašnjost objekta nije grejana.

Na slici 4-42, prikazan je grafik pomeraja pukotina 1 i 2 mereni kontinualno sa intervalom uzorkovanja od 1 min od 09.08.2010 u 7:31 h do 18.08.2010. u 9:51 h. Vremenski period na x osi podeljen je sa 1440 min odnosno 24 h. Za merenje pomeraja pukotine, aktiviran je brzi režim rada MIN/MAX, gde su u svakoj minuti ispisivane minimalne i maksimalne vrednosti pomeraja pukotina sa frekvencijom uzorkovanja 100 uzoraka na 1s. Prikupljanje izmerenih podataka vršeno je daljinski putem e-mejla. Kako je prikazano na slici 4-42, pukotine znatno više reaguju na dnevne promene temperature i relativne vlažnosti. Pozitivne vrednosti pomeraja pukotina na grafiku pokazuju skupljanje pukotine, a negativne širenje. Pomeraji pukotina prate dnevne oscilacije temperature i relativne vlažnosti.



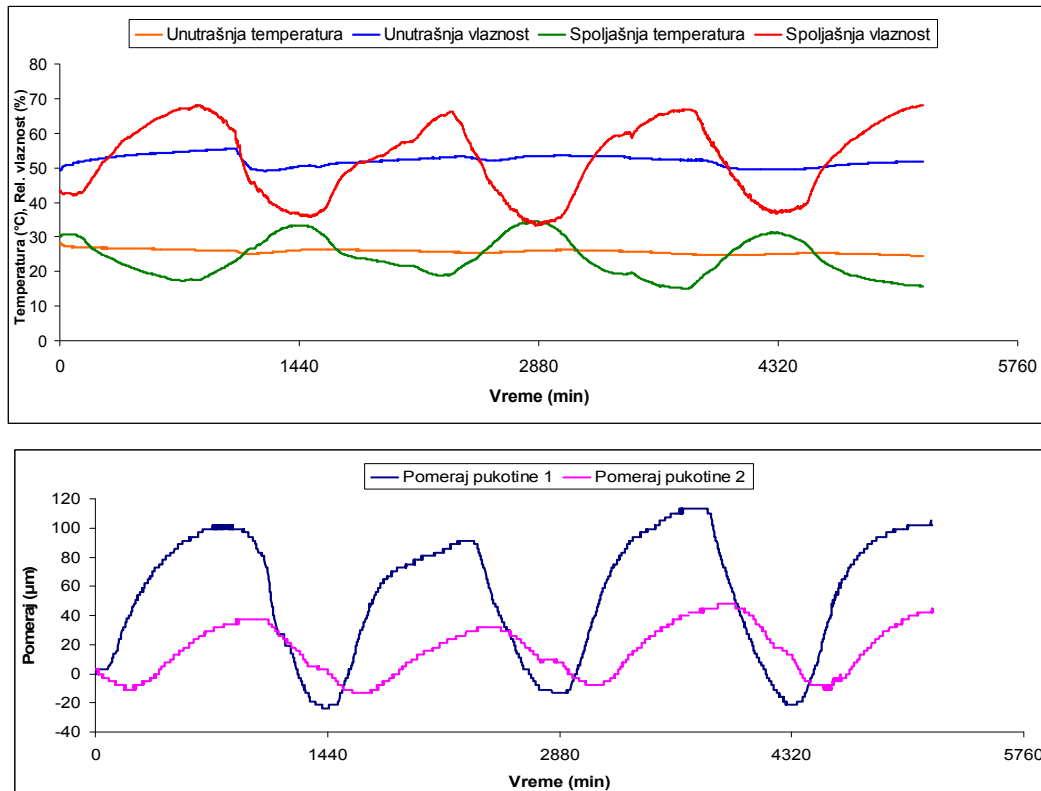
Slika 4-42. Pomeraj pukotine 1 i 2 usled dnevnih varijacija spoljašnje i unutrašnje temperature i vlažnosti za period od 9.08.2010 u 7:31 h do 18.08.2010. u 9:51 h [105]

Na grafiku se zapaža određeni fazni pomeraj u vremenu između promene temperature/relativne vlažnosti i pomeraja pukotine, gde maksimumi pomeraja pukotine kasne u odnosu na maksimume temperature. Ta razlika je posledica položaja senzora pomeraja pukotina na unutrašnjoj strani spoljašnjih zidova, pa je određeno vreme potrebno da se materijal zida zagreje pri čemu počinje da se širi (skupljanje pukotine) odnosno ohladi kada se skuplja (širenje pukotine).

U ovom periodu maksimalno skupljanje pukotine 1 zabeleženo je od 14.08.2010 u 15:28 h do 15.08.2010. u 05:32 h od 124  $\mu\text{m}$ , a najveće širenje od 15.08. 2010. u 06:32h do 15.08.2010. u 15:30 h od 116  $\mu\text{m}$ . Pukotina 2 je manje reagovala na ove promene, verovatno iz razloga što je više u hladovini tokom dana, dok se pukotina 1 nalazi pod direktnim uticajem Sunčevog zagrevanja i ispod prozora, gde je veće naprezanje. Maksimalno skupljanje pukotine 2 zabeleženo je od 17.08.2010. u 20:12 h do 18.08.2010. u 04:48 h od 54  $\mu\text{m}$ , a najveće širenje od 16.08.2010. u 08:44 h do 16.08.2010. u 19:12 h od 45  $\mu\text{m}$ .

U periodu od 09.08.2010. do 18.08. 2010. izvedena su samo dva miniranja 18.08.2010. u 14:21 h i 14:25 h, gde su pomeraji pukotina direktno mereni sa intervalom uzorkovanja od 1 s. Potrese od miniranja merio je samo seizmograf 2, pri čemu je zabeležio maksimalnu brzinu oscilovanja 0.49 mm/s i frekvenciju 19.9 Hz pri miniranju u 14:21 h, gde je maksimalna količina po intervalu usporenja  $Q$  iznosila 300 kg, a rastojanje  $r = 1347$  m. Pri drugom miniranju izvedenom 18.08.2010. u 14:25 h, seizmograf se nije aktivirao, jer je vrednost bila ispod vrednosti trigeru 0.5 mm/s. Maksimalna količina po intervalu usporenja  $Q$  iznosila je 150 kg, a rastojanje  $r = 1824$  m. Prvo miniranje izazvalo je pomeraj samo pukotine 2 od 3  $\mu\text{m}$ , dok kod drugog miniranja nije bilo reakcije kod obe pukotine.

Na slici 4-43, prikazan je pomeraj pukotina 1 i 2 mereni kontinualno sa intervalom uzorkovanja od 1 min od 18.08.2010 u 15:49 h do 22.08.2010. u 6:23 h ujutru.



Slika 4-43. Pomeraji pukotina 1 i 2 usled dnevnih varijacija spoljašnje i unutrašnje temperature i relativne vlažnosti za period od 18.08.2010 u 15:49 h do 22.08.2010. u 6:23 h

Kao što se vidi sa slike 4-43, pomeraji u ovom periodu su bili još izraženiji. Maksimalno skupljanje pukotine 1 zabeleženo je od 20.08.2010. u 15:00 h do 21.08.2010. u 04:25h i iznosilo je 126 µm, a maksimalno širenje od 19.08.2010 u 03:57 h do 19.08.2010. u 15:14 h od 126 µm. Maksimalno skupljanje pukotine 2, zabeleženo je od 20.08.2010. u 20:20 h do 21.08.2010. u 08:12 h od 56 µm, dok je maksimalno širenje zabeleženo od 21.08.2010. u 10:00 h do 21.08.2010. u 19:04 h od 59 µm.

U periodu od 18.08.2010 do 22.08.2010. miniranja su izvedena samo 20.08.2010. pri kojem se instrument za merenje vibracija 2 nije aktivirao.

Od 18.08.2010. seizmograf 2 je ostavljen na istoj poziciji da kontinualno meri potrese od miniranja. Kao i u prethodnim slučajevima trigger je podešen na 0.5 mm/s. U periodu od 18.08.2010. godine do 24.09.2010. seizmograf 2 se aktivirao tri puta i to 23.08.2010. u 13:42 h, 14.09.2010. god u 13:19 h i 22.09.2010. u 11:52 h pri čemu je za date maksimalne količine eksploziva po intervalu usporenja i rastojanja izmerio vrednosti prikazane u Tabeli 4-6.

Tabela 4-6. Izmerene vrednosti brzina oscilovanja i frekvencija pri miniranjima izvedenim 23.08., 14.09 i 22.09.2010.

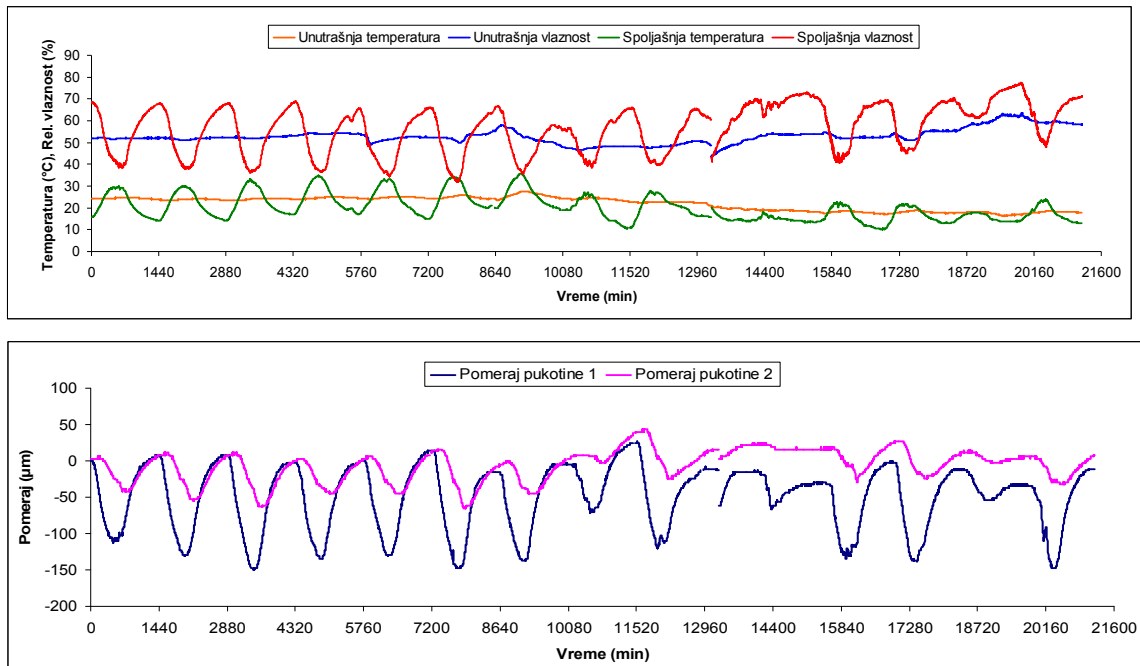
Instrument za merenje vibracija 2	Datum i vreme miniranja	Instrument za merenje vibracija 2	Frekvencija (Hz)
Količina eksploziva po intervalu usporenja $Q$ (kg)	23.08.2010. 13:42 h	300	
	14.09.2010. 13:19 h	360	
	22.09.2010. 11:52 h	420	
Rastojanje $r$ (m)	23.08.2010. 13:42 h	1285	
	14.09.2010. 13:19 h	1364	
	22.09.2010. 11:52 h	1465	
Brzina oscilovanja $V$ (mm/s)	23.08.2010. 13:42 h	0.7	14.2
	14.09.2010. 13:19 h	0.6	13.8
	22.09.2010. 11:52 h	1.0	31.2
Brzina oscilovanja $L$ (mm/s)	23.08.2010. 13:42 h	0.3	12.0
	14.09.2010. 13:19 h	0.2	15.6
	22.09.2010. 11:52 h	0.3	38.3
Brzina oscilovanja $T$ (mm/s)	23.08.2010. 13:42 h	0.4	18.0
	14.09.2010. 13:19 h	0.2	13.5
	22.09.2010. 11:52 h	0.3	33.2

Maksimalni pomeraj pukotine 1 pri miniranju 23.08.2010. u 13:42 h je iznosio 2  $\mu\text{m}$ , dok je pomeraj pukotine 2 iznosio 3  $\mu\text{m}$ . Pri miniranju 14.09.2010. u 13:19 h pomeraj pukotine 1 i 2 je bio isti i iznosio je 3  $\mu\text{m}$ . Prilikom miniranja izvedenog 22.09.2010. u 11:52 h, pomeraj pukotine 1 je bio 3  $\mu\text{m}$ , a pukotina 2 nije reagovala.

Na slici 4-44, prikazan je zapis pomeraja pukotina 1 i 2 mereni kontinualno sa intervalom uzorkovanja od 1 min za period od 22.08.2010 u 6:24:00 h do 06.09.2010. u 5:04:00 h. Maksimalno skupljanje pukotine 1 u periodu od 22.08.2010 do 06.09.2010, zabeleženo je od 24.08.2010. u 16:52:00 h do 25.08.2010. u 05:02:00 h od 147  $\mu\text{m}$ , a najveće širenje pukotine 1 zabeleženo je od 27.08.2010. u 07:20:00 h do 27.08.2010. u 15:10:00 h od 159  $\mu\text{m}$ . Najveće skupljanje pukotine 2 je iznosilo 64  $\mu\text{m}$  i zabeleženo je od 23.08.2010. u 20:13 h do 24.08.2010. u 08:10. h, dok je najveće širenje zabeleženo od 27.08.2010. u 10:39 h do 27.08.2010. u 17:14 h i iznosilo je 77  $\mu\text{m}$ .

U periodu od 22.08.2010 do 06.09.2010. zabeleženi su pomeraji pukotine 1 pri miniranju 24.08.2010. u 14:36 h od 5  $\mu\text{m}$ , a pukotine 2, 2  $\mu\text{m}$ . Pri miniranju 26.08.2010.

u 12:16 h zabeležen je pomeraj pukotine 1 od 6  $\mu\text{m}$ , a pukotine 2, od 3  $\mu\text{m}$ , dok je pri miniranju 28.08.2010. u 12:56 h zabeležen pomeraj pukotine 1 od 5  $\mu\text{m}$ , a pukotine 2, 2  $\mu\text{m}$ . Pri miniranju 29.08.2010. u 11:23 h zabeležen je pomeraj pukotine 1 od 6  $\mu\text{m}$ , a pukotine 2, 2  $\mu\text{m}$ , dok je pri miniranju 30.08.2010. u 13:45 h zabeležen pomeraj pukotine 1 od 3  $\mu\text{m}$ , a pukotine 2, 0  $\mu\text{m}$ . Podaci o vremenima pomeraja pukotina upoređivani su sa vremenima koja su seizmografi zabeležili pri merenju potresa od miniranja, tako da se vodilo računa da zabeleženi pikovi pomeraja pukotina ne budu posledica kućnih aktivnosti ili drugih sličnih uzrok



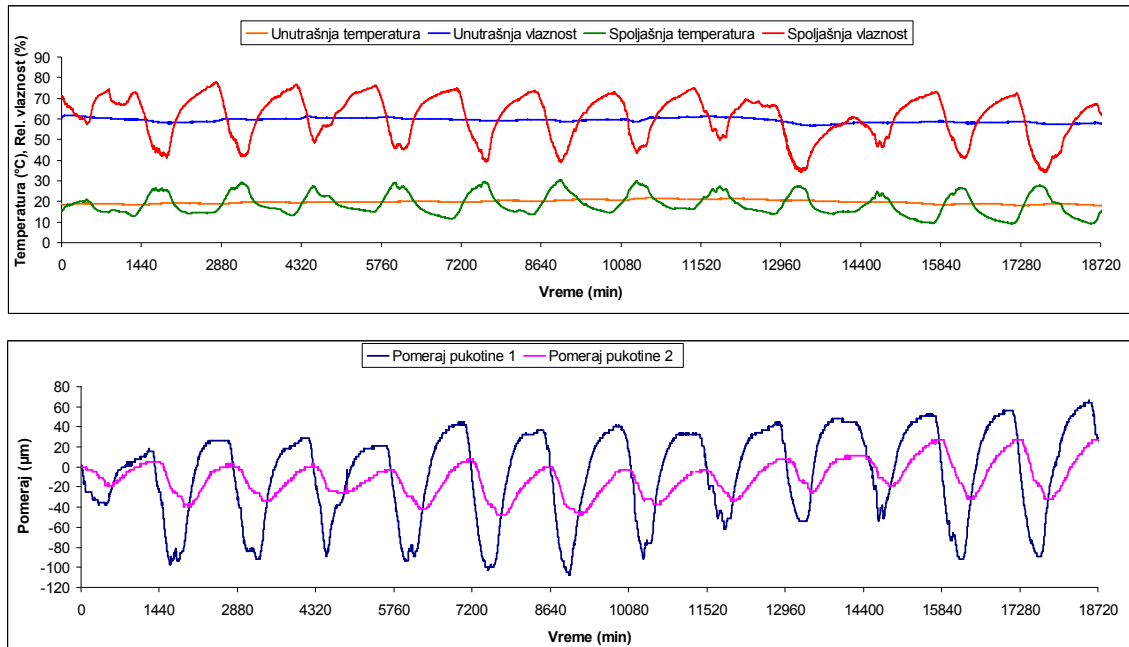
*Slika 4-44. Pomeraji pukotina 1 i 2 usled dnevnih varijacija spoljašnje i unutrašnje temperature i relativne vlažnosti za period od 22.08.2010 u 6:24:00 h do 06.09.2010. u 5:04:00 h [106]*

Na slici 4-45 prikazani su zapisi pomeraja pukotina 1 i 2 za period od 11.09.2010.god. u 9:33 h do 24.09.2010 u 10:56 h. Vremenski intervali od 1440 min na x osi, predstavljaju period od 24 h, za interval uzorkovanja od 1 min. U ovom periodu, zabeleženo je maksimalno skupljanje pukotine 1 od 23.09.2010 u 16:12 h do 24.09.2010. u 05:17 h od 150  $\mu\text{m}$ , a maksimalno širenje od 16.09.2010. u 06:59 h do 16.09.2010. u 14:15 h od 147  $\mu\text{m}$ . Maksimalno skupljanje pukotine 2, zabeleženo je od 22.09.2010. u 17:46 h do 23.09.2010. u 07:38 h i od 23.09.2010. u 19:43 h do 24.09.2010. u 07:38 h i iznosilo je 59  $\mu\text{m}$ . Maksimalno širenje pukotine 2 iznosilo je takođe 59  $\mu\text{m}$  i zabeleženo je u



periodu od 22.09.2010. u 10:12 h do 22.09.2010. u 17:29 h i u periodu od 23.09.2010. u 10:24 h do 23.09.2010. u 17:10 h.

U periodu od 11.09.2010 do 24.09.2010. zabeležen je pomeraj pukotine 1 od 6  $\mu\text{m}$ , a pukotine 2, 3  $\mu\text{m}$  pri miniranju izvedenom 17.09.2010. u 14:22 h.

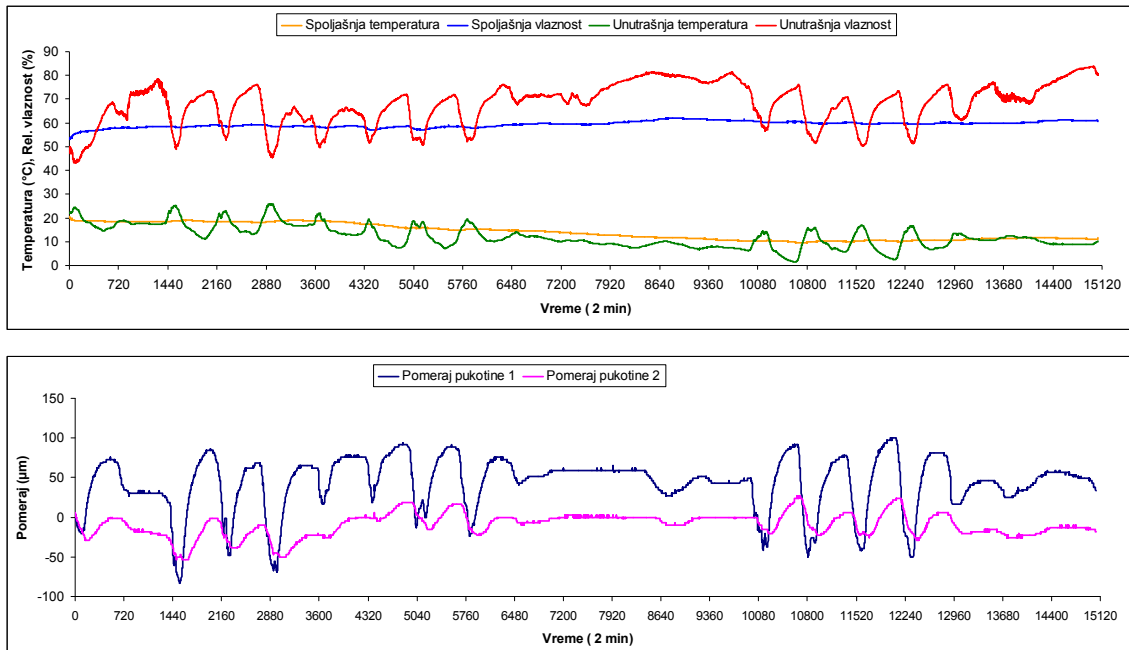


*Slika 4-45. Pomeraji pukotina 1 i 2 usled dnevnih varijacija spoljašnje i unutrašnje temperature i relativne vlažnosti za period od 11.09.2010.god. u 9:33:00 h do 24.09.2010 u 10:56:00 h*

U periodu od 24.09.2010. do 24.10.2010. praćeni su pomeraji pukotina 1 i 2 sa intervalom uzorkovanja od 2 min pri čemu je za merenje pomeraja pukotina bio aktiviran režim MIN/MAX. Na slici 4-46, prikazan je grafik pomeraja pukotina za period od 24.09.2010. u 12:12 h do 15.10.2010. u 10:04 h. Vremenski interval od 720 predstavlja period od 24 časa, za interval uzorkovanja od 2 min. U periodu od 24.09. do 15.10.2010. maksimalno širenje pukotine 1 zabeleženo je od 11.10.2010. u 07:44 h do 11.10.2010. u 16:16 h i iznosilo je 148  $\mu\text{m}$ , dok je najveće skupljanje zabeleženo od 26.09.2010. u 15:48 h do 27.09.2010. u 04:48 h od 167  $\mu\text{m}$ . Najveće širenje pukotine 2 u ovom periodu zabeleženo je od 11.10.2010. u 10:20 h do 11.10.2010. u 17:40 h od 51  $\mu\text{m}$ , a najveće skupljanje zabeleženo je od 26.09.2010. u 19:44 h do 27.09.2010. u 06:20 h od takođe 51  $\mu\text{m}$ . Na dijagramu na slici 4-46, mogu se zapaziti određeni vremenski intervali kada je razlika spoljašnje i unutrašnje temperature mala, tada je i intenzitet

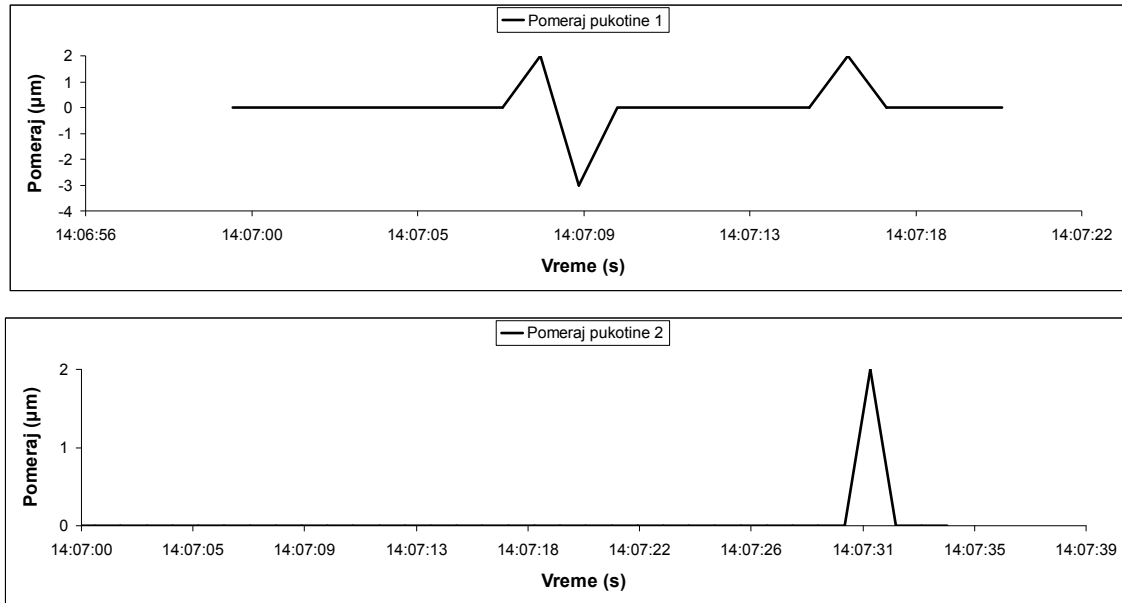
pomeraja obe pukotine takođe mali, iako je razlika spoljnje i unutrašnje relativne vlažnosti velika.

U periodu od 24.09.2010 do 15.10.2010. zabeležen je pomeraj pukotine 1 od 8  $\mu\text{m}$ , a pukotine 2, 5  $\mu\text{m}$  pri miniranju 27.09.2010. u 14:37 h, dok je pri miniranju 11.10.2010. u 14:31 h zabeležen pomeraj pukotine 2 od 6  $\mu\text{m}$ , a pukotine 1, 0  $\mu\text{m}$ . Pri miniranju 11.10.2010. u 14:51 h zabeležen je pik pukotine 1 od 5  $\mu\text{m}$ , a pukotine 2, od 3  $\mu\text{m}$ .



*Slika 4-46. Pomeraji pukotina 1 i 2 usled dnevnih varijacija spoljašnje i unutrašnje temperature i relativne vlažnosti za period od 24.09.2010. u 12:12 h do 15.10.2010. u 10:04 h*

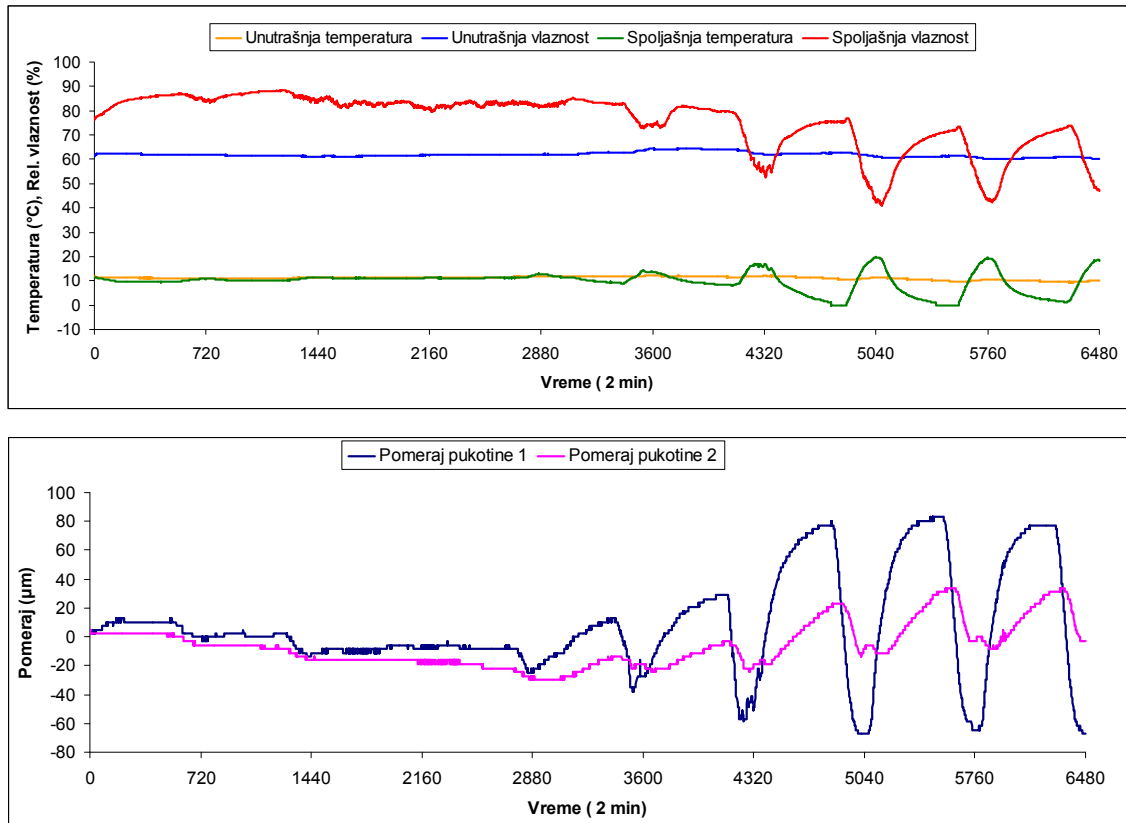
Direktno merenje pomeraja pukotina sa intervalom uzorkovanja od 1 s i aktiviranim brzim MIN/MAX režimom rada vršeno je pri miniranju izvedenom 15.10.2010. Grafik pomeraja pukotine 1 i 2 pri izmerenim potresima 15.10.2010. u 14:07 h dat je na slici 4-47. Kako se može videti sa grafika, miniranje je uzrokovalo pomeraj pukotine 1 od 5  $\mu\text{m}$ , a pukotine 2 od 2  $\mu\text{m}$ .



Slika 4-47. Pomeraj pukotine 1 i 2 pri miniranju izvedenom 15.10.2010. u 14:07 h

Na slici 4-48 prikazan je dijagram pomeraja pukotina 1 i 2 u periodu od 15.10.2010. u 14:36 h do 24.10.2010. u 14:34 h sa intervalom uzorkovanja od 2 min. Kao i na prethodnoj slici i ovde imamo periode sa relativno ujednačenim spoljnim i unutrašnjim temperaturama, što je uzrokovalo manje intenzivno kretanje obe pukotine. U drugom delu dijagrama, kako su oscilacije temperatura i vlažnosti uočljivije i pomeraji pukotina su intenzivniji. Maksimalno skupljanje pukotine 1 zabeleženo je od 22.10.2010. u 15:42h do 23.10.2010. u 05:18 h i iznosilo je 150 µm, dok je maksimalno širenje zabeleženo od 23.10.2010. u 07:50 h do 23.10.2010. u 13:58 h od 148 µm. Maksimalno skupljanje pukotine 2 u ovom periodu iznosilo je 48 µm, a zabeleženo je od 22.10.2010. u 19:54 h do 23.10.2010. u 08:16 h. Maksimalno širenje pukotine 2 zabeleženo je od 23.10.2010. u 10:24 h do 23.10.2010. u 17:38 h od 42 µm.

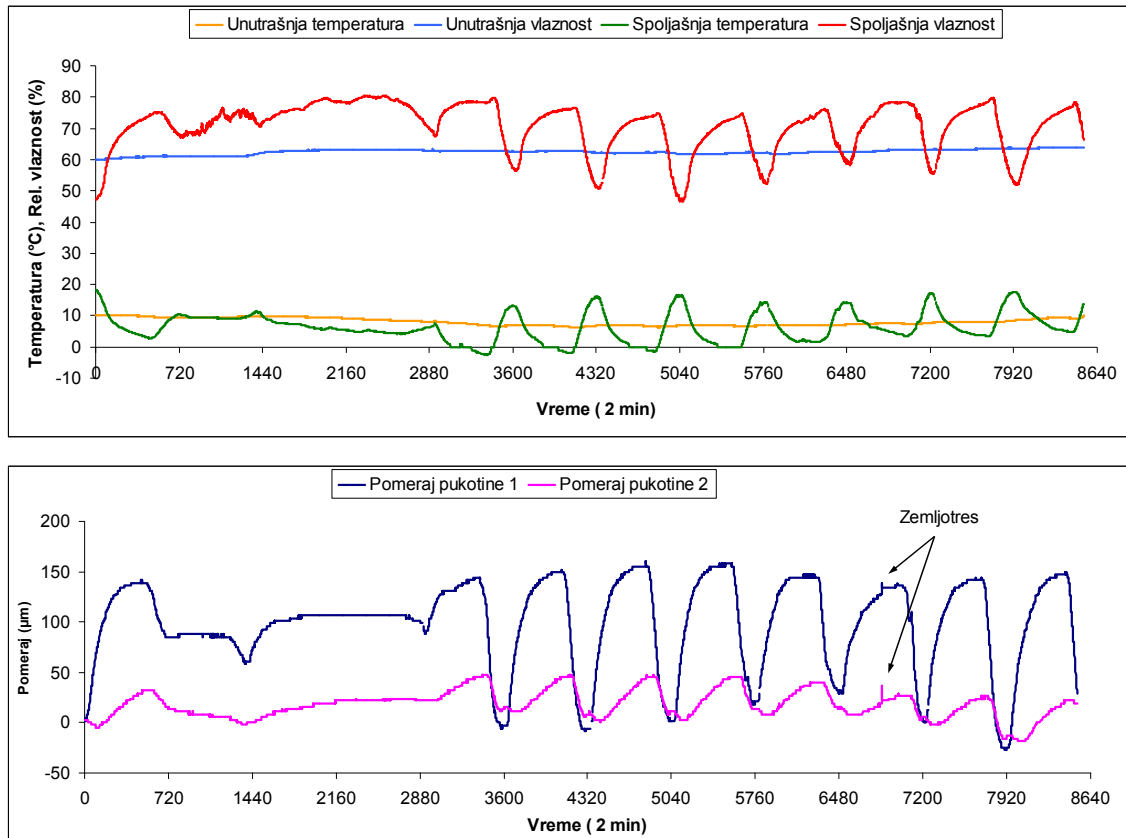
U periodu od 15.10.2010 do 24.10.2010. zabeležen je pomeraj od 5 µm za pukotinu 1 i 3 µm za pukotinu 2 pri miniranju izvedenom 19.10.2010. u 14:51 h.



*Slika 4-48. Pomeraji pukotina 1 i 2 usled dnevnih varijacija spoljašnje i unutrašnje temperature i relativne vlažnosti za period od 15.10.2010. u 14:36 h do 24.10.2010. u 14:34 h*

Na slici 4-49 dat je dijagram pomeraja pukotina 1 i 2 za period od 24.10.2010. u 14:52 h do 5.11.2010. u 10:58 h meren sa intervalom uzorkovanja od 2 min. Treba imati u vidu da je 31.10.2010. počelo zimsko računanje vremena i da vremena posle ovog datuma treba umanjiti za 1 sat. Maksimalno skupljanje pukotine 1 zabeleženo je od 04.11. 2010. u 14:42 h do 5.11.2010. u 4:52 h od 174 µm, dok je maksimalno širenje pukotine zabeleženo od 4.11.2010. u 8:12 h do 4.11.2010. u 14:22 h od 164 µm. Maksimalno skupljanje pukotine 2 zabeleženo je od 31.10. u 19:10 h do 1.11. 2010. u 7:48 h od 42 µm, a širenje od 30.10.2010. u 10:08 h do 30.10.2010. u 14:56 h od 40 µm [105].

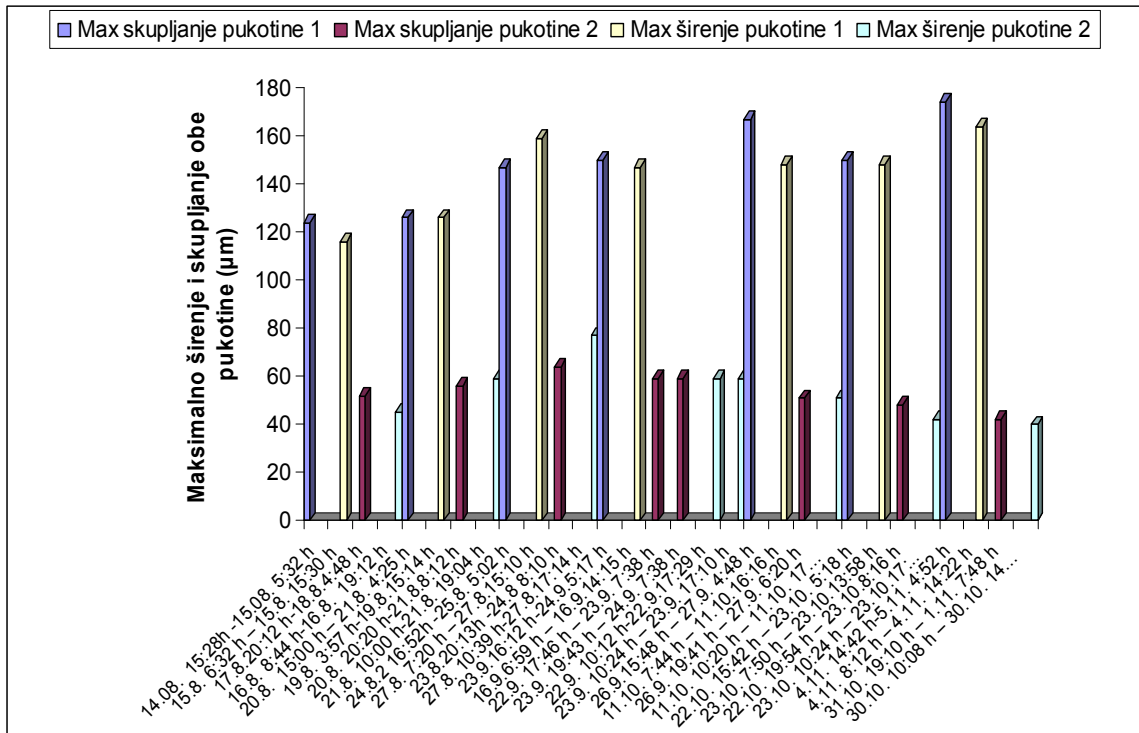
U periodu od 24.10.2010 do 5.11.2010. vrednosti pomeraja pukotina od miniranja dobijene poređenjem vremena najvećih pikova pomeraja pukotina sa vremenima miniranja, nisu prelazile vrednost od 3 µm.



Slika 4-49. Pomeraji pukotina 1 i 2 usled dnevnih varijacija spoljašnje i unutrašnje temperature i relativne vlažnosti za period od 24.10.2010. u 14:52 h do 5.11.2010. u 10:58 h [97]

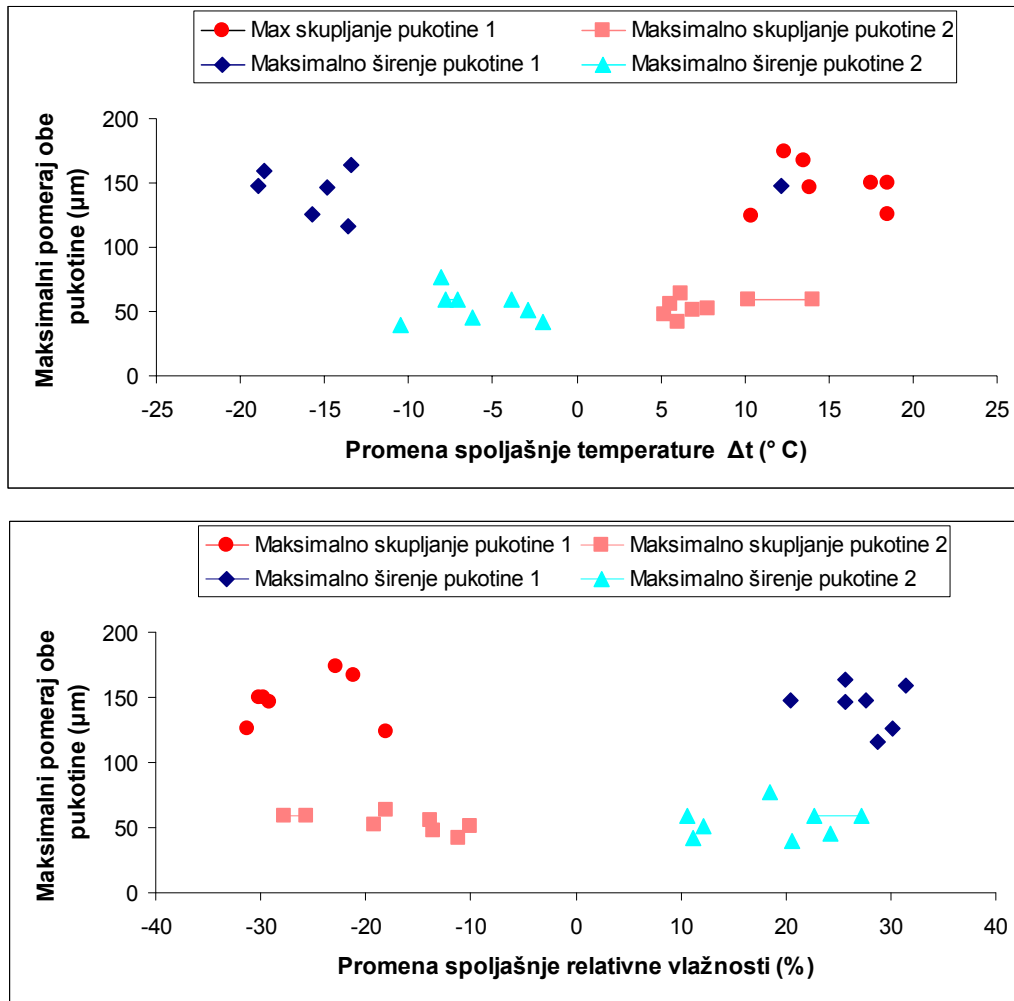
Zemljotres jačine 5.4 stepeni Rihterove skale sa epicentrom u Kraljevu registrovan je 03.11.2010. u 01h 57min 3s i 01h 57min 9s seizmografom postavljenim u podrumu objekta (MM1, Prilog 4). Rezultati izmerenih karakteristika potresa od zemljotresa dati su u Tabeli. Maksimalni pomeraj pukotine 1 uzrokovan potresima od zemljotresa iznosio je 11 µm, a pukotine 2, 18 µm. Pikovi pomeraja obe pukotine od zemljotresa prikazani su na slici 4-49.

Na slici 4-50 je dat sumarni prikaz vremenskih intervala maksimalnog skupljanja i širenja pukotina 1 i 2 pri promeni temperature i relativne vlažnosti za celokupni period praćenja.



Slika 4-50. Sumarni prikaz vremenskih intervala maksimalnog skupljanja i širenja pukotine 1 i 2 pri promeni temperature i relativne vlažnosti za celokupni period praćenja

Na slici 4-51, prikazan je grafik vrednosti maksimalnih skupljanja i širenja obe pukotine u odnosu na promene spoljne temperature i relativne vlažnosti vazduha za vremenske intervale predstavljene na slici 4-50.



Slika 4-51. Vrednosti maksimalnih širenja i skupljanja obe pukotine u odnosu na promene spoljnje temperature i relativne vlažnosti vazduha [105]

Kontinuirano praćenje pomeraja pukotina na objektima je pokazalo da dejstvo dnevnih oscilacija temperature i relativne vlažnosti nije tako zanemarljivo. Promene temperature i relativne vlažnosti vazduha uzrokuju širenje i skupljanje materijala zida, stvarajući velika naprezanja u materijalu. Naprezanja mogu biti znatno veća kada je grejna sezona sa znatno većom razlikom spoljne i unutašnje temperature i relativne vlažnosti vazduha. Osetljivost ljudi na vibracije je veoma visoka i ljudi nesvesno uznemireno reaguju kada su u pitanju vibracije, čiji je izvor nepoznat, posebno kada prethodno nisu upozoreni. Veza između vibracija i oštećenja objekata je veoma kompleksna iz više razloga. Objekti se grade na različite načine: neki su mnogo čvršće građeni od drugih, različitih dimenzija, materijala, metoda građenja i tipova fundiranja. Pored toga, objekti su konstantno izloženi efektima vremenskih prilika koje nisu vibracione prirode. Razlika

između ovih efekata i vibracija je u tome što deluju sporije i bez pratećih uznemirujućih pojava kao što je buka, pa ih zato vlasnici objekata ne mogu detektovati. Iako su ovi efekti nečujni ili se ne osećaju, ne znači da njihovo delovanje nije aktivno i veliko.

Tokom celokupnog perioda osmatranja zabeleženo je maksimalno skupljanje pukotine 1 od 174  $\mu\text{m}$  u periodu od 04.11.2010. u 14:42 h do 05.11.2010. u 4:52 h i maksimalno širenje od 164  $\mu\text{m}$  u periodu od 04.11.2010. u 8:12 h do 04.11.2010. u 14:22 h. Maksimalno širenje pukotine 2 zabeleženo je od 27.8.2010. u 10:39 h do 27.8.2010. u 17:14 h od 77  $\mu\text{m}$  a maksimalno skupljanje od 23.8.2010. u 20:13 h do 24.8.2010. u 8:10 h od 64  $\mu\text{m}$ .

Treba napomenuti da su izmereni pomeraji pukotina usled kućnih aktivnosti u rangu pomeraja pukotina od miniranja, dok je pomeraj pukotina usled zemljotresa koji je na teritoriji Bora rangiran kao treći stepen Merkalijeve skale, znatno veći od pomeraja izmerenih pri miniranjima.

Kontinuirano praćenje pomeraja pukotina na stambenom objektu kao i potresa od miniranja potvrdilo je dugogodišnja ispitivanja profesora Dowding-a [100] i pokazalo da standard DIN 4150-3 iz 1999. godine daje visoku pouzdanost u zaštiti objekata od miniranja u okruženju površinskih kopova.



## 5.0 PREDVIĐANJE POTRESA OD MINIRANJA FAZI I MONTE KARLO MODELIRANJEM

### 5.1 OSNOVE FAZI MODELIRANJA

#### 5.1.1 Osnove teorije fazi skupova

Teoriju fazi skupova uveo je 1965. godine Lotfi A. Zadeh [107] u svom radu *Fuzzy sets (Fazi skupovi)* objavljenom u Časopisu *Information and Control (Informacija i kontrola)*, gde je prvi put uveo pojam fuzzy (rasplinut, nejasan, neodređen). Zadeh u radu navodi " *Da bi se izborili sa veoma složenim problemima, ne moramo da se krećemo ka rigoroznosti, što većoj preciznosti opisa i razmišljanja o pojavama, već možemo da krenemo i u suprotnom smeru i dozvolimo da opisi budu neprecizni u duhu prirodnog jezika*" [107]. Fazi skupovi se mogu smatrati kao generalizacija klasične teorije skupova i kao generalizacija dvojne logike [108].

Teorija fazi logike je deo šire teorije fazi skupova, koja se posebno primenjuje kad se radi o predmetima proučavanja koji imaju nedoumice i nejasnoće [23].

Fazi logika pruža jednostavan način da se stigne do određenog zaključka na osnovu nejasnih, dvosmislenih, nepreciznih, slučajnih ili nedostajućih ulaznih informacija [109].

Klasičan skup se posmatra kao grupisanje elemenata, koji imaju najmanje jednu zajedničku karakteristiku [108]. Ako element poseduje ovu karakteristiku, on pripada skupu. U suprotnom, element ne pripada skupu. U teoriji fazi skupova, skup više nije ograničen na ovu binarnu (da/ne) definiciju pripadnosti skupu, već omogućava postepenu definiciju pripadnosti. To znači da se stepen pripadnosti skupu može odrediti za svaki element. Ovaj skup se onda odnosi na fazi skup. U daljem tekstu, klasični skupovi označeni su velikim slovima, a fazi skupovi velikim slovima navučenim oznakom  $\tilde{\cdot}$ .

##### 5.1.1.1 Fazi skupovi

###### Definicija

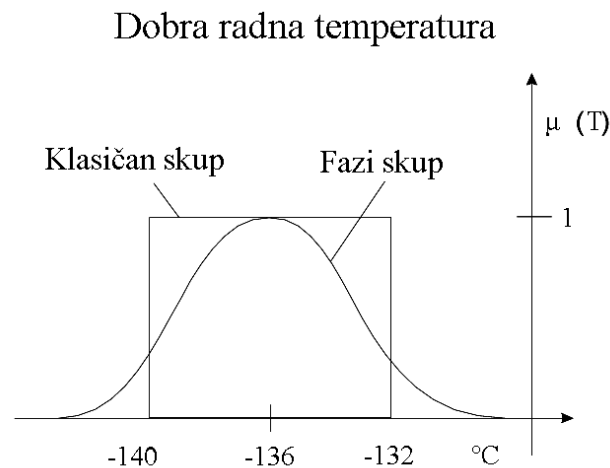
Klasičan skup objekata  $X$

$$\tilde{A} := \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)); x \in X\}$$

predstavlja fazi skup od  $X$ , gde  $\mu_{\tilde{A}}$  predstavlja funkciju pripadnosti, a  $\mu_{\tilde{A}}(x)$  predstavlja stepen pripadnosti elementa  $x$  fazi skupu  $\tilde{A}$ .

Primer:

Temperatura  $T$  za optimalan rad procesa hlađenja u industrijskom postrojenju definisana je od strane proizvođača i iznosi  $-136\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Međutim, iskustvo stečeno u toku rada postrojenja, pokazalo je da vrednost temperature varira kako pozitivno tako i negativno. Prilikom ispitivanja, rukovodilac postrojenja je izjavio da postrojenje može da radi bez ikakvih problema na temperaturama između  $-140\text{ }^{\circ}\text{C}$  i  $-132\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Model ovog zapažanja se može uz pomoć teorije fazi skupova prikazati na slici 5-1.



Slika 5-1. Klasični i fazi skupovi “Dobre radne temperature” [108]

Slika 5-1 jasno pokazuje prednosti modeliranja procesa primenom fazi skupova. Pretpostavljajući da su procesi monitoringa automatizovani, sa klasičnim skupom, rukovodilac postrojenja ne bi dobio nikakvu informaciju o stanju postrojenja kada je temperatura u intervalu klasičnog skupa od  $-140\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $-132\text{ }^{\circ}\text{C}$ . To znači da bi dobio istu ocenu za temperaturu  $-139.9\text{ }^{\circ}\text{C}$  kao i za  $-136\text{ }^{\circ}\text{C}$  i bio bi iznenađen kada bi sistem iznenada pokazao signal za grešku (tj. kada temperatura padne ispod  $-140\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). U slučaju fazi modela, vrednosti pripadnosti omogućavaju rukovodiocu postrojenja da opaža kako samo stanje postrojenja, tako i njegov trend tokom vremena. Ovan način procene situacije je znatno realniji.

Primena procesa koji se tiču neizvesnosti primenom funkcija pripadnosti na način prikazan na slici 5-1, često se meša sa funkcijom gustine verovatnoće ili funkcijom raspodele kod teorije verovatnoće. Funkcija pripadnosti ima potpuno drugačije tumačenje. Ona navodi stepen pripadnosti radnog stanja postrojenja skupu “Dobra radna stanja”. Ako se funkcija tumači kao funkcija gustine, onda će verovatnoća da

temperatura padne ispod  $-136\text{ }^{\circ}\text{C}$  biti 0.5, pod pretpostavkom da je prikazana funkcija simetrična. Međutim, teorija verovatnoće ne daje nikakvu informaciju o tome u kojoj meri je temperatura jedna od “dobrih radnih stanja”. Ovaj primer bi bio dovoljan da razgraniči teoriju fazi skupova i teoriju verovatnoće.

Postoji veliki broj različitih vrsta fazi skupova. Dve vrste koje su stekle posebnu važnost u primenama su tzv. fazi brojevi i lingvističke promenljive [110].

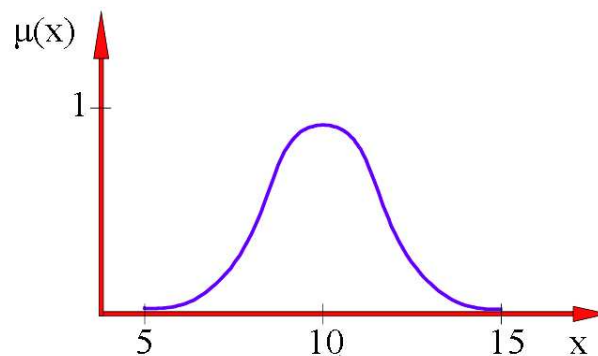
### 5.1.1.2 Fazi brojevi

#### Definicija

Fazi broj je konveksni fazi skup, normalizovan na intervalu  $[0,1]$  skupa realnih brojeva. Postoji tačno jedan element sa stepenom pripadnosti 1. Funkcija pripadnosti ovog fazi skupa je kontinualna na tom podintervalu.

#### Primer:

Slika 5-2 prikazuje fazi broj “Približno 10”.



Slika 5-2. Fazi broj “Približno 10” [108]

### 5.1.1.3 Lingvističke promenljive

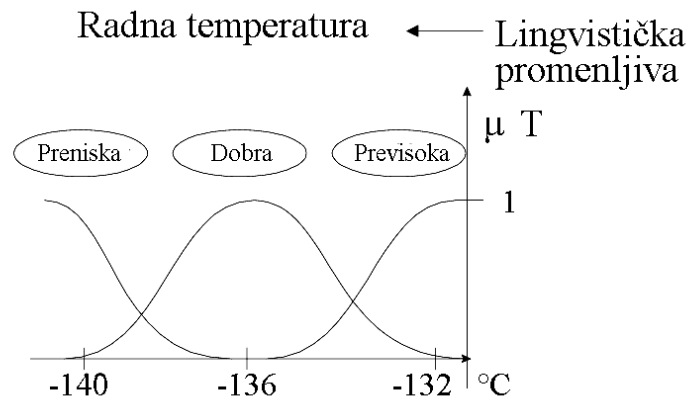
#### Definicija

Lingvistička promenljiva je promenljiva čije vrednosti nisu brojevi (kao u slučaju determinističkih promenljivih), već pre lingvističke konstrukcije (tzv. uslovi). Sastav ovih uslova se definiše fazi skupovima nad osnovnom promenljivom.

#### Primer:

Uslov “radna temperatura”, kao lingvistička promenljiva, mogla bi da pretpostavi vrednosti (uslove) “preniska”, “dobra” i “previsoka”. Značenje svakog od ovih uslova

se može definisati kao fazi skup nad temperaturnom skalom u °C (osnovna promenljiva).



Slika 5-3. Lingvistička promenljiva “radna temperatura” [108]

Koncept lingvističke promenljive jasno pokazuje kako fazi skupovi mogu da formiraju most između lingvističkih izraza i numeričke informacije. U navedenom primeru, skup uslova predstavlja realni način na koji bi rukovodilac postrojenja mogao da opiše radnu temperaturu procesa hlađenja. Osnovna promenljiva, s druge strane, predstavlja fizičku skalu koja se može odrediti do bilo kog nivoa tačnosti.

#### 5.1.1.4 Operacije nad fazi skupovima

Da bi se opisala teorija skupova, pored njenih elemenata (skupova), neophodno je takođe definisati operacije koje se mogu primeniti za spajanje ili transformaciju skupova. U teoriji fazi skupova, ove operacije se definišu putem odgovarajuće funkcije pripadnosti, najvažnije komponente fazi skupova. U narednom delu navedene su operacije koje je predložio Zadeh 1965. godine [107]. Mnogobrojna proširenja i izmene ovih definicija su razvijene od tada [110].

#### Definicija

Funkcija pripadnosti preseka dva fazi skupa  $\tilde{A}$  i  $\tilde{B}$  sa funkcijama pripadnosti  $\mu_{\tilde{A}}(x)$  i  $\mu_{\tilde{B}}(x)$  definisana je kao:

$$\mu_{\tilde{A} \cap \tilde{B}}(x) = \min(\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(x)) \quad \forall x \in X.$$

Definicija

Funkcija pripadnosti unije dva fazi skupa  $\tilde{A}$  i  $\tilde{B}$  sa funkcijama pripadnosti  $\mu_{\tilde{A}}(x)$  i  $\mu_{\tilde{B}}(x)$  definisana je kao:

$$\mu_{\tilde{A} \cup \tilde{B}}(x) = \max(\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(x)) \quad \forall x \in X.$$

Definicija

Funkcija pripadnosti komplementa normalizovanog fazi skupa  $\tilde{A}$  definiše se kao:

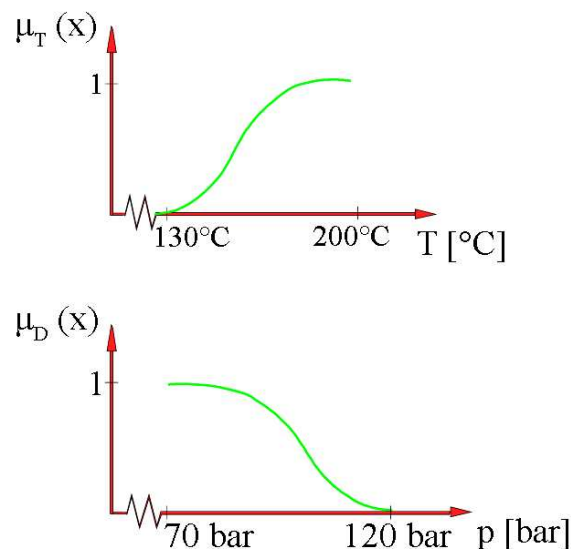
$$\mu_{\tilde{A}^c}(x) = 1 - \mu_{\tilde{A}}(x) \quad \forall x \in X.$$

Primer:

Deo složenog hemijskog postrojenja treba da se održava u „najbolje mogućem radnom stanju“. Pretpostavka je da se ovo stanje karakteriše dvema promenljivim: temperaturom i pritiskom, kao i da se dobro radno stanje primenjuje kada je temperatura visoka, a pritisak nizak, dok se interakcije ignorišu.

Neka je  $T=[130,200]$  interval svih mogućih temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), a  $D=[70,120]$  interval svih vrednosti pritiska (bar). To znači da je klasičan skup svih teoretski mogućih radnih stanja dat kao  $X = T \times D$ .

Neka je  $\mu_{\tilde{T}} : X \rightarrow R$  funkcija pripadnosti koja formuliše do kog stepena svako radno stanje poseduje „visoku temperaturu“, a  $\mu_{\tilde{D}} : X \rightarrow R$  funkcija pripadnosti koja formuliše do kog stepena svako radno stanje poseduje „nizak nivo pritiska“. Funkcije pripadnosti su prikazane na slici 5-4.

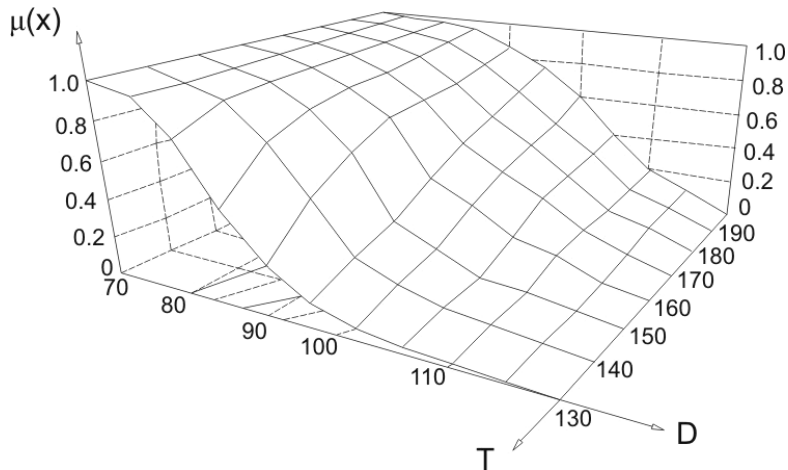


Slika 5-4. Funkcije pripadnosti za visoku temperaturu i nizak pritisak [108]

Svako radno stanje se može opisati definisanjem njegovih karakterističnih vrednosti  $(t, d) \in X$ . Stepen do kojeg se takvo stanje klasifikuje kao “dobro” sada se može odrediti preko sledećih funkcija:

$$\mu_{dobro}(t, d) = \min(\mu_{\bar{T}}(t), \mu_{\bar{D}}(d))$$

Slika 5-5 pokazuje funkcije pripadnosti za sva moguća stanja.



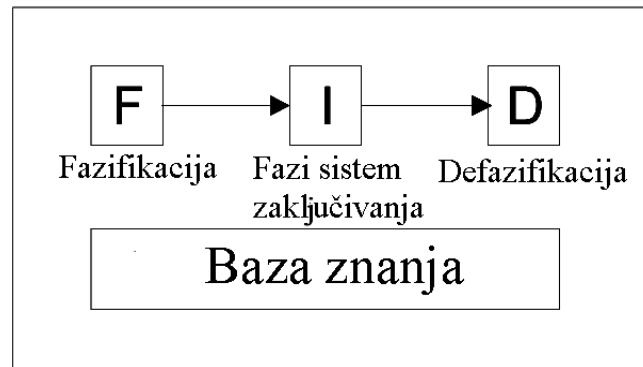
Slika 5-5. Funkcije pripadnosti za „Dobro radno stanje“ [108]

### 5.1.2 Osnovi projektovanja sistema baziranih na znanju

U cilju rešavanja problema koji se zasniva na neizvesnim ili fazi zapažanjima ili korelacijama, neophodno da se opiše plan i obrada faktora koji utiču na fazi uslove, kao i da se obezbedi rezultat ove obrade u korisnom obliku. Ovi zahtevi dovode do osnovnih elemenata fazi sistema baziranih na znanju:

- baza znanja ( definicija lingvističkih varijabli, uslova i pravila),
- obrada ulaznih podataka (fazifikacija),
- mehanizam zaključivanja (analiza),
- obrada rezultata (defazifikacija).

Ovo se može prikazati šematski na slici 5-6.



Slika 5-6. Projektovanje fazi sistema baziranog na znanju [108]

Skalarni ulazi se transformišu u pripadnosti fazi skupova pomoću funkcija za fazifikaciju. Ova informacija, zajedno sa deklarisanim pravilima, se dodeljuje mehanizmu zaključivanja, a rezultat je ponovo skup pripadnosti fazi skupova (uslova za izlazne promenljive). Poslednji korak je transformisanje ovih vrednosti pripadnosti u tražene skalarne izlazne promenljive defazifikacijom.

#### 5.1.2.1 Baza znanja

Baza znanja sadrži celokupno "znanje" za rešavanje datog problema. To je:

- definisanje lingvističkih promenljivih i njihovih uslova (fazi skupova),
- kao i (fazi) pravila.

Lingvističke promenljive i njihovi uslovi su sastavni delovi fazi pravila u obliku:

**AKO** (*Premisa*) **TADA** (*Zaključak*) **SA** (*Faktor izvesnosti*).

Premise (uslovi) i zaključci se u svakom slučaju sastoje od iskaza u obliku:

(*Promenljiva*) **JE** (*Uslov*)

i povezani su zajedno jedni sa drugim putem standardnog logičkog operatora **I**. Faktor izvesnosti, kao i sa konvencionalnim ekspertskim sistemima, može da se navede i on pokazuje stepen do kojeg je pravilo ispunjeno u okviru opsega [0..1].

Pojedine promenljive (odnosno ulazne promenljive) se koriste samo u delu pravila gde su premise, ostale (izlazne promenljive) se koriste isključivo u delu pravila gde su zaključci.

U nekim sistemima, postoji mogućnost da se koriste takozvane privremene promenljive. Privremene promenljive su promenljive koje se mogu koristiti na obe strane pravila.

Privremene promenljive se posebno koriste za bolje strukturiranje znanja i da omoguće jednostavnije poštovanje pravila.

Znanje koje se nalazi u bazi znanja predstavlja osnovu procesa odlučivanja fazi sistema zasnovanog na znanju, fazifikacije, zaključivanja i defazifikacije.

### 5.1.2.2 Fazifikacija

Fazifikacija je proces transformisanja numeričkih vrednosti ulaznih promenljivih u pripadnosti uslovima lingvističkih promenljivih. Za svaki uslov ulazne promenljive, vrednost pripadnosti  $\mu_{uslov}(x)$  je data za skalarna veličina  $x$ .

Fazifikacija nije neophodna za sve promenljive u fazi sistemu zasnovanom na znanju. Neka promenljiva može započeti proces u DataEngine sa fazi vrednostima umesto sa klasičnim vrednostima.

Postoji poseban tip lingvističkih promenljivih u obliku lingvističkih simbola za koje funkcije pripadnosti nisu definisane. Lingvistički simbol je lingvistička promenljiva za čije uslove nisu definisane funkcije pripadnosti. Primeri lingvističkih simbola su:

- greške: kratki spoj, magnetski disbalans ....
- dijagnoze: boginje, ovčje boginje ...
- buka motora: škripa, lupanje, normalno ...

Primena lingvističkih simbola je uvek preporučljiva kada je data informacija koja ne može lako da se predstavi kao skalarna veličina, pošto su takve promenljive privremenih rezultata često predstavljene kao lingvistički simboli.

### 5.1.2.3 Mehanizam zaključivanja

Proces, sa kojim su zaključci izvedeni iz postojećih činjenica i raspoloživog znanja, zove se zaključivanje [111]. Proces zaključivanja fazi sistema zasnovanog na znanju koristi zaključivanje unapred. Date činjenice (tj. vrednosti pripadnosti uslova ulaznih veličina) se analiziraju i nastaju novi iskazi (tj. uslovi pravila zaključivanja).

Proces se ponavlja za novi, potpuniji skup činjenica i njihovih odgovarajućih pravila, dok vrednosti pripadnosti uslova izlaznih promenljivih nisu poznate.

Korak zaključivanja (evaluacija pravila) se sastoji od tri koraka:

- agregacija,
- implikacija,
- akumulacija.



### 5.1.2.3.1 Agregacija

Agregacija je izračunavanje ispunjenja celokupnog pravila na osnovu ispunjenja individualnih premisa. Ovaj proces obično odgovara logičnom **I** operatoru individualnih izraza premise.

Ova veza ipak može u principu biti sprovedena korišćenjem bilo kojeg operatora. Istraživanja nekih od njih mogu se naći u [112]. Sledeći operatori agregacije su najčešći i mogu se naći u DataEngine:

Tabela 5-1. Operatori agregacije

<b>Minimum</b>	$\min(\mu_{\bar{A}}(x), \mu_{\bar{B}}(x))$
<b>Maksimum</b>	$\max(\mu_{\bar{A}}(x), \mu_{\bar{B}}(x))$
<b>Algebarski proizvod</b>	$\mu_{\bar{A}}(x) \cdot \mu_{\bar{B}}(x)$
<b>Algebarska suma</b>	$(\mu_{\bar{A}}(x) + \mu_{\bar{B}}(x) - \mu_{\bar{A}}(x) \cdot \mu_{\bar{B}}(x))$
<b>Gama operator</b>	$(\mu_{\bar{A}}(x) \mu_{\bar{B}}(x))^{(1-\gamma)}$ * $(\mu_{\bar{A}}(x) + \mu_{\bar{B}}(x) - \mu_{\bar{A}}(x) \mu_{\bar{B}}(x))^\gamma$

Izbor operatora zavisi od svakog pojedinačnog problema.

### 5.1.2.3.2 Implikacija

Implikacija, na osnovu faktora izvesnosti premisa, izračunava odgovarajući stepen izvesnosti za zaključak. Ovo se zove stepen ispunjenja. Ovaj korak predstavlja zaključak logičke izjave ("AKO A TADA B").

Ona služi za modeliranje činjenice tako da na pravila takođe utiče izvesnost, obezbeđujući time stepen izvesnosti zaključka. Faktor izvesnosti je na neki način maksimalni stepen ispunjenja koji se može razmotriti za zaključak. Ako zaključak ukuljučuje neku neizvesnost, tada se modeliranje vrši preko faktora izvesnosti (maksimalnog stepena ispunjenja) koji ima vrednost manju od 1.0.

Implikacija je veza između faktora izvesnosti i stepena ispunjenja, gde je rezultat stepen ispunjenja svakog od zaključaka.

Brojni operatori se predlažu za ovu vrstu operacija i proučavani su u istraživanjima Ruan i Kerre [113]. Oni koji su omogućeni u Data Engine su prikazani u Tabeli 5-2.

Table 5-2. Operatori implikacije

<b>Minimum</b>	$\min(\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(x))$
<b>Algebarski proizvod</b>	$\mu_{\tilde{A}}(x) \cdot \mu_{\tilde{B}}(x)$

Ovi operatori ispunjavaju uslov da stepen ispunjenja zaključka ne može nikad biti veći od faktora izvesnosti.

### 5.1.2.3.3 Akumulacija

U sistemima baziranim na znanju, često više od jednog pravila vodi do istog zaključka (tj. kvar je kratak spoj). Iako to ne predstavlja problem klasičnoj logici, ovaj slučaj mora da se razmatra zasebno u fazi sistemima.

Ako zaključak pravila ima stepen ispunjenja 0.7, a 0.3 kod drugog pravila, onda različiti stepeni ispunjenja treba da se sumiraju u samo jedan. To se postiže procesom akumulacije, kojim se ujedinjuju pojedinačni rezultati sa logičkim operatorom **ILI**. U DataEngine, dostupni su sledeći operatori:

Table 5-3. Operatori akumulacije

<b>Maksimum</b>	$\max(\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(x))$
<b>Algebarska suma</b>	$(\mu_{\tilde{A}}(x) + \mu_{\tilde{B}}(x) - \mu_{\tilde{A}}(x) \cdot \mu_{\tilde{B}}(x))$

### 5.1.3 Defazifikacija

Rezultat procesa zaključivanja sistema baziranog na znanju mora često da bude preveden iz fazi logike (pripadnosti uslova lingvističkih promenljivih) u klasičnu vrednost, drugim rečima u konkretne preporuke za preduzimanje određenih radnji. Ovaj proces se zove defazifikacija.

Matematički gledano, rezultat procesa zaključivanja je fazi skup za svaku od izlaznih promenljivih ( fazi izlazni skup) tj. skup:

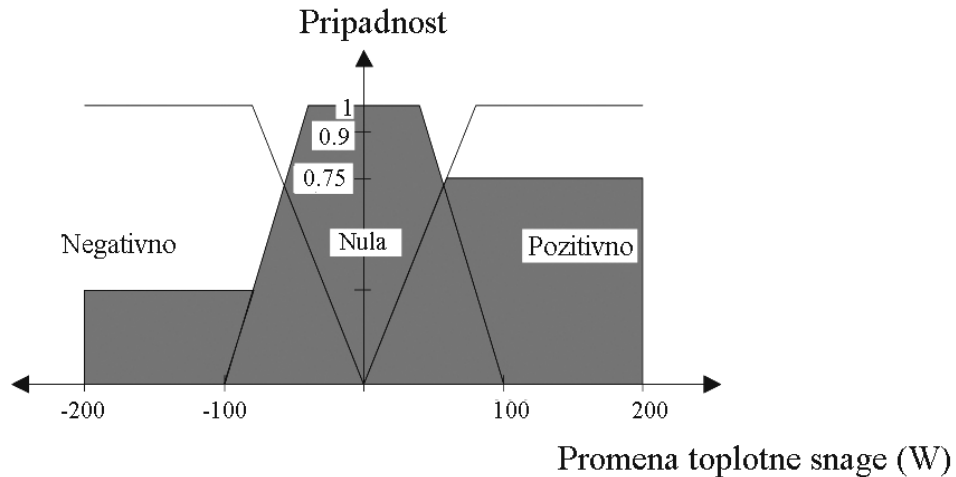
Promenljiva **JE** Izraz1 **ILI**

Promenljiva **JE** Izraz1 **ILI**

...**ILI**

Promenljiva **JE** Izraz N.

Prema tome, fazi izlazni skup lingvističkih promenljivih je unija svih uslova ( koji su sami fazi skupovi). Ovaj skup fazi izlaza ima funkciju pripadnosti koja se računa iz funkcija pripadnosti i stepena pripadnosti različitih uslova. Primer takve funkcije pripadnosti prikazan je na slici 5-7.



Slika 5-7. Fazi rezultati procesa zaključivanja [108]

Da bi se izgradila funkcija pripadnosti skupa fazi izlaza neophodno je preduzeti sledeće korake:

- implikacija iz funkcija pripadnosti svih uslova vrednosti pripadnosti,
- akumulacija modifikovanih funkcija pripadnosti u ukupnu funkciju.

Ako je operator implikacije minimalna vrednost, onda se originalne funkcije pripadnosti uslova presecaju na visini minimalne vrednosti pripadnosti uslova, (slika 5-7). Ako se izabere algebarski proizvod, funkcije pripadnosti su smanjene u odnosu na vrednosti pripadnosti uslovima.

Ako se izabere maksimum, kao operator akumulacije, gornja granica funkcije pripadnosti je u svakoj tački najviša modifikovana vrednost funkcija pripadnosti. Ako se izabere algebarska suma, tada su opsezi u kojima se modifikovani uslovi preklapaju smanjuju nagore.

Zadatak stvarnog defazifikatora je da transformiše funkciju pripadnosti fazi izlaznog skupa u klasični rezultat. Metod defazifikacije je prema tome funkcija na skupu mogućih funkcija pripadnosti fazi izlaznog skupa.

Zbog mnogih mogućnosti interpretacije funkcija pripadnosti, postoji veliki broj metoda defazifikacije, od kojih se neke mogu naći u [110, 111, 112]. Jedan od osnovnih

problema defazifikacije je brzina izračunavanja usled kompleksnosti zadatka. Iz tog razloga, dve funkcije koje se uglavnom primenjuju a dostupne su i u DataEngine su:

Tabela 5-4. Metode defazifikacije

<b>Centar gravitacije</b>	$\bar{x} = \frac{\int_a^b x \mu_{izl}(x) dx}{\int_a^b \mu_{izl}(x) dx}$
<b>Sredina maksimuma</b>	$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^{\max}$

gde je:

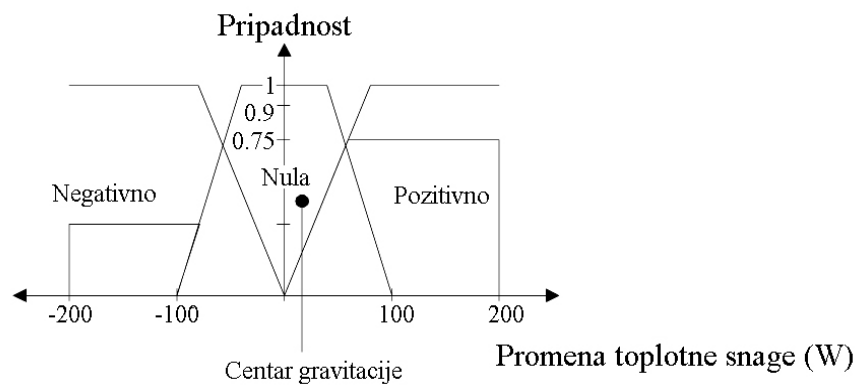
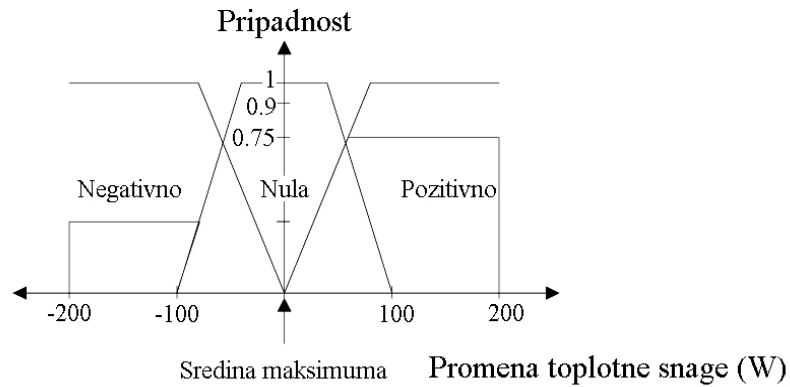
$\bar{x}$  - defazifikovana izlazna vrednost,

$\mu_{izl}(x)$  - funkcija pripadnosti fazi izlaznog skupa u granicama od  $a$  do  $b$ ,

$x_i^{\max}$  - vrednost od  $x$  u tački u kojoj fazi izlazni skup dostiže svoj ukupni maksimum  $\mu^{\max}$ . Kada se  $\mu^{\max}$  uzima iz većeg broja opsega, sredina odgovarajućih opsega se uzima od  $x_i^{\max}$ ,

$n$  - broj opsega iz kojih se  $\mu^{\max}$  izračunava.

Razlika između navedena dva operatora može se videti na slici 5-8.



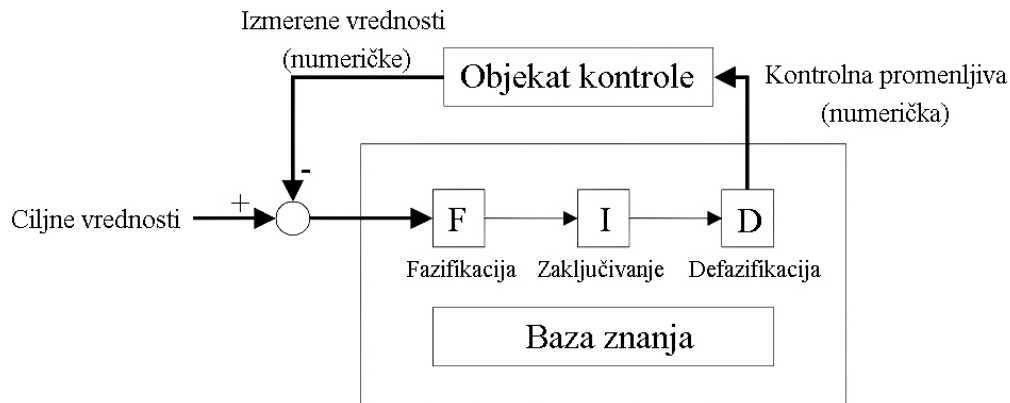
Slika 5-8. Metode defazifikacije [108]

#### 5.1.4 Primena

Fazi sistemi zasnovani na znanju se primenjuju u razliĉitim oblastima. Ćesto se primenjuju u fazi kontroli i analizi fazi podataka.

##### 5.1.4.1 Fazi kontrola

Izraz „fazi kontrola“ se odnosi na oblast fazi tehnologije koja se bavi rešavanjem problema kontrole [114]. Ova struktura je uspešno razvijena u brojnim primenama. Karakteristiĉan primer je predstavljen na slici 5-9.



Slika 5-9. Automatski fazi kontroler [108]

Fazi kontrolni uređaj prima jednu ili više klasičnih promenljivih, kao i jedan ili više klasičnih ciljeva, koji se fazifikuju. Rezultati zaključivanja se defazifikuju i prevode u klasičnu izlaznu promenljivu.

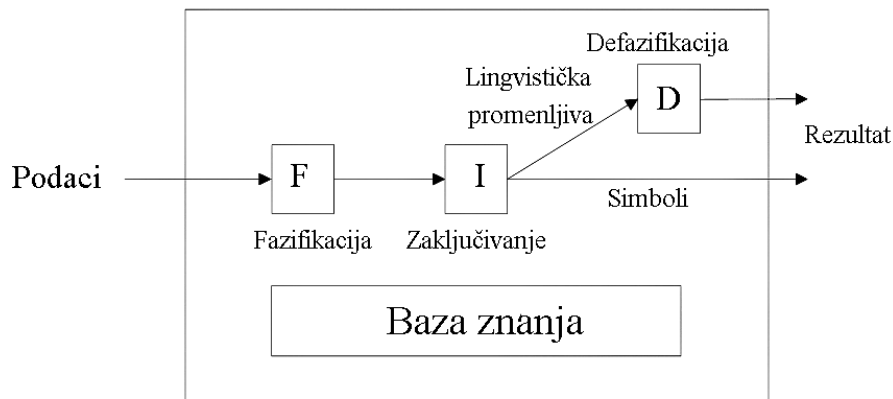
Brojni primeri primene automatskih fazi kontrolera se mogu naći u istraživanjima [110, 112, 114].

#### 5.1.4.2 Analiza fazi podataka zasnovana na znanju

Postoje brojne mogućnosti za primenu fazi sistema zasnovanih na znanju u oblasti analize fazi podataka, kao što su:

- sistemi dijagnoze (kliničke, analiza proseca, dijagnoza kvarova),
- sistemi evaluacije (kontrola kvaliteta, kreditna sposobnost, procena tržišta),
- sistemi selekcije (baze podataka marketinga, konsalting prodaje, analiza troškova/dobiti).

Ovaj oblik tehnologije se može efikasno koristiti kada je ekspertsko znanje dostupno u obliku lingvističkih pravila i kada se koristi za rešavanje problema [110, 111, 112, 115, 116, 117].



Slika 5-10. Sistem zasnovan na znanju za analizu podataka [108]

Fazi sistemi zasnovani na znanju, kada se koriste u analizi fazi podataka, često primaju ulazne parametre u obliku simboličkih informacija, kao što je primer:

Buka { normalna, velika, prevelika }

Direktna primena lingvističkih prosuđivanja je korisna u mnogim primenama kao što je „ekonomska situacija je stabilna“ ili „perspektiva je ograničena“.

Često su korisni i za simboličke izlazne informacije u fazi sistemima zasnovanim na znanju za analizu podataka, na primer:

Kvar **JE** kratak spoj

ili

Dijagnoza **JE** upala krajnika

Korisno je često primeniti privremene promenljive i tako formulisati pravila u nekoliko koraka, kako bi se pojednostavio kompleksan problem. U DataEngine ova metoda rada može iskoristiti prednost lingvističkih simbola i može u procesu dati informacije koje se odnose na različite faze zaključivanja.

### 5.1.5 Fazi sistemi zaključivanja (FIS)

Fazi sistemi zaključivanja (*en. Fuzzy Inference Systems - FIS*) imaju širok opseg primene u mnogim oblastima, kao što su automatska kontrola, klasifikacija podataka, ekspertski sistemi, predviđanje vremenskih serija, robotika, prepoznavanju obrazaca itd. [118]. Zbog svoje multidisciplinarne prirode, fazi sistemi zaključivanja poznati su po mnogobrojnim drugim imenima, kao što su fazi sistemi zasnovani na pravilu, fazi

ekspertski sistemi [119], fazi modeli, fazi asocijativna memorija [120], fazi logički kontroler [121, 122, 123] ili jednostavno fazi sistem.

Osnovna struktura fazi sistema zaključivanja se sastoji od tri komponente: baze pravila koja sadrži izbor fazi pravila, baze podataka koja definiše funkcije pripadnosti primenjene u fazi pravilima i mehanizma zaključivanja koji izvršava proceduru zaključivanja po pravilima i datim činjenicama, kako bi se dobio odgovarajući izlaz ili zaključak.

Fazifikacija je proces gde se klasična vrednosti ulaznih i izlaznih promenljivih koje postoje u stvarnom svetu transformišu u fazi vrednosti od funkcija pripadnosti.

U praksi, postoji više različitih tipova funkcija pripadnosti, trougaone, trapezoidne, Gausove, u obliku zvona, sigmoidalne i u obliku S-krive [124].

Trougaona funkcija pripadnosti se definiše kao:

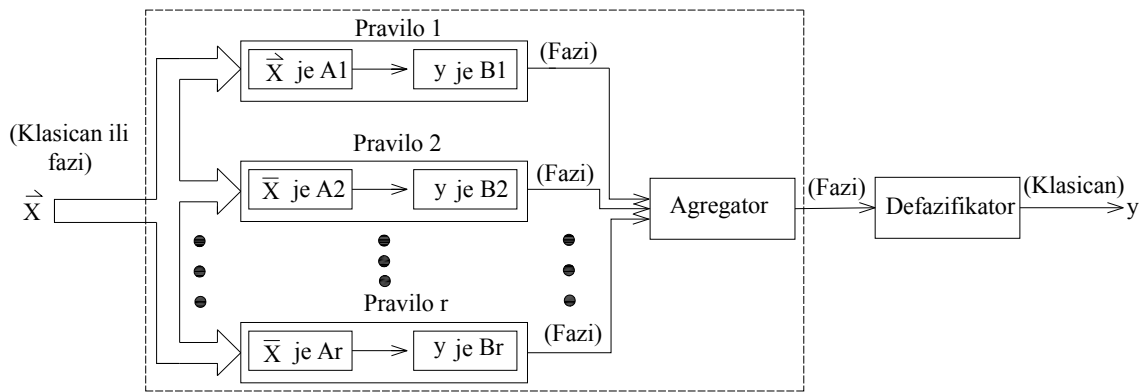
$$\text{Trougaona funkcija pripadnosti } (x; a, b, c) = \left. \begin{array}{l} 0, \text{ ako je } x \leq a. \\ \frac{x-a}{b-a}, \text{ ako je } a \leq x \leq b. \\ \frac{c-x}{c-b}, \text{ ako je } b \leq x \leq c \\ 0, \text{ ako je } c \leq x. \end{array} \right\} \quad (5-1)$$

gde su  $\{a, b, c\}$  ( $a < b < c$ ) parametri lingvističke vrednosti, koji određuju  $x$  koordinate tri ugla trougaone funkcije pripadnosti, dok je  $x$  opseg ulaznih parametara.

Baza podataka sadrži "znanje" za rešenje datog problema, koja je definicija lingvističkih promenljivih i njihovih izraza (fazi skupovi) kao i (fazi) proizvodnih pravila [108]. Fazi pravila se formiraju na osnovu prethodnog iskustva i stečenog znanja.

Osnovni fazi sistemi zaključivanja mogu imati ili fazi ili klasične ulazne veličine, ali izlazna informacija fazi sistema zaključivanja je najčešće fazi veličina. Ponekad je neophodno imati klasičnu izlaznu veličinu, posebno u situacijama gde se fazi sistem zaključivanja koristi u okviru fazi kontrolera. U takvom slučaju je neophodno izvršiti defazifikaciju, kojom se izdvaja klasična (*en. crisp*) vrednost, koja najbolje reprezentuje izlazno fazi pravilo. Fazi sistem zaključivanja sa klasičnim izlazom, prikazan je na slici 5-11. Tačkasta linija na slici 5-11 pokazuje osnovni fazi sistem zaključivanja sa fazi izlazom, dok blok za defazifikaciju služi za transformisanje izlaznog fazi skupa u jednu klasičnu veličinu.



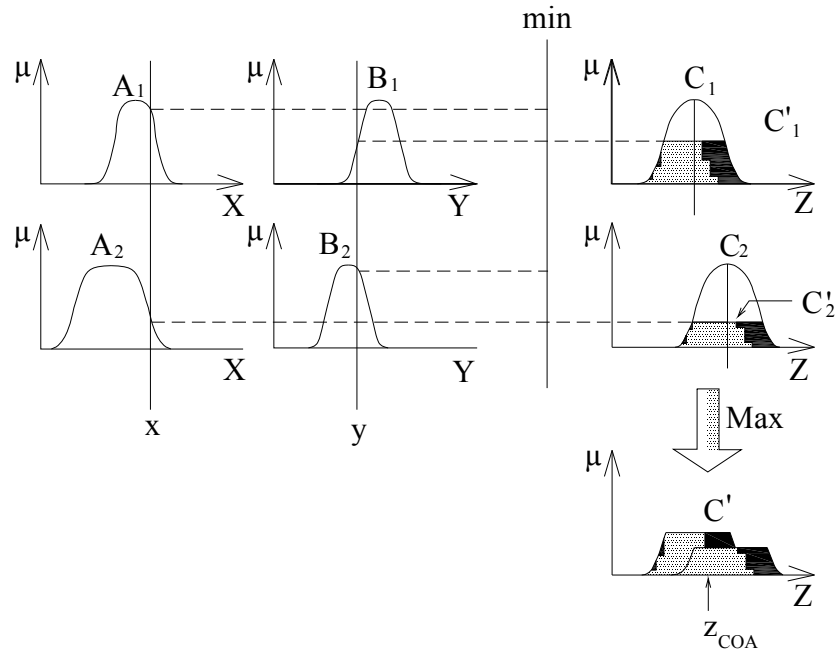


Slika 5-11. Blok dijagram fazi sistema zaključivanja [118]

Proces fazi zaključivanja kombinuje funkcije pripadnosti sa pravilima upravljanja da bi se dobio fazi izlaz [124]. Najčešće primenjivani sistemi fazi zaključivanja su Mamdani fazi model, Takagi –Sugeno–Kang (TSK), Tsukamoto fazi model i drugi.

#### 5.1.5.1 Mamdani fazi modeli

Mamdani fazi sistem zaključivanja je razvijen za potrebe regulisanja rada parnog generatora sa rezervoarom, pomoću skupa lingvističkih kontrolnih pravila koja je definisala grupa eksperata [121]. Slika 5-12, ilustruje kako se iz Mamdani fazi sistema zaključivanja sa dva pravila izdvaja sveukupni izlaz  $z$  kada su ulazne veličine klasično  $x$  i  $y$ . U primeni Mamdani sistema zaključivanja [121], dva fazi sistema zaključivanja su korišćena kao kontroleri za stvaranje ulaza toplote rezervoara i otvora ventila cilindra generatora pare, za regulaciju pritiska fluida u rezervoaru i brzine rada generatora. Pošto je postrojenju bila potrebna samo klasična vrednost kao ulaz, potrebno je primeniti defazifikator za pretvaranje fazi skupa u klasičnu vrednost.



Slika 5-12. Mamdani fazi sistem zaključivanja primenom min i max za T-normu i T-konormu operatore [118]

#### 5.1.5.1.1 Defazifikacija

Defazifikacija se odnosi na način na koji se klasična vrednost izdvaja kao reprezentativna vrednost fazi veličine (broja ili skupa). U praktičnoj upotrebi se koristi pet metoda defazifikacije fazi skupa  $A$  domena od interesa  $Z$ , kako je prikazano na slici 5-13 (Fazi skup  $A$  predstavljen je kao rezultat agregacije izlazne funkcije pripadnosti, kao što je  $C'$  na slici 5-12). Sledi kratak prikaz metoda defazifikacije.

1. Metoda težišta  $z_{COA}$  (en. *Centroid of area*):

$$z_{COA} = \frac{\int_Z \mu_A(z)z \, dz}{\int_Z \mu_A(z) \, dz}, \quad (5-2)$$

gde je  $\mu_A(z)$  rezultat agregacije izlaza funkcije pripadnosti. Ovaj metod defazifikacije se najviše primenjuje i donekle se odvija analogno izračunavanju očekivanih vrednosti raspodela verovatnoće.

2. Metoda polovljenja prostora  $z_{BOA}$  (en. *Bisector of area*):

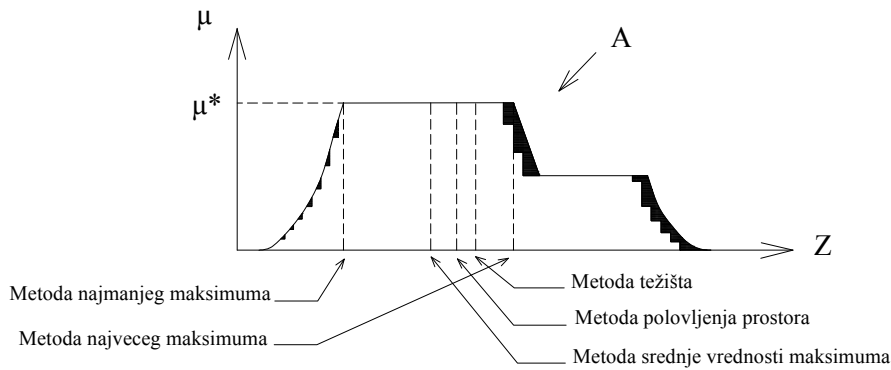
$$\int_{\alpha}^z \mu_A(z) \, dz = \int_{z_{BOA}}^{\beta} \mu_A(z) \, dz \quad (5-3)$$

gde je  $\alpha = \min\{z|z \in Z\}$  i  $\beta = \max\{z|z \in Z\}$ . To je vertikalna linija  $z=z_{BOA}$  koja deli prostor između  $z = \alpha$ ,  $z = \beta$ ,  $y = 0$  i  $y = \mu_A(z)$  na dva prostora iste oblasti.

3. Metoda srednje vrednosti maksimuma (*en. mean of maximum*)  $z_{MOM}$ :  $z_{MOM}$  je srednja vrednost maksimiziranja  $z$  na kojoj funkcija pripadnosti ima maksimum  $\mu^*$ . U simbolima:

$$z_{MOM} = \frac{\int_{Z'} z' dz}{\int_{Z'} dz} \quad (5-4)$$

gde je  $Z' = \{z | \mu_A(z) = \mu^*\}$ . Ako  $\mu_A(z)$  ima jedan maksimum u  $z = z^*$ , onda  $z_{MOM} = z^*$ . Ako  $\mu_A(z)$  dostigne svoj maksimum svaki put kad  $z \in [z_{levo}, z_{desno}]$  (slika 5-13), onda je  $z_{MOM} = (z_{levo} + z_{desno}) / 2$ .



Slika 5-13. Različite šeme za dobijanje klasičnog izlaza [118]

4. Metoda najmanjeg maksimuma (*en. smallest of maximum*)  $z_{SOM}$ :  $z_{SOM}$  je minimum (u smislu veličine) maksimiziranja  $z$ .

5. Metoda najvećeg maksimuma (*en. largest of maximum*)  $z_{LOM}$ :  $z_{LOM}$  je maksimum (u smislu veličine) maksimiziranja  $z$ .

Poslednje dve metode defazifikacije se ne koriste često kao prve tri navedene. Druge fleksibilnije metode defazifikacije se mogu naći u [125, 126, 127].

Da bi se u potpunosti odredila operacija Mamdani sistema zaključivanja, neophodno je dodeliti funkciju za svaku od sledećih operacija:

- AND operater (obično T-norma) za izračunavanje jačine aktiviranja pravila sa AND premisama.
- OR operater (obično T-konorma) za izračunavanje jačine aktiviranja pravila sa OR premisama.

- Operator implikacije (obično T-norma) za izračunavanje kvalifikovane posledice funkcija pripadnosti zasnovanih na datoj jačini aktiviranja pravila.
- Operator agregacije (obično T-konorma) za agregaciju kvalifikovane posledice funkcija pripadnosti za stvaranje opšte izlazne funkcije pripadnosti.
- Operator defazifikacije za pretvaranje izlazne funkcije pripadnosti u jednu klasičnu izlaznu vrednost.

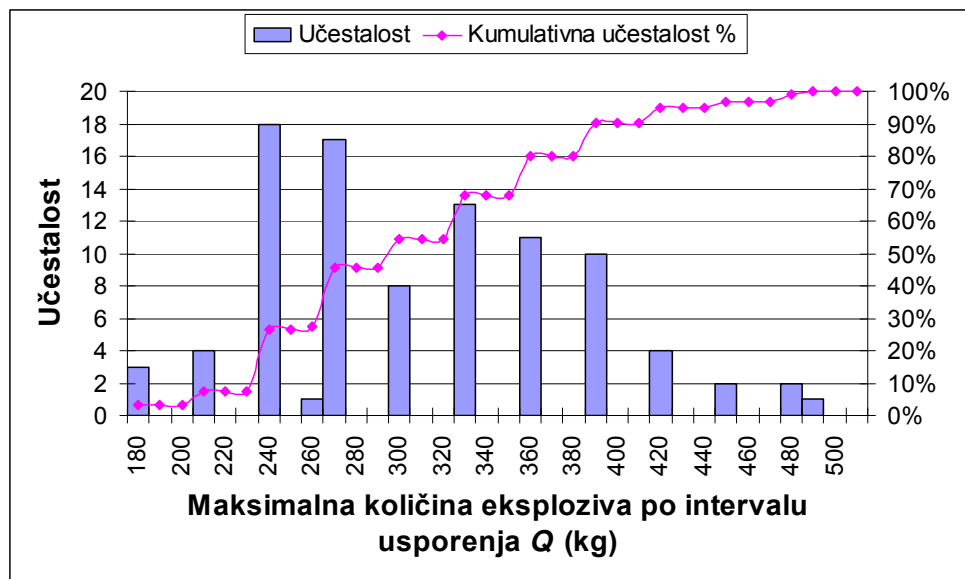
## **5.2 PREDVIĐANJE POTRESA OD MINIRANJA PRIMENOM FAZI LOGIKE**

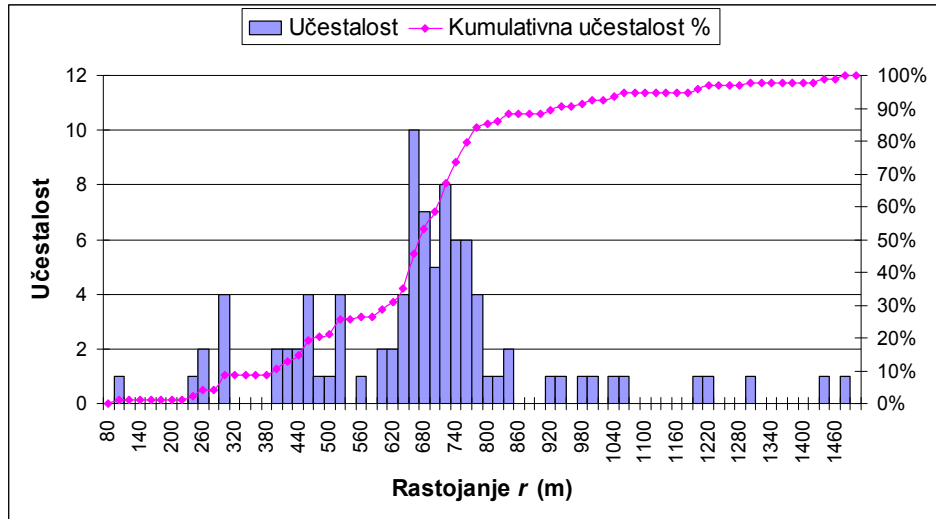
Predviđanje potresa od miniranja primenom fazi logike zasnovano je na podacima dobijenim terenskim merenjima potresa od miniranja na površinskom kopu "Veliki Krivelj" RTB Bor, u periodu od avgusta do novembra 2010. godine [86]. Dobijeno je ukupno 117 podataka od 63 miniranja, sa većeg broja mernih mesta, (Prilog 4). Od ukupno 117 podataka, za formiranje fazi modela upotrebljeno je 94 podatka, dok su preostalih 23 primenjeni za testiranje modela.

Promenljive fazi modela definisane su analizom parametara bušenja i miniranja minskih serija, kao i velosigrama izmerenih potresa od miniranja. Osnovni statistički pokazatelji analiziranih vrednosti parametara prikazani su u Tabeli 5-5. Na slikama od 5-14 do 5-23 predstavljena je učestalost pojavljivanja i kumulativna učestalost u % svih parametara.

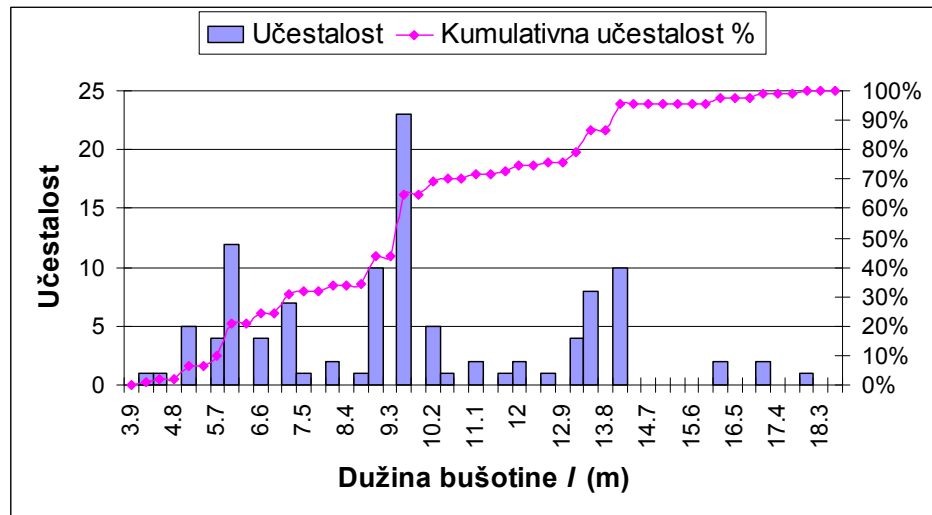
Tabela 5-5. Statistički pokazatelji analiziranih vrednosti parametara

Parametri	Minimalna vrednost	Maksimalna vrednost	Srednja vrednost	Standardna devijacija
Maksimalna količina eksploziva po intervalu usporenja $Q$ (kg)	180	490	309.89	72.13
Rastojanje $r$ (m)	85	1465	669.70	236.95
Dužina minske bušotine $l$ (m)	4	18	10.51	3.23
Dužina minskog punjenja $lp$ (m)	0.5	9	4.02	2.30
Linija najmanjeg otpora $W$ (m)	3.3	9.3	6.00	1.52
Rastojanje između bušotina u redu $a$ (m)	3.7	9.9	6.24	1.34
Rastojanje između redova bušotina $b$ (m)	3.9	8.7	6.09	1.17
Maksimalna brzina oscilovanja $V_{max}$ (mm/s)	0.49	15.2	1.70	1.91
Frekvencija $f$ (Hz)	6.0	55.5	19.78	10.88
Dominantna frekvencija $f_d$ (Hz)	7.2	50.6	16.62	8.27

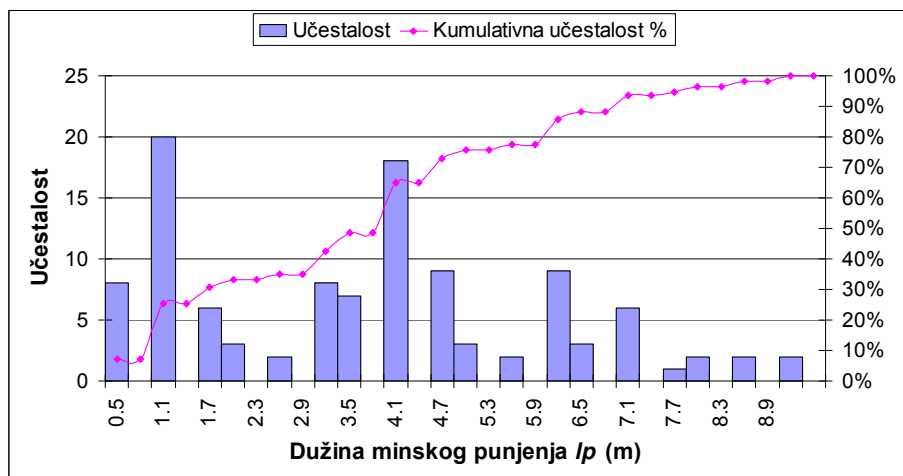

 Slika 5-14. Učestalost pojavljivanja i kumulativna učestalost maksimalne količine eksploziva po intervalu usporenja  $Q$  (kg)



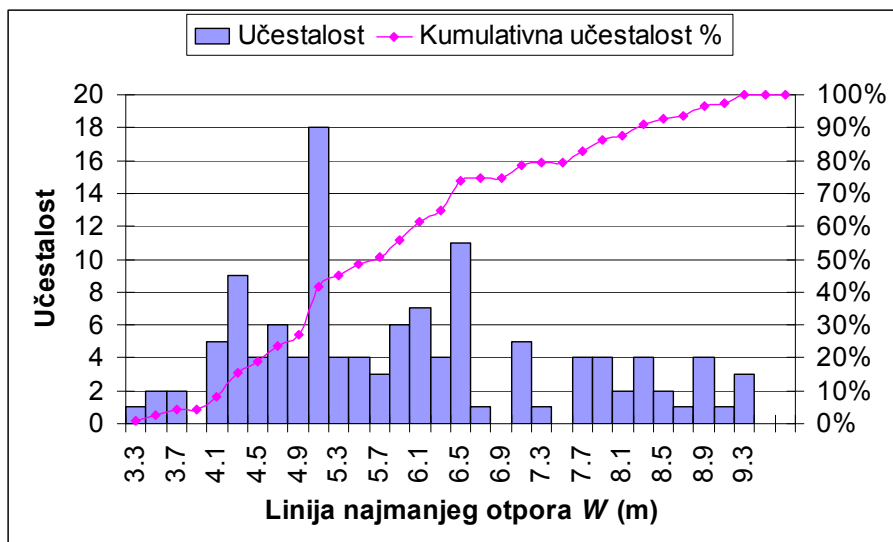
Slika 5-15. Učestalost pojavljivanja i kumulativna učestalost rastojanja  $r$  (m)



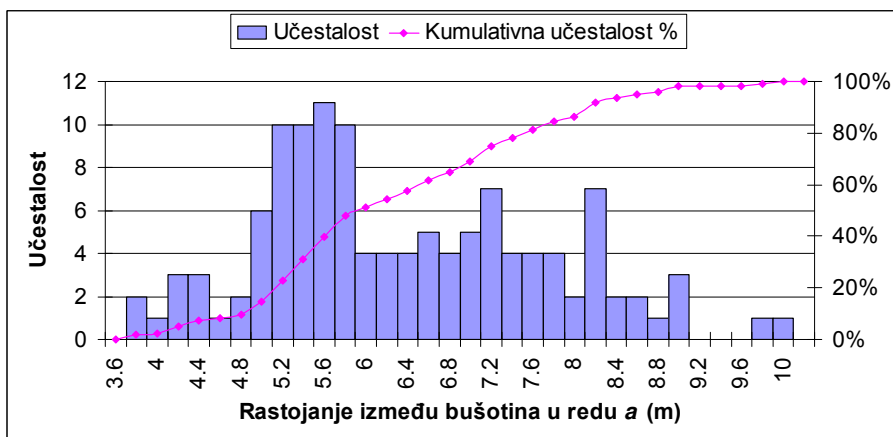
Slika 5-16. Učestalost pojavljivanja i kumulativna učestalost dužine bušotine  $l$  (m)



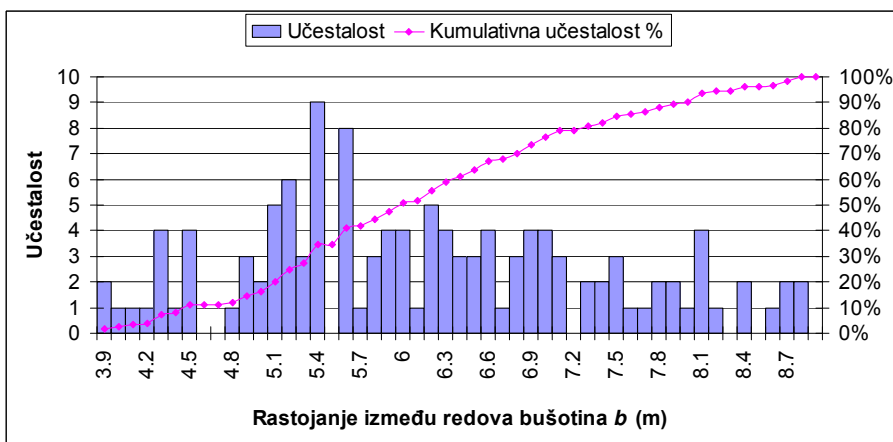
Slika 5-17. Učestalost pojavljivanja i kumulativna učestalost dužine minskog punjenja  $l_p$  (m)



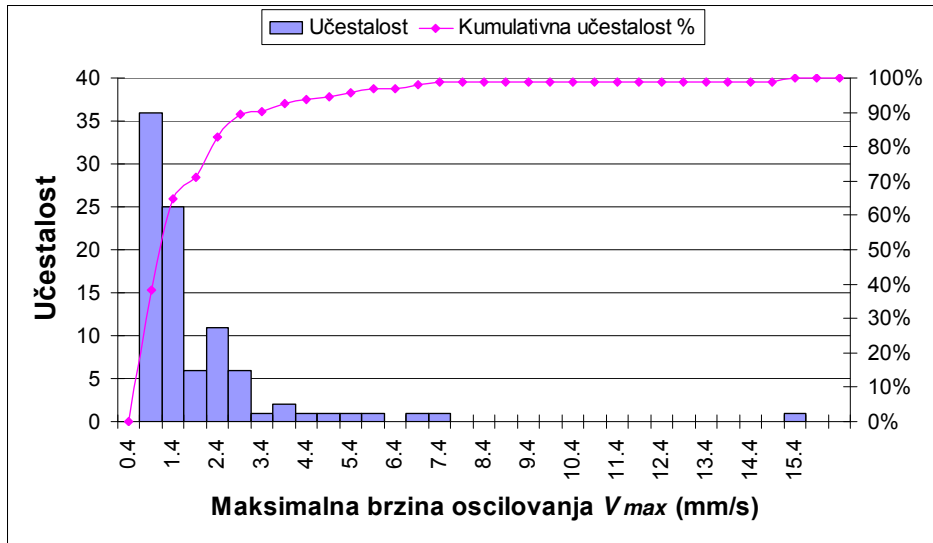
Slika 5-18. Učestalost pojavljivanja i kumulativna učestalost linije najmanjeg otpora W (m)



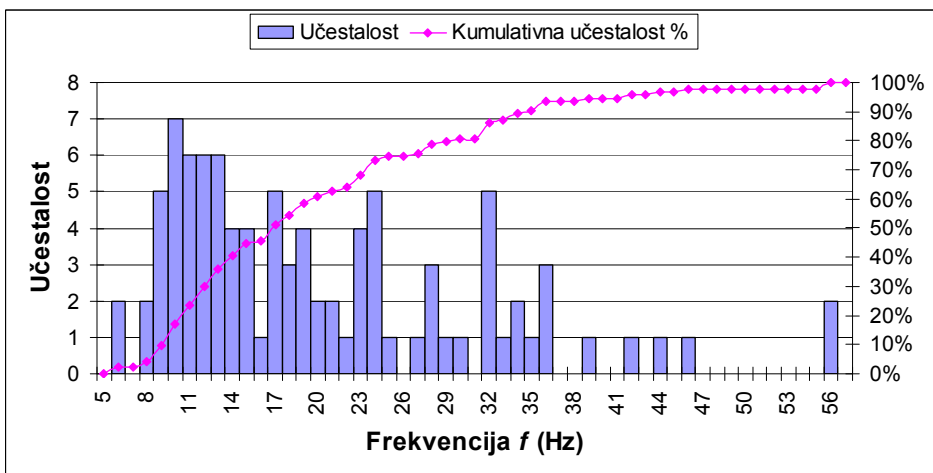
Slika 5-19. Učestalost pojavljivanja i kumulativna učestalost rastojanja između bušotina u redu a (m)



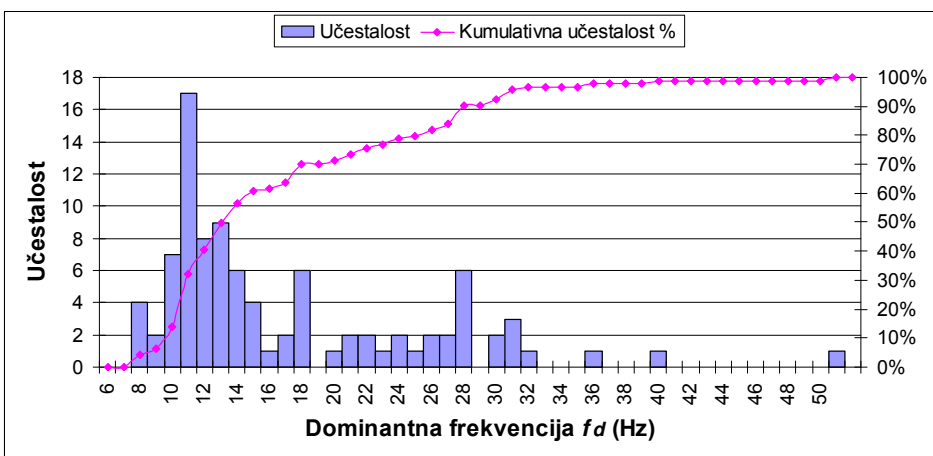
Slika 5-20. Učestalost pojavljivanja i kumulativna učestalost rastojanja između redova minskih bušotina b (m)



Slika 5-21. Učestalost pojavljivanja i kumulativna učestalost maksimalne brzine oscilovanja  $V_{max}$  (mm/s)



Slika 5-22. Učestalost pojavljivanja i kumulativna učestalost frekvencije  $f$  (Hz)



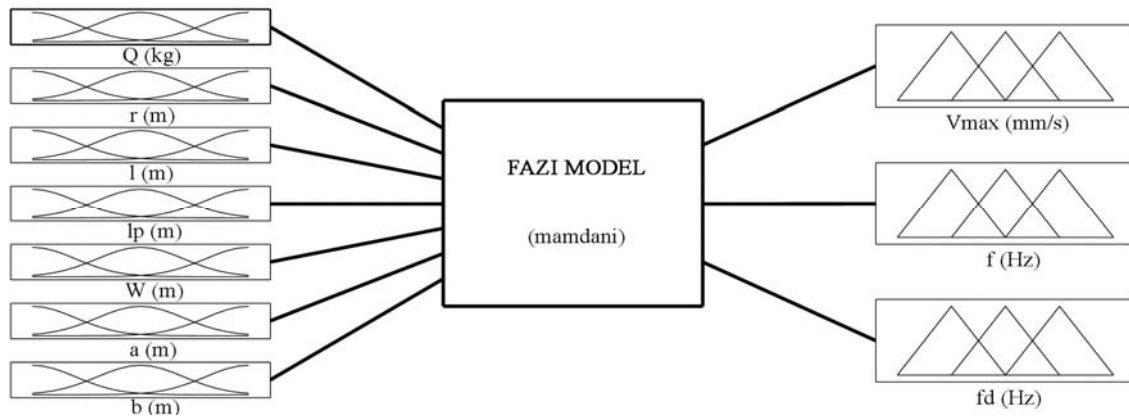
Slika 5-23. Učestalost pojavljivanja i kumulativna učestalost dominantne frekvencije  $f_d$  (Hz)



### 5.2.1 Fazi model

Fazi model predviđanja potresa od miniranja zasnovan je na Mamdani algoritmu. Razvijen je primenom MATLAB, Fuzzy Logic Toolbox (R2011a) [128]. Model ima sedam ulaznih i tri izlazne promenljive.

Ulazne promenljive modela su: maksimalna količina eksploziva po intervalu usporenja  $Q$  (kg), rastojanje od minskog polja do mesta merenja  $r$  (m), dužina minske bušotine  $l$  (m), dužina minskog punjenja  $lp$  (m), linija najmanjeg otpora  $W$  (m), rastojanje između bušotina u redu  $a$  (m) i rastojanje između redova minskih bušotina  $b$  (m). Izlazne promenljive modela su: maksimalna brzina oscilovanja  $V_{max}$  (mm/s), frekvencija  $f$  (Hz) i dominantna frekvencija  $f_d$  (Hz), kao tri bitne karakteristike potresa nastalih od miniranja. Ulazne i izlazne promenljive fazi modela prikazane su na slici 5-24.



Slika 5-24. Ulazne i izlazne promenljive fazi modela

Proces fazifikacije vršen je trougaonim funkcijama pripadnosti. Trougaona funkcija pripadnosti, opisana jednačinom 5-1, primenjena je pri pretvaranju lingvističkih vrednosti u opseg od 0 do 1.

$$\text{Trougaona funkcija pripadnosti } (x; a, b, c) = \left. \begin{array}{l} 0, \text{ ako je } x \leq a. \\ \frac{x-a}{b-a}, \text{ ako je } a \leq x \leq b. \\ \frac{c-x}{c-b}, \text{ ako je } b \leq x \leq c \\ 0, \text{ ako je } c \leq x. \end{array} \right\}$$

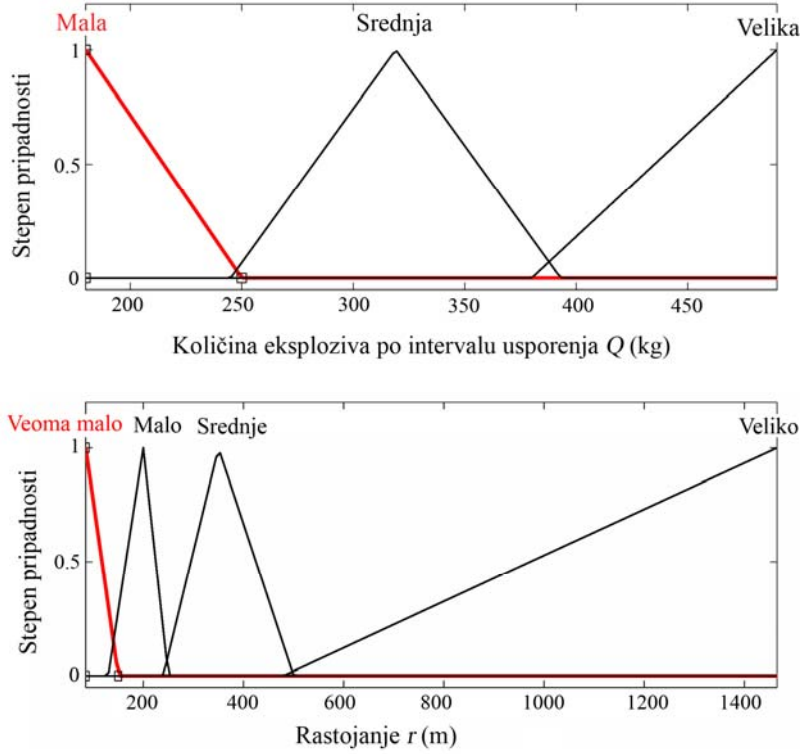
gde su  $\{a, b, c\}$  ( $a < b < c$ ) parametri lingvističke vrednosti, koji određuju  $x$  koordinate tri ugla trougaone funkcije pripadnosti, dok je  $x$  opseg ulaznih parametara.

Funkcije pripadnosti i njihovi parametri ulaznih i izlaznih promenljivih prikazane su u Tabeli 5-6.

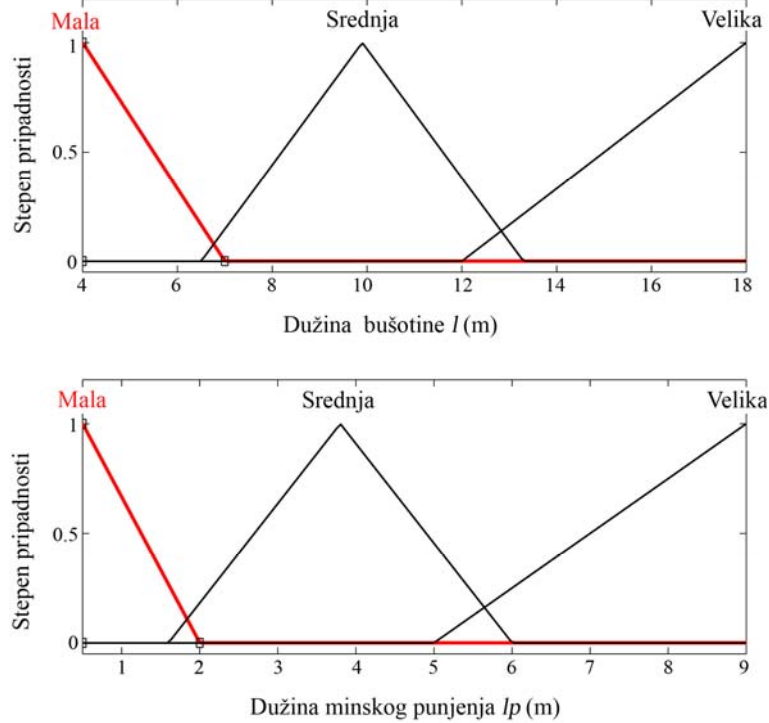
Tabela 5-6. Funkcije pripadnosti i njihovi parametri ulaznih i izlaznih promenljivih

Promenljive	Lingvističke promenljive	Opseg	Lingvističke vrednosti	Parametri
Ulazne	Maksimalna količina eksploziva po intervalu usporenja $Q$ (kg)	[180 490]	Mala	[180 180 250]
			Srednja	[245 319 393]
			Velika	[380 490 490]
	Rastojanje $r$ (m)	[85 1465]	Veoma malo	[85 85 150]
			Malo	[130 200 250]
			Srednje	[240 350 500]
			Veliko	[480 1465 1465]
	Dužina bušotine $l$ (m)	[4 18]	Mala	[4 4 7]
			Srednja	[6.5 9.9 13.3]
			Velika	[12 18 18]
	Dužina minskih punjenja $lp$ (m)	[0.5 9]	Mala	[0.5 0.5 2]
			Srednja	[1.6 3.8 6]
			Velika	[5 9 9]
	Linija najmanjeg otpora $W$ (m)	[3.3 9.3]	Mala	[3.3 3.3 4.8]
			Srednja	[4.4 5.9 7.4]
			Velika	[7 9.3 9.3]
	Rastojanje između bušotina u redu $a$ (m)	[3.7 9.9]	Malo	[3.7 3.7 5.2]
			Srednje	[5 6.3 7.7]
Veliko			[7.6 9.9 9.9]	
Rastojanje između redova bušotina $b$ (m)	[3.9 8.7]	Malo	[3.9 3.9 5]	
		Srednje	[4.9 6.1 7.3]	
		Veliko	[7 8.7 8.7]	
Izlazne	Maksimalna brzina oscilovanja $V_{max}$ (mm/s)	[0.49 15.2]	Veoma mala	[0.49 0.49 1]
			Mala	[0.8 2.5 3]
			Srednja	[2.8 3.5 5]
			Velika	[4.8 6.5 8]
			Veoma velika	[7.8 15.2 15.2]
	Frekvencija $f$ (Hz)	[6 55.5]	Mala	[6 6 10]
			Srednja	[9 20.3 25]
			Velika	[24.5 35 45]
			Veoma velika	[40 55.5 55.5]
	Dominantna frekvencija $fd$ (Hz)	[7.2 50.6]	Mala	[7.2 7.2 10]
			Srednja	[9 17.3 25]
			Velika	[24.5 35 45]
Veoma velika			[40 50.6 50.6]	

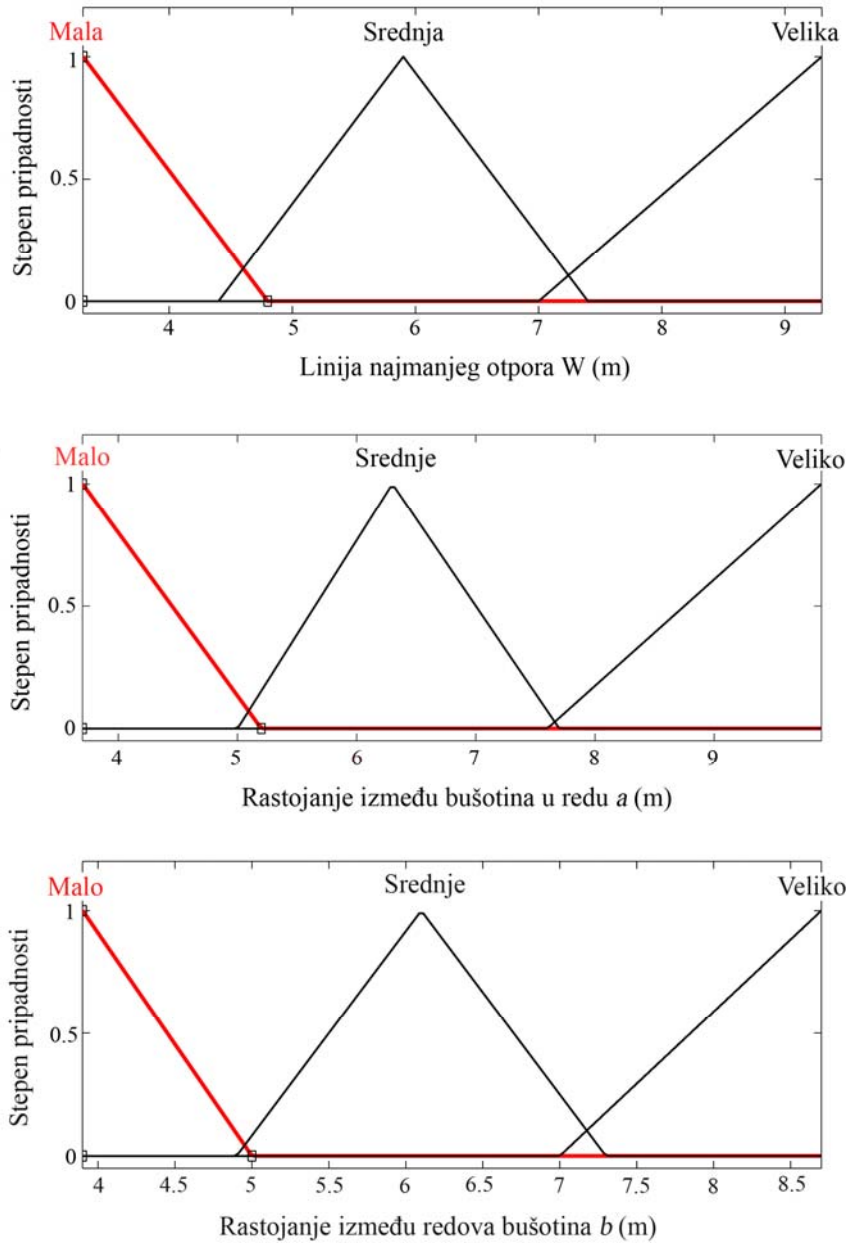
Na slikama 5-25, 5-26 i 5-27 prikazane su trougaone funkcije pripadnosti ulaznih promenljivih fazi modela.



Slika 5-25. Trougaone funkcije pripadnosti ulaznih promenljivih maksimalne količine eksploziva po intervalu usporenja  $Q$  i rastojanja  $r$

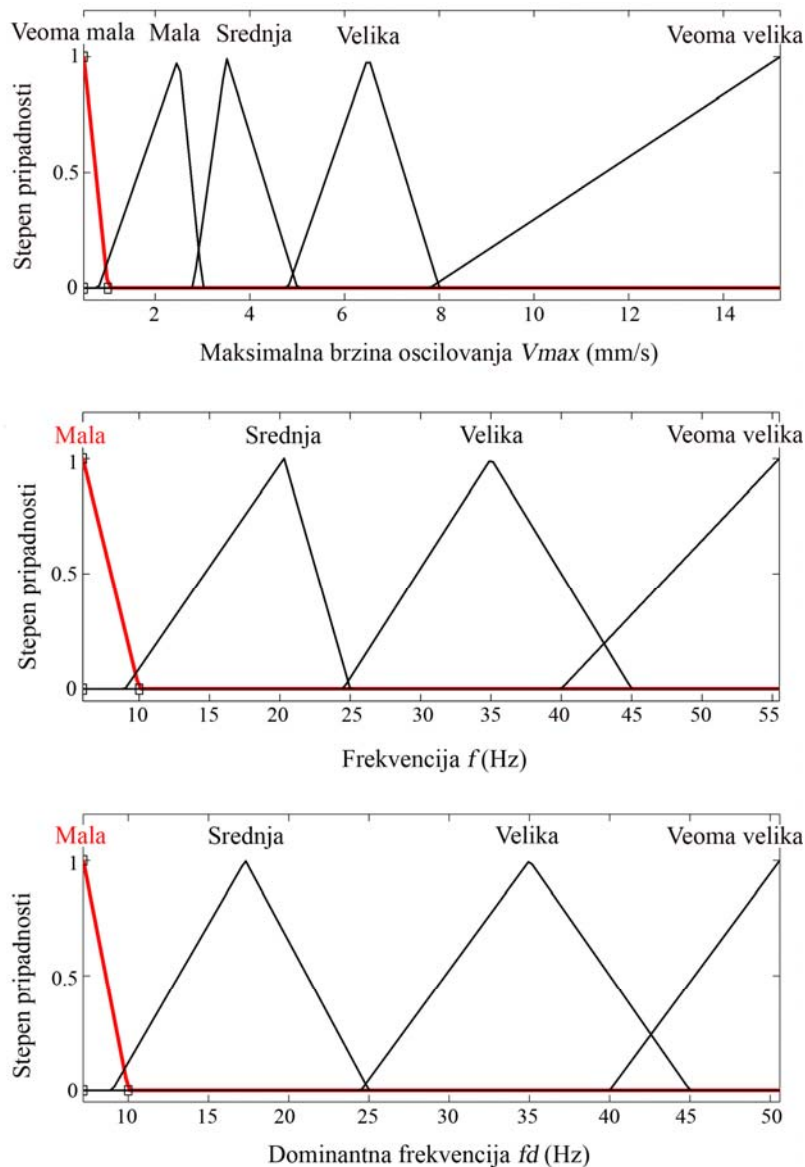


Slika 5-26. Trougaone funkcije pripadnosti ulaznih promenljivih dužine bušotine  $l$  i dužine minskog punjenja  $lp$



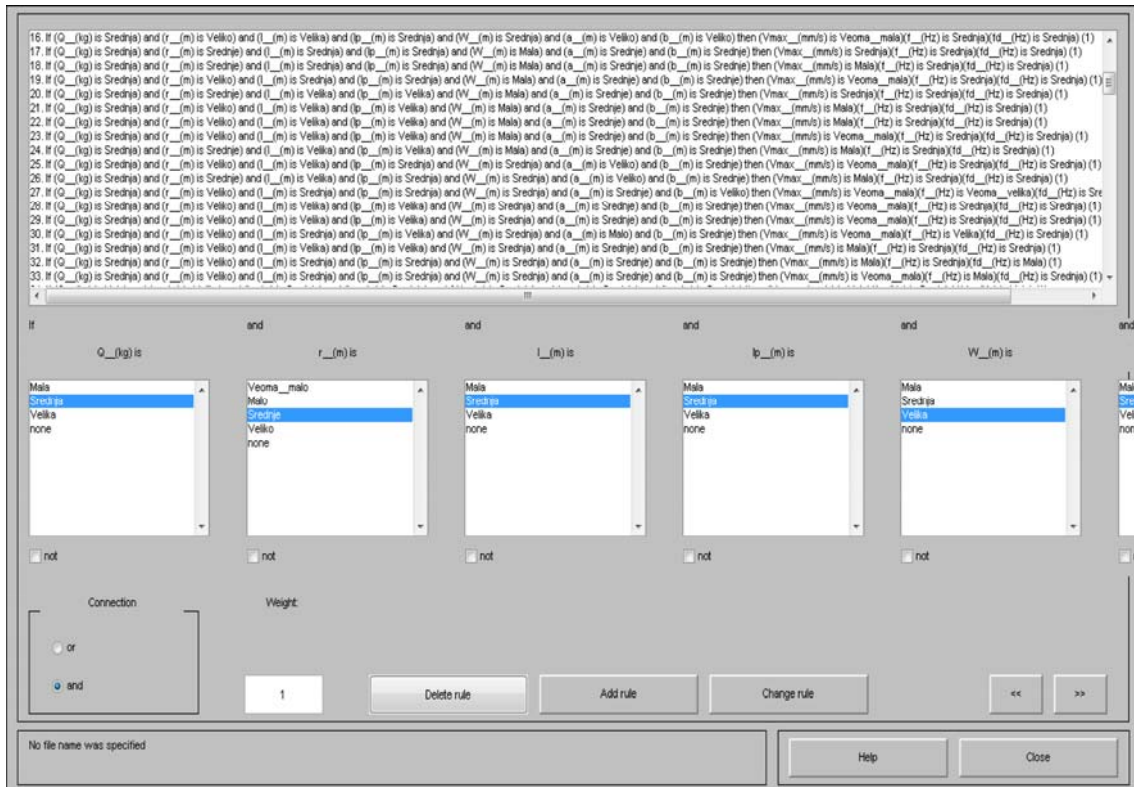
Slika 5-27. Trougaone funkcije pripadnosti ulaznih promenljivih linije najmanjeg otpora  $W$ , rastojanja između bušotina u redu  $a$  i rastojanja između redova bušotina  $b$

Trougaone funkcija pripadnosti izlaznih promenljivih fazi modela - maksimalne brzine oscilovanja  $V_{max}$ , frekvencije  $f_i$  i dominantne frekvencije  $f_d$ , prikazane su na slici 5-28.



Slika 5-28. Trougaone funkcije pripadnosti izlaznih promenljivih maksimalne brzine oscilovanja  $V_{max}$ , frekvencije  $f$  i dominantne frekvencije  $f_d$

Sledeći korak fazi sistema zaključivanja je formiranje IF THEN (AKO TADA) fazi pravila, koji pokazuju fazi odnose između ulaznih i izlaznih fazi promenljivih. Za formiranje baze pravila fazi modela, primenjeno je ukupno 155 pravila na osnovu prethodnih saznanja i iskustava iz oblasti seizmičkih efekata miniranja. Na slici 5-29 je prikazan izgled ekrana za prikaz fazi pravila u MATLAB, Fuzzy Logic Toolbox (R2011a) [128].



Slika 5-29. Izgled ekrana za prikaz fazi pravila u MATLAB, Fuzzy Logic Toolbox (R2011a) [128]

Poslednji korak u formiranju fazi modela je pretvaranje svakog rezultata u obliku fazi skupa u klasičnu vrednost procesom defazifikacije. Proces defazifikacije, izvršen je metodom težišta (COA). Klasična vrednost primenom metode težišta (COA) dobija se prema izrazu 5-2:

$$z^* = \frac{\int \mu_A(z)z dz}{\int \mu_A(z) dz}$$

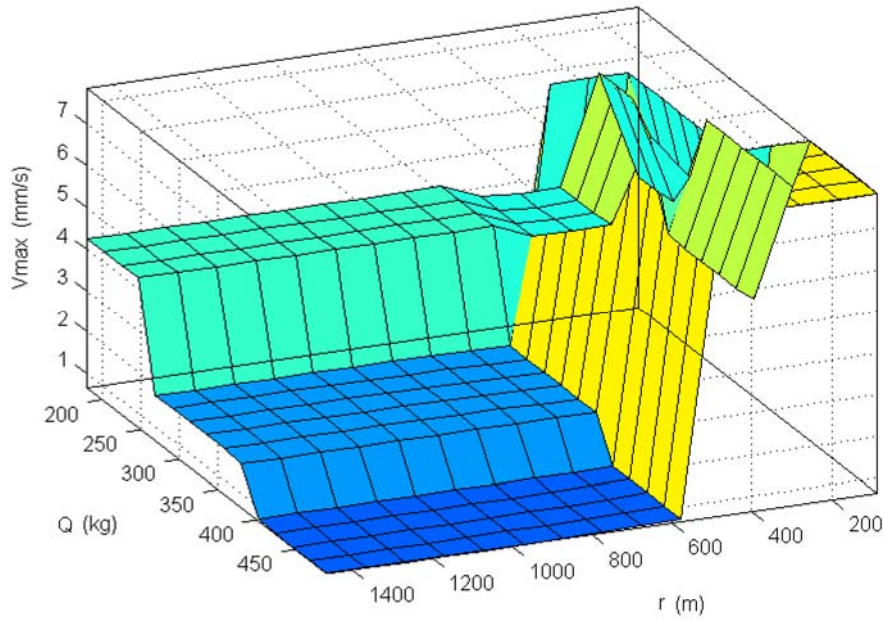
gdje je  $z^*$  klasična vrednost za  $z$  izlaznu i  $\mu_A(z)$  je agregatna izlazna funkcija pripadnosti. Razvijen fazi model obezbeđuje predviđanje maksimalne brzine oscilovanja  $V_{max}$ , frekvencije  $f$  i dominantne frekvencije  $f_d$  pri unosu odgovarajućih vrednosti ulaznih parametara: maksimalne količine eksploziva po intervalu usporenja  $Q$ , rastojanja od minskog polja do mesta merenja  $r$ , dužine minske bušotine  $l$ , dužine minskog punjenja  $l_p$ , linije najmanjeg otpora  $W$ , rastojanja između bušotina u redu  $a$  i rastojanja između redova bušotina  $b$ . Unosom određenih vrednosti ulaznih promenljivih ( $Q, r, l, l_p, W, a, b$ ), dobijaju se odgovarajuće vrednosti izlaznih promenljivih ( $V_{max}, f, f_d$ ). Na primer, za

sljedeće vrednosti ulaznih promenljivih:  $Q = 270$  kg,  $r = 336$  m,  $l = 9.5$  m,  $l_p = 4.5$  m,  $W = 8.5$  m,  $a = 7.2$  m,  $b = 6$  m, predviđene vrednosti izlaznih promenljivih dobijene fazi modelom su:  $V_{max} = 2.92$  mm/s,  $f = 27.2$  Hz i  $f_d = 17$  Hz. Pregled dejstva pravila od ulaza do izlaza fazi sistema sa navedenim primerom prikazan je na slici 5-30.

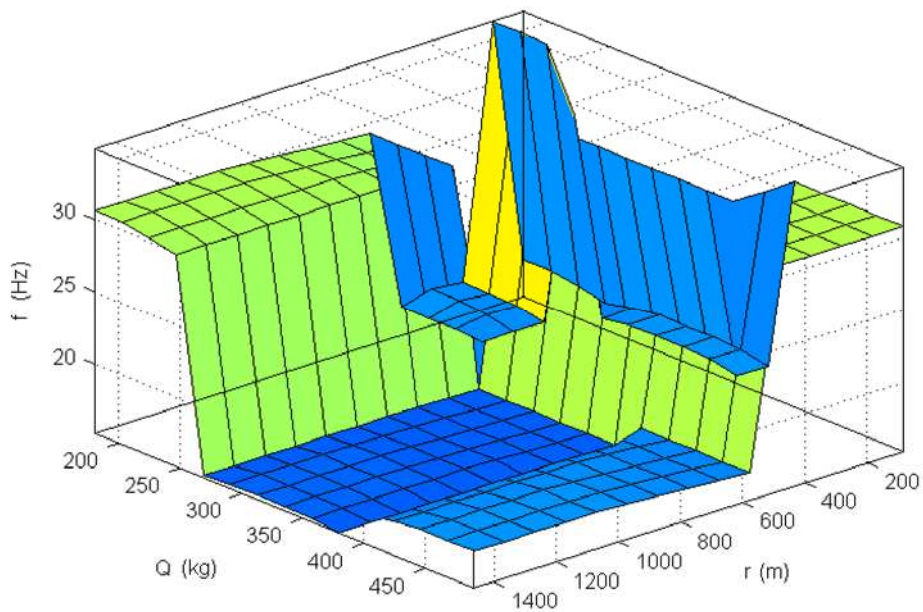


Slika 5-30. Izgled ekrana za pregled dejstva pravila od ulaza do izlaza fazi sistema u MATLAB, Fuzzy Logic Toolbox (R2011a) [128]

3D prikaz izlaznih promenljivih od odgovarajućih ulaznih promenljivih fazi sistema, predstavljeni su na slikama od 5-31 do 5-42.

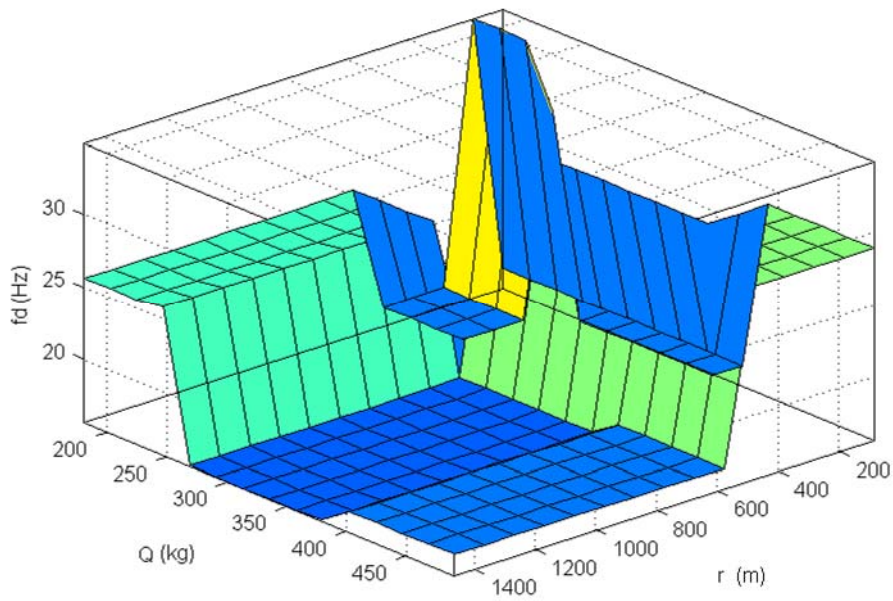


Slika 5-31. 3D prikaz maksimalne brzine oscilovanja  $V_{max}$  u odnosu na količinu eksploziva po intervalu usporenja  $Q$  i rastojanje od minskog polja do mesta merenja  $r$

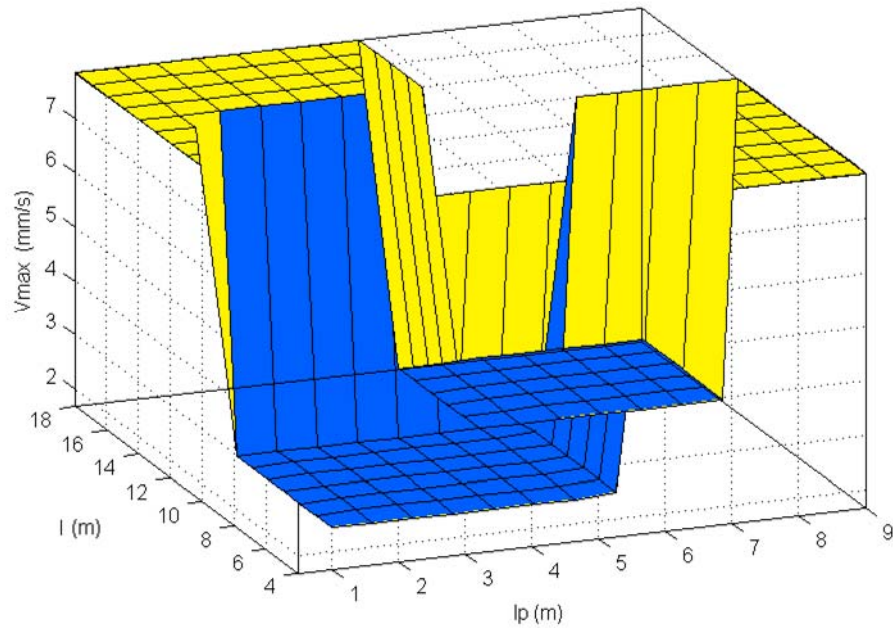


Slika 5-32. 3D prikaz frekvencije  $f$  u odnosu na količinu eksploziva po intervalu usporenja  $Q$  i rastojanje od minskog polja do mesta merenja  $r$

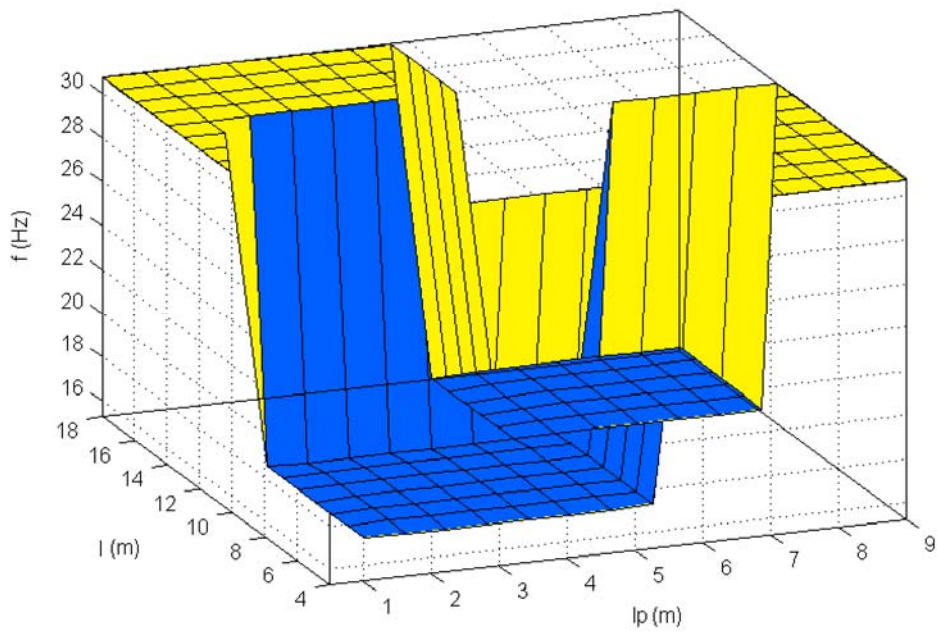




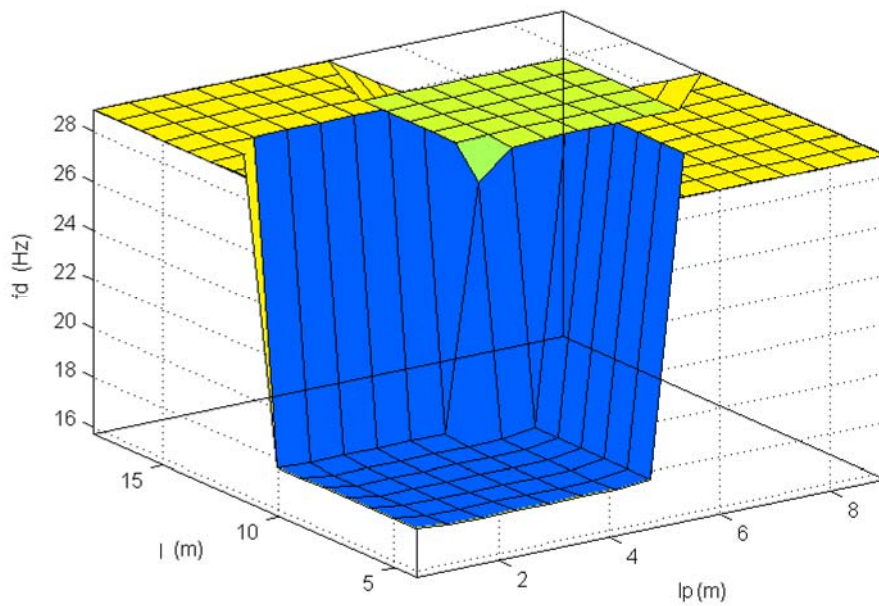
Slika 5-33. 3D prikaz dominantne frekvencije  $f_d$  u odnosu na količinu eksploziva po intervalu usporenja  $Q$  i rastojanje od minskog polja do mesta merenja  $r$



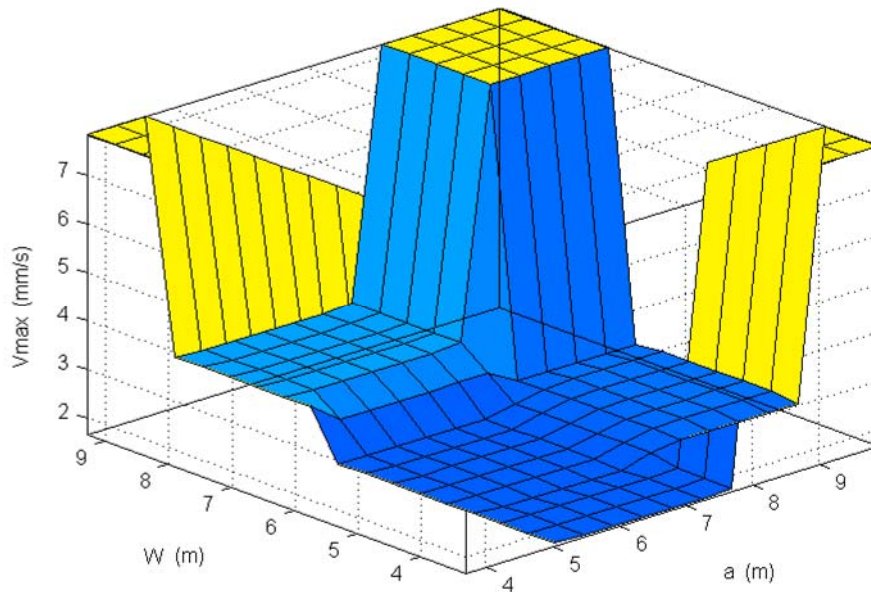
Slika 5-34. 3D prikaz maksimalne brzine oscilovanja  $V_{max}$  u odnosu na dužinu minske bušotine  $l$  i dužinu minskog punjenja  $l_p$



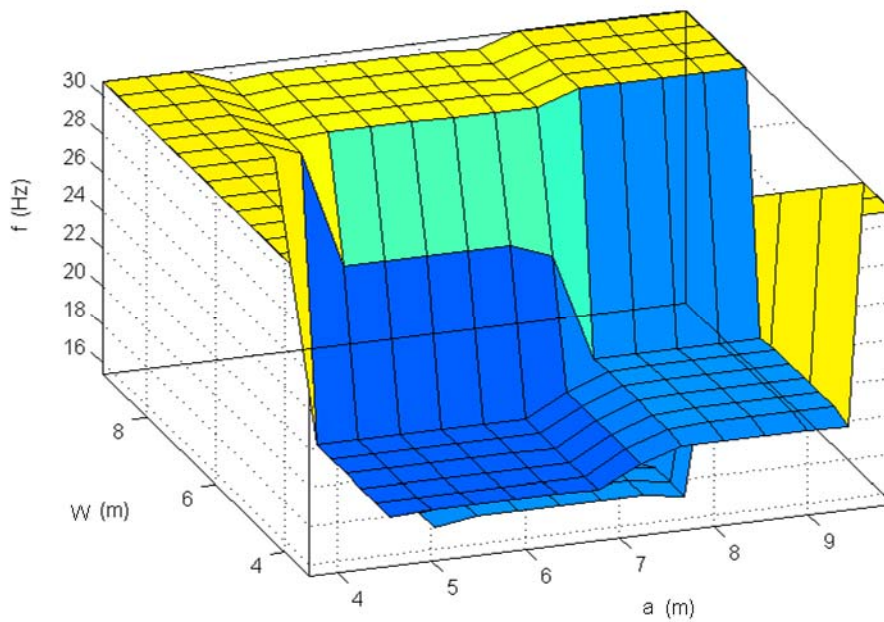
Slika 5-35. 3D prikaz frekvencije  $f$  u odnosu na dužinu minske bušotine  $l$  i dužinu minskog punjenja  $l_p$



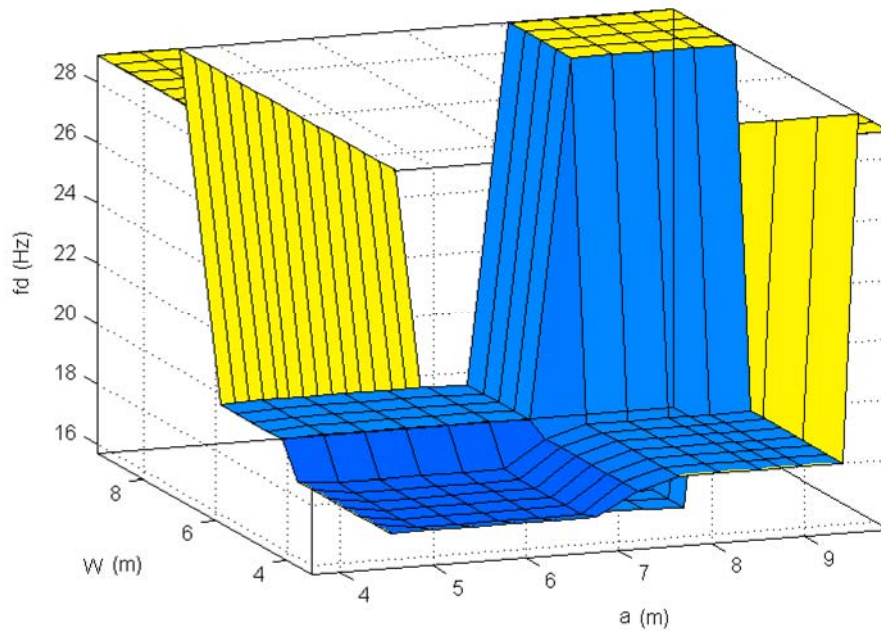
Slika 5-36. 3D prikaz dominantne frekvencije  $f_d$  u odnosu na dužinu minske bušotine  $l$  i dužinu minskog punjenja  $l_p$



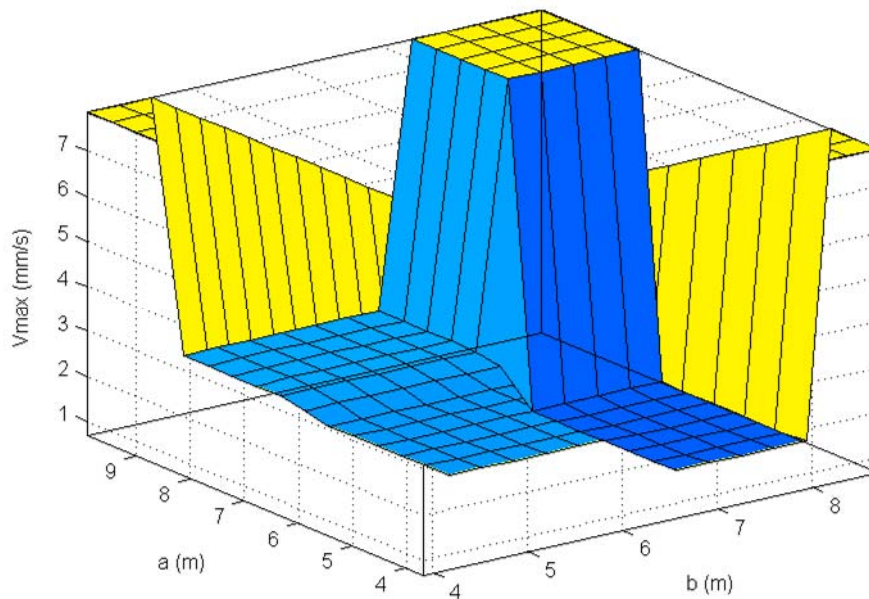
Slika 5-37. 3D prikaz maksimalne brzine oscilovanja  $V_{max}$  u odnosu na liniju najmanjeg otpora  $W$  i rastojanje između bušotina u redu  $a$



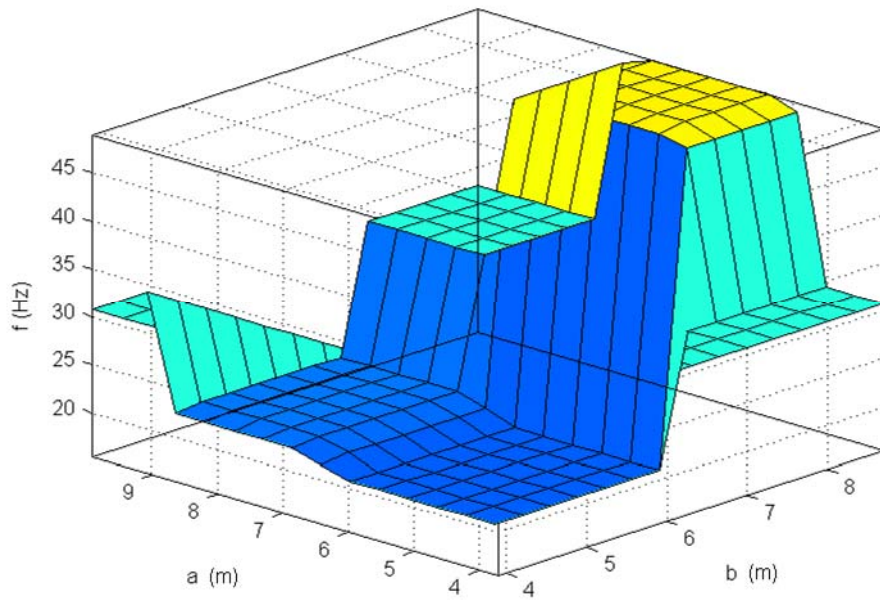
Slika 5-38. 3D prikaz frekvencije  $f$  u odnosu na liniju najmanjeg otpora  $W$  i rastojanje između bušotina u redu  $a$



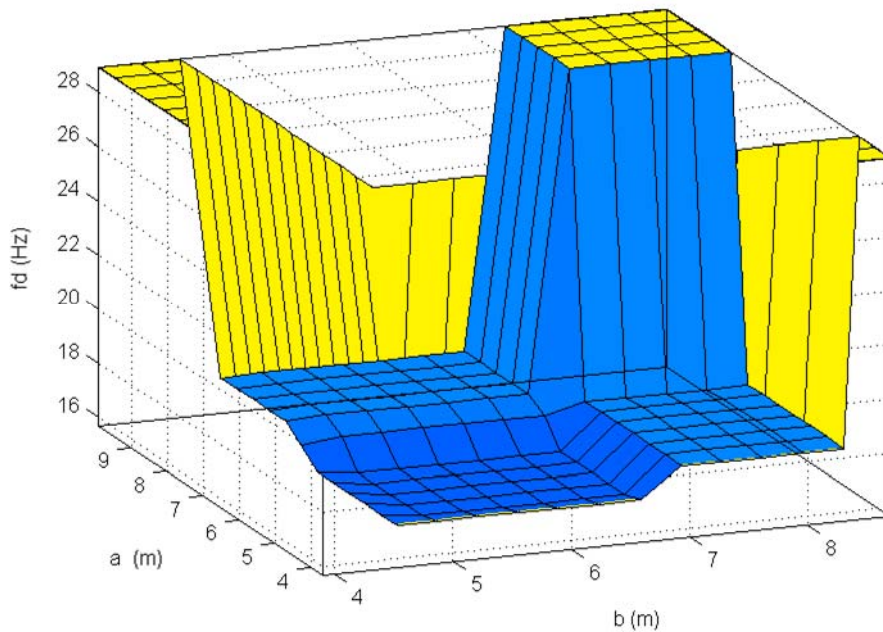
Slika 5-39. 3D prikaz dominantne frekvencije  $f_d$  u odnosu na liniju najmanjeg otpora  $W$  i rastojanje između bušotina u redu  $a$



Slika 5-40. 3D prikaz maksimalne brzine oscilovanja  $V_{max}$  u odnosu na rastojanje između bušotina u redu  $a$  i rastojanje između redova bušotina  $b$



Slika 5-41. 3D prikaz frekvencije  $f$  u odnosu na rastojanje između bušotina u redu  $a$  i rastojanje između redova bušotina  $b$



Slika 5-42. 3D prikaz dominantne frekvencije  $f_d$  u odnosu na rastojanje između bušotina u redu  $a$  i rastojanje između redova bušotina  $b$

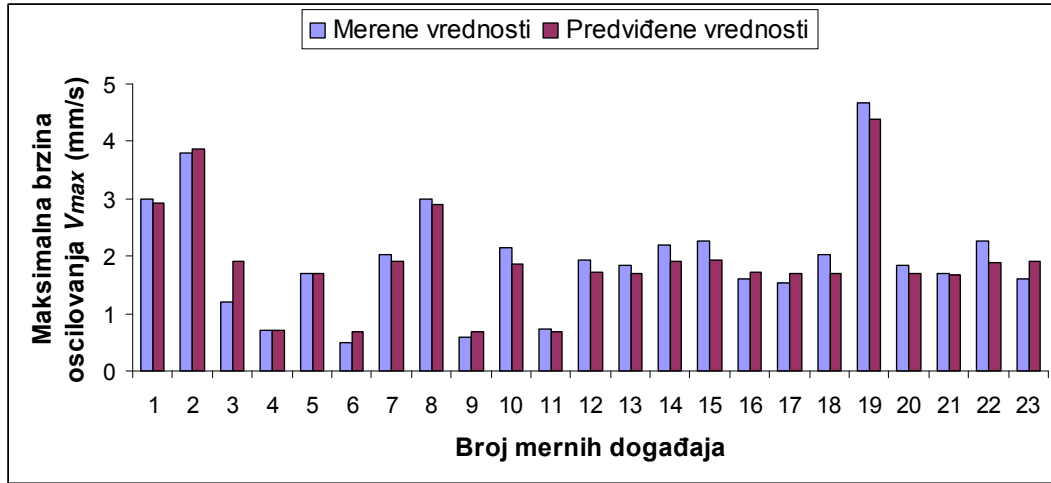
### 5.2.1.1 Testiranje fazi modela

Od ukupno 117 podataka, izdvojeno je 23 podatka, koji su primenjeni za testiranje modela. U tabeli 5-7 dati su podaci dobijeni terenskim merenjima, kao i predviđene vrednosti dobijene fazi modelom za  $V_{max}$ ,  $f$ ,  $f_d$ .

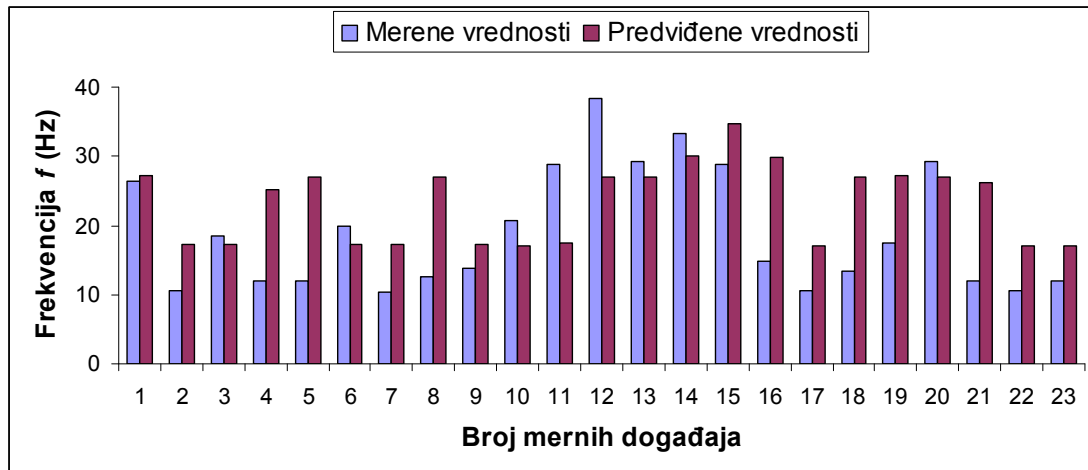
Tabela 5-7. Izmerene i predviđene vrednosti dobijene fazi modelom za  $V_{max}$ ,  $f$ ,  $f_d$

Maksimalna brzina oscilovanja $V_{max}$ (mm/s)		Frekvencija $f$ (Hz)		Dominantna frekvencija $f_d$ (Hz)	
Merene vrednosti	Predviđene vrednosti	Merene vrednosti	Predviđene vrednosti	Vrednosti dobijene analizom merenih vrednosti	Predviđene vrednosti
3.0	2.92	26.3	27.2	12.6	17.0
3.8	3.87	10.6	17.3	13.1	17.0
1.2	1.91	18.5	17.2	16.0	17.0
0.7	0.71	11.9	25.2	17.6	25.8
1.7	1.70	11.9	27.1	13.1	17.0
0.49	0.69	19.9	17.3	14.1	17.0
2.02	1.90	10.4	17.2	11.7	17.0
2.99	2.91	12.6	27.0	11.7	27.0
0.6	0.69	13.8	17.3	12.2	17.0
2.14	1.87	20.8	17.1	26.8	34.8
0.74	0.68	28.8	17.4	36.0	34.8
1.94	1.73	38.3	27.0	27.7	27.0
1.85	1.69	29.3	27.0	14.8	25.8
2.2	1.91	33.2	30.1	45.3	40.4
2.27	1.94	28.9	34.8	11.7	27.0
1.61	1.72	14.8	29.9	48.7	28.9
1.53	1.70	10.6	17.1	12.2	27.0
2.03	1.69	13.5	27.0	14.6	25.8
4.66	4.39	17.4	27.2	18.0	27.0
1.85	1.70	29.3	27.0	14.6	25.9
1.69	1.68	11.9	26.2	13.1	23.9
2.26	1.88	10.6	17.1	10.2	17.0
1.6	1.91	11.9	17.1	11.2	17.0

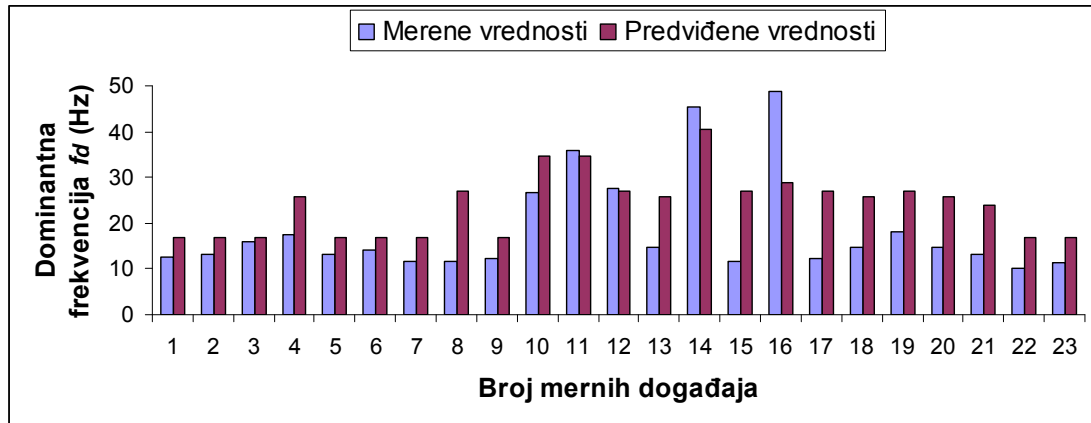
Razlika izmerenih vrednosti i predviđenih vrednosti fazi modelom predstavljena je na slikama 5-43, 5-44, 5-45. Dobijeni rezultati pokazuju visoku pouzdanost fazi modela u predviđanju maksimalne brzine oscilovanja, frekvencije i dominantne frekvencije.



Slika 5-43. Razlika merenih vrednosti maksimalne brzine oscilovanja i predviđenih vrednosti primenom fazi modela



Slika 5-44. Razlika merenih vrednosti frekvencije i predviđenih vrednosti primenom fazi modela



Slika 5-45. Razlika vrednosti dominantne frekvencije dobijene analizom podataka sa terena i predviđenih vrednosti dominantne frekvencije dobijene primenom fazi modela

### 5.2.1.1.1 Predviđanje brzine oscilovanja primenom regresione analize

Za predviđanje potresa od miniranja regresionom analizom primenjena su 94 podatka dobijena terenskim istraživanjima, identična kao kod fazi modeliranja, da bi se omogućilo poređenje dobijenih rezultata u cilju testiranja fazi modela. Podaci su statistički analizirani primenom regresione analize kako bi se dobio model predviđanja maksimalne brzine oscilovanja na osnovu ulaznih parametara: maksimalne količine eksploziva po intervalu usporenja  $Q$  (kg) i rastojanja od minskog polja do mesta merenja  $r$  (m).

Maksimalna brzina oscilovanja predstavlja maksimalnu vrednost od tri merene komponente (longitudinalna, transversalna i vertikalna) brzine oscilovanja. Redukovano rastojanje izračunato je iz obrasca (jednačina 2-23):

$$R = \frac{r}{\sqrt{Q}}, \quad (m/\sqrt{kg})$$

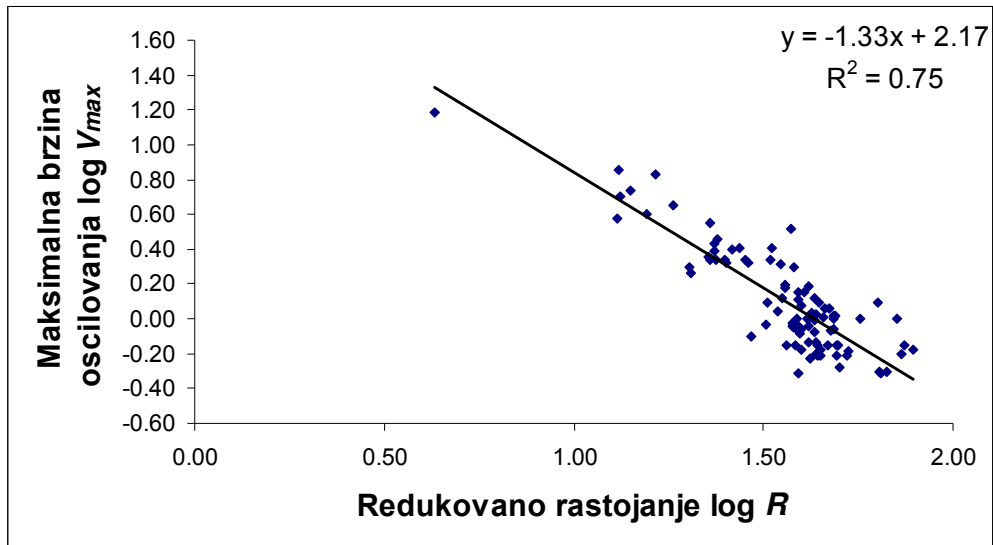
gde je:

$Q$  - maksimalna količina eksploziva po intervalu usporenja, (kg)

$r$  - rastojanje mernog mesta od minskog polja, (m)

Na koordinatnom sistemu (slika 5-46) nanete su logaritamske vrednosti maksimalnih brzina oscilovanja ( $y$  osa) dobijene terenskim merenjima  $V_{max}$  i logaritamske vrednosti redukovanog rastojanja  $R$  ( $x$  osa).



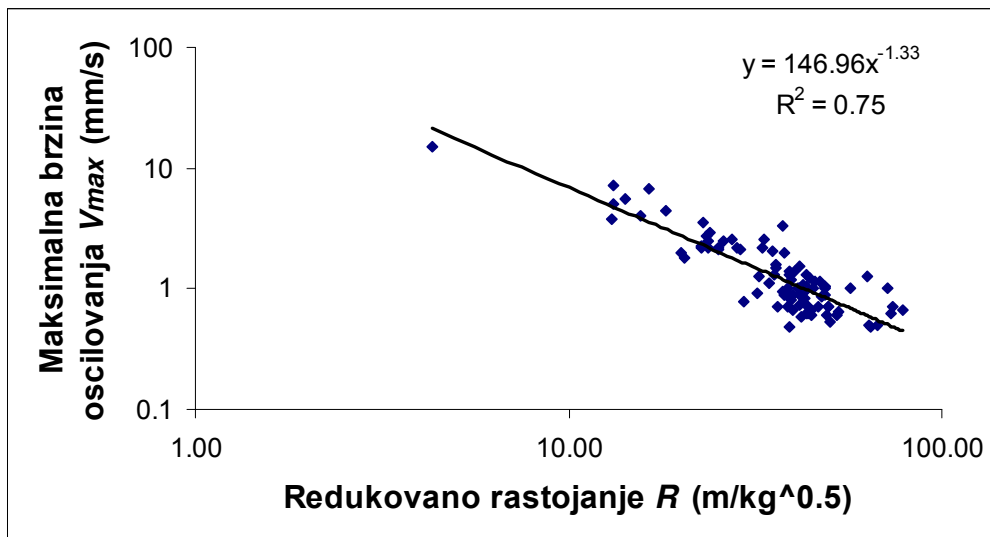


Slika 5-46. Regresiona analiza logaritamskih vrednosti maksimalne brzine oscilovanja u funkciji logaritamskih vrednosti redukovanog rastojanja

Regressionom analizom dobijen je model predviđanja maksimalne brzine oscilovanja za nivo pouzdanosti od 50 % :

$$\log V_{\max} = -1.33 \cdot \log R + 2.167 \quad (5-5)$$

odnosno u drugom obliku:



Slika 5-47. Regresiona analiza maksimalne brzine oscilovanja u funkciji redukovanog rastojanja

Model predviđanja maksimalne brzine oscilovanja za nivo pouzdanosti od 50 % iznosi:

$$V_{\max} = 146.96 \cdot R^{-1.33} \Rightarrow 146.96 \cdot \left( \frac{r}{\sqrt{Q}} \right)^{-1.33}, (mm/s) \quad (5-6)$$

gde je:

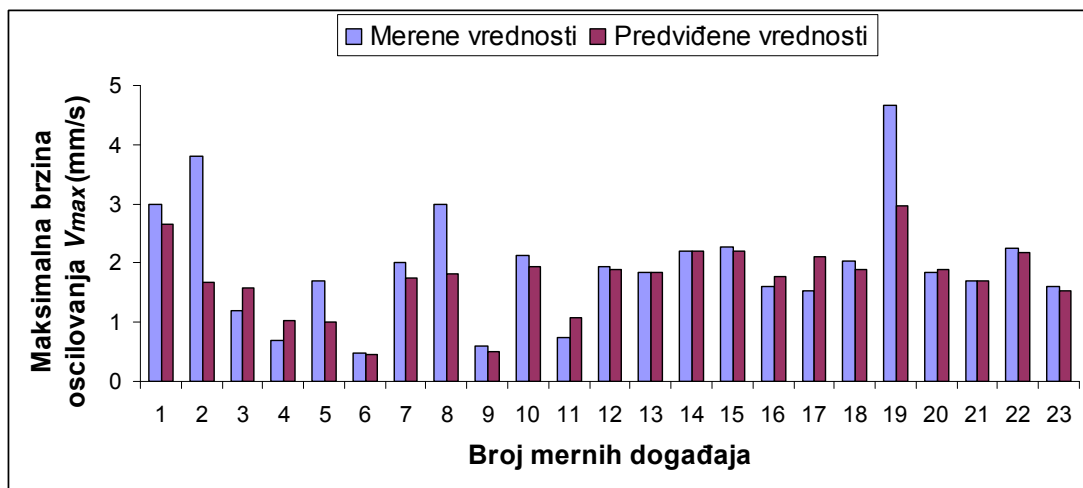
Q - maksimalna količina eksploziva po intervalu usporenja, (kg)

r - rastojanje mernog mesta od minskog polja, (m)

R - redukovano rastojanje, (m/kg<sup>0.5</sup>)

Koeficijent korelacije  $R^2$  je jednak 0.75, a standardna greška predviđanja iznosi 0.149797.

Na slici 5-48 predstavljena je razlika merenih i predviđenih vrednosti maksimalne brzine oscilovanja primenom regresione analize za nivo pouzdanosti od 50%.

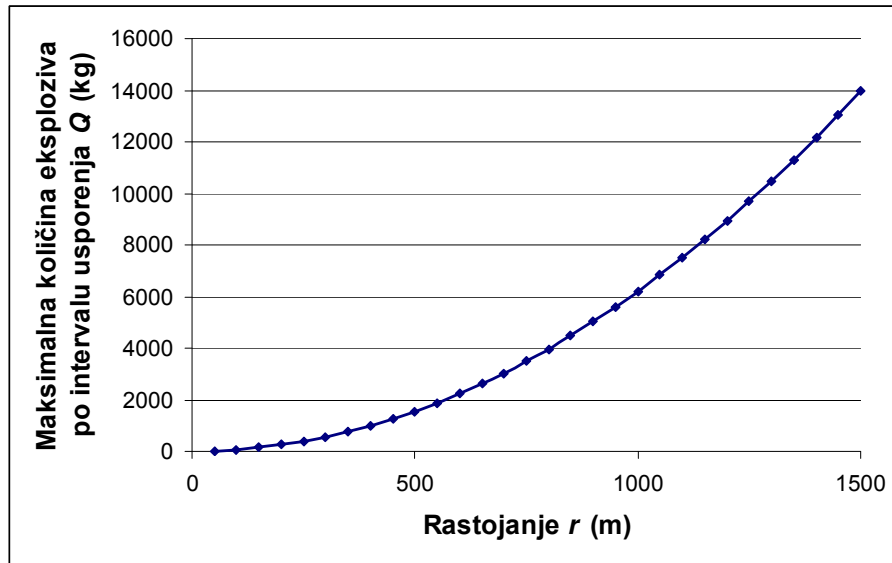


Slika 5-48. Razlika merenih i predviđenih vrednosti maksimalne brzine oscilovanja primenom regresione analize za nivo pouzdanosti od 50%

Za dozvoljenu maksimalnu brzinu oscilovanja  $V_{\max}$  propisanu DIN 4150-3 [61] standardom za stambene objekte koja iznosi 5 mm/s, redukovano rastojanje je jednako:

$$5 = 146.96 \cdot R^{-1.33} \Rightarrow R = 12.7 \quad (5-7)$$

Na osnovu jednačine 5-7, na slici 5-49 predstavljen je grafik zavisnosti maksimalnih količina eksploziva po intervalu usporenja  $Q$  u funkciji rastojanja mernog mesta od minskog polja na osnovu modela predviđanja maksimalne brzine oscilovanja  $V_{\max}$  za nivo pouzdanosti od 50 % i dozvoljenu brzinu oscilovanja od 5 mm/s.

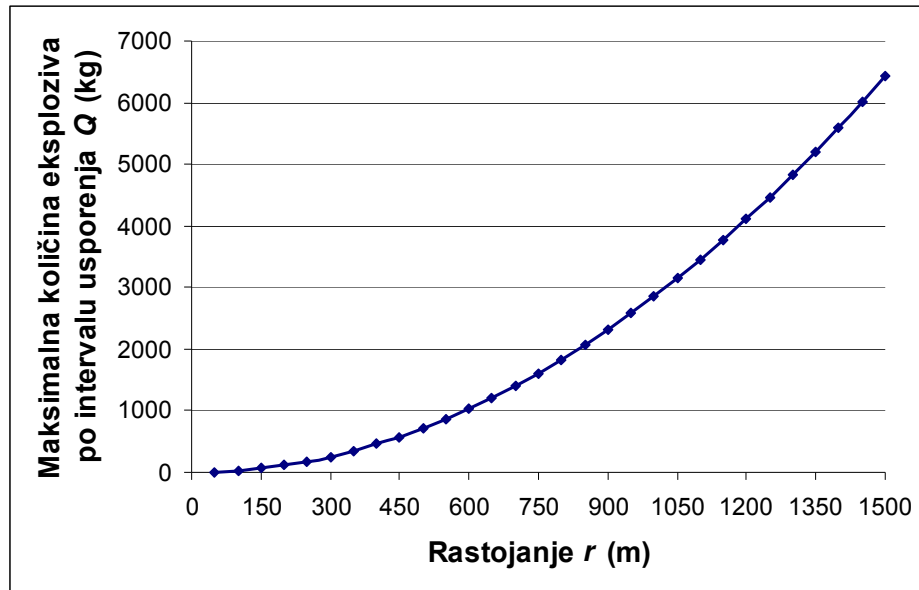


Slika 5-49. Zavisnost maksimalnih količina eksploziva po intervalu usporenja u funkciji rastojanja mernog mesta od minskog polja za nivo pouzdanosti od 50 % i dozvoljenu brzinu oscilovanja od 5 mm/s

Za dozvoljenu vrednost maksimalne brzine oscilovanja  $V_{max}$  propisanu DIN 4150-3 [61] standardom za objekte od posebnog kulturno - istorijskog značaja, koja iznosi 3 mm/s, redukovano rastojanje je jednako:

$$3 = 146.96 \cdot R^{-1.33} \Rightarrow R = 18.7 \quad (5-8)$$

Na slici 5-50 predstavljen je grafik zavisnosti maksimalnih količina eksploziva po intervalu usporenja  $Q$  u funkciji rastojanja mernog mesta od minskog polja  $r$ , na osnovu modela predviđanja maksimalne brzine oscilovanja  $V_{max}$  za nivo pouzdanosti od 50 % i dozvoljenu brzinu oscilovanja od 3 mm/s.



Slika 5-50. Zavisnost maksimalnih količina eksploziva po intervalu usporenja u funkciji rastojanja mernog mesta od minskog polja za nivo pouzdanosti od 50 % i dozvoljenu brzinu oscilovanja od 3 mm/s

Kao što je prikazano na slici 5-47, regresionom analizom se određuje model predviđanja maksimalne brzine oscilovanja za nivo pouzdanosti 50%, koji daje prosečnu očekivanu vrednost brzine oscilovanja. Stvarno merena brzina može biti manja ili veća od te vrednosti. Za efikasniju kontrolu potresa u praksi se najčešće određuje zavisnost maksimalne brzine oscilovanja od maksimalne količine eksploziva po intervalu usporenja i rastojanja mernog mesta od minskog polja za nivo pouzdanosti od 95%, koja omogućava u 95% slučajeva da merena brzina oscilovanja neće preći predviđenu vrednost.

Prema literaturi [49] model predviđanja maksimalne brzine oscilovanja za nivo pouzdanosti od 95% izračunava se prema jednačini:

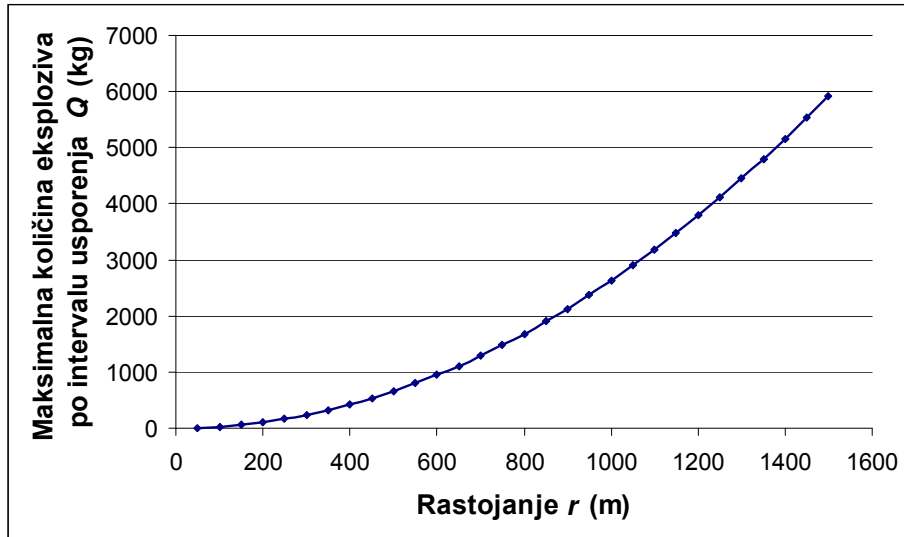
$$V_{\max} = 146.96 \cdot 10^{1.645 \cdot SE} \cdot R^{-1.33} \Rightarrow V_{\max} = 259.19 \cdot \left( \frac{r}{\sqrt{Q}} \right)^{-1.33}, (mm/s) \quad (5-9)$$

gde je SE standardna greška i iznosi 0.149797.

Za dozvoljenu maksimalnu brzinu oscilovanja  $V_{\max}$  propisanu DIN 4150-3[61] standardom za stambene objekte, koja iznosi 5 mm/s, redukovano rastojanje za nivo pouzdanosti od 95% iznosi:

$$5 = 259.19 \cdot R^{-1.33} \Rightarrow R = 19.5 \quad (5-10)$$

Na slici 5-51 je predstavljen grafik zavisnosti maksimalnih količina eksploziva po intervalu usporenja  $Q$  u funkciji rastojanja od minskog polja do mesta merenja  $r$ , na osnovu modela predviđanja maksimalne brzine oscilovanja  $V_{max}$ , za nivo pouzdanosti od 95 % i dozvoljenu brzinu oscilovanja od 5 mm/s.

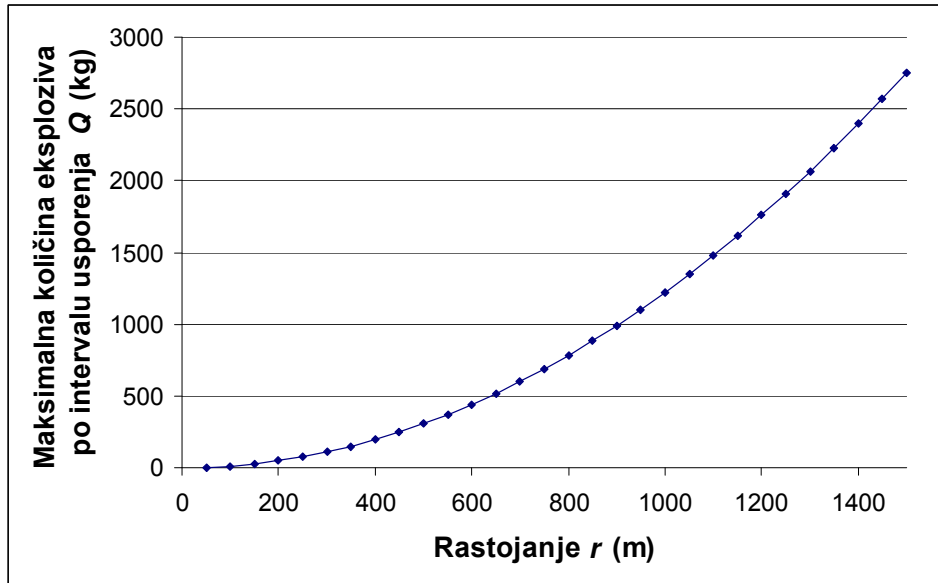


Slika 5-51. Zavisnost maksimalnih količina eksploziva po intervalu usporenja u funkciji rastojanja mernog mesta od minskog polja za nivo pouzdanosti od 95 % i dozvoljenu brzinu oscilovanja od 5 mm/s

Za dozvoljenu vrednost maksimalne brzine oscilovanja  $V_{max}$  propisanu DIN 4150-3 [61] standardom za objekte od posebnog kulturno - istorijskog značaja, koja iznosi 3 mm/s, redukovano rastojanje je jednako:

$$3 = 259.19 \cdot R^{-1.33} \Rightarrow R = 28.6 \quad (5-11)$$

Na slici 5-52 je predstavljen grafik zavisnosti maksimalnih količina eksploziva po intervalu usporenja  $Q$  u funkciji rastojanja mernog mesta od minskog polja  $r$ , na osnovu modela predviđanja maksimalne brzine oscilovanja  $V_{max}$ , za nivo pouzdanosti od 95 % i dozvoljenu brzinu oscilovanja od 3 mm/s.



Slika 5-52. Zavisnost maksimalnih količina eksploziva po intervalu usporenja u funkciji rastojanja od minskog polja do mesta merenja za nivo pouzdanosti od 95 % i dozvoljenu brzinu oscilovanja od 3 mm/s

Rezultati regresione analize primenom Excel alata za regresionu analizu prikazani su u Tabeli 5-8.

Tabela 5-8. Rezultati regresione analize primenom Excel alata za regresionu analizu

Rezultati regresione analize	
Koeficijent korelacije $R^2$	0.749869814
Standardna greška $SE$	0.149797045
Broj analiziranih podataka	94
Konstanta (odsečak na y-osi)	2.167188589
Nagib regresione prave	-1.327914435
Nivo pouzdanosti 95%	2.416073

### 5.2.1.1.1 Model predviđanja potresa od miniranja primenom regresione analize za ukupan broj podataka

Pored navedenih regresionih modela dobijenih analizom 94 podataka, koji će biti analizirani sa drugim modelima predviđanja, izvršena je dodatna regresiona analiza svih 117 podataka u cilju dobijanja modela predviđanja potresa od miniranja za nivo pouzdanosti od 50 % i 95%. Razlog prikaza rezultata analize svih podataka je činjenica da rezultati mogu biti od koristi prilikom primene u praksi, jer dobijen model predstavlja model predviđanja potresa od miniranja, sa mnogo više podataka, za oblast koja je kontinuirano praćena. Takođe, poređenjem se može utvrditi koliko odstupa vrednost redukovano rastojanja za dozvoljenu brzinu oscilovanja od 5 mm/s prema modelu dobijenom na osnovu 94 i 117 tačaka za isti nivo pouzdanosti od 95 %.

Model predviđanja maksimalne brzine oscilovanja za nivo pouzdanosti od 50 % iznosi:

$$V_{\max} = 157.57 \cdot R^{-1.34} \Rightarrow 157.57 \cdot \left( \frac{r}{\sqrt{Q}} \right)^{-1.34}, (mm/s) \quad (5-12)$$

gde je:

Q – maksimalna količina eksploziva po intervalu usporenja, (kg)

r – rastojanje mernog mesta od minskog polja, (m)

R – redukovano rastojanje, (m/kg<sup>0.5</sup>)

Koeficijent korelacije  $R^2$  je jednak 0.75, standardna greška predviđanja iznosi 0.145208.

Za dozvoljenu maksimalnu brzinu oscilovanja  $V_{\max}$  propisanu DIN 4150-3 [61] standardom za stambene objekte koja iznosi 5 mm/s, redukovano rastojanje je jednako:

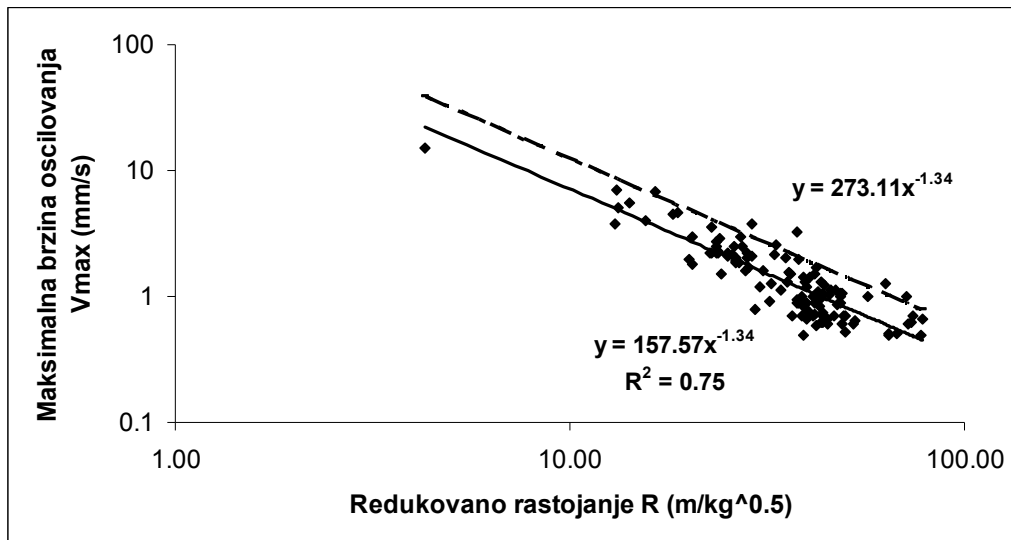
$$5 = 157.57 \cdot R^{-1.34} \Rightarrow R = 13.1 \quad (5-13)$$

Za dozvoljenu vrednost maksimalne brzine oscilovanja  $V_{\max}$  propisanu DIN 4150-3 [61] standardom za objekte od posebnog kulturno istorijskog značaja koja iznosi 3 mm/s, redukovano rastojanje iznosi:

$$3 = 157.57 \cdot R^{-1.34} \Rightarrow R = 19.2 \quad (5-14)$$

Model predviđanja maksimalne brzine oscilovanja za nivo pouzdanosti od 95% iznosi:

$$V_{\max} = 273.11 \cdot \left( \frac{r}{\sqrt{Q}} \right)^{-1.34}, (mm/s) \quad (5-15)$$



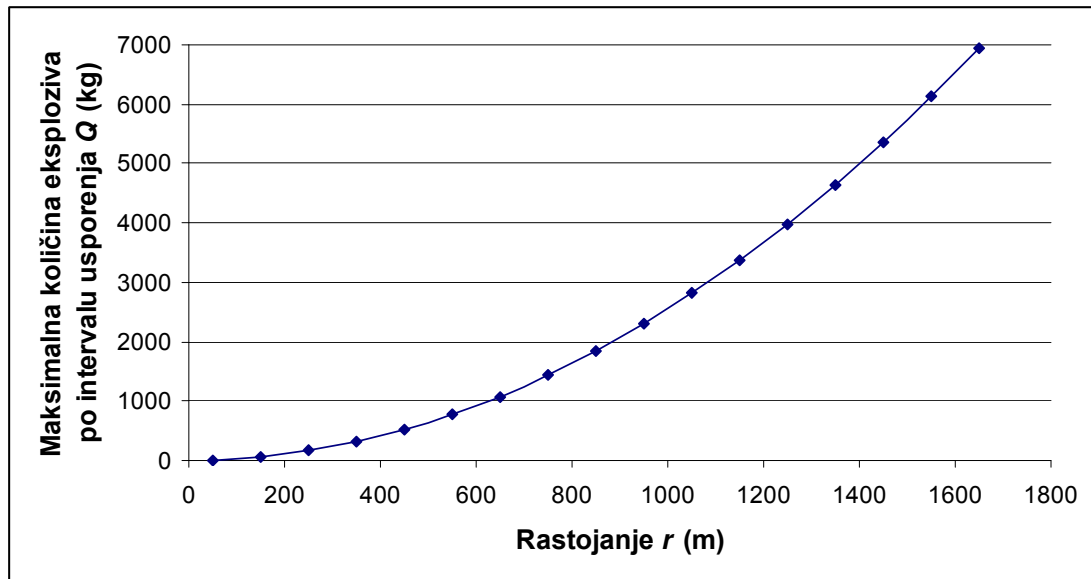
Slika 5-53. Regresiona analiza maksimalne brzine oscilovanja u funkciji redukovanog rastojanja za ukupan broj podataka istraživanja

Za dozvoljenu maksimalnu brzinu oscilovanja  $V_{max}$  propisanu DIN 4150-3 [61] standardom za stambene objekte koja iznosi 5 mm/s, redukovano rastojanje za nivo pouzdanosti od 95% iznosi:

$$5 = 273.11 \cdot R^{-1.34} \Rightarrow R = 19.8 \quad (5-16)$$

Na slici 5-54 predstavljen je grafik zavisnosti maksimalnih količina eksploziva po intervalu usporenja  $Q$  u funkciji rastojanja mernog mesta od minskog polja  $r$ , na osnovu modela predviđanja maksimalne brzine oscilovanja  $V_{max}$ , za nivo pouzdanosti od 95 % i dozvoljenu brzinu oscilovanja od 5 mm/s.



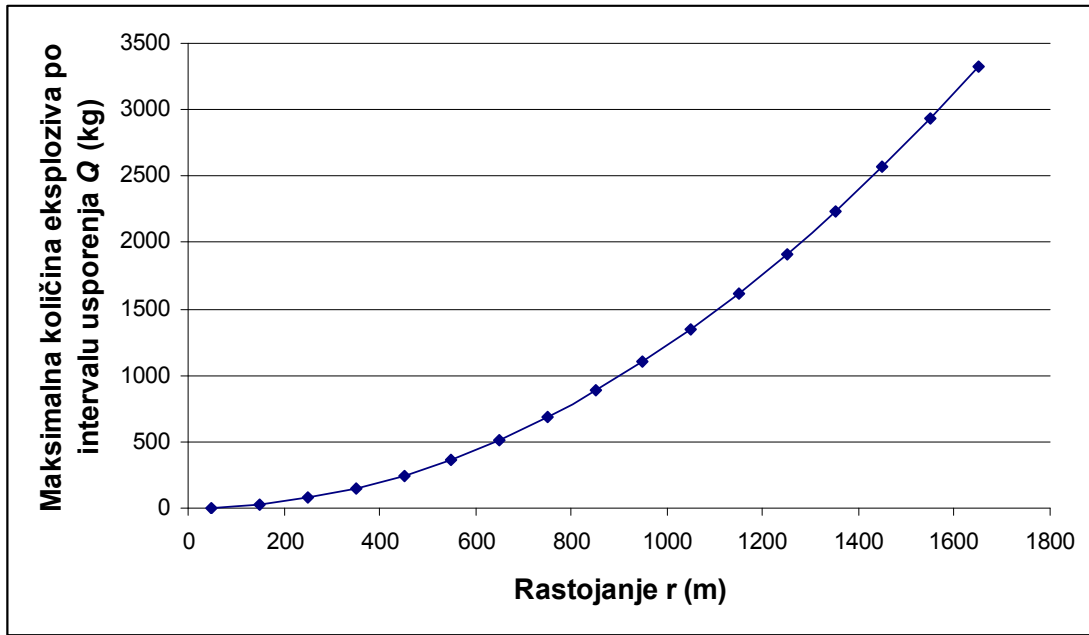


Slika 5-54. Zavisnost maksimalnih količina eksploziva po intervalu usporenja u funkciji rastojanja mernog mesta od minskog polja za nivo pouzdanosti od 95 % i dozvoljenu brzinu oscilovanja od 5 mm/s

Za dozvoljenu vrednost maksimalne brzine oscilovanja  $V_{max}$  propisanu DIN 4150-3 [61] standardom za objekte od posebnog kulturno istorijskog značaja koja iznosi 3 mm/s, redukovano rastojanje je jednako:

$$3 = 259.19 \cdot R^{-1.33} \Rightarrow R = 28.6 \quad (5-17)$$

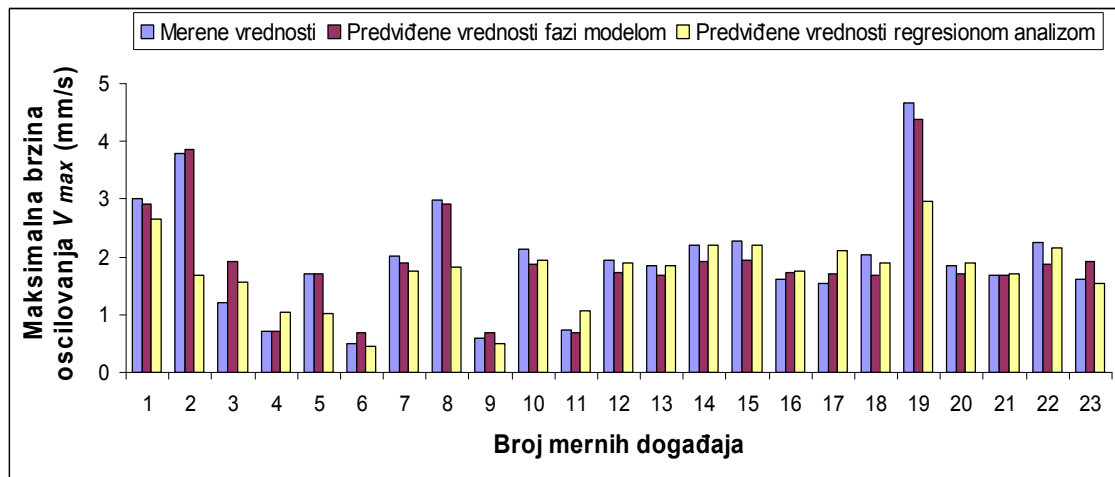
Na slici 5-55 predstavljen je grafik zavisnosti maksimalnih količina eksploziva po intervalu usporenja  $Q$  u funkciji rastojanja mernog mesta od minskog polja  $r$ , na osnovu modela predviđanja maksimalne brzine oscilovanja  $V_{max}$ , za nivo pouzdanosti od 95 % i dozvoljenu brzinu oscilovanja od 3 mm/s.



*Slika 5-55. Zavisnost maksimalnih količina eksploziva po intervalu usporenja u funkciji rastojanja mernog mesta od minskog polja za nivo pouzdanosti od 95 % i dozvoljenu brzinu oscilovanja od 3 mm/s*

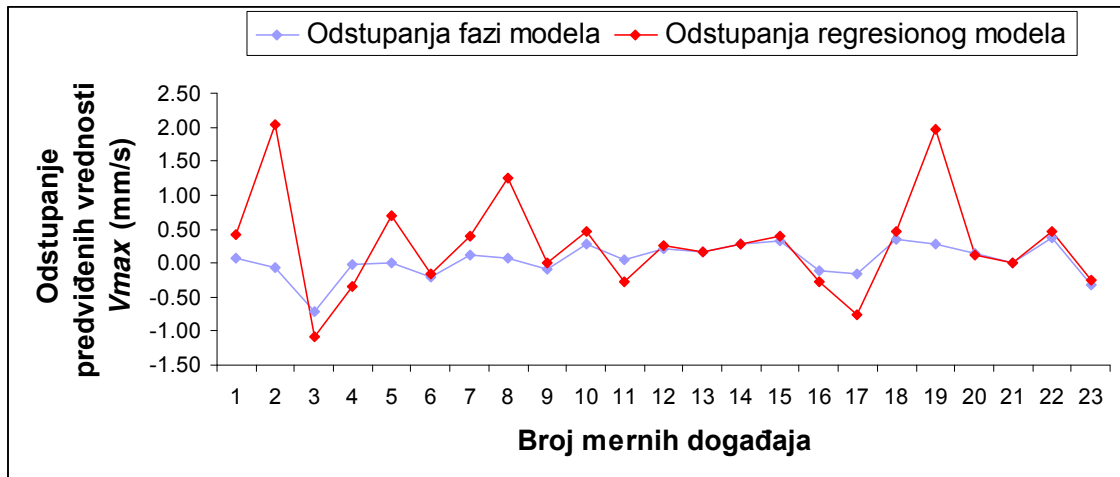
### 5.2.1.1.2 Uporedna analiza rezultata dobijenih merenjima i predviđanjem primenom fazi logike i regresione analize

Identični podaci, ukupno 23 primenjeni za testiranje fazi modela, upotrebljeni su i za uporednu analizu fazi i regresionog modela predviđanja potresa. Predviđene vrednosti maksimalne brzine oscilovanja, kao izlazne veličine fazi modela, poređene su sa predviđenim vrednostima brzine oscilovanja dobijene regresionom analizom za nivo pouzdanosti od 50%. Razlika merenih vrednosti maksimalne brzine oscilovanja i predviđenih vrednosti dobijenih primenom fazi modela i regresione analize, prikazana je na slici 5-56.



Slika 5-56. Razlika merenih vrednosti maksimalne brzine oscilovanja i predviđenih vrednosti dobijenih primenom fazi modela i regresione analize

Na slici 5-57 prikazana su odstupanja predviđenih vrednosti maksimalne brzine oscilovanja dobijene fazi i regresionim modelom od merenih vrednosti na terenu. Kako se može videti na slici 5-57, odstupanje fazi modela je znatno manje i njegove vrednosti se kreću od  $-0.71$  do  $+0.38$  mm/s, dok se kod regresionog modela kreće od  $-0.59$  do  $+2.12$  mm/s. Razlika apsolutnih vrednosti najvećih odstupanja dva modela je 1.41 mm/s.



Slika 5-57. Odstupanja predviđenih vrednosti maksimalne brzine oscilovanja dobijene fazi i regresionim modelom od merenih vrednosti na terenu

Za uporednu analizu primenjuje se više statističkih pokazatelja pouzdanosti predviđanja modela između izmerenih i predviđenih vrednosti kao što su: koeficijent korelacije  $R^2$ , varijansa predviđanja  $VAF$ , koren srednje kvadratne greške  $RMSE$  i srednja apsolutna procentualna greška  $MAPE$ .

Varijansa predviđanja se izračunava prema sledećem obrascu:

$$VAF = \left[ 1 - \frac{\text{var}(M_i - P_i)}{\text{var}(M_i)} \right] \cdot 100, \quad (\%) \quad (5-18)$$

gde je:

$M_i$  - merena vrednost određene veličine,

$P_i$  - predviđena vrednost određene veličine.

Koren srednje kvadratne greške se izračunava prema sledećem obrascu:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - P_i)^2} \quad (5-19)$$

gde je:

$M_i$  - merena vrednost određene veličine,

$P_i$  - predviđena vrednost određene veličine,

$N$  - broj testiranih uzoraka.

Srednja apsolutna procentualna greška se izračunava prema sledećem obrascu:

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{M_i - P_i}{M_i} \right| \cdot 100, \quad (\%) \quad (5-20)$$

gde je:

$M_i$  - merena vrednost određene veličine,

$P_i$  - predviđena vrednost određene veličine,

$N$  - broj testiranih uzoraka.

U Tabeli 5-9 su date izračunate vrednosti statističkih pokazatelja pouzdanosti predviđanja maksimalne brzine oscilovanja primenom fazi i regresionog modela.

*Tabela 5-9. Statistički pokazatelji pouzdanosti predviđanja maksimalne brzine oscilovanja primenom fazi i regresionog modela*

<b>Vrsta modela predviđanja</b>	<b>R<sup>2</sup> (%)</b>	<b>VAF (%)</b>	<b>RMSE</b>	<b>MAPE (%)</b>
Fazi model	96.85	93.61	0.25	12.28
Regresioni model	74.99	57.62	0.67	18.52

### 5.3 Metoda Monte Karlo

Primena Monte Karlo metode prvi put je prikazana 1949. godina, kada je publikovana studija pod nazivom "Metoda Monte Karlo". Pored imena Džon fon Nojmana za nastanak metode Monte Karlo vezuju se imena S. Ulama, N. Metropolisa, G. Kana i E. Fermija. Svi su oni 40-tih godina radili u Los Alamosu (SAD), laboratoriji u kojoj je napravljena atomska bomba [129].

Naziv "Monte Karlo" je proistekao iz naziva čuvenog kazina u Monaku. Korišćenje slučajnosti i procesa ponavljanja u metodi je analogno aktivnostima koji se događaju u kazinu. Teorijske osnove metode Monte Karlo bile su poznate znatno ranije u matematičkoj statistici. Kako su za dobijanje dovoljno tačne ocene tražene veličine, potrebna izračunavanja za veoma veliki broj posebnih slučajeva i odgovarajuća statistička obrada ogromnog numeričkog materijala, efektivna primena metode Monte Karlo omogućena je tek pojavom elektronskih računara [130].

Opšte poznate definicije metode Monte Karlo nema. Ispravnije bi bilo govoriti o metodama umesto o metodi Monte Karlo. Pod metodama Monte Karlo podrazumevaju se numeričke metode za rešavanje matematičkih problema uz pomoć modeliranja slučajnih promenljivih i statističkih ocena njihovih karakteristika. U algoritmima Monte Karlo važnu ulogu igraju tzv. slučajni brojevi i strogo govoreći oni postoje jedino kao rezultati slučajnih procesa [129].

#### 5.3.1 Modeliranje slučajnih promenljivih

Modeliranje slučajnih promenljivih predstavlja izračunavanje vrednosti slučajne promenljive  $X$  pomoću slučajnih brojeva  $\gamma$ , pri čemu je poznata funkcija raspodele  $F(x)$  od  $X$ . Ukoliko se radi o diskretnoj slučajnoj promenljivoj, onda je najčešće poznata verovatnoća  $p_i = P(X = x_i)$  ( $i = 1, 2, \dots$ ) [129].

Tada se interval  $[0, 1]$  podeli na podintervale dužine  $\Delta_i = p_i$ .



Ukoliko se slučajna promenljiva  $X$  definiše kao  $X = x$ , ako  $\gamma \in \Delta_i$ , onda je upravo  $p_i = P(X = x_i)$ , tj. zadatak je rešen.

Ako se radi o neprekidnoj slučajnoj promenljivoj  $X$ , pretpostavimo da je ona definisana za  $a < x < b$  (slučajevi  $a = -\infty$  i  $b = \infty$  se ne isključuju) i da ima gustinu  $f(x)$  i funkciju raspodele

$$F(x) = \int_a^x f(t)dt \quad (5-21)$$

Tada slučajna promenljiva  $X$  koja zadovoljava jednačinu

$$F(x) = \gamma \quad (5-22)$$

ima upravo gustinu raspodele  $f(x)$ , te je i u ovom slučaju zadatak rešen.

### 5.3.2 Primena metode Monte Karlo

Monte Karlo metoda se primenjuje u raznim simulacijama koje koriste slučajne brojeve. Najčešće se metoda koristi samo za tipove simulacija kod kojih se u rešavanju problema koristi dobijanje uzoraka iz raspodela slučajnih promenljivih [130]. Pri tome, problemi mogu biti bilo determinističkog, bilo stohastičkog karaktera. Razlikuju se sledeće primene Monte Carlo simulacije:

1. Deterministički problemi koje je teško ili skupo rešavati. Tipičan primer je korišćenje ovog metoda za izračunavanje određenih integrala koji se ne mogu rešiti analitički. Monte Karlo metoda se u ovom slučaju koristi za generisanje niza slučajnih tačaka  $(x_j, y_j)$  sa jednakim verovatnoćama unutar određenog pravougaonika. Zatim se ispituje koliko je generisanih tačaka sadržano u površini koja odgovara integralu.
2. Složeni fenomeni koji nisu dovoljno poznati predstavljaju drugu klasu problema koji se rešavaju primenom Monte Karlo metode. Ove probleme karakteriše to da nije poznat način uzajamnog delovanja između elemenata, već su poznate samo verovatnoće njihovog ishoda. Verovatnoće se koriste za izvođenje niza eksperimenata koji daju uzorke mogućih stanja zavisnih promenljivih. Statističkom obradom rezultata dobija se raspodela verovatnoća zavisnih promenljivih koje su od interesa. Društveni i ekonomski problemi se rešavaju na ovaj način.
3. Statistički problemi koji nemaju analitička rešenja. Statistički problemi bez analitičkog rešenja (npr. procene kritičnih vrednosti ili testiranje novih hipoteza) su jedna specifična klasa problema koji se rešavaju Monte Karlo simulacijom. Rešavanje takvih problema takođe se zasniva na generisanju slučajnih brojeva i promenljivih [130].

### 5.3.3 Deterministički i stohastički procesi

Vrlo često se kod formiranja dinamičkih modela moraju ugraditi izvori poremećajnih dejstava u procesima realnih sistema. Pri ovome poremećajna dejstva mogu imati deterministički, stohastički ili mešoviti karakter [129].

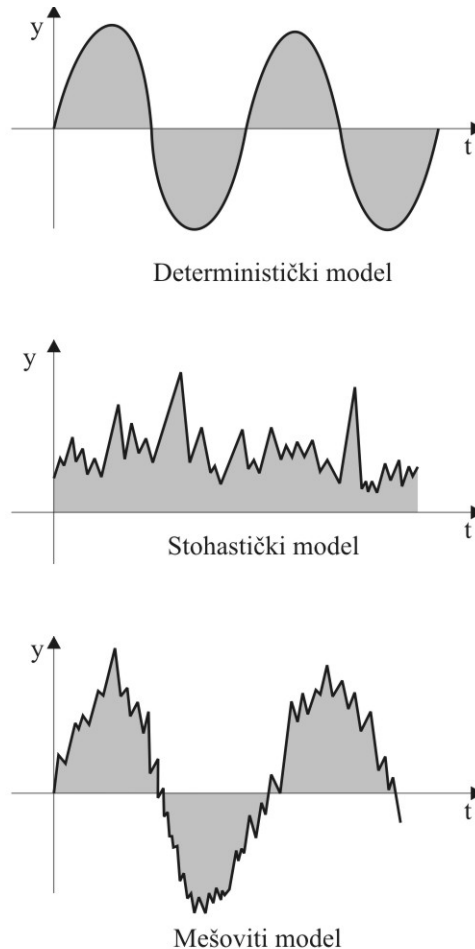
Deterministička promenljiva može se predstaviti funkcijom koja je precizno predskazuje. Jednostavan primer determinističke promenljive je oscilogram koji se može opisati pomoću obične sinusoide. Dakle kod determinističkih procesa mogućnost slučajnosti se apsolutno isključuje.

Mnogi prirodni procesi su u osnovi stohastički. Grčka reč "stohastika" znači "događanje" ili "slučajno predstavljanje". Pored reči "stohastički" koriste se u istom smislu i termini kao "probabilistički", "verovatni" i "slučajni".

Stohastička promenljiva je takva veličina koja poprima vrednosti koje nije moguće tačno predskazati. Samim tim stohastičke promenljive i nije moguće drugačije do statistički opisati. Tako npr. ako je raspodela slučajne veličine po Gausovoj raspodeli, tada njeno statističko ponašanje karakteriše srednja vrednost i standardno odstupanje. Osim Gausove normalne raspodele, postoji čitav niz drugih tipova teorijskih raspodela. Svako od njih svojstvena je određena gustina analiziranih parametara.

U praksi modeliranja veći broj problema zahteva kombinaciju determinističkih i stohastičkih pristupa. Na slici 5-58 ilustrovana su sva tri slučaja: deterministički, stohastički i mešoviti (hibridni).





Slika 5-58. Osnovni tipovi modela [129]

Teškoće pri modeliranju se povećavaju sa uključivanjem većeg broja stohastičkih elemenata u model. Stohastički modeli daju različite izlaze za date ulaze, pa je i interpretacija rezultata teža i obično zahteva neki vid statističkog rezimea.

Dobijanje adekvatne naizmeničnosti brojeva, zadovoljavanje uslova slučajnosti i posedovanje određenih statističkih svojstava predstavlja vrlo složen problem kod stohastičkog modeliranja [129].

### 5.3.4 Generisanje slučajnih brojeva

Postoji više načina za dobijanje (generisanje) slučajnih brojeva. U ozbiljnim pristupima za dobijanje slučajnih brojeva koriste se tri načina:

- tabele slučajnih brojeva,
- generatori slučajnih brojeva,
- metode pseudoslučajnih brojeva.

Tabele slučajnih brojeva: Tabele slučajnih brojeva ili preciznije slučajnih cifara formiraju se tako što se npr. na deset jednakih papirića ispišu cifre: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9. Potom se pristupa izvlačenju papirića tako što se jedan po jedan izvučeni papirić vraća i pre svakog novog izvlačenja papirići se promešaju. Dobijene cifre se zapisuju u tabelarnoj formi.

Tabele slučajnih brojeva mogu se koristiti za dobijanje jedno, dvo, tro i višecifrenih slučajnih brojeva.

Često su potrebni brojevi sa vrednostima između 0 i 1. Tada se npr. trocifreni brojevi množe sa 0.001, te se dobije niz decimalnih brojeva za naš primer:

0.865, 0.159, 0.079, 0.566, 0.155, 0.664, 0.345,...

Generatori slučajnih brojeva: su elektronski uređaji koji proizvode slučajne cifre. To su najčešće analogni elektronski računari sa dodatim generatorom šuma. Oni proizvode slučajne cifre na principu pretvaranja elektronskih šumova u cifarsko značenje, tako što se registruje broj šumova koji nadvisuju zadati nivo u fiksnom vremenskom intervalu. Kako većina digitalnih računara koji su u masovnoj upotrebi nema mogućnost neposrednog prijema podataka (signala) sa analognog računara, ovaj metod dobijanja slučajnih brojeva se retko u praksi koristi.

Metode pseudoslučajnih brojeva: Pomoću nekih numeričkih postupaka moguće je dobiti takve "slučajne" brojeve koje nazivamo pseudoslučajnim ili kvazislučajnim. Metode pseudoslučajnih brojeva pogodne su za proizvodnju slučajnih brojeva na digitalnim računarima, pošto generisanje teče istom brzinom kao brzina rada računara.

Značajne pogodnosti su i to što programi za generisanje zauzimaju mali memorijski prostor, što je moguće ma koji slučajni broj ponovo generisati i što je potrebno samo jedno testiranje kvaliteta takvog niza slučajnih brojeva.

Jedini nedostatak metode pseudoslučajnih brojeva je ograničenost rezervi slučajnih brojeva. Postoje, međutim, načini za proizvodnju velikog broja takvih brojeva.

Sa praktičnog stanovišta metode pseudoslučajnih brojeva su najpogodnije za primenu i danas se uz pomoć računara najviše i koriste.

Prvi numerički postupak za dobijanje pseudoslučajnih brojeva na računaru predložio je Džon fon Nojman 1946. godine, kome je dodelio naziv metoda sredine kvadrata. Po ovoj metodi svaki broj u nizu dobija se izdvajanjem srednjih cifara iz kvadrata prethodnog broja. Da bi se nedostaci Nojmanovog algoritma otklonili razvijeni su drugi

postupci. Jedan od tih je kongruentna metoda. Na osnovu primećenih nedostataka metode sredine kvadrata, formulisani su uslovi i zahtevi koji kod generisanja pseudoslučajnih brojeva moraju biti ispunjeni.

Ti se zahtevi svode na sledeće:

- a) ravnomernost raspodele vrednosti pseudoslučajnih brojeva u zadanom intervalu,
- b) statistička nezavisnost, tj. svaki član niza nezavistan je od svih prethodnih vrednosti,
- c) neponovljivost unutar zadanog ograničenog intervala,
- d) reproduktivnost svih nizova unutar definisanih intervala,
- e) metoda mora biti stabilna, pošto često za rešavanje zadataka modeliranja postoje potrebe za milionima slučajnih brojeva,
- f) idealno je ukoliko metoda zahteva minimalni prostor operativne memorije.

Treći način dobijanja pseudoslučajnih brojeva je metodom stepenog ostatka. Ovo je u praksi vrlo korišćena metoda, odlikuje je velika brzina proizvodnje brojeva, izbor proizvoljne dužine periode i neosetljivost na izbor početnog broja  $x_0$ .

U praksi danas, zahvaljujući dostupnosti računarske tehnike najširem krugu korisnika i stalnom podizanju nivoa hardvera i softvera, korisnik vrlo jednostavno uz pomoć RANDOM potprograma sadržanog u sistemskom softveru može ostvariti željenu produkciju slučajnih brojeva.

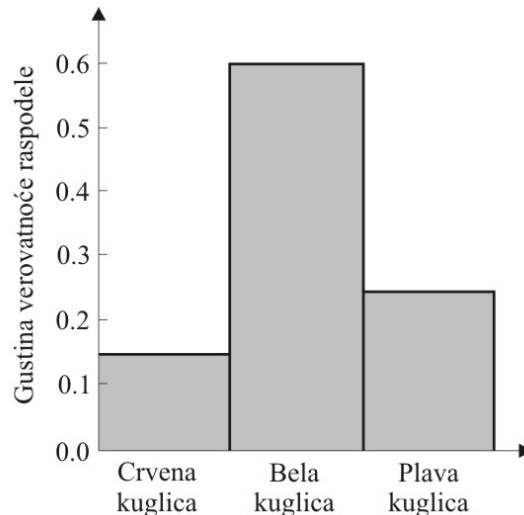
### **5.3.5 Osnovni principi primene metode Monte Karlo**

Primena metode Monte Karlo zasnovana je na vrednostima slučajnih promenljivih, gde se kao osnovni problem javlja određivanje vrednosti slučajnih promenljivih sa poznatom verovatnoćom raspodele [129]. Postupak uzorkovanja pretpostavlja zamenu stvarne populacije elemenata sa teorijskom kopijom koja je opisana nekom pretpostavljenom verovatnoćom raspodele. Ovakav pristup osigurava da svaki element u populaciji ima jednaku šansu uz ispunjenje uslova da je učestalost mogućih ishoda proporcionalna njihovoj verovatnoj gustini.

Primer: U vrećici se nalazi nedefinisan broj belih, plavih i crvenih kuglica. Iako se ne zna ukupan broj kuglica, pretpostavlja se da je poznata proporcija kuglica: 0.6 belih, 0.25 plavih i 0.15 crvenih i da je izvlačenje svake kuglice jednako verovatno. Na osnovu ovih pretpostavki može se izvesti sledeći zaključak:

- Ako se proizvoljno izvuče jedna kuglica iz vrećice, verovatnoća da će biti bela je 0.6, da će biti plava je 0.25 i 0.15 da će biti crvena.

Na osnovu verovatnoće svakog ishoda (izvlačenje bele, plave ili crvene kuglice) moguće je definisati funkciju gustine odnosno gustinu verovatnoće raspodele (slika 5-59) i kumulativnu funkciju raspodele (slika 5-60).

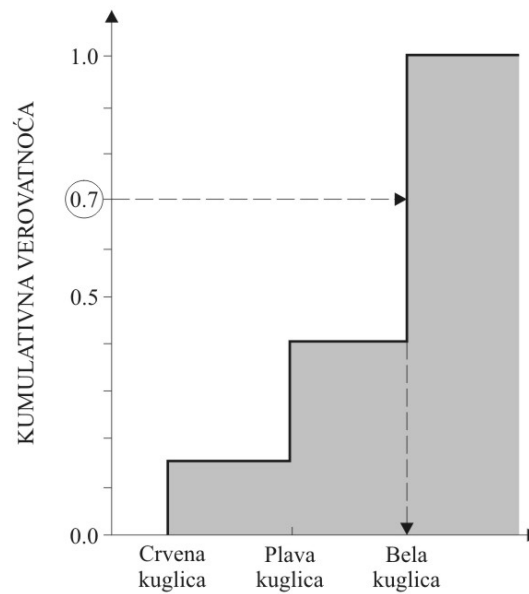


Slika 5-59. Gustina verovatnoće raspodele [129]

Preko kumulativne funkcije raspodele, uzorkovanje se vrši uz pomoć slučajnog broja, koji se generiše na neki od navedenih načina. Kako svaki slučajni broj u uniformnom nizu slučajnih brojeva ima istu verovatnoću pojavljivanja (biranja), biranje slučajnih brojeva je jednako biranju kuglica iz vrećice.

Prema tome metoda Monte Karlo ispunjava princip slučajnog uzorkovanja, što znači da svaki elemenat ili događaj u odgovarajućoj populaciji ima jednaku šansu da bude registrovan.

Ako se pretpostavi da je izvučen slučajan broj 0.7. Na grafiku na slici 5-60. ovom broju odgovara tačka na y-osi. Njenim projektovanjem na kumulativnu krivu i zatim projektovanjem presečne tačke na x-osu, dobija se kao ishod pozicija na x-osi koja označava belu kuglicu. Drugim rečima, generisanje slučajnog broja vrednosti između 0.0 i 0.15 ekvivalentno je izvlačenju crvene kuglice iz vrećice.



Slika 5- 60. Kumulativna funkcija raspodele [129]

Ukoliko je slučajan broj u opsegu između 0.15 i 0.40, to odgovara izvlačenju plave kuglice, a ukoliko je između 0.40 i 1, ekvivalentno je izvlačenju bele kuglice.

Kako vrednosti na y-osi kumulativne funkcije predstavljaju verovatnoće ishoda, ovaj postupak zadovoljava i drugi potreban uslov - da je učestalost završavanja izvesnim ishodom proporcionalna njegovoj verovatnoći.

Ovaj primer sa kuglicama oslikava osnovne principe i suštinu metode Monte Karlo, kao i tok uzorkovanja koji obuhvata sledeće faze:

- 1) formiranje kumulativne funkcije raspodele,
- 2) generisanje slučajnog broja (vrednosti između 0 i 1),
- 3) iznalaženje uz pomoć izabranog slučajnog broja presečne tačke na kumulanti i ishoda na x-osi.

Monte Karlo metoda se može rešavati u Excel-u jer ovaj softer nudi široke mogućnosti kada je u pitanju unos podataka i obrada rezultata (grafičko prikazivanje).

Osnovni koraci u realizaciji metode Monte Karlo korišćenjem nekog programa su:

1. generisanje posmatranih ulaznih promenljivih,
2. izračunavanje izlaza (output) korišćenjem ulaza (input) kroz zadatu funkciju,
3. ponavljanje izračunavanja mnogo puta,
4. analiza dobijenih izlaznih veličina.

Primer 1. Monte Karlo simulacija predviđanja prodaje [131]

Kompanija želi da sazna koliko će njihov novi proizvod biti profitabilan na tržištu, s obzirom da na tržištu postoje mnoge neizvesnosti koje su povezane sa veličinom tržišta, troškovima i prihodima. Korišćenjem Monte Karlo modeliranja dolazi se do procene profita i određivanja rizika. Realizacija Monte Karlo modela izvodi se u četiri koraka:

1. Formiranje modela

Prvi korak u formiranju modela predviđanja prodaje je postavljanje osnovne jednačine:

$$\text{PROFIT} = \text{PRIHOD} - \text{TROŠKOVI} \quad (5-23)$$

Kao i prihod, tako i troškovi predstavljaju neizvesne parametre, pa se problem mora razložiti na osnovne parametre, što je i svrha razvijanja modela. U idealnom slučaju bi svi ulazi (input) bili nezavisni. Ako se prihod računa tako što se broj prodaja  $S$  pomnoži sa profitom po prodaji  $P$ , koji je rezultat individualne kupovine proizvoda, tada je  $\text{PRIHOD} = S \cdot P$ . Profit po prodaji  $P$  uzima u račun prodajnu cenu, inicijalne (početne) troškove proizvođača ili prihod od prodaje na veliko i druge platne transakcije (kreditne kartice, špedicije i dr.). Kada se to uzme u obzir, pretpostavlja se da  $P$  fluktuiše između 47 \$ i 53 \$.

Broj prodaja  $S$  se može ostaviti kao primarna promenljiva. Neka se pretpostavi da kompanija stvara prodaju kroz purchasing leads-ove. Lead je identitet osobe ili nekog entiteta koji je potencijalno zainteresovan za kupovinu proizvoda ili određene usluge. Broj prodaja po mesecu  $S$  se dobija kada se broj lead-ova po mesecu  $L$  pomnoži sa ratom konverzije  $R$ . Rata konverzije je način da se izmeri efektivnost prodajnog procesa. Tako da se na kraju za jednačinu prihoda dobija:

$$\text{PRIHOD} = L \cdot R \cdot P \quad (5-24)$$

Što se tiče troškova, može se uzeti da su troškovi jednaki zbiru fiksnih troškova  $H$  i ukupnih troškova lead-ova. Neka trošak pojedinačnog lead-a  $C$  varira između 0.2 i 0.8\$. Prema podacima istraživanja tržišta, kompanija očekuje da broj lead-ova po mesecu  $L$  varira između 1200 i 1800. Konačni model predviđanje prodaje je:

$$\text{PROFIT} = L \cdot R \cdot P - (H + L \cdot C) \quad (5-25)$$

Ulazne promenljive (input) u Monte Karlo simulaciji su neizvesni parametri  $x_i$ .

$$X_1 = L, X_2 = C, X_3 = R, X_4 = P$$

Treba napomenuti da je  $H$  takođe deo jednačine, ali da se u ovom primeru uzima da je konstantna vrednost. Ulazi (input) Monte Karlo simulacije predstavljaju samo neizvesni parametri  $X_i$ . Izlazna promenljiva (output) je  $Y$  i reprezentuje moguće profite.

Nakon rastavljanja na osnovne parametre uočava se da broj lead-ova  $L$  figuriše i u prihodu i u troškovima. Prema tome, prihodi i troškovi nisu nezavisni.

## 2. Monte Karlo simulacije Primenom Excel-a

Primenom Excel-a mogu se vršiti Monte Karlo simulacije sa proizvoljno odabranim brojem ponavljanja. Pri svakom ponovnom izračunavanju, program za slučajne vrednosti ulaznih veličina  $L$ ,  $C$ ,  $R$ ,  $P$  i  $H$  daje rezultate koji predstavljaju ostvarene profite. Za izračunavanje profita koristi se navedena formula sa ponavljanjem  $n$  puta:

$$\text{PROFIT} = L \cdot R \cdot P - (H + L \cdot C) \quad (5-26)$$

## 3. Analiza rezultata

Poslednji korak u realizaciji Monte Karlo metode u simulaciji je analiza dobijenih rezultata. Za prikazivanje rezultata koristi se histogram. Histogram je grafički prikaz koji pokazuje koliki je opseg događaja koji pripadaju svakoj od nekoliko mogućih kategorija.

Jedna od osnovnih formi histograma se dobija razdvajanjem celokupnog područja sa podacima u podeoke (*eng. bins*) jednake veličine koji se zovu klase (*eng. class*).

Zatim se za svaki podeok računa broj tačaka, iz dobijenih rezultata, koje pripadaju datom podeoku, tj. vrši se vrednovanje podeoka. Tako je:

- vertikalna osa: frekvencija ili učestalost (brojčana veličina svakog podeoka),
- horizontalna osa: odgovarajuća promenljiva.

Dakle, y-osa predstavlja frekvenciju (frekvencija ili učestalost događaja  $I$  je broj  $n_i$  koji pokazuje koliko puta se događaj dogodio u eksperimentu ili analizi), x-osa predstavlja zasebne kategorije. Histogram je jedan od osnovnih alata za analizu podataka, kao i za donošenje odluka.

## 4. Statistička obrada rezultata Monte Karlo simulacije

U cilju potpune analize rezultata, uobičajeno je da se prikažu podaci o srednjoj vrednosti, medijani, standardnoj devijaciji, intervalu, standardnoj grešci, ali i ostali podaci statistike, u cilju kvalitetnije analize rezultujuće raspodele [130]. Srednja

vrednost i medijana statistički opisuju centralnu težnju (tendenciju) ili "lokaciju" raspodele.

*Srednja vrednost* je prosečna vrednost svih merenja. Takođe se još naziva i "prvi moment" raspodele. Računa se po formuli:

$$\bar{x} = \sum_{i=0}^n \frac{x_i}{n} \quad (5-27)$$

gde su:  $x_i$  - vrednost dobijena u  $i$ -tom izračunavanju i  $n$  - broj izračunavanja.

*Medijana* je broj koji razdvaja gornju polovinu dobijenih rezultata od donje polovine istih. Ako sortiramo rezultate od najmanjih do najvećih, medijana je "sredina" vrednosti ili 50-ti procenat, označavajući da su 50% rezultata simulacije manji od medijane. Ako postoji podjednak broj tačaka koje reprezentuju podatke, onda je medijana sredina između dve srednje tačke. Ekstremne vrednosti imaju veliki uticaj na srednju vrednost, ali medijana zavisi jedino od srednje tačke (srednjih tačaka). Ovo svojstvo medijane čini je korisnom za opisivanje sredine (centra) iskrivljenih raspodela. Ako je raspodela simetrična (kao što je normalna raspodela), onda će srednja vrednost i medijana biti identični.

*Varijansa, standardna devijacija, interval i kvantili* opisuju rasprostiranje podataka tj. predstavljaju mere odstupanja. *Varijansa (dispersija)* je mera rasipanja vrednosti jednog niza merenja i računa se:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (5-28)$$

*Standardna devijacija* je veličina koja pokazuje prosečnu udaljenost dobijenih vrednosti od srednje vrednosti. Ako su dobijeni podaci bliski srednjoj vrednosti, standardna devijacija će biti mala (bliža nuli). Ako se mnoge dobijene tačke koje reprezentuju dobijene rezultate mnogo razlikuju od srednje vrednosti, tada će standardna devijacija biti velika. Na kraju, ako su sve dobijene vrednosti jednake, standardna devijacija je jednaka nuli. Standardna devijacija je kvadratni koren varijanse pa se računa kao:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (5-29)$$



*Standardna greška* je količnik standardne devijacije i kvadratnog korena broja izračunavanja:

$$\delta = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (5-30)$$

*Interval (range)* je broj koji se jednostavno dobija oduzimanjem minimalne vrednosti od maksimalne vrednosti. Uopšteno, može se definisati i kao dužina najmanjeg intervala koji sadrži sve podatke (raspon varijacije).

*Kvantil raspodele* vrednosti je broj  $x_p$  takav da je procenat  $p$  populacija vrednosti manji ili jednak  $x_p$ . Na primer, .25 kvantil (koji se označava i kao 25-i percentil ili "donji" kvartil) promenljive je veličina ( $x_p$ ) tako da 25% vrednosti promenljive ide ispod te vrednosti. Slično, postoji i .75 kvantil (75-i percentil ili "gornji" kvartil). Drugim rečima, kvantili su vrednosti numeričke promenljive koji niz uređen po veličini dele na  $q$  jednakih delova.

*Maksimalna i minimalna vrednost* su ekstremne vrednosti dobijene u simulaciji. Što su ove dve vrednosti bliže, manje je rasipanje pa je srednja vrednost pouzdanija.

*Iskrivljenost i zaobljenost* služe za opisivanje oblika dobijene raspodele. To su veličine koje pokazuju kako su dobijene vrednosti raspoređene oko moda. Iskrivljenost (*en.skewness*) je veličina koja opisuje asimetriju raspodele u odnosu na srednju vrednost. Pozitivna vrednost ove veličine znači da je raspodela okrenuta više ka pozitivnim vrednostima. Negativna vrednost ove veličine znači da je raspodela iskrivljena ulevo. Vrednost nula pokazuje da su vrednosti podjednako raspoređene sa obe strane moda.

*Zaobljenost (en. kurtosis)* je veličina koja opisuje šiljatost ili pljosnatost raspodele u odnosu na normalnu raspodelu tj. pokazuje koliko je dobijena raspodela uzana ili prostrana. Pozitivna vrednost zaobljenosti označava više šiljatu raspodelu i znači da je ta raspodela uža od normalne raspodele. Negativna vrednost označava pljosnatiju ili prostraniju raspodelu. Normalna raspodela ima vrednost za zaobljenost nula.

#### 5.4 MODEL PREDVIĐANJA POTRESA OD MINIRANJA PRIMENOM MONTE KARLO METODE

Na osnovu prikazanog testiranja fazi modela u odnosu na konvencionalni model predviđanja potresa dobijen regresionom analizom, može se zaključiti da je pouzdanost predviđanja fazi modela vrlo visoka. Međutim, uprkos visokoj tačnosti predviđanja, fazi modelom se u određenim slučajevima dobija neznatno manja vrednost izlazne veličine od izmerene, dok se u drugom slučaju dobija neznatno veća vrednost. Uprkos malim odstupanjima predviđenih od izmerenih vrednosti, verovatnoća da izmerena brzina oscilovanja pri budućim miniranjima pređe propisanu vrednost postoji.

Problem slične prirode postoji i kod regresionog modela. Regresionom analizom se dobijaju modeli predviđanja potresa uzrokovanih miniranjem za 50% i 95% nivo pouzdanosti. U praksi se za predviđanje brzine oscilovanja primenjuje isključivo model sa 95% pouzdanosti. To znači, da se primenom modela sa 95% pouzdanosti, obezbeđuje verovatnoća od 95% da izmerene brzine oscilovanja u praćenom području neće preći maksimalnu brzinu oscilovanja propisanu odgovarajućim standardom, pri budućim miniranjima na konkretnom površinskom kopu. Prema tome, verovatnoća da će brzina oscilovanja pri budućim miniranjima preći propisanu granicu postoji i iznosi 5%. Dobijanje vrednosti brzina oscilovanja većih od graničnih vrednosti propisanih odgovarajućim standardima znači povećanu verovatnoću oštećenja objekta.

U delu disertacije koji se bavi uzrocima koji dovode do povećanja intenziteta seizmičkih potresa, naveden je niz faktora koji mogu uticati na povećanje potresa. Jedan deo faktora može da se kontroliše, proračunom parametara bušenja i miniranja, kvalitetom opreme za bušenje, stručnošću i obučenošću ljudstva. Drugi deo parametara koji ne može da se kontroliše odnosi se na karakteristike stenskih masiva ili tla kroz koje se prostiru seizmički talasi, odstupanje sredstava za iniciranje i sl.

Istraživanja su pokazala da su potresi od miniranja statistički promenljivi [42]. Pri detonaciji velikog broja identičnih eksplozivnih punjenja na istoj udaljenosti, seizmograf registruje različite vrednosti brzina oscilovanja sa rasporedom koji se približava obliku normalne raspodele. Problematična je činjenica da su se u istraživanjima viši nivoi potresa od očekivanog javljali redovno. Razlike u nivou potresa su iznosile i do 60%. Za očekivanu vrednost od 1.00 cm/s, zabeležene su vrednosti od 0.4 do 1.6 cm/s [42].

Prilikom predviđanja potresa od miniranja, primenom različitih modela, teži se da se ustanovi određena zavisnost ulaznih i izlaznih parametara. Tačnost fazi modela i modela dobijenog regresionom analizom može se povećati velikim brojem izmerenih podataka, što ponekad nije moguće izvesti iz finansijskih razloga. Uprkos tome, kompleksnost predviđanja potresa od miniranja je u tome što proces prostiranja seizmičkih talasa kroz heterogenu, anizotropnu stensku sredinu ima karakteristike i stohastičkih procesa.

Na osnovu toga, pogodna metoda predviđanja brzine oscilovanja predstavlja i metoda Monte Karlo. Primena Monte Karlo simulacije omogućava da se sa proizvoljno odabranim brojem ponavljanja, pri svakom ponovnom izračunavanju, za slučajne vrednosti ulaznih promenljivih, dobiju odgovarajuće vrednosti brzine oscilovanja.

#### **5.4.1 Monte Karlo model**

Kako je navedeno, prilikom predviđanja maksimalne brzine oscilovanja tla postoji određeni stepen neizvesnosti koji je povezan sa karakteristikama stenskog materijala, verovatnoćom preklapanja sredstava za iniciranje i dr. Primenom Monte Karlo simulacije, za određene parametre miniranja, mogu se dobiti raspodele učestalosti pojavljivanja vrednosti brzina oscilovanja tla, za različita rastojanja od minskog polja, odnosno odrediti pojavljivanje kritičnih vrednosti brzine oscilovanja koje prelaze dozvoljenu vrednost prema određenom standardu (u ovom slučaju DIN 4150-3. iz 1999. godine).

Realizacija Monte Karlo modela biće izvedena u četiri koraka:

1. formiranje modela (definisane matematičke zavisnosti ulaznih (input) i izlaznih parametara (output) određenom funkcijom),
2. generisanje slučajnih ulaza,
3. Monte Karlo simulacija primenom Excel-a,
4. analiza i statistička obrada rezultata Monte Karlo simulacije.

##### **5.4.1.1 Formiranje modela**

Za formiranje modela predviđanja brzine oscilovanja tla (odnosno definisanja matematičke zavisnosti ulaznih i izlaznih parametara određenom funkcijom), primenjena je jednačina dobijena višestrukom linearnom regresionom analizom, koja predstavlja matematičku zavisnost maksimalne brzine oscilovanja  $V_{max}$  kao izlaznog parametra u funkciji ulaznih parametara: maksimalne količine eksploziva po intervalu

usporenja  $Q$ , rastojanja od mesta merenja do minskog polja  $r$ , dužine minske bušotine  $l$ , dužine minskog punjenja  $lp$ , linije najmanjeg otpora  $W$ , rastojanja između bušotina u redu  $a$  i rastojanja između redova minskih bušotina  $b$ .

Parametri  $Q$ ,  $l$ ,  $lp$ ,  $W$ ,  $a$  i  $b$  predstavljaju neizvesne ulazne parametre, dok je rastojanje  $r$  konstantna vrednost pri Monte Karlo simulaciji. Na taj način će se primenom više Monte Karlo simulacija dobiti vrednosti predviđenih maksimalnih brzina oscilovanja sa promenom rastojanja od minskog polja.

#### 5.4.1.1.1 Model višestruke linearne regresione analize za predviđanje brzine oscilovanja tla

Kod proste linearne regresije, jedna zavisno promenljiva  $y$  se dovodi u vezu sa jednom nezavisno promenljivom  $x$ . Ova zavisnost se može predstaviti jednačinom:

$$y = a + bx + c \quad (5-31)$$

gde je  $a$  odsečak,  $b$  nagib prave, a  $c$  greška za koju važi pretpostavka da je nezavisna i sa srednjom vrednošću nula [132].

U većini slučajeva zavisno promenljiva  $y$  je određena većim brojem nezavisnih promenljivih, pa je za definisanje te zavisnosti neophodno upotrebiti neku multivarijantnu analizu. Višestruka linearna regresija je jedna od najčešće korišćenih regresionih metoda. Opšti izraz višestruke linearne regresije može biti predstavljen sledećom jednačinom:

$$y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k + c \quad (5-32)$$

Validacija modela je vrlo važan korak, a njihov kvalitet se definiše statističkim parametrima. Najčešće se u ovu svrhu koriste koeficijent korelacije  $R^2$ , koji predstavlja meru odstupanja koja može biti objašnjena regresionom pravom, kao i standardna greška  $SE$ .

Model višestruke linearne regresione analize za predviđanje brzine oscilovanja tla dobijen je primenom Excel-a i iznosi:

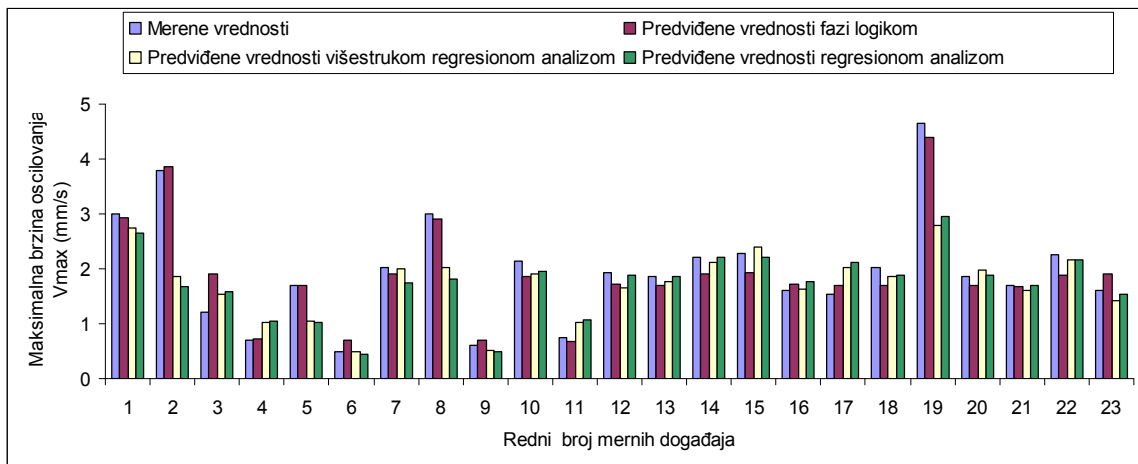
$$\log V = 3.02100 + 0.22285 \cdot \log Q - 1.36634 \cdot \log r - 0.00780 \cdot \log l + \\ + 0.179174 \cdot \log lp - 0.09785 \cdot \log W + 0.399167 \cdot \log a - 0.044433 \cdot \log b \quad (5-33)$$

Odnosno u drugom obliku:

$$V=1049.5 \cdot Q^{0.22285} \cdot r^{-1.36634} \cdot l^{-0.00780} \cdot l_p^{0.179174} \cdot W^{0.09785} \cdot a^{0.399167} \cdot b^{-0.044433} \quad (5-34)$$

Koeficijent korelacije višestruke regresione analize iznosi  $R^2=0.76$ , a standardna greška  $SE = 0.15146$ .

Na slici 5-61 predstavljeni su rezultati testiranja jednačine predviđanja brzine oscilovanja tla dobijene višestrukom regresionom analizom u odnosu na merene vrednosti, kao i na predviđene vrednosti dobijene prostom regresionom analizom i fazi modelom.



*Slika 5-61. Razlika vrednosti maksimalne brzine oscilovanja tla dobijene analizom podataka sa terena i predviđenih dobijenih višestrukom regresionom analizom, prostom regresionom analizom i fazi modelom*

U Tabeli 5-10 date su izračunate vrednosti statističkih pokazatelja pouzdanosti predviđanja maksimalne brzine oscilovanja primenom fazi, regresionog modela i višestrukog regresionog modela.

*Tabela 5-10. Statistički pokazatelji pouzdanosti predviđanja maksimalne brzine oscilovanja primenom fazi, regresionog modela i višestrukog regresionog modela*

Vrsta modela predviđanja	$R^2$ (%)	VAF (%)	RMSE	MAPE (%)
Fazi model	0.97	93.61	0.25	12.28
Regresioni model	0.75	57.62	0.67	18.52
Višestruki regresioni model	0.76	61.18	0.64	17.89

### 5.4.1.2 Generisanje slučajnih ulaza

Za generisanje slučajnih brojeva primenjena je uniformna raspodela koja predstavlja šest nezavisnih parametara ( $Q, l, l_p, W, a, b$ ). Za uniformnu raspodelu važi: neprekidna slučajna promenljiva  $X$  ima uniformnu raspodelu na intervalu  $(a,b)$ , ako je gustina slučajne promenljive  $X$ :

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & x \in [a,b] \\ 0, & x \notin [a,b] \end{cases} \quad (5-35)$$

Minimalne i maksimalne vrednosti za ulazne parametre date su Tabeli 5-11.

Tabela 5-11. Vrednosti ulaznih parametara Monte Karlo simulacije

Ulazni parametri	Nominalna vrednost	Minimalna vrednost	Maksimalna vrednost
Maksimalna količina eksploziva po intervalu usporenja $Q$ (kg)	420	180	490
Dužina minske bušotine $l$ (m)	14	4	18
Dužina minskog punjenja $l_p$ (m)	7	0.5	9
Linija najmanjeg otpora $W$ (m)	6.3	3.3	9.3
Rastojanje između bušotina u redu $a$ (m)	8.2	3.7	9.9
Rastojanje između redova bušotina $b$ (m)	8.6	3.9	8.7

Nominalne vrednosti ulaznih veličina predstavljaju vrednosti parametara svakog pojedinačnog miniranja. Konkretno, nominalne vrednosti unete u Tabeli 5-11, predstavljaju vrednosti za miniranje izvedeno 22.09.2010. Rastojanje mernog mesta od minskog polja iznosilo je 550 m, ali će vrednosti Monte Karlo simulacije biti predstavljene za različita rastojanja 300, 550, 800 i 1000 m. Na taj način će se dobiti vrednosti predviđenih maksimalnih brzina oscilovanja sa promenom rastojanja od minskog polja.

### 5.4.1.3 Monte Karlo simulacija

Primenom Excel-a izvršena je Monte Karlo simulacija sa 5000 ponavljanja. Pri svakom ponovnom izračunavanju, program za slučajne vrednosti ulaznih veličina  $Q$ ,  $l$ ,  $l_p$ ,  $W$ ,  $a$  i  $b$  i konstantnu vrednost  $r$ , daje rezultate koji predstavljaju vrednosti maksimalne brzine oscilovanja tla  $V_{max}$  prema jednačini 5-34:

$$V=1049.5 \cdot Q^{0.22285} \cdot r^{-1.36634} \cdot l^{-0.00780} \cdot l_p^{0.179174} \cdot W^{0.09785} \cdot a^{0.399167} \cdot b^{-0.044433}$$

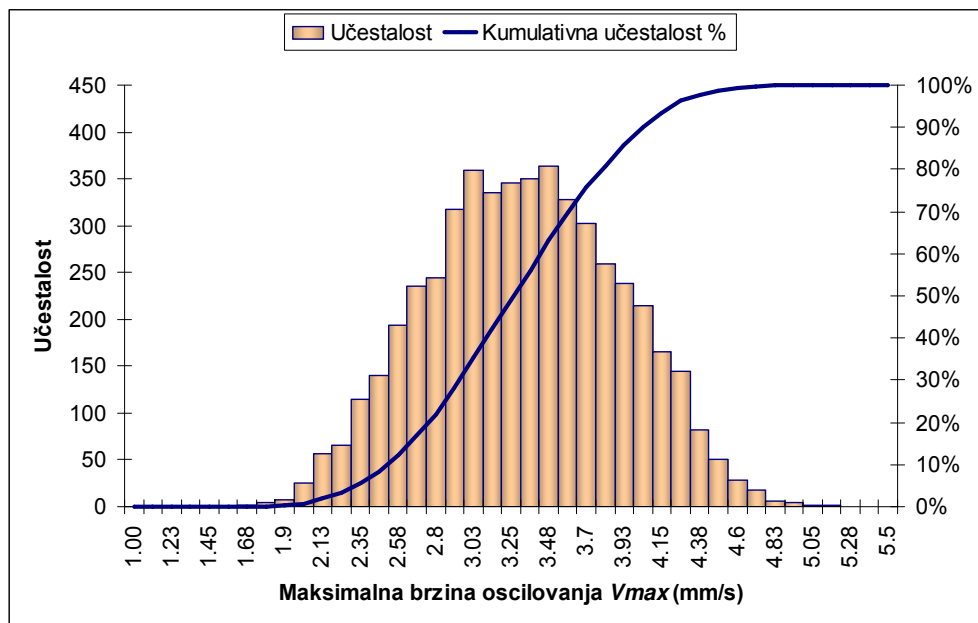
U Tabeli 5-12 prikazane su vrednosti izlazne veličine maksimalne brzine oscilovanja tla  $V_{max}$  (OUTPUT) za slučajne vrednosti  $Q$ ,  $l$ ,  $l_p$ ,  $W$ ,  $a$ ,  $b$  i konstantnu vrednost  $r$  koje predstavljaju ulazne veličine (INPUT).

Tabela 5-12. Vrednosti maksimalne brzine oscilovanja za slučajne vrednosti  $Q$ ,  $l$ ,  $l_p$ ,  $W$ ,  $a$ ,  $b$  i konstantnu vrednost  $r$

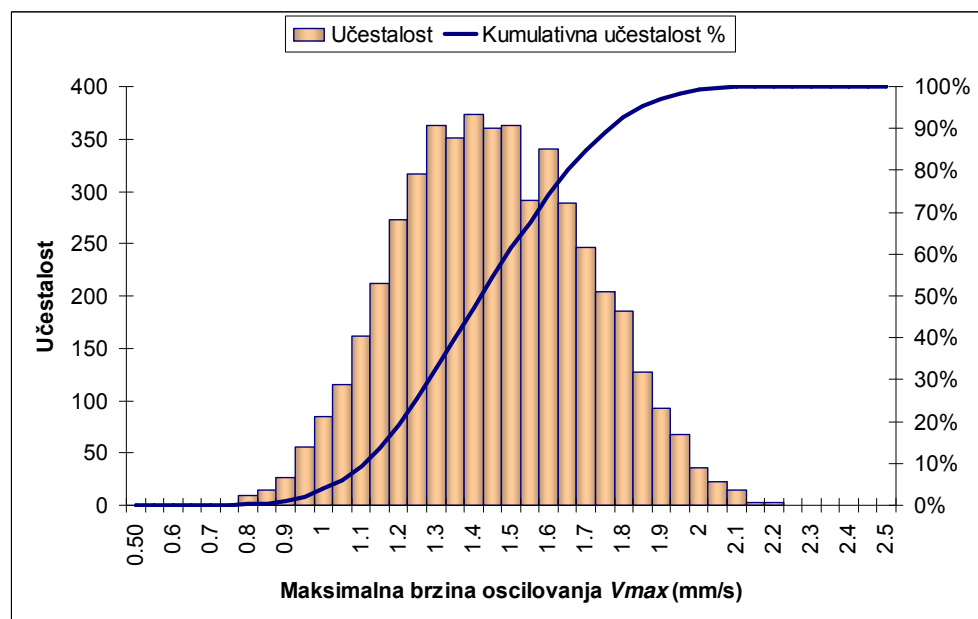
Ulazne veličine (INPUT)							Izlazna veličina (OUTPUT)
Q (kg)	r (m)	l (m)	$l_p$ (m)	W (m)	a (m)	b (m)	$V_{max}$ (mm/s)
265.19	550.00	6.08	0.66	6.60	9.40	8.36	1.11
472.59	550.00	10.28	2.42	5.87	6.41	5.28	1.41
202.16	550.00	4.94	1.29	7.68	8.26	7.03	1.11
246.36	550.00	5.88	4.74	5.73	5.89	5.37	1.34
219.45	550.00	4.76	6.99	9.26	8.01	5.94	1.50
426.64	550.00	11.49	2.04	5.72	7.17	6.10	1.39
266.11	550.00	6.96	3.98	8.81	7.36	6.36	1.37
466.99	550.00	9.37	8.07	6.69	7.83	4.81	1.87
300.41	550.00	9.23	2.90	5.36	4.13	5.95	1.11
427.99	550.00	13.73	6.72	6.89	5.92	5.63	1.57
353.79	550.00	11.71	4.23	9.21	6.33	7.29	1.37
260.20	550.00	9.65	3.42	7.54	7.36	8.10	1.33
280.27	550.00	8.08	5.05	7.25	4.09	5.72	1.17
238.22	550.00	7.13	2.89	5.19	8.39	6.22	1.40
222.80	550.00	8.48	3.92	5.28	6.75	7.91	1.32

#### 5.4.1.4 Analiza i statistička obrada rezultata Monte Karlo simulacije

Na slikama od 5-62 do 5-65 i tabeli 5-13, prikazani su pokazatelji analize rezultata Monte Karlo simulacije, gde su prikazane raspodele učestalosti i kumulativne funkcije raspodela maksimalnih brzina oscilovanja tla za rastojanja 300, 550, 800 i 1000 m od minskog polja.

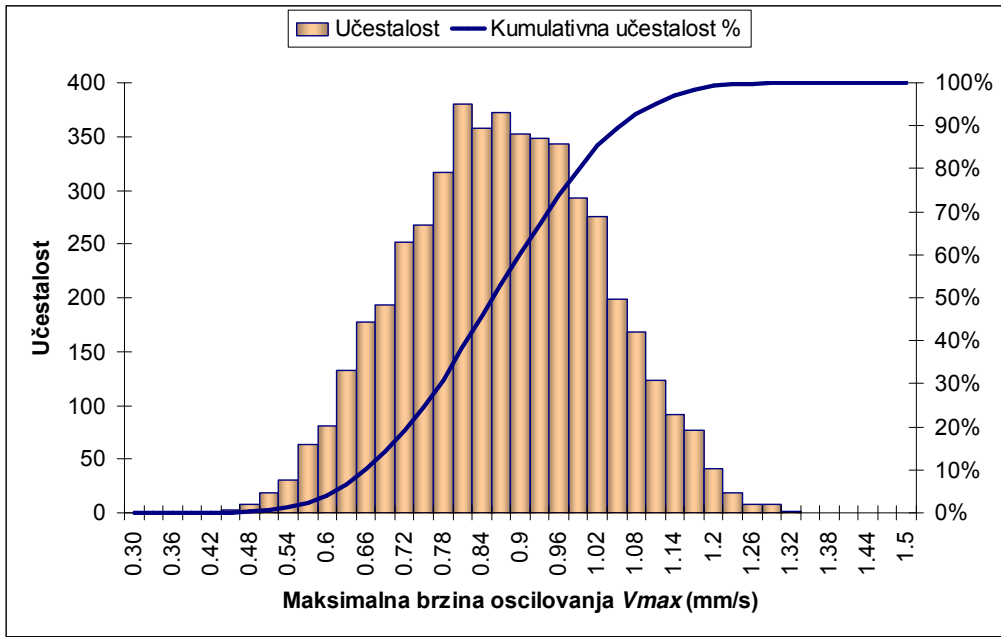


Slika 5-62. Raspodela učestalosti i kumulativna funkcija raspodele maksimalnih brzina oscilovanja tla za rastojanje 300 m

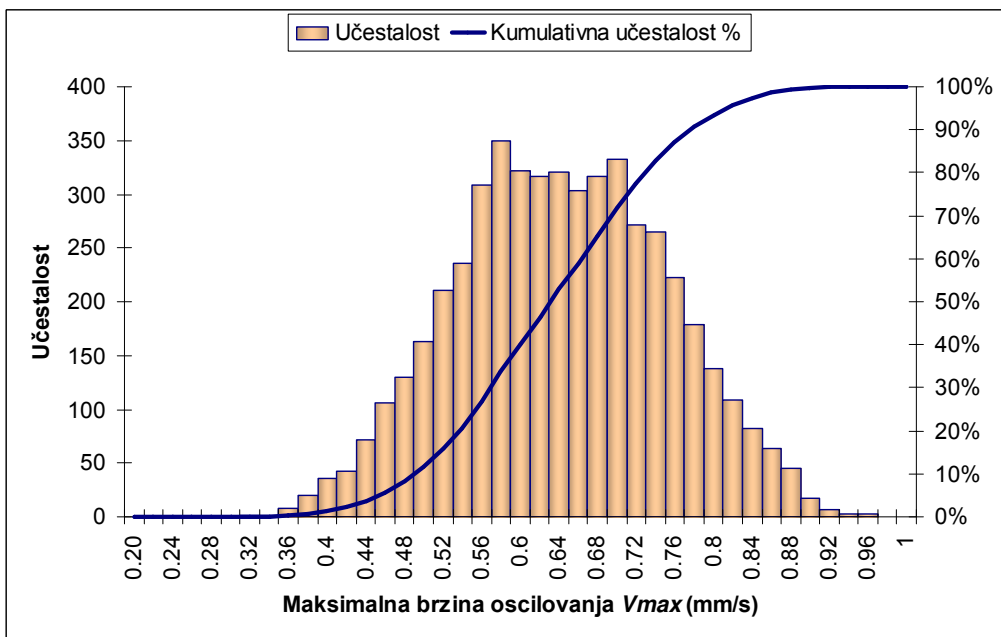


Slika 5-63. Raspodela učestalosti i kumulativna funkcija raspodele maksimalnih brzina oscilovanja tla za rastojanje 550 m





Slika 5-64. Raspodela učestalosti i kumulativna funkcija raspodele maksimalnih brzina oscilovanja tla za rastojanje 800 m



Slika 5-65. Raspodela učestalosti i kumulativna funkcija raspodele maksimalnih brzina oscilovanja tla za rastojanje 1000 m

Tabela 5-13. Pokazatelji statističke obrade rezultata Monte Karlo simulacije za različita rastojanja

Statistički pokazatelji	Rastojanje r = 300 m	Rastojanje r = 550 m	Rastojanje r = 800 m	Rastojanje r = 1000 m
Srednja vrednost	3.27	1.43	0.86	0.63
Standardna greška	0.01	0.0035	0.002	0.0016
Medijana	3.26	1.42	0.86	0.63
Maksimalna vrednost	5.10	2.17	1.29	0.95
Minimalna vrednost	1.64	0.75	0.43	0.31
Standardna devijacija	0.57	0.25	0.15	0.11
Varijansa	0.33	0.06	0.02	0.01
Interval	0.83	0.36	0.21	0.16
Kvantil raspodele .75	3.68	1.61	0.96	0.71
Kvantil raspodele .25	2.86	1.25	0.75	0.56
90% interval raspodele (kvantil .05)	2.33	1.02	0.61	0.45
90% interval raspodele (kvantil .95)	4.21	1.85	1.11	0.81
95% interval raspodele (kvantil .025)	2.18	0.96	0.57	0.43
95% interval raspodele (kvantil .975)	4.35	1.91	1.15	0.84
Iskrivljenost	0.02	0.08	0.01	0.02
Zaobljenost	-0.50	-0.46	-0.44	-0.47

Kako je prikazano na slikama od 5-62 do 5-65, vrednosti brzine oscilovanja za parametre konkretnog miniranja pri različitim rastojanjima imaju raspodelu koja ima izgled normalne raspodele. Posmatrajući učestalosti pojavljivanja, može se videti da se brzina oscilovanja veća od propisane (5 mm/s) pojavljuje samo pri rastojanju od 300 m. Pri miniranju izvršenom 22.09.2010. godine, na mernom mestu koje se nalazilo 550 m od minskog polja, za parametre date u tabeli 5-12, izmerena je maksimalna vrednost brzine oscilovanja tla od 1.85 mm/s.

Vrednost brzine oscilovanja tla dobijena predviđanjem fazi modelom iznosi 1.69 mm/s, dok vrednost predviđanja brzine oscilovanja tla prostom regresionom analizom za nivo

pouzdanosti od 50% iznosi 1.85 mm/s. Prema grafiku slike 5-63, može se očitati srednja vrednost raspodele brzina oscilovanja od 1.43 mm/s. Granice centralnog intervala od 95% odnosno oblast u kome se nalazi 95% dobijenih vrednosti brzina oscilovanja tla kreće se od 0.96 do 1.91 mm/s.

Navedene vrednosti pokazuju da je pri predviđanju potresa od miniranja, pored tačnosti predviđanja, bitno odrediti određeni koeficijent sigurnosti koji treba da obezbedi veći nivo pouzdanosti predviđanja, pri čemu metoda Monte Karlo može da bude veoma korisna. Na primer, predviđena vrednost brzine oscilovanja prostom regresionom analizom za nivo pouzdanosti 95% iznosi 3.26 mm/s, što je 1.74 puta veće od izmerene vrednosti. Time se obezbeđuje određen stepen rezerve za sve nepredviđene okolnosti koje se ne mogu kontrolisati.

Primena Monte Karlo simulacije omogućava da se sa proizvoljno odabranim brojem ponavljanja, pri svakom ponovnom izračunavanju, za slučajne vrednosti ulaznih promenljivih, dobiju odgovarajuće vrednosti karakteristika potresa poput brzine oscilovanja tla. Na taj način se mogu za određene parametre konkretnog miniranja dobiti učestalosti pojavljivanja kritičnih vrednosti brzina oscilovanja tla, za različita rastojanja od minskog polja. Analiza učestalosti pojavljivanja kritičnih vrednosti brzina oscilovanja tla može se izvršiti i za konkretan objekat koji se nalazi na određenom rastojanju od minskog polja, menjajući vrednosti parametara bušenja i miniranja. Rezultati Monte Karlo simulacije mogu biti korisni pri predviđanju potresa od miniranja za određivanje koeficijenta sigurnosti u cilju povećanja nivoa pouzdanosti predviđanja primenom različitih metoda, u ovom slučaju metoda zasnovanih na fazi logici i regresionoj analizi.

## 6.0 ZAKLJUČAK

Potresi tla uzrokovani miniranjem predstavljaju neželjenu prateću pojavu svakog primarnog miniranja na površinskim kopovima. Predviđanje potresa je naročito značajno za kontrolu intenziteta potresa i sprečavanje oštećenja okolnih objekata.

U disertaciji je prikazano modeliranje predviđanja potresa od miniranja na površinskim kopovima primenom fazi logike i metode Monte Karlo, zasnovano na podacima dobijenim terenskim istraživanjima. Promenljive modela definisane su analizom parametara bušenja i miniranja minskih serija, kao i velosigrama izmerenih potresa od miniranja. Iskorišćene su prednosti fazi logike u implementaciji mnogo većeg broja ulaznih i izlaznih promenljivih za modeliranje u odnosu na postojeće empirijske modele.

U cilju povećanja pouzdanosti modela predviđanja, prethodno su obrađeni i analizirani podaci dobijeni terenskim istraživanjima, izvršena je analiza izmerenih karakteristika potresa prema postojećim standardima, izračunati su spektri odziva na osnovu velosigrama, izvršeno je merenje i analiza pomeraja pukotina usled potresa od miniranja i dnevnih promena temperature i relativne vlažnosti vazduha na okolnom stambenom objektu.

Izvršena analiza izmerenih karakteristika potresa svih miniranja prema standardu DIN 4150-3.1999. godine [61] pokazala je da su vrednosti brzina oscilovanja tla, u odnosu na propisane opsege frekvencija za stambene objekte, ispod graničnih vrednosti za lokacije gde se objekti nalaze.

Analiza velosigrama potresa od miniranja i zemljotresa pokazala je da se karakteristike oscilovanja razlikuju kako po intenzitetu tako i po frekvenciji i dužini trajanja. Dužina trajanja oscilacija uzrokovanih zemljotresom prelazi 10 s, dok su oscilacije usled potresa od miniranja reda veličine nekoliko sekundi. Izmerene frekvencije potresa uzrokovanih zemljotresom, kao i dominantne frekvencije dobijene FFT analizom, znatno su nižih vrednosti u odnosu na potrebe od miniranja i nalaze se unutar opsega prirodne frekvencije skeletne konstrukcije objekta od 5 do 10 Hz [6, 65]. To može uzrokovati oštećenje objekata pri ulasku objekta u rezonancu sa pobuđenim potresima od zemljotresa.

Poređenje spektara odziva izračunatih na osnovu velosigrama izmerenih potresa od miniranja i zemljotresa, pokazuje da miniranje daje spektar odziva koji je sličniji

harmonijskim oscilacijama u odnosu na zemljotres, koji daje širok opseg frekvencija. Dominantna frekvencija potresa od zemljotresa je manja u odnosu na potrese nastale od miniranja. Pri malim dominantnim frekvencijama ulaznih vibracija od zemljotresa, maksimalni relativni pomeraji spektra odziva imaju velike vrednosti, što predstavlja opasnost po objekte uzimajući u obzir opseg prirodne frekvencije.

Rezultati kontinuiranog praćenja pomeraja pukotina na stambenom objektu, pokazali su da dejstvo dnevnih oscilacija temperature i relativne vlažnosti nije zanemarljivo. Promene temperature i relativne vlažnosti vazduha uzrokuju širenje i skupljanje materijala zida, stvarajući velika naprezanja u materijalu. Naprezanja se povećavaju sa povećanjem razlike spoljne i unutrašnje temperature i relativne vlažnosti vazduha. Razlika između ovih efekata i potresa je u tome što imaju sporije dejstvo bez pratećih uznemirujućih pojava kao što je buka, pa ih zato vlasnici objekata ne mogu osetiti. Izmereni pomeraji pukotina usled kućnih aktivnosti u rangu su pomeraja pukotina od miniranja, dok je pomeraj pukotina usled zemljotresa, koji je na teritoriji Bora u rangu trećeg stepena Merkalijeve skale, znatno veći od pomeraja izmerenih pri miniranjima.

Fazi model predviđanja potresa od miniranja formiran je na osnovu sedam ulaznih promenljivih: maksimalne količine eksploziva po intervalu usporenja  $Q$  (kg), rastojanja od mesta merenja do minskog polja  $r$  (m), dužine minske bušotine  $l$  (m), dužine minskog punjenja  $lp$  (m), linije najmanjeg otpora  $W$  (m), rastojanja između bušotina u redu  $a$  (m) i rastojanja između redova minskih bušotina  $b$  (m). Izlazne promenljive fazi modela su: maksimalna brzina oscilovanja  $V_{max}$  (mm/s), frekvencija  $f$  (Hz) i dominantna frekvencija  $f_d$  (Hz). Fazi model je razvijen primenom Mamdani algoritma i trougaonih funkcija pripadnosti za opis ulaznih i izlaznih promenljivih. Model je formiran na osnovu 155 fazi pravila, dok je defazifikacija urađena metodom težišta.

Pri formiranju fazi modela nije uzet u obzir prečnik minske bušotine, jer njegova vrednost nije bila promenljiva. Međutim, treba naglasiti da pri formiranju sličnih modela u slučajevima gde se prečnici bušotina razlikuju, neophodno je da prečnik bušenja bude jedna od ulaznih promenljivih.

Da bi se neka od karakteristika stenske mase poput pritisne čvrstoće i brzine prostiranja uzdužnih seizmičkih talasa mogla uvrstiti u ulazne promenljive fazi modela, bilo je neophodno opsežnije istraživanje, odnosno merenje navedenih karakteristika pri svakom praćenom miniranju, što nije bilo moguće iz finansijskih razloga. Uprkos tome,

pouzdanost fazi modela je velika, jer je formiran na osnovu velikog broja izmerenih podataka na terenu. Praćeno je 63 miniranja na većem broju lokacija i različitim stenskom materijalu. Terenskim merenjima dobijene su konkretne vrednosti pokazatelja potresa, koje su uključene u model, pri čemu je obuhvaćeno više parametara koji nisu uzeti kao ulazne promenljive.

Testiranje fazi modela izvršeno je poređenjem rezultata predviđanja potresa sa jednim delom podataka dobijenih terenskim merenjima, kao i sa rezultatima predviđanja potresa primenom regresionog modela, prethodno dobijenog na osnovu identičnih podataka kao i fazi model. Rezultati testiranja fazi modela pokazuju visok nivo pouzdanosti predviđanja u odnosu na regresioni model. Jedan od razloga je prednost fazi modela u mogućnosti uključivanja mnogo više ulaznih i izlaznih promenljivih u odnosu na regresioni model, koji se najčešće zasniva na dve ulazne promenljive: maksimalnoj količini eksploziva po intervalu usporenja  $Q$  (kg) i rastojanju od mesta merenja do minskog polja  $r$  (m) i jednoj izlaznoj veličini, maksimalnoj brzini oscilovanja  $V_{max}$  (mm/s). Pri predviđanju potresa fazi modelom, izlaznu promenljivu pored maksimalne brzine oscilovanja predstavlja i frekvencija dobijena merenjem za maksimalnu vrednost brzine oscilovanja i dominantna frekvencija dobijena FFT analizom svakog velosigrama. Uzimajući u obzir činjenicu da se standardi koji se koriste za procenu dejstva kratkotrajnih vibracija, među koje se ubrajaju i potresi od miniranja za različite tipove objekata, zasnivaju na maksimalnoj brzini oscilovanja i frekvenciji, može se zaključiti da fazi model daje bolje pokazatelje uticaja potresa na objekte od regresionog modela. U pogledu praktične primene, fazi model predstavlja moćno sredstvo pri podešavanju parametara miniranja u cilju kontrolisanja potresa uzrokovanih miniranjem i zaštiti okolnih objekata od oštećenja, obzirom na kompleksnost problema i veliki broj uticajnih faktora.

Tačnost fazi modela, kao i regresionog modela, zavisi od broja i reprezentativnosti izmerenih podataka na terenu, tako da se naknadnim merenjima model može dodatno korigovati i usavršavati.

Uprkos visokoj tačnosti predviđanja fazi modela, verovatnoća da izmerena brzina oscilovanja pri budućim miniranjima pređe propisanu vrednost postoji. Problem slične prirode postoji i kod regresionog modela. Primena modela predviđanja brzine oscilovanja tla za nivo pouzdanosti od 95%, obezbeđuje verovatnoću od 95% da

izmerene brzine oscilovanja u praćenom području neće preći maksimalnu brzinu oscilovanja propisanu odgovarajućim standardom, pri budućim miniranjima na konkretnom površinskom kopu. Prema tome, verovatnoća da brzina oscilovanja pri budućim miniranjima pređe propisanu granicu iznosi 5%.

Istraživanja su pokazala [42] da su potresi od miniranja statistički promenljivi. Pri detonaciji velikog broja identičnih eksplozivnih punjenja na istoj udaljenosti, seizmograf registruje različite vrednosti brzina oscilovanja sa rasporedom koji se približava obliku normalne raspodele. Razlike u nivou potresa iznose i do 60%. Prilikom predviđanja potresa od miniranja, primenom različitih modela, teži se da se ustanovi određena zavisnost ulaznih i izlaznih parametara. Tačnost fazi modela i modela dobijenog regresionom analizom može se povećati velikim brojem izmerenih podataka, što ponekad nije moguće izvesti iz finansijskih razloga. Uprkos tome, kompleksnost predviđanja potresa od miniranja je u tome što proces prostiranja seizmičkih talasa kroz heterogenu, anizotropnu stensku sredinu ima karakteristike i stohastičkih procesa.

Na osnovu navedenog, pogodna metoda predviđanja potresa od miniranja predstavlja i metoda Monte Karlo. Primena Monte Karlo simulacije omogućava da sa proizvoljno odabranim brojem ponavljanja, pri svakom ponovnom izračunavanju, za slučajne vrednosti ulaznih promenljivih, dobiju odgovarajuće vrednosti karakteristika potresa poput brzine oscilovanja tla. Na taj način se mogu, za određene parametre konkretnog miniranja, dobiti učestalosti pojavljivanja kritičnih vrednosti brzina oscilovanja tla, za različita rastojanja od minskog polja. Analiza učestalosti pojavljivanja kritičnih vrednosti brzina oscilovanja tla može se izvršiti i za konkretan objekat koji se nalazi na određenom rastojanju od minskog polja, menjajući vrednosti parametara bušenja i miniranja. Rezultati Monte Karlo simulacije mogu biti korisni pri predviđanju potresa od miniranja za određivanje koeficijenta sigurnosti u cilju povećanja nivoa pouzdanosti predviđanja primenom različitih metoda, u ovom slučaju metoda zasnovanih na fazi logici i regresionoj analizi.

Ograničenja modela odnose se na primenu na drugim površinskim kopovima, jer je modeliranje zasnovano na terenskim istraživanjima na površinskom kopu "Veliki Krivelj" RTB Bor. Međutim, metodologija modeliranja prikazana u doktorskoj disertaciji, može se primeniti na svim površinskim kopovima pri predviđanju potresa uzrokovanih miniranjem.

## 7.0 LITERATURA

1. Jimeno, C.L., Jimeno, E.L., Carcedo, F.J.A, Drilling and blasting of rocks, A.A.Balkema, Rotterdam, Brookfield, 1995.
2. Morris, G., Vibration due to blasting and their effects on building structure, Engineer, 1950, 394-395.
3. Blair, B.E., Duvall, W.I., Evaluation of gages for measuring displacement, velocity, acceleration of seismic pulses, USBM RI 5073, 1954.
4. Duvall, W.I., Petkof, B., Spherical propagation of explosion-generated strain pulses in rock, USBM RI 5483, 1959.
5. Ambraseys, N. R., Hendron, A. J., Dynamic behaviour of rock mass, (eds. K. G. Stagg and O. C. Zienkiewics), Rock mechanics in engineering practices, London, John Wiley, 1968, 203-207.
6. Dowding, C.H., Response of Buildings to Ground Vibrations from Construction Blasting, Ph.D Thesis, University of Illinois, Urbana - Champaign, 1971.
7. Devine, J.F., Duvall, W.I., Effect of Charge Weight on Vibration Levels for Millisecond Delayed Quarry Blast, Earthquake Notes, Seismological Society of America, Vol.34, No 2., 1963.
8. Davies, B., Farmer, I.W., Attewell, P.B., Ground vibrations from shallow sub-surface blasts, The Engineer 217, 1964, 553-559.
9. Holmberg, R., Persson, P.A., Design of tunnel perimeter blasthole patterns to prevent rock damage, Proc. Tunnelling '79, 1979.
10. Shoop, S.A., Daemen J.J.K, Site-specific predictions of ground vibrations induced by blasting, In: Paper presented at the AIME spring meeting, Atlanta, March 1983.
11. Langefors, U., Kihlstrom, B., The modern techniques of rock blasting, New York, John Wiley, 1978, 1-438.
12. Nicholls, H. R., Johnson, C. F., Duvall, W. I., Blasting Vibrations and Their Effects on Structures, USBM. Bull. 656, 1971.
13. Ghosh, A., Daemem Jaak, J. K., A simple new blast vibration predictor (based on wave propagation laws), Proc. 24th U.S. Symp. on Rock Mechanics, Texas, USA, 1983, 151-161.
14. Indian Standard, Criteria for safety and design of structures subjected to under ground blast, ISI, IS - 6922, 1973.



15. Gupta, R.N., Pal Roy, P., Singh, B., 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, 1987, 1015-1021.
16. Pal Roy, P., Vibration control in an opencast mine based on improved blast vibration predictors, *Mining Science and Technology* 12(2), 1991, 157-165.
17. Rai, R., Singh, T.N., A new predictor for ground vibration prediction and its comparison with other predictors, *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences* 11(3), 2004, 178-184.
18. Siskind, D. E., *Vibrations from Blasting*, International Society of Explosives Engineers, Cleveland, OH, USA, 2000.
19. Siskind, D. E., Stagg, M. S., Kopp, J. W., Dowding, C. H., *Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration from Surface Mine Blasting*, U.S. Bureau of Mines Report of Investigations, RI 8507, International Society of Explosives Engineers, 1980b.
20. Siskind, D.E., Crum, S.V., Otterness, R.E., Kopp, J.W., *Comparative Study of Blasting Vibrations From Indiana Surface Coal Mines*, U.S Bureau of Mines RI 9229, 1989.
21. Crum, S.V., Siskind, D.E., Pierce, W.E., Radcliffe, K.S., *Ground Vibrations and Airblasts Monitored in Swedesburg, Pennsylvania, From Blasting at the McCoy Quarry*, Contract Research Rept. by the U.S Bureau of Mines for the Pennsylvania Dept. Env. Resources (14-09-0070-1522), 1995b.
22. Fisne, A., Kuzu, C., Hudaverdi, T., *Prediction of environmental impacts of quarry blasting operation using fuzzy logic*, *Environmental Monitoring and Assessment*, Epub ahead of print 1 May 2010. DOI: 10.1007/s10661- 010-1470-z, 2010.
23. Ghasemi, E., Ataei, M., Hashemolhosseini, H., *Development of a fuzzy model for predicting ground vibration caused by rock blasting in surface*, *Journal of Vibration and Control* 0(0) 1–16. DOI: 10.1177/1077546312437002, 2012.
24. Singh, T.N., Singh, V., *An intelligent approach to predict and control ground vibration in mines*, *Geotechnical and Geological Engineering* 23(3), 2005, 249-262.
25. Khandelwal, M., Singh, T.N., *Prediction of blast induced ground vibrations and frequency in opencast mine: a neural network approach*, *Journal of Sound and Vibration* 289(4-5), 2006, 711-725.

26. Khandelwal, M., Singh, T.N., Evaluation of blast-induced ground vibration predictors, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 27(2), 2007, 116-125.
27. Iphar, M., Yavuz, M., Ak, H., Prediction of ground vibrations resulting from the blasting operations in an open-pit mine by adaptive neuro-fuzzy inference system, *Environmental Geology* 56(1), 2008, 97-107.
28. Mohamed, M.T., Artificial neural network for prediction and control of blasting vibrations in Assiut (Egypt) limestone quarry, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 46(2), 2009, 426-431.
29. Khandelwal, M., Kumar, D.L., Yellishetty, M., Application of soft computing to predict blasting-induced ground vibration, *Engineering with Computers*. Epub ahead of print 13 November 2009, DOI: 10.1007/s00366-009-0157-y.
30. Khandelwal, M., Singh, T.N., Prediction of blast-induced ground vibration using artificial neural network, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 46(7), 2009, 1214-1222.
31. Bakhshandeh Amnieh, H., Mozaianfard, M.R., Siamaki, A., Predicting of blasting vibrations in Sarcheshmeh copper mine by neural network, *Safety Science* 48(3), 2010, 319-325.
32. Monjezi, M., Ahmadi, M., Sheikhan, M., Predicting blast-induced ground vibration using various types of neural networks, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 30(11), 2010, 1233-1236.
33. Verma, A.K., Singh, T.N., Intelligent systems for ground vibration measurement: A Comparative Study, *Engineering with Computers*, Epub ahead of print 7 July 2010. DOI: 10.1007/s00366-010-0193-7.
34. Dehghani, H., Ataee-pour, M., Development of a model to predict peak particle velocity in a blasting operation, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 48(1), 2011, 51-58.
35. Kamali, M., Ataei, M., Prediction of blast induced vibrations in the structures of Karoun III power plant and dam, *Journal of Vibration and Control* 17(4), 2011, 541-548.
36. Mohamed, M.T., 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), 2011, 845-851.

37. Grothe, D., Reinders P., Advanced vibration management in quarries using a predictive blast vibration model, Vienna Conference Proceedings, European Federation of Explosives Engineers, 2007.
38. Orica Explosives Software informer,  
<http://shotplus-i-probeta.software.informer.com/4.3/>
39. Blair, D.P., Statistical model for ground vibration and airblast, *Fragblast - Int. Journ. of Blasting and Fragmentation* 3, 1999, 335-364.
40. Burke, B., Advanced Vibration Management, Quarry production blasting in environmentally sensitive locations, QM October 2008, [www.quarrymanagement.com](http://www.quarrymanagement.com)
41. Blair, D. P., Non-linear superposition models of blast vibration. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, 2007.
42. Konya, J.C., *Surface blast design*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 1990.
43. Savić, M., *Miniranje na površinskim kopovima*, Institut za bakar, Bor, 2000.
44. Purčić, N., *Bušenje i miniranje*, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, 1991.
45. DuPont E.I., *Blaster's Handbook*, Technical Services Division, Wilmington, DE, 1977, 494.
46. Berta, G., *Explosives an engineering tool*, Italesplosivi, Milano, Italy, 1990.
47. Persson, P., Holmer, R. Lee, J. *Rock blasting and explosive engineering*, CRC Press, Inc, Distributed by International Society of Explosives Engineering, USA, 1994.
48. Dowding, C.H., *Construction Vibrations*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA, 1996.
49. Dowding, C.H., *Blast Vibration Monitoring and Control*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA., 1985.
50. Cording, E. J., Hendron, A. J., Hansmire, W. H., Macpherson, H., Jones, R. A., O'Rourke, T. D., *Method for Geotechnical Observations and Instrumentation in Tunneling*, Vol. 2, The National Science Foundation, Grant GZ 33644X, 1975.
51. Kričak, L. *Seizmika miniranja*, Centar za miniranje, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, 2006.
52. Atlas Copco, *Surface Drilling in Open Pit Mining*, First edition, Atlas Copco Construction and Mining Technique, 2006, 10.
53. Dyno Nobel, [www.dynonobel.com](http://www.dynonobel.com)

54. CASIO, [www.casio.com/products/archive/Digital\\_Cameras/High-Speed/EX-F1](http://www.casio.com/products/archive/Digital_Cameras/High-Speed/EX-F1)
55. Pattern designer, Precision Blasting Services, Montville, OH, U.S.A.
56. Olofsson, S.O., Applied Explosives Technology for Construction and Mining, Applex, Arla, Sweden, 2002.
57. InstanTEL, Minimate Plus™, [www.instanTEL.com](http://www.instanTEL.com)
58. ISEE, Field Practice Guidelines for Blasting Seismographs, International Society of Explosives Engineers, Standards Committee, Final Standard 2/8/09, 2009, 5.
59. ISO 5348-3: 1998, Mechanical vibration and shock - Mechanical mounting of accelerometers, 1998, 12.
60. Stagg, M.S., Engler, A.J., Measurement of Blast Induced Ground Vibraton and Seismogrph Calibrations, Report of Investigations 8896, U.S. Bureau of Mines, Washington DC, 1980.
61. German Standards, Part 3-Structural vibrations in building, effects on structures, DIN 4150, Berlin, Germany, 1999.
62. Stojadinović, S., 2009, Seizmički efekti miniranja na površinskim kopovima i zaštita objekata od njihovog dejstva, Magistarska teza, Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet Bor, 2009.
63. Thompson, W.T, Vibration Theory and Applications, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1965, 43-44.
64. Dowding, C.H., Beck, W.K., Atmatzidis, D.K., Blast Vibration Implications of Cyclic Shear Behavior of Model Plaster Panels, ASTM Geotechnical Testing Journal, Vol. 3, No. 2, 1980, 81-90.
65. Medearis, K., The Development of Rational Damage Criteria for Low-Rise Structures Subjected to Blasting Vibrations, Report to the National Crushed Stone Association, Washington, D.C., 1976.
66. Newmark, N.M., Hall, W.J., Earthquake Spectra and Design, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, CA, 1982.
67. Veletsos, A.S., Newmark, N.M., Design Procedures for Shock Isolation Systems of Underground Protective Structures, Volume III; Response Spectra of Single Degree-of-Freedom Elastic and Inelastic Systems, Air Force Weapons Laboratory Technical Documentary Report RTD TDR-63-3096 AD44989-Volume III, 1964.

68. Timoshenko, S.P., Goodier, J.N., Theory of Elasticity, 3rd ed., McGraw-Hill Book Company, New York, 1970, 567.
69. Hendron, A.J., Dowding, C.H., Ground and Structural Response Due to Blasting, Proceedings of the 3rd Congress of the International Society for Rock Mechanics, Denver, CO, Vol. IIB, 1974, 1359-1364.
70. Edwards, A.T., Northwood, T.D., Experimental Studies of the Effects of Blasting on Structures, The Engineer, Vol. 210, 1960.
71. Tamrock, Handbook on surface drilling and blasting, Painofaktorit, 1984.
72. Thoenen, J.R., Windes, S.L., Seismic Effects on Quarry Blasting. Bulletin No. 442, U.S. Bureau of Mines, Washington, DC., 1942.
73. Crandell, F.J., Ground Vibration Due to Blasting and Its Effect Upon Structures, Journal of the Boston Society of Civil Engineers, 49(2), 1949, 152-168.
74. Langefors, U., Westerberg, H., Khilstron, B., Ground Vibrations in Blasting. Parts I-III, Water Power, September 1958, 335-338, October 1958, 390-395, November 1958, 421-424.
75. Edwards, A.T., Northwood, T.D., Experimental Blasting Studies on Structures, National Research Council, Ottawa, Canada, 1959.
76. Stagg, M.S., Siskind, D.E., Stevens, M.G., Dowding, C.H., Effects of Repeated Blasting on Wood-frame House, RI8896, U.S. Bureau of Mines, Washington, DC, 1984.
77. BS 7385-2:1993 Evaluation and measurement for vibration in buildings - Part 2: Guide to damage levels from groundborne vibration, British Standard.
78. AS 2187.2-1993, Australian Standard.
79. Building Research Station, Cracking in Buildings, Building Research Establishment Digest, Vol. 75, BRS, Carston, England, 1977, 8.
80. Association of Casualty Anusurety Companies, Blasting Claims, A Guide to Adjusters, Association of Casualty and Surety Companies, HO William Street, New York, NY 10038, 1956.
81. Holmberg, R., Lundborg, N., Runquist, G., Ground vibrations and Damage Criteria, Report R85 for Swedish Council for Buildings Research (BFR) by the Swedish Detonic Research Foundation, Stockholm, 1981.
82. Wall, J.F., Seismic-induced Architectural Damage to Masonry Structure at Mercury, Nevada, University of California, Lawrence Radiation Laboratory, UCRL - 14987, 1966.

83. Atlas Copco, SmartRig, [www.atlascopco.com](http://www.atlascopco.com)
84. Kričak, L., Teodorović, A., Vučković, D., Negovanović, M., Vasiljević, I., Janković, I., Zeković, D., Vodootporna video sonda. Softver, Tehničko rešenje, Industrijski prototip M82, Centar za miniranje, Rudarsko-geološki fakultet, 2010.
85. Kuzmenko, A.A., Vorobev, V.D., Denisyuk, I.I., Dauetas, A.A., Seismic effects of blasting in rock, CRC Press, 1993.
86. Studija uticaja miniranja na objekte u okruženju površinskog kopa „Veliki Krivelj“ RTB Bor, Rudarsko-geološki fakultet, 2010.
87. Projekat tehnološkog razvoja Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj TR 17013, Sistem za praćenje negativnih uticaja miniranja na okolnu sredinu, 2008 - 2011.
88. Dopunski Rudarski Projekat otkopavanja i prerade rude u ležištu „Veliki Krivelj“ za kapacitet  $8.5 \times 10^6$  tona vlažne rude godišnje, RTB Bor - Grupa, Institut za Bakar d.o.o, Bor, 2010.
89. Glavni Rudarski Projekat otkopavanja ležišta "Veliki Krivelj", Institut za bakar Bor, 1978.
90. Studija stabilnosti kosine za površinski kop "Veliki Krivelj" do kote - 100, Rudarski Institut - Beograd, 1986.
91. Dopunski Rudarski Projekat otkopavanja u ležištu "Veliki Krivelj" za kapacitet 10.6 miliona tona rude godišnje, Institut za bakar Bor, 1999.
92. Bucyrus Erie, Drilling Rig 45-R, History Brochure, Caterpillar Mining, 1945.
93. Dopunski Rudarski Projekat otkopavanja na kopu "Veliki Krivelj" za kapacitet od  $10.6 \times 10^6$  tona vlažne rude, Institut za bakar Bor, 1995.
94. Kričak, L., Negovanović, M., Janković, I., Zeković, D., Measurement and analysis of blast-induced vibrations in the open pit copper mine „Veliki Krivelj“ Bor, Proceedings of the XI National Conference with International Participation of the Open and Underwater Mining of Minerals, Scientific and Technical Union of mining, geology and metallurgy, Varna, Bulgaria, 19-23 June 2011, 163-170.
95. Dyno Nobel, Blasting and Explosives Quick Reference Guide, 2010, [www.dynonobel.com](http://www.dynonobel.com)
96. ABEM Vibraloc, Sweden, [www.abem.se](http://www.abem.se)
97. Kričak, L., Negovanović, M., Janković, I., Zeković, D., Mitrović, S., Analysis of crack displacements on residential structure induced by blasting and earthquake

vibrations and daily changes of temperature and relative humidity, Proceedings of International Conference on Damage Mechanics - ICDM, Belgrade, Serbia, 25 - 27 June 2012, 181-184.

98. NUVIB, Dowding, C.H., Northwestern University, Evanston, IL, USA.

99. Dplot, [www.dplot.com](http://www.dplot.com)

100. Dowding, C. H., Micrometer crack response to vibration and weather, International Society of Explosives Engineers, Cleveland, Ohio, USA, 2008.

101. Kosnik, D.E., Autonomous Crack Displacement Monitoring of a Residence Near a Quarry, Autonomous Crack Monitoring Publications, Northwestern University, 2009.

102. AMA, Structure Response Study, Report prepared for the City of Henderson, NV by Aimone-Martin Associates, 2005.

103. Dowding, C. H., Blast Induced Micrometer Response of Cracks in Concrete Block Structures, Proceedings of the 4th World Conference on Explosives and Blasting, European Federation of Explosive Engineers, UK, 2007.

104. Scanntronik, [www.scanntronik.de](http://www.scanntronik.de)

105. Negovanović, M., Kričak, L., Janković, I., Zeković, D., Ignjatović, S., Measurement of crack displacement on residential structure due to blast-induced vibrations and daily changes of temperature and relative humidity, Journal Technics Technologies Education Management, Vol. 7. No.1 u II/III 2012, 411-417.

106. Kričak, L., Negovanović, M., Janković, I., Zeković, D., Kontinuirano praćenje pomeraja pukotina na stambenom objektu u cilju poređenja uticaja miniranja i vremenskih prilika, Zbornik radova sa sedmog Naučno-stručnog savetovanja „Ocena stanja, održavanje i sanacija građevinskih objekata i naselja“, Savez građevinskih inženjera Srbije, Zlatibor, Srbija, 09-11 maj 2011, 391-400.

107. Zadeh, L.A., Fuzzy sets, Information and Control, 8(3), 1965, 338-353.

108. Kirschfink, H., Lieven, K., Basic Tools for Fuzzy Modeling, Heribert Kirschfink, Aachen, Germany, [citeseerx.ist.psu.edu](http://citeseerx.ist.psu.edu), 1999.

109. Kaehler, S.D., Fuzzy logic - an introduction, Part 1. Encoder, Seattlerobotics, [www.seattlerobotics.org/encoder/mar98/fuz/fl\\_part1](http://www.seattlerobotics.org/encoder/mar98/fuz/fl_part1).

110. Zimmermann, H.-J., Fuzzy Set Theory and its Applications (3rd rev. ed.), Kluwer Academic Publishers, Boston, Dordrecht, Lancaster, 1996.

111. Zimmermann, H.-J, Fuzzy Sets, Decision Making and Expert Systems, Kluwer Academic Publishers, Boston, Dordrecht, Lancaster, 1987.
112. Zimmermann, H.-J. (ed.): Fuzzy Technologien - Prinzipien, Werkzeuge, Potentiale, VDI Verlag, Düsseldorf, 1993.
113. Ruan, D., Kerre E.E., Fuzzy implication operators and generalized fuzzy method of cases, Fuzzy Sets Syst., 54, 1993, 23-37.
114. Sugeno, M. (ed.), Industrial Applications of Fuzzy Control, North-Holland, Amsterdam, London, New York, 1985.
115. Kaldorf, S., Echtzeit-Expertensysteme in der chemischen Industrie. ist - Intelligente Software Technologien 2, 1992, 13-18.
116. Miyamoto, S., Fuzzy Sets in Information Retrieval and Cluster Analysis, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London, 1990.
117. Barczewski, T., Rust, J., Weber, R., Zygan, H., A fuzzy system for credit analysis in a german credit insurance company, Proceedings EUFIT '96, Aachen, 1996, 2215-2218.
118. Jang, J- S. R, Sun, C.T., Functional equivalence between radial basis function networks and fuzzy inference systems, IEEE, Transactions on Neural Networks, 4(1),1993, 156-159.
119. Kandel, A., Fuzzy expert systems, CRC Press, Inc, Boca Raton, FL, 1992.
120. Kosko, B., Neural networks and fuzzy systems: a dynamical systems approach, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1991.
121. Mamdani, E.H., Assilian, S., An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller, International Journal of Man-Machine Studies, 7(1), 1975, 1-13.
122. Lee, C.-C., Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller - part1, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 20(2), 1990, 404-418.
123. Lee, C.-C., Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller - part2, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 20(2), 1990, 419-435.
124. Bai Y., Zhuang, H., Wang, D., Fundamentals of Fuzzy Logic Control - Fuzzy Sets, Fuzzy Rules and Defuzzifications, Advanced Fuzzy Logic Technologies in Industrial Applications, Springer, XXV, 2006, 334.



125. Pfluger, N., Yen, J., Langari, R., A defuzzification strategy for a fuzzy logic controller employing prohibitive information in command formulation, Proceedings of IEEE International Conference on Fuzzy on Fuzzy Systems, San Diego, 1992, 717-723.
126. Runkler, T.A., Glesner, M., Defuzzification and Ranking in the Context of Membership Values Semantics, Rule modality, and Measurement Theory, In European Congress on Fuzzy and Intelligent Technologies, Aachen, 1994.
127. Yager, R.R., Filev, D.P. SLIDE, A simple adaptive defuzzification method, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 1(1), 1993, 69-78.
128. MATLAB, Fuzzy Logic Toolbox (R2011a), [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com)
129. Vujić, S., Ivić, A., Matematičke metode u rudarstvu i geologiji, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, 1991.
130. Jovanović, M., Logističke simulacije, Mašinski fakultet, Niš, 2011.
131. Wittwer, J.W., Monte Carlo Simulation: Sales Forecast Example, From Vertex42.com, June 1, 2004, <http://vertex42.com/ExcelArticles/mc/SalesForecast.html>
132. Miller, J.N., Miller, J.C., Statistics and chemometrics for analytical chemistry, 6th ed, Pearson Education Limited, Harlow, England, 2010.

## **PRILOZI**

### **Spisak Priloga**

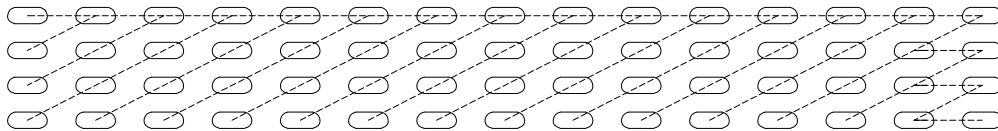
- Prilog 1 Vremenska analiza šeme iniciranja primenom softvera PATTERN DESIGNER za neelektrični sistem iniciranja - I
- Prilog 2 Vremenska analiza šeme iniciranja primenom softvera PATTERN DESIGNER za neelektrični sistem iniciranja - II
- Prilog 3 Vremenska analiza šeme iniciranja primenom softvera PATTERN DESIGNER za neelektrični sistem iniciranja - III
- Prilog 4 Položaj mernih mesta i minskih polja pri terenskim merenjima na površinskom kopu "Veliki Krivelj" RTB Bor; R 1:8000
- Prilog 5 Odštampani velosigrama izmerenih potresa od miniranja primenom seizmografa ABEM Vibraloc
- Prilog 6 Odštampani velosigrama izmerenih potresa od zemljotresa primenom seizmografa ABEM Vibraloc
- Prilog 7 Izjava o autorstvu
- Prilog 8 Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada
- Prilog 9 Izjava o korišćenju

## Prilog 1

### VREMENSKA ANALIZA ŠEME INICIRANJA PRIMENOM SOFTVERA PATTERN DESIGNER ZA NEELEKTRIČNI SISTEM INICIRANJA - I

Tabela P1-1. Ulazni podaci

<b>Maksimalni broj minskih bušotina u redu</b>	15
<b>Broj redova</b>	4
<b>Odstupanje vremena usporenja konektora</b>	2%
<b>Standardna devijacija</b>	95% nivo pouzdanosti (p2 standardna devijacija)
<b>Kriterijum preklapanja</b>	1 minsko punjenje po usporenju



Slika P1-1. Šema povezivanja minskih punjenja

*Tabela P1-2. Usporejnja bušotinskih detonatora (ms)*

<b>Prvi red</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
<b>Drugi red</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
<b>Treći red</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
<b>Četvrti red</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
<b>Prvi red</b>	11	12	13	14	15					
	500	500	500	500	500					
<b>Drugi red</b>	11	12	13	14	15					
	500	500	500	500	500					
<b>Treći red</b>	11	12	13	14	15					
	500	500	500	500	500					
<b>Četvrti red</b>	11	12	13	14	15					
	500	500	500	500	500					

Tabela P1-3. Usporenja površinskih konektora

Red	Minska bušotina	Usporenje između bušotina (ms)	Red	Minska bušotina	Vreme odstupanja (ms)	Odstupanje (%)
1	1	25	1	2	0.50	2.00
1	2	25	1	3	0.50	2.00
1	3	25	1	4	0.50	2.00
1	4	25	1	5	0.50	2.00
1	5	25	1	6	0.50	2.00
1	6	25	1	7	0.50	2.00
1	7	25	1	8	0.50	2.00
1	8	25	1	9	0.50	2.00
1	9	25	1	10	0.50	2.00
1	10	25	1	11	0.50	2.00
1	11	25	1	12	0.50	2.00
1	12	25	1	13	0.50	2.00
1	13	25	1	14	0.50	2.00
1	14	25	1	15	0.50	2.00
1	2	67	2	1	1.34	2.00
1	3	67	2	2	1.34	2.00
1	4	67	2	3	1.34	2.00
1	5	67	2	4	1.34	2.00
1	6	67	2	5	1.34	2.00
1	7	67	2	6	1.34	2.00
1	8	67	2	7	1.34	2.00
1	9	67	2	8	1.34	2.00
1	10	67	2	9	1.34	2.00
1	11	67	2	10	1.34	2.00
1	12	67	2	11	1.34	2.00
1	13	67	2	12	1.34	2.00
1	14	67	2	13	1.34	2.00
1	15	67	2	14	1.34	2.00
2	14	25	2	15	0.50	2.00
2	2	67	3	1	1.34	2.00
2	3	67	3	2	1.34	2.00
2	4	67	3	3	1.34	2.00
2	5	67	3	4	1.34	2.00
2	6	67	3	5	1.34	2.00
2	7	67	3	6	1.34	2.00
2	8	67	3	7	1.34	2.00
2	9	67	3	8	1.34	2.00
2	10	67	3	9	1.34	2.00
2	11	67	3	10	1.34	2.00
2	12	67	3	11	1.34	2.00
2	13	67	3	12	1.34	2.00

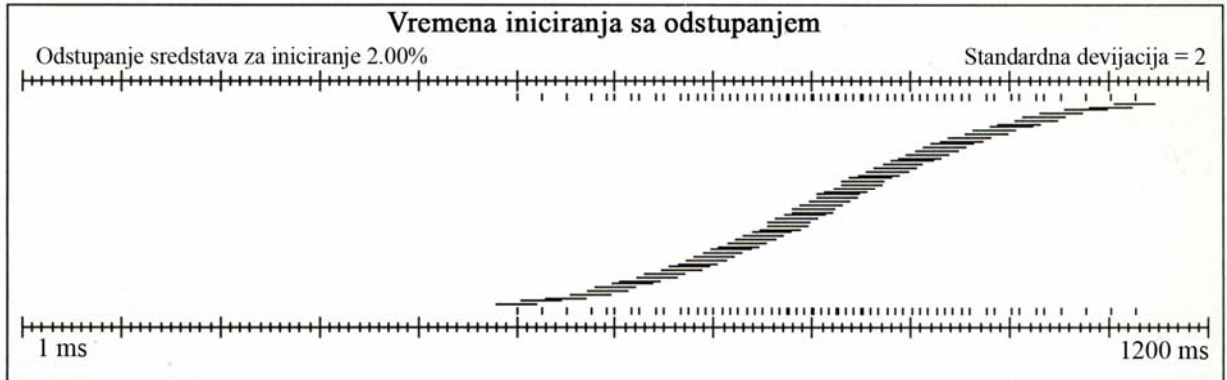
Red	Minska bušotina	Usporenje između bušotina (ms)	Red	Minska bušotina	Vreme odstupanja (ms)	Odstupanje (%)
2	14	67	3	13	1.34	2.00
2	15	67	3	14	1.34	2.00
3	14	25	3	15	0.50	2.00
3	2	67	4	1	1.34	2.00
3	3	67	4	2	1.34	2.00
3	4	67	4	3	1.34	2.00
3	5	67	4	4	1.34	2.00
3	6	67	4	5	1.34	2.00
3	7	67	4	6	1.34	2.00
3	8	67	4	7	1.34	2.00
3	9	67	4	8	1.34	2.00
3	10	67	4	9	1.34	2.00
3	11	67	4	10	1.34	2.00
3	12	67	4	11	1.34	2.00
3	13	67	4	12	1.34	2.00
3	14	67	4	13	1.34	2.00
3	15	67	4	14	1.34	2.00
4	14	25	4	15	0.5	2.00

Tabela P1-4. Vremena iniciranja uključujući odstupanja sredstava za iniciranje

\*Punjenja sa verovatnoćom preklapanja

<b>Red 1</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	480	505	530	555	580	605	630	655	680	705
<b>Čep 1</b>	500*	525*	550*	575*	600*	625*	650*	675*	700*	725*
	520	545	570	595	620	645	670	695	720	745
<b>Red 2</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	572	597	622	647	672	697	722	747	772	797
<b>Čep 1</b>	592*	617*	642*	667*	692*	717*	742*	767*	792*	817*
	612	637	662	687	712	737	762	787	812	837
<b>Red 3</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	664	689	714	739	763	788	813	838	863	888
<b>Čep 1</b>	684*	709*	734*	759*	784*	809*	834*	859*	884*	909*
	704	729	754	779	805	830	855	880	905	930
<b>Red 4</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	755	780	805	830	855	880	905	930	955	980
<b>Čep 1</b>	776*	801*	826*	851*	876*	901*	926*	951*	976*	1.001*
	797	822	847	872	897	922	947	972	997	1.022
<b>Red 1</b>	11	12	13	14	15					

	730	755	780	805	830					
<b>Čep 1</b>	750*	775*	800*	825*	850*					
	770	795	820	845	870					
<b>Red 2</b>	11	12	13	14	15					
	822	847	872	896	921					
<b>Čep 1</b>	842*	867*	892*	917*	942*					
	862	887	912	938	963					
<b>Red 3</b>	11	12	13	14	15					
	913	938	963	988	1.013					
<b>Čep 1</b>	934*	959*	984*	1.009*	1.034*					
	955	980	1.005	1.030	1.055					
<b>Red 4</b>	11	12	13	14	15					
	1.005	1.030	1.055	1.080	1.105					
<b>Čep 1</b>	1.026*	1.051*	1.076*	1.101*	1.126*					
	1.047	1.072	1.097	1.122	1.147					



*Slika P1-2. Vremena iniciranja uključujući odstupanja sredstava za iniciranje*

Tabela P1-5. Redosled iniciranja minskih punjenja (odstupanje sredstava za iniciranje 2%, standardna devijacija 2)

Redosled iniciranja	Red	Minska bušotina	Čep	Vreme iniciranja (ms)	Interval usporenja (ms)	+/- (ms)	Min (ms)	Max (ms)	Verovatnoća preklapanja (%)
1)	1	1	1	500		10.00	480	520	
					25*				18.98
2)	1	2	1	525		10.01	505	545	
					25*				19.01
3)	1	3	1	550		10.02	530	570	
					25*				19.04
4)	1	4	1	575		10.04	555	595	
					17*				27.63
5)	2	1	1	592		10.10	572	612	
					8*				38.94
6)	1	5	1	600		10.05	580	620	
					17*				27.65
7)	2	2	1	617		10.11	597	637	
					8*				38.95
8)	1	6	1	625		10.06	605	645	
					17*				27.68
9)	2	3	1	642		10.13	622	662	
					8*				38.96
10)	1	7	1	650		10.07	630	670	
					17*				27.70
11)	2	4	1	667		10.14	647	687	
					8*				38.98
12)	1	8	1	675		10.09	655	695	
					9*				37.66
13)	3	1	1	684		10.20	664	704	
					8*				39.04
14)	2	5	1	692		10.15	672	712	
					8*				38.99
15)	1	9	1	700		10.10	680	720	
					9*				37.67
16)	3	2	1	709		10.21	689	729	
					8*				39.06
17)	2	6	1	717		10.16	697	737	
					8*				39.00
18)	1	10	1	725		10.11	705	745	
					9*				37.69
19)	3	3	1	734		10.23	714	754	
					8*				39.07
20)	2	7	1	742		10.18	722	762	



Redosled iniciranja	Red	Minska bušotina	Čep	Vreme iniciranja (ms)	Interval usporenja (ms)	+/- (ms)	Min (ms)	Max (ms)	Verovatnoća preklapanja (%)
					8*				39.02
21)	1	11	1	750		10.12	730	770	
					9*				37.70
22)	3	4	1	759		10.24	739	779	
					8*				39.08
23)	2	8	1	767		10.19	747	787	
					8*				39.03
24)	1	12	1	775		10.14	755	795	
					1*				48.31
25)	4	1	1	776		10.30	755	797	
					8*				39.15
26)	3	5	1	784		10.25	763	805	
					8*				39.09
27)	2	9	1	792		10.20	772	812	
					8*				39.04
28)	1	13	1	800		10.15	780	820	
					1*				48.31
29)	4	2	1	801		10.31	780	822	
					8*				39.16
30)	3	6	1	809		10.26	788	830	
					8*				39.11
31)	2	10	1	817		10.21	797	837	
					8*				39.05
32)	1	14	1	825		10.16	805	845	
					1*				48.31
33)	4	3	1	826		10.33	805	847	
					8*				39.17
34)	3	7	1	834		10.28	813	855	
					8*				39.12
35)	2	11	1	842		10.22	822	862	
					8*				39.07
36)	1	15	1	850		10.17	830	870	
					1*				48.32
37)	4	4	1	851		10.34	830	872	
					8*				39.18
38)	3	8	1	859		10.29	838	880	
					8*				39.13
39)	2	12	1	867		10.24	847	887	
					9*				37.83
40)	4	5	1	876		10.35	855	897	
					8*				39.20
41)	3	9	1	884		10.30	863	905	
					8*				39.14

Redosled iniciranja	Red	Minska bušotina	Čep	Vreme iniciranja (ms)	Interval usporenja (ms)	+/- (ms)	Min (ms)	Max (ms)	Verovatnoća preklapanja (%)
42)	2	13	1	892		10.25	872	912	
					9*				37.84
43)	4	6	1	901		10.36	880	922	
					8*				39.21
44)	3	10	1	909		10.31	888	930	
					8*				39.16
45)	2	14	1	917		10.26	896	938	
					9*				37.86
46)	4	7	1	926		10.37	905	947	
					8*				39.22
47)	3	11	1	934		10.32	913	955	
					8*				39.17
48)	2	15	1	942		10.27	921	963	
					9*				37.87
49)	4	8	1	951		10.39	930	972	
					8*				39.23
50)	3	12	1	959		10.34	938	980	
					17*				28.20
51)	4	9	1	976		10.40	955	997	
					8*				39.24
52)	3	13	1	984		10.35	963	1.005	
					17*				28.23
53)	4	10	1	1.001		10.41	980	1.022	
					8*				39.26
54)	3	14	1	1.009		10.36	988	1.030	
					17*				28.25
55)	4	11	1	1.026		10.42	1.005	1.047	
					8*				39.27
56)	3	15	1	1.034		10.37	1.013	1.055	
					17*				28.27
57)	4	12	1	1.051		10.43	1.030	1.072	
					25*				19.99
58)	4	13	1	1.076		10.45	1.055	1.097	
					25*				20.02
59)	4	14	1	1.101		10.46	1.080	1.122	
					25*				20.04
60)	4	15	1	1.126		10.47	1.105	1.147	

Tabela P1-6. Minska punjenja koja prelaze kriterijume preklapanja iz Tabele P1-1.

Red	Minska bušotina	Čep	Vreme Iniciranja (ms)	Red	Minska bušotina	Čep	Vreme Iniciranja (ms)	Interval usporenja (ms)	Verovatnoća preklapanja (%)
1	1	1	500	1	2	1	525	25	18.98
1	2	1	525	1	3	1	550	25	19.01
1	3	1	550	1	4	1	575	25	19.04
1	4	1	575	2	1	1	592	17	27.63
2	1	1	592	1	5	1	600	8	38.94
1	5	1	600	2	2	1	617	17	27.65
2	2	1	617	1	6	1	625	8	38.95
1	6	1	625	2	3	1	642	17	27.68
2	3	1	642	1	7	1	650	8	38.96
1	7	1	650	2	4	1	667	17	27.70
2	4	1	667	1	8	1	675	8	38.98
1	8	1	675	3	1	1	684	9	37.66
3	1	1	684	2	5	1	692	8	39.04
2	5	1	692	1	9	1	700	8	38.99
1	9	1	700	3	2	1	709	9	37.67
3	2	1	709	2	6	1	717	8	39.06
2	6	1	717	1	10	1	725	8	39.00
1	10	1	725	3	3	1	734	9	37.69
3	3	1	734	2	7	1	742	8	39.07
2	7	1	742	1	11	1	750	8	39.02
1	11	1	750	3	4	1	759	9	37.70
3	4	1	759	2	8	1	767	8	39.08
2	8	1	767	1	12	1	775	8	39.03
1	12	1	775	4	1	1	776	1	48.31
4	1	1	776	3	5	1	784	8	39.15
3	5	1	784	2	9	1	792	8	39.09
2	9	1	792	1	13	1	800	8	39.04
1	13	1	800	4	2	1	801	1	48.31
4	2	1	801	3	6	1	809	8	39.16
3	6	1	809	2	10	1	817	8	39.11
2	10	1	817	1	14	1	825	8	39.05
1	14	1	825	4	3	1	826	1	48.31
4	3	1	826	3	7	1	834	8	39.17
3	7	1	834	2	11	1	842	8	39.12
2	11	1	842	1	15	1	850	8	39.07
1	15	1	850	4	4	1	851	1	48.32
4	4	1	851	3	8	1	859	8	39.18
3	8	1	859	2	12	1	867	8	39.13
2	12	1	867	4	5	1	876	9	37.83
4	5	1	876	3	9	1	884	8	39.20
3	9	1	884	2	13	1	892	8	39.14

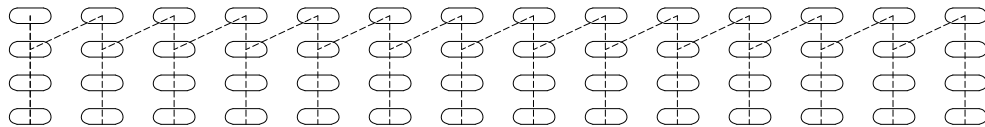
Red	Minska bušotina	Čep	Vreme Iniciranja (ms)	Red	Minska bušotina	Čep	Vreme Iniciranja (ms)	Interval usporenja (ms)	Verovatnoća preklapanja (%)
2	13	1	892	4	6	1	901	9	37.84
4	6	1	901	3	10	1	909	8	39.21
3	10	1	909	2	14	1	917	8	39.16
2	14	1	917	4	7	1	926	9	37.86
4	7	1	926	3	11	1	934	8	39.22
3	11	1	934	2	15	1	942	8	39.17
2	15	1	942	4	8	1	951	9	37.87
4	8	1	951	3	12	1	959	8	39.23
3	12	1	959	4	9	1	976	17	28.20
4	9	1	976	3	13	1	984	8	39.24
3	13	1	984	4	10	1	1.001	17	28.23
4	10	1	1.001	3	14	1	1.009	8	39.26
3	14	1	1.009	4	11	1	1.026	17	28.25
4	11	1	1.026	3	15	1	1.034	8	39.27
3	15	1	1.034	4	12	1	1.051	17	28.27
4	12	1	1.051	4	13	1	1.076	25	19.99
4	13	1	1.076	4	14	1	1.101	25	20.02
4	14	1	1.101	4	15	1	1.126	25	20.04

## Prilog 2

### VREMENSKA ANALIZA ŠEME INICIRANJA PRIMENOM SOFTVERA PATTERN DESIGNER ZA NEELEKTRIČNI SISTEM INICIRANJA - II

Tabela P2-1. Ulazni podaci

<b>Maksimalni broj minskih bušotina u redu</b>	14
<b>Broj redova</b>	4
<b>Odstupanje vremena usporenja konektora</b>	2%
<b>Standardna devijacija</b>	95% nivo pouzdanosti (p2 standardna devijacija)
<b>Kriterijum preklapanja</b>	1 minsko punjenje po usporenju



Slika P2-1. Šema povezivanja minskih punjenja

*Tabela P2-2. Usporejna bušotinskih detonatora (ms)*

<b>Prvi red</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
<b>Drugi red</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
<b>Treći red</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
<b>Četvrti red</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
<b>Prvi red</b>	11	12	13	14						
	500	500	500	500						
<b>Drugi red</b>	11	12	13	14						
	500	500	500	500						
<b>Treći red</b>	11	12	13	14						
	500	500	500	500						
<b>Četvrti red</b>	11	12	13	14						
	500	500	500	500						

Tabela P2-3. Usporenja površinskih konektora

Red	Minska bušotina	Usporenje između bušotina (ms)	Red	Minska bušotina	Vreme odstupanja (ms)	Odstupanje (%)
2	1	25	1	2	0.50	2.00
2	2	25	1	3	0.50	2.00
2	3	25	1	4	0.50	2.00
2	4	25	1	5	0.50	2.00
2	5	25	1	6	0.50	2.00
2	6	25	1	7	0.50	2.00
2	7	25	1	8	0.50	2.00
2	8	25	1	9	0.50	2.00
2	9	25	1	10	0.50	2.00
2	10	25	1	11	0.50	2.00
2	11	25	1	12	0.50	2.00
2	12	25	1	13	0.50	2.00
2	13	25	1	14	0.50	2.00
1	1	67	2	1	1.34	2.00
1	2	67	2	2	1.34	2.00
1	3	67	2	3	1.34	2.00
1	4	67	2	4	1.34	2.00
1	5	67	2	5	1.34	2.00
1	6	67	2	6	1.34	2.00
1	7	67	2	7	1.34	2.00
1	8	67	2	8	1.34	2.00
1	9	67	2	9	1.34	2.00
1	10	67	2	10	1.34	2.00
1	11	67	2	11	1.34	2.00
1	12	67	2	12	1.34	2.00
1	13	67	2	13	1.34	2.00
1	14	67	2	14	1.34	2.00
2	1	67	3	1	1.34	2.00
2	2	67	3	2	1.34	2.00
2	3	67	3	3	1.34	2.00
2	4	67	3	4	1.34	2.00
2	5	67	3	5	1.34	2.00
2	6	67	3	6	1.34	2.00
2	7	67	3	7	1.34	2.00
2	8	67	3	8	1.34	2.00
2	9	67	3	9	1.34	2.00
2	10	67	3	10	1.34	2.00
2	11	67	3	11	1.34	2.00
2	12	67	3	12	1.34	2.00
2	13	67	3	13	1.34	2.00
2	14	67	3	14	1.34	2.00

Red	Minska bušotina	Usporenje između bušotina (ms)	Red	Minska bušotina	Vreme odstupanja (ms)	Odstupanje
3	1	67	4	1	1.34	2.00
3	2	67	4	2	1.34	2.00
3	3	67	4	3	1.34	2.00
3	4	67	4	4	1.34	2.00
3	5	67	4	5	1.34	2.00
3	6	67	4	6	1.34	2.00
3	7	67	4	7	1.34	2.00
3	8	67	4	8	1.34	2.00
3	9	67	4	9	1.34	2.00
3	10	67	4	10	1.34	2.00
3	11	67	4	11	1.34	2.00
3	12	67	4	12	1.34	2.00
3	13	67	4	13	1.34	2.00
3	14	67	4	14	1.34	2.00

Tabela P2-4. Vremena iniciranja uključujući odstupanja sredstava za iniciranje

\*Punjenja sa verovatnoćom preklapanja

<b>Red 1</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	480	572	664	755	847	939	1.031	1.123	1.214	1.306
<b>Čep 1</b>	500	592*	684*	776*	868*	960*	1.052*	1.144*	1.236*	1.328*
	520	612	704	797	889	981	1.073	1.165	1.258	1.350
<b>Red 2</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	547	639	730	822	914	1.006	1.098	1.189	1.281	1.373
<b>Čep 1</b>	567*	659*	751*	843*	935*	1.027*	1.119*	1.211*	1.303*	1.395*
	587	679	772	864	956	1.048	1.140	1.233	1.325	1.417
<b>Red 3</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	614	705	797	889	981	1.073	1.164	1.256	1.348	1.440
<b>Čep 1</b>	634*	726*	818*	910*	1.002*	1.094*	1.186*	1.278*	1.370*	1.462*
	654	747	839	931	1.023	1.115	1.208	1.300	1.392	1.484
<b>Red 4</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	680	772	864	956	1.048	1.139	1.231	1.323	1.415	1.507
<b>Čep 1</b>	701*	793*	885*	977*	1.069*	1.161*	1.253*	1.345*	1.437*	1.529*
	722	814	906	998	1.090	1.183	1.275	1.367	1.459	1.551
<b>Red 1</b>	11	12	13	14						
	1.398	1.490	1.582	1.673						
<b>Čep 1</b>	1.420*	1.512*	1.604*	1.696*						



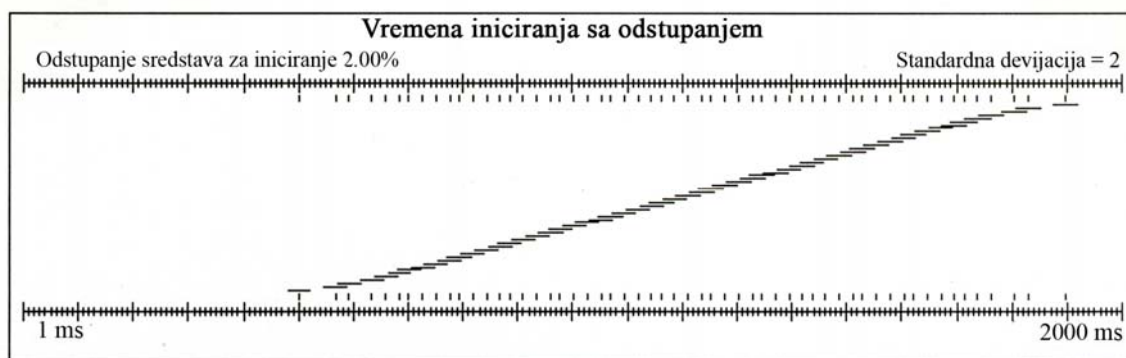
	1.442	1.534	1.626	1.719						
<b>Red 2</b>	11	12	13	14						
	1.465	1.557	1.649	1.740						
<b>Čep 1</b>	1.487*	1.579*	1.671*	1.763*						
	1.509	1.601	1.693	1.786						
<b>Red 3</b>	11	12	13	14						
	1.532	1.624	1.715	1.807						
<b>Čep 1</b>	1.554*	1.646*	1.738*	1.830*						
	1.576	1.668	1.761	1.853						
<b>Red 4</b>	11	12	13	14						
	1.599	1.690	1.782	1.874						
<b>Čep 1</b>	1.621*	1.713*	1.805*	1.897*						
	1.643	1.736	1.828	1.920						

Tabela P2-5. Redosled iniciranja minskih punjenja (odstupanje sredstava za iniciranje 2%, standardna devijacija 2)

Redosled iniciranja	Red	Minska bušotina	Čep	Vreme iniciranja (ms)	Interval uspor. (ms)	+/- (ms)	Min (ms)	Max (ms)	Verovatnoća preklapanja (%)
1)	1	1	1	500		10.00	480	520	
					67				
2)	2	1	1	567		10.09	547	587	
					25*				19.19
3)	1	2	1	592		10.10	572	612	
					42				
4)	3	1	1	634		10.18	614	654	
					25*				19.40
5)	2	2	1	659		10.19	639	679	
					25*				19.43
6)	1	3	1	684		10.20	664	704	
					17*				27.95
7)	4	1	1	701		10.27	680	722	
					25*				19.60
8)	3	2	1	726		10.28	705	747	
					25*				19.63
9)	2	3	1	751		10.29	730	772	
					25*				19.66
10)	1	4	1	776		10.30	755	797	
					17*				28.14
11)	4	2	1	793		10.36	772	814	
					25*				19.83
12)	3	3	1	818		10.38	797	839	
					25*				19.86
13)	2	4	1	843		10.39	822	864	
					25*				19.88
14)	1	5	1	868		10.40	847	889	
					17*				28.32
15)	4	3	1	885		10.46	864	906	
					25*				20.05
16)	3	4	1	910		10.48	889	931	
					25*				20.08
17)	2	5	1	935		10.49	914	956	
					25*				20.11
18)	1	6	1	960		10.50	939	981	
					17*				28.50
19)	4	4	1	977		10.56	956	998	
					25*				20.27
20)	3	5	1	1.002		10.57	981	1.023	
					25*				20.30
21)	2	6	1	1.027		10.58	1.006	1.048	
					25*				20.32

Redosled iniciranja	Red	Minska bušotina	Čep	Vreme iniciranja (ms)	Interval uspor. (ms)	+/- (ms)	Min (ms)	Max (ms)	Verovatnoća preklapanja (%)
22)	1	7	1	1.052		10.60	1.031	1.073	
					17*				28.68
23)	4	5	1	1.069		10.66	1.048	1.090	
					25*				20.48
24)	3	6	1	1.094		10.67	1.073	1.115	
					25*				20.51
25)	2	7	1	1.119		10.68	1.098	1.141	
					25*				20.54
26)	1	8	1	1.144		10.69	1.123	1.165	
					17*				28.85
27)	4	6	1	1.161		10.75	1.139	1.183	
					25*				20.69
28)	3	7	1	1.186		10.76	1.164	1.208	
					25*				20.72
29)	2	8	1	1.211		10.78	1.189	1.233	
					25*				20.74
30)	1	9	1	1.236		10.79	1.214	1.258	
					17*				29.02
31)	4	7	1	1.253		10.85	1.231	1.275	
					25*				20.90
32)	3	8	1	1.278		10.86	1.256	1.300	
					25*				20.92
33)	2	9	1	1.303		10.87	1.281	1.325	
					25*				20.95
34)	1	10	1	1.328		10.88	1.306	1.350	
					17*				29.18
35)	4	8	1	1.345		10.94	1.323	1.367	
					25*				21.10
36)	3	9	1	1.370		10.95	1.348	1.392	
					25*				21.12
37)	2	10	1	1.395		10.96	1.373	1.417	
					25*				21.15
38)	1	11	1	1.420		10.98	1.398	1.442	
					17*				29.34
39)	4	9	1	1.437		11.03	1.415	1.459	
					25*				21.29
40)	3	10	1	1.462		11.05	1.440	1.484	
					25*				21.32
41)	2	11	1	1.487		11.06	1.465	1.509	
					25*				21.34
42)	1	12	1	1.512		11.07	1.490	1.534	
					17*				29.50
43)	4	10	1	1.529		11.13	1.507	1.551	
					25*				21.49
44)	3	11	1	1.554		11.14	1.532	1.576	

Redosled iniciranja	Red	Minska bušotina	Čep	Vreme iniciranja (ms)	Interval uspor. (ms)	+/- (ms)	Min (ms)	Max (ms)	Verovatnoća preklapanja (%)
					25*				21.51
45)	2	12	1	1.579		11.15	1.557	1.601	
					25*				21.53
46)	1	13	1	1.604		11.16	1.582	1.626	
					17*				29.65
47)	4	11	1	1.621		11.22	1.599	1.643	
					25*				21.68
48)	3	12	1	1.646		11.23	1.624	1.668	
					25*				21.70
49)	2	13	1	1.671		11.24	1.649	1.693	
					25*				21.72
50)	1	14	1	1.696		11.25	1.673	1.719	
					17*				29.80
51)	4	12	1	1.713		11.31	1.690	1.736	
					25*				21.86
52)	3	13	1	1.738		11.32	1.715	1.761	
					25*				21.88
53)	2	14	1	1.763		11.33	1.740	1.786	
					42*				9.70
54)	4	13	1	1.805		11.40	1.782	1.828	
					25*				22.04
55)	3	14	1	1.830		11.41	1.807	1.853	
					67				
56)	4	14	1	1.897		11.49	1.874	1.920	



Slika P2-2. Vremena iniciranja uključujući odstupanja sredstava za iniciranje

Tabela P2-6. Minska punjenja koja prelaze kriterijume preklapanja iz Tabele P2-1.

Red	Minska bušotina	Čep	Vreme Iniciranja (ms)	Red	Minska bušotina	Čep	Vreme Iniciranja (ms)	Interval usporenja (ms)	Verovatnoća preklapanja (%)
2	1	1	567	1	2	1	592	25	19.19
3	1	1	634	2	2	1	659	25	19.40
2	2	1	659	1	3	1	684	25	19.43
1	3	1	684	4	1	1	701	17	27.95
4	1	1	701	3	2	1	726	25	19.60
3	2	1	726	2	3	1	751	25	19.63
2	3	1	751	1	4	1	776	25	19.66
1	4	1	776	4	2	1	793	17	28.14
4	2	1	793	3	3	1	818	25	19.83
3	3	1	818	2	4	1	843	25	19.86
2	4	1	843	1	5	1	868	25	19.88
1	5	1	868	4	3	1	885	17	28.32
4	3	1	885	3	4	1	910	25	20.05
3	4	1	910	2	5	1	935	25	20.08
2	5	1	935	1	6	1	960	25	20.11
1	6	1	960	4	4	1	977	17	28.50
4	4	1	977	3	5	1	1.002	25	20.27
3	5	1	1.002	2	6	1	1.027	25	20.30
2	6	1	1.027	1	7	1	1.052	25	20.32
1	7	1	1.052	4	5	1	1.069	17	28.68
4	5	1	1.069	3	6	1	1.094	25	20.48
3	6	1	1.094	2	7	1	1.119	25	20.51
2	7	1	1.119	1	8	1	1.144	25	20.54
1	8	1	1.144	4	6	1	1.161	17	28.85
4	6	1	1.161	3	7	1	1.186	25	20.69
3	7	1	1.186	2	8	1	1.211	25	20.72
2	8	1	1.211	1	9	1	1.236	25	20.74
1	9	1	1.236	4	7	1	1.253	17	29.02
4	7	1	1.253	3	8	1	1.278	25	20.90
3	8	1	1.278	2	9	1	1.303	25	20.92
2	9	1	1.303	1	10	1	1.328	25	20.95
1	10	1	1.328	4	8	1	1.345	17	29.18
4	8	1	1.345	3	9	1	1.370	25	21.10
3	9	1	1.370	2	10	1	1.395	25	21.12
2	10	1	1.395	1	11	1	1.420	25	21.15
1	11	1	1.420	4	9	1	1.437	17	29.34
4	9	1	1.437	3	10	1	1.462	25	21.29
3	10	1	1.462	2	11	1	1.487	25	21.32
2	11	1	1.487	1	12	1	1.512	25	21.34
1	12	1	1.512	4	10	1	1.529	17	29.50
4	10	1	1.529	3	11	1	1.554	25	21.49
3	11	1	1.554	2	12	1	1.579	25	21.51
2	12	1	1.579	1	13	1	1.604	25	21.53
1	13	1	1.604	4	11	1	1.621	17	29.65

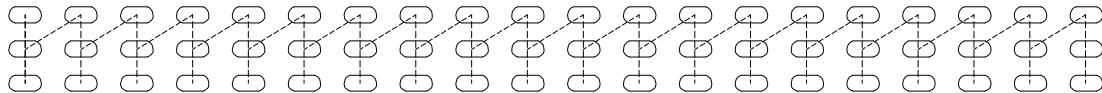
<b>Red</b>	<b>Minska bušotina</b>	<b>Čep</b>	<b>Vreme Iniciranja (ms)</b>	<b>Red</b>	<b>Minska bušotina</b>	<b>Čep</b>	<b>Vreme Iniciranja (ms)</b>	<b>Interval usporenja (ms)</b>	<b>Verovatnoća preklapanja (%)</b>
4	11	1	1.621	3	12	1	1.646	25	21.68
3	12	1	1.646	2	13	1	1.671	25	21.70
2	13	1	1.671	1	14	1	1.696	25	21.72
1	14	1	1.696	4	12	1	1.713	17	29.80
4	12	1	1.713	3	13	1	1.738	25	21.86
3	13	1	1.738	2	14	1	1.763	25	21.88
2	14	1	1.763	4	13	1	1.805	42	9.70
4	13	1	1.805	3	14	1	1.830	25	22.04

### Prilog 3

#### VREMENSKA ANALIZA ŠEME INICIRANJA PRIMENOM SOFTVERA PATTERN DESIGNER ZA NEELEKTRIČNI SISTEM INICIRANJA - III

Tabela P3-1. Ulazni podaci

<b>Maksimalni broj minskih bušotina u redu</b>	20
<b>Broj redova</b>	3
<b>Odstupanje vremena usporenja konektora</b>	2%
<b>Standardna devijacija</b>	95% nivo pouzdanosti (p2 standardna devijacija)
<b>Kriterijum preklapanja</b>	1 minsko punjenje po usporenju



Slika P3-1. Šema povezivanja minskih punjenja





Tabela P3-3. Usporenja površinskih konektora

Red	Minska bušotina	Usporenje između bušotina (ms)	Red	Minska bušotina	Vreme odstupanja (ms)	Odstupanje (%)
2	1	25	1	2	0.50	2.00
2	2	25	1	3	0.50	2.00
2	3	25	1	4	0.50	2.00
2	4	25	1	5	0.50	2.00
2	5	25	1	6	0.50	2.00
2	6	25	1	7	0.50	2.00
2	7	25	1	8	0.50	2.00
2	8	25	1	9	0.50	2.00
2	9	25	1	10	0.50	2.00
2	10	25	1	11	0.50	2.00
2	11	25	1	12	0.50	2.00
2	12	25	1	13	0.50	2.00
2	13	25	1	14	0.50	2.00
2	14	25	1	15	0.50	2.00
2	15	25	1	16	0.50	2.00
2	16	25	1	17	0.50	2.00
2	17	25	1	18	0.50	2.00
2	18	25	1	19	0.50	2.00
2	19	25	1	20	0.50	2.00
1	1	42	2	1	0.84	2.00
1	2	42	2	2	0.84	2.00
1	3	42	2	3	0.84	2.00
1	4	42	2	4	0.84	2.00
1	5	42	2	5	0.84	2.00
1	6	42	2	6	0.84	2.00
1	7	42	2	7	0.84	2.00
1	8	42	2	8	0.84	2.00
1	9	42	2	9	0.84	2.00
1	10	42	2	10	0.84	2.00
1	11	42	2	11	0.84	2.00
1	12	42	2	12	0.84	2.00
1	13	42	2	13	0.84	2.00
1	14	42	2	14	0.84	2.00
1	15	42	2	15	0.84	2.00
1	16	42	2	16	0.84	2.00
1	17	42	2	17	0.84	2.00
1	18	42	2	18	0.84	2.00
1	19	42	2	19	0.84	2.00
1	20	42	2	20	0.84	2.00
2	1	42	3	1	0.84	2.00
2	2	42	3	2	0.84	2.00

Red	Minska bušotina	Usporenje između bušotina (ms)	Red	Minska bušotina	Vreme odstupanja (ms)	Odstupanje
2	3	42	3	3	0.84	2.00
2	4	42	3	4	0.84	2.00
2	5	42	3	5	0.84	2.00
2	6	42	3	6	0.84	2.00
2	7	42	3	7	0.84	2.00
2	8	42	3	8	0.84	2.00
2	9	42	3	9	0.84	2.00
2	10	42	3	10	0.84	2.00
2	11	42	3	11	0.84	2.00
2	12	42	3	12	0.84	2.00
2	13	42	3	13	0.84	2.00
2	14	42	3	14	0.84	2.00
2	15	42	3	15	0.84	2.00
2	16	42	3	16	0.84	2.00
2	17	42	3	17	0.84	2.00
2	18	42	3	18	0.84	2.00
2	19	42	3	19	0.84	2.00
2	20	42	3	20	0.84	2.00

Tabela P3-4. Vremena iniciranja uključujući odstupanja sredstava za iniciranje

\*Punjenja sa verovatnoćom preklapanja

<b>Red 1</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	480	547	614	681	748	815	881	948	1.015	1.082
<b>Čep 1</b>	500	567*	634*	701*	768*	835*	902*	969*	1.036*	1.103*
	520	587	654	721	788	855	923	990	1.057	1.124
<b>Red 2</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	522	589	656	723	790	856	923	990	1.057	1.124
<b>Čep 1</b>	542*	609*	676*	743*	810*	877*	944*	1.011*	1.078*	1.145*
	562	629	696	763	830	898	965	1.032	1.099	1.166
<b>Red 3</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	564	631	698	765	831	898	965	1.032	1.099	1.166
<b>Čep 1</b>	584*	651*	718*	785*	852*	919*	986*	1.053*	1.120*	1.187*
	604	671	738	805	873	940	1.007	1.074	1.141	1.208
<b>Red 1</b>	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	1.149	1.216	1.283	1.350	1.417	1.484	1.551	1.617	1.684	1.751
<b>Čep 1</b>	1.170*	1.237*	1.304*	1.371*	1.438*	1.505*	1.572*	1.639*	1.706*	1.773*
	1.191	1.258	1.325	1.392	1.459	1.526	1.593	1.661	1.728	1.795

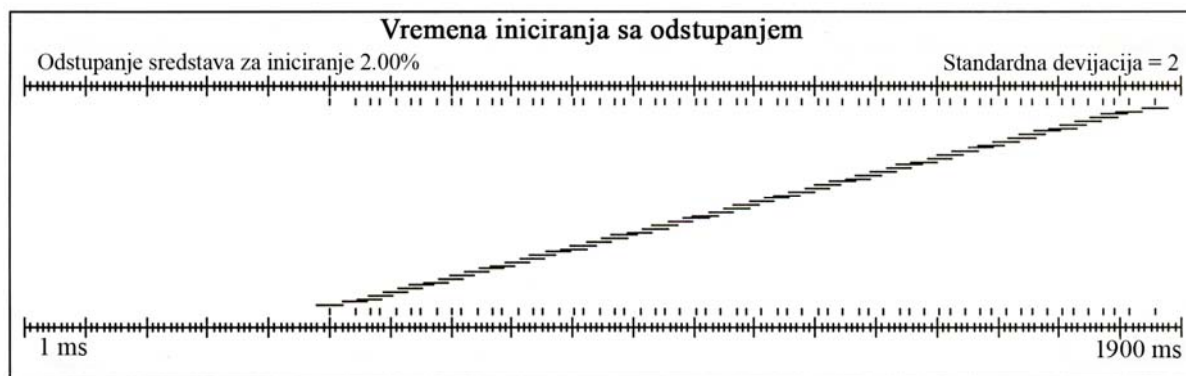
<b>Red 2</b>	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	1.191	1.258	1.325	1.392	1.459	1.526	1.592	1.659	1.726	1.793
<b>Čep 1</b>	1.212*	1.279*	1.346*	1.413*	1.480*	1.547*	1.614*	1.681*	1.748*	1.815*
	1.233	1.300	1.367	1.434	1.501	1.568	1.636	1.703	1.770	1.837
<b>Red 3</b>	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	1.233	1.300	1.367	1.434	1.501	1.567	1.634	1.701	1.768	1.835
<b>Čep 1</b>	1.254*	1.321*	1.388*	1.455*	1.522*	1.589*	1.656*	1.723*	1.790*	1.857*
	1.275	1.342	1.409	1.476	1.543	1.611	1.678	1.745	1.812	1.879

Tabela P3-5. Redosled iniciranja minskih punjenja (odstupanje sredstava za iniciranje 2%, standardna devijacija 2)

Redosled iniciranja	Red	Minska bušotina	Čep	Vreme iniciranja (ms)	Interval uspor. (ms)	+/- (ms)	Min (ms)	Max (ms)	Verovatnoća preklapanja (%)
1)	1	1	1	500		10.00	480	520	
					42				
2)	2	1	1	542		10.04	522	562	
					25*				19.06
3)	1	2	1	567		10.05	547	587	
					42				27.61
4)	3	1	1	584		10.07	564	604	
					25*				19.15
5)	2	2	1	609		10.08	589	629	
					25*				19.18
6)	1	3	1	634		10.10	614	654	
					17*				27.71
7)	3	2	1	651		10.12	631	671	
					25*				19.26
8)	2	3	1	676		10.13	656	696	
					25*				19.29
9)	1	4	1	701		10.14	681	721	
					17*				27.80
10)	3	3	1	718		10.16	698	738	
					25*				19.37
11)	2	4	1	743		10.18	723	763	
					25*				19.40
12)	1	5	1	768		10.19	748	788	
					17*				27.89
13)	3	4	1	785		10.21	765	805	
					25*				19.48
14)	2	5	1	810		10.22	790	830	
					25*				19.51
15)	1	6	1	835		10.24	815	855	
					17*				27.98
16)	3	5	1	852		10.26	831	873	
					25*				19.59
17)	2	6	1	877		10.27	856	898	
					25*				19.61
18)	1	7	1	902		10.28	881	923	
					17*				28.07
19)	3	6	1	919		10.30	898	940	
					25*				19.69
20)	2	7	1	944		10.32	923	965	
					25*				19.72
21)	1	8	1	969		10.33	948	990	
					17*				28.16

Redosled iniciranja	Red	Minska bušotina	Čep	Vreme iniciranja (ms)	Interval uspor. (ms)	+/- (ms)	Min (ms)	Max (ms)	Verovatnoća preklapanja (%)
22)	3	7	1	986		10.35	965	1.007	
					25*				19.80
23)	2	8	1	1.011		10.36	990	1.032	
					25*				19.83
24)	1	9	1	1.036		10.38	1.015	1.057	
					17*				28.24
25)	3	8	1	1.053		10.40	1.032	1.074	
					25*				19.90
26)	2	9	1	1.078		10.41	1.057	1.099	
					25*				19.93
27)	1	10	1	1.103		10.42	1.082	1.124	
					17*				28.33
28)	3	9	1	1.120		10.44	1.099	1.141	
					25*				20.01
29)	2	10	1	1.145		10.45	1.124	1.166	
					25*				20.03
30)	1	11	1	1.170		10.47	1.149	1.191	
					17*				28.42
31)	3	10	1	1.187		10.49	1.166	1.208	
					25*				20.11
32)	2	11	1	1.212		10.50	1.191	1.233	
					25*				20.14
33)	1	12	1	1.237		10.51	1.216	1.258	
					17*				28.50
34)	3	11	1	1.254		10.53	1.233	1.275	
					25*				20.21
35)	2	12	1	1.279		10.55	1.258	1.300	
					25*				20.24
36)	1	13	1	1.304		10.56	1.283	1.325	
					17*				28.58
37)	3	12	1	1.321		10.58	1.300	1.342	
					25*				20.31
38)	2	13	1	1.346		10.59	1.325	1.367	
					25*				20.34
39)	1	14	1	1.371		10.60	1.350	1.392	
					17*				28.66
40)	3	13	1	1.388		10.62	1.367	1.409	
					25*				20.41
41)	2	14	1	1.413		10.64	1.392	1.434	
					25*				20.44
42)	1	15	1	1.438		10.65	1.417	1.459	
					17*				28.75
43)	3	14	1	1.455		10.67	1.434	1.476	
					25*				20.51
44)	2	15	1	1.480		10.68	1.459	1.501	

Redosled iniciranja	Red	Minska bušotina	Čep	Vreme iniciranja (ms)	Interval uspor. (ms)	+/- (ms)	Min (ms)	Max (ms)	Verovatnoća preklapanja (%)
					25*				20.54
45)	1	16	1	1.505		10.69	1.484	1.526	
					17*				28.83
46)	3	15	1	1.522		10.71	1.501	1.543	
					25*				20.61
47)	2	16	1	1.547		10.73	1.526	1.568	
					25*				20.64
48)	1	17	1	1.572		10.74	1.551	1.593	
					17*				28.91
49)	3	16	1	1.589		10.76	1.567	1.611	
					25*				20.71
50)	2	17	1	1.614		10.77	1.592	1.636	
					25*				20.73
51)	1	18	1	1.639		10.78	1.617	1.661	
					17*				28.98
52)	3	17	1	1.656		10.80	1.634	1.678	
					25*				20.80
53)	2	18	1	1.681		10.81	1.659	1.703	
					25*				20.83
54)	1	19	1	1.706		10.83	1.684	1.728	
					17*				29.06
55)	3	18	1	1.723		10.85	1.701	1.745	
					25*				20.90
56)	2	19	1	1.748		10.86	1.726	1.770	
					25*				20.92
57)	1	20	1	1.773		10.87	1.751	1.795	
					17*				29.14
58)	3	19	1	1.790		10.89	1.768	1.812	
					25*				20.99
59)	2	20	1	1.815		10.90	1.793	1.837	
					42*				8.83
60)	3	20	1	1.857		10.93	1.835	1.879	



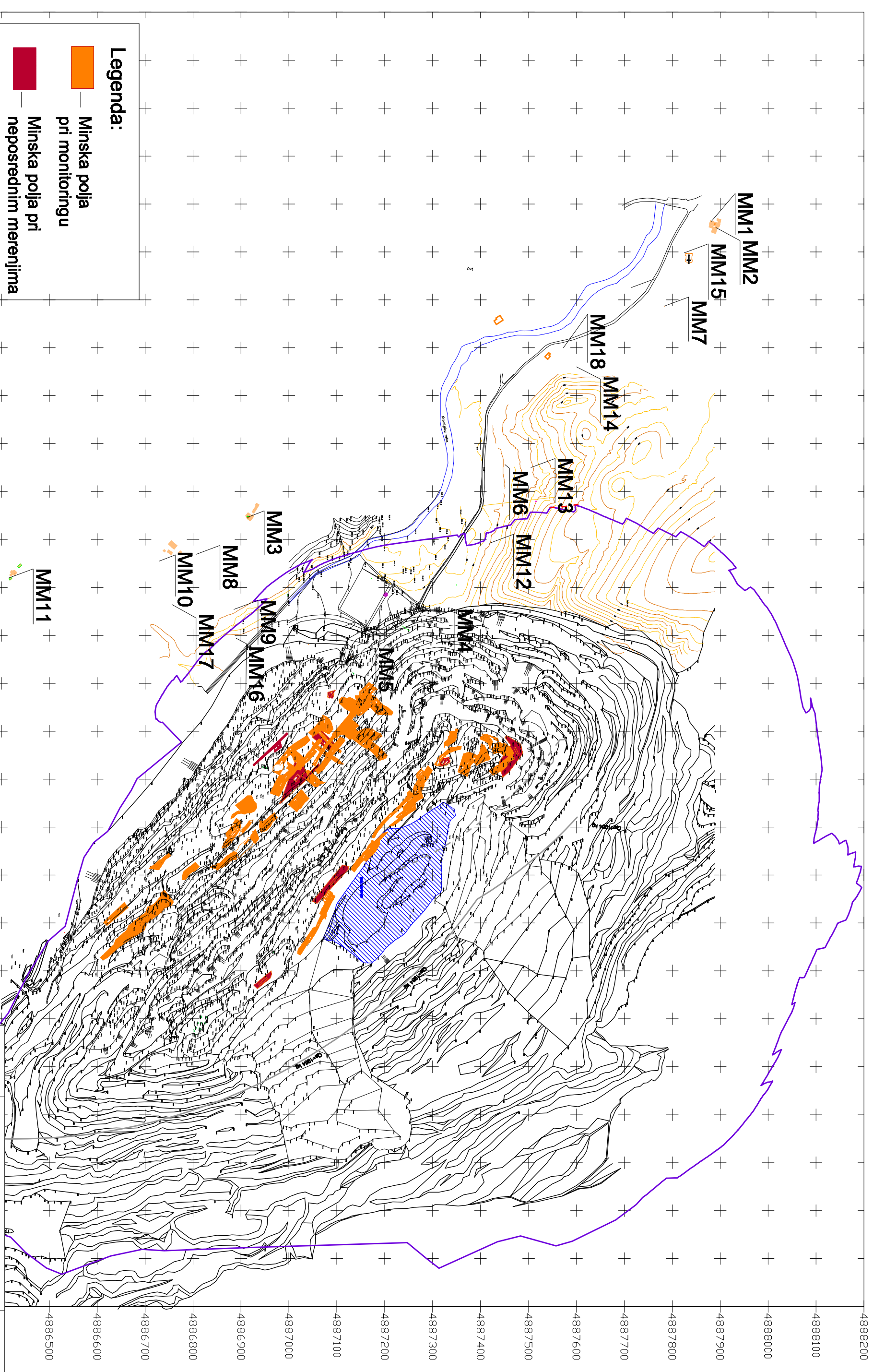
*Slika P3-2. Vremena iniciranja uključujući odstupanja sredstava za iniciranje*

*Tabela P3-6. Minska punjenja koja prelaze kriterijume preklapanja iz Tabele P-1.*




Red	Minska bušotina	Čep	Vreme Iniciranja (ms)	Red	Minska bušotina	Čep	Vreme Iniciranja (ms)	Interval usporenja (ms)	Verovatnoća preklapanja (%)
2	1	1	542	1	2	1	567	25	19.06
1	2	1	567	3	1	1	584	17	27.71
3	1	1	584	2	2	1	609	25	19.15
2	2	1	609	1	3	1	634	25	19.18
1	3	1	634	3	2	1	651	17	27.71
3	2	1	651	2	3	1	676	25	19.26
2	3	1	676	1	4	1	701	25	19.29
1	4	1	701	3	3	1	718	17	27.80
3	3	1	718	2	4	1	743	25	19.37
2	4	1	743	1	5	1	768	25	19.40
1	5	1	768	3	4	1	785	17	27.89
3	4	1	785	2	5	1	810	25	19.48
2	5	1	810	1	6	1	835	25	19.51
1	6	1	835	3	5	1	852	17	27.98
3	5	1	852	2	6	1	877	25	19.59
2	6	1	877	1	7	1	902	25	19.61
1	7	1	902	3	6	1	919	17	28.07
3	6	1	919	2	7	1	944	25	19.69
2	7	1	944	1	8	1	969	25	19.72
1	8	1	969	3	7	1	986	17	28.16
3	7	1	986	2	8	1	1.011	25	19.80
2	8	1	1.011	1	9	1	1.036	25	19.83
1	9	1	1.036	3	8	1	1.053	17	28.24
3	8	1	1.053	2	9	1	1.078	25	19.90
2	9	1	1.078	1	10	1	1.103	25	19.93
1	10	1	1.103	3	9	1	1.120	17	28.33
3	9	1	1.120	2	10	1	1.145	25	20.01

Red	Minska bušotina	Čep	Vreme Iniciranja (ms)	Red	Minska bušotina	Čep	Vreme Iniciranja (ms)	Interval usporenja (ms)	Verovatnoća preklapanja (%)
2	10	1	1.145	1	11	1	1.170	25	20.03
1	11	1	1.170	3	10	1	1.187	17	28.42
3	10	1	1.187	2	11	1	1.212	25	20.11
2	11	1	1.212	1	12	1	1.237	25	20.14
1	12	1	1.237	3	11	1	1.254	17	28.50
3	11	1	1.254	2	12	1	1.279	25	20.21
2	12	1	1.279	1	13	1	1.304	25	20.24
1	13	1	1.304	3	12	1	1.321	17	28.58
3	12	1	1.321	2	13	1	1.346	25	20.31
2	13	1	1.346	1	14	1	1.371	25	20.34
1	14	1	1.371	3	13	1	1.388	17	28.66
3	13	1	1.388	2	14	1	1.413	25	20.41
2	14	1	1.413	1	15	1	1.438	25	20.44
1	15	1	1.438	3	14	1	1.455	17	28.75
3	14	1	1.455	2	15	1	1.480	25	20.51
2	15	1	1.480	1	16	1	1.505	25	20.54
1	16	1	1.505	3	15	1	1.522	17	28.83
3	15	1	1.522	2	16	1	1.547	25	20.61
2	16	1	1.547	1	17	1	1.572	25	20.64
1	17	1	1.572	3	16	1	1.589	17	28.91
3	16	1	1.589	2	17	1	1.614	25	20.71
2	17	1	1.614	1	18	1	1.639	25	20.73
1	18	1	1.639	3	17	1	1.656	17	28.98
3	17	1	1.656	2	18	1	1.681	25	20.80
2	18	1	1.681	1	19	1	1.706	25	20.83
1	19	1	1.706	3	18	1	1.723	17	29.06
3	18	1	1.723	2	19	1	1.748	25	20.90
2	19	1	1.748	1	20	1	1.773	25	20.92
1	20	1	1.773	3	19	1	1.790	17	29.14
3	19	1	1.790	2	20	1	1.815	25	20.99
2	20	1	1.815	3	20	1	1.857	42	8.83





**Legenda:**

	Minska polja pri monitoringu
	Minska polja pri neposrednim merenjih
	Merna mesta

7587700  
7587800  
7587900  
7588000  
7588100  
7588200  
7588300  
7588400  
7588500  
7588600  
7588700  
7588800  
7588900  
7589000  
7589100  
7589200  
7589300  
7589400  
7589500  
7589600  
7589700  
7589800

4888200  
4888100  
4888000  
4887900  
4887800  
4887700  
4887600  
4887500  
4887400  
4887300  
4887200  
4887100  
4887000  
4886900  
4886800  
4886700  
4886600  
4886500

Prilog	Položaj mernih mesta i minskih polja pri terenskim merenjih na površinskom kopu "Veliki Kriveji" RTB Bor	Razmera
4		1:8000

Podloga: Situaciona karta RTB Bor

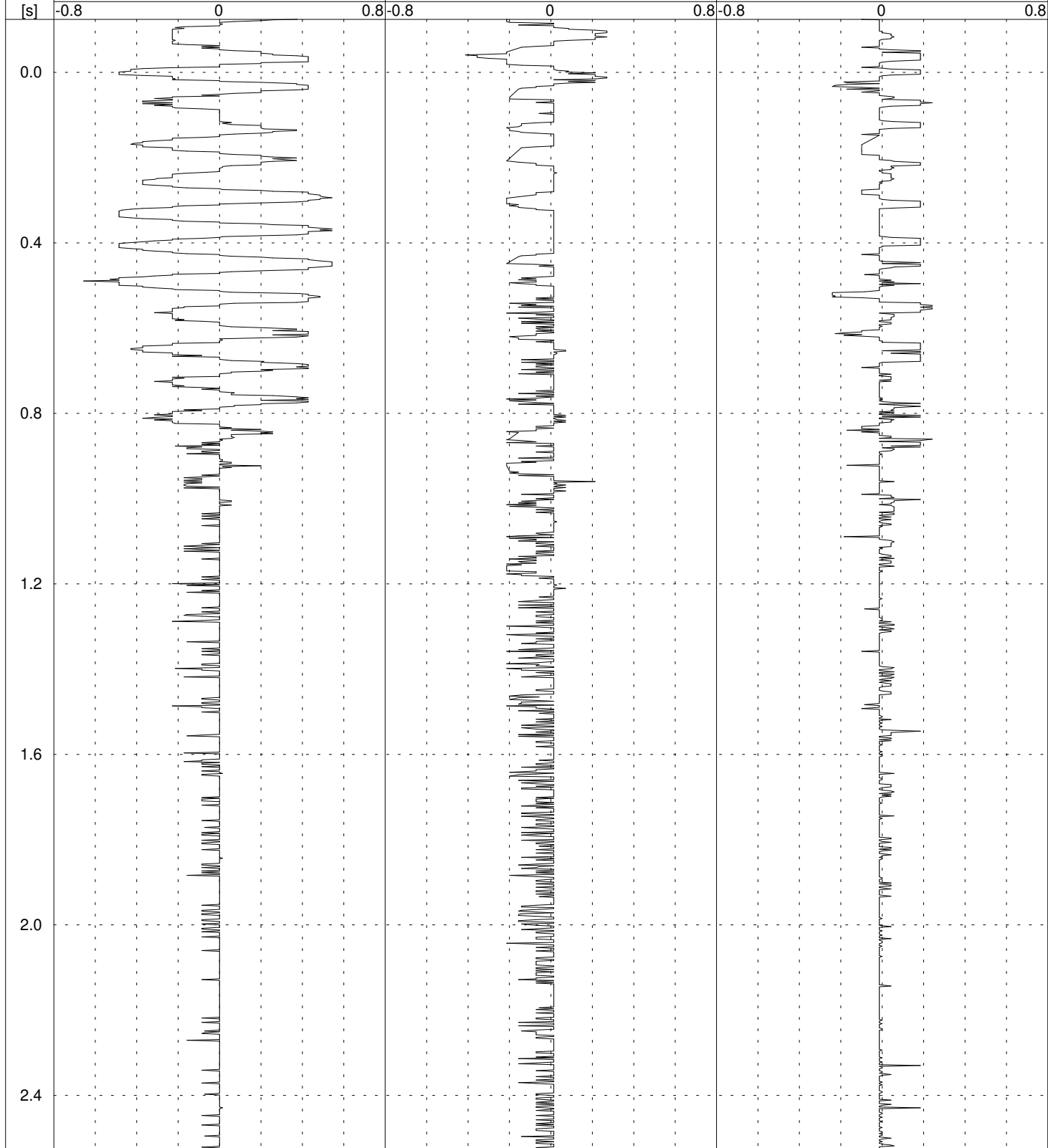
## **Prilog 5**

Odštampani velosigrama izmerenih potresa od miniranja primenom seizmografa ABEM Vibraloc za sledeće datume i merna mesta:

- 07.08.2010. u 13.05 h, (MM1)
- 18.08.2010. u 14.21 h, (MM1)
- 23.08.2010. u 13.42 h, (MM1)
- 14.09. 2010. u 13:19 h, (MM1)
- 14.09. 2010. u 13:19 h, (MM3)
- 25.09.2010. u 14:31 h, (MM3)
- 06.10. 2010. u 12:29 h, (MM11)

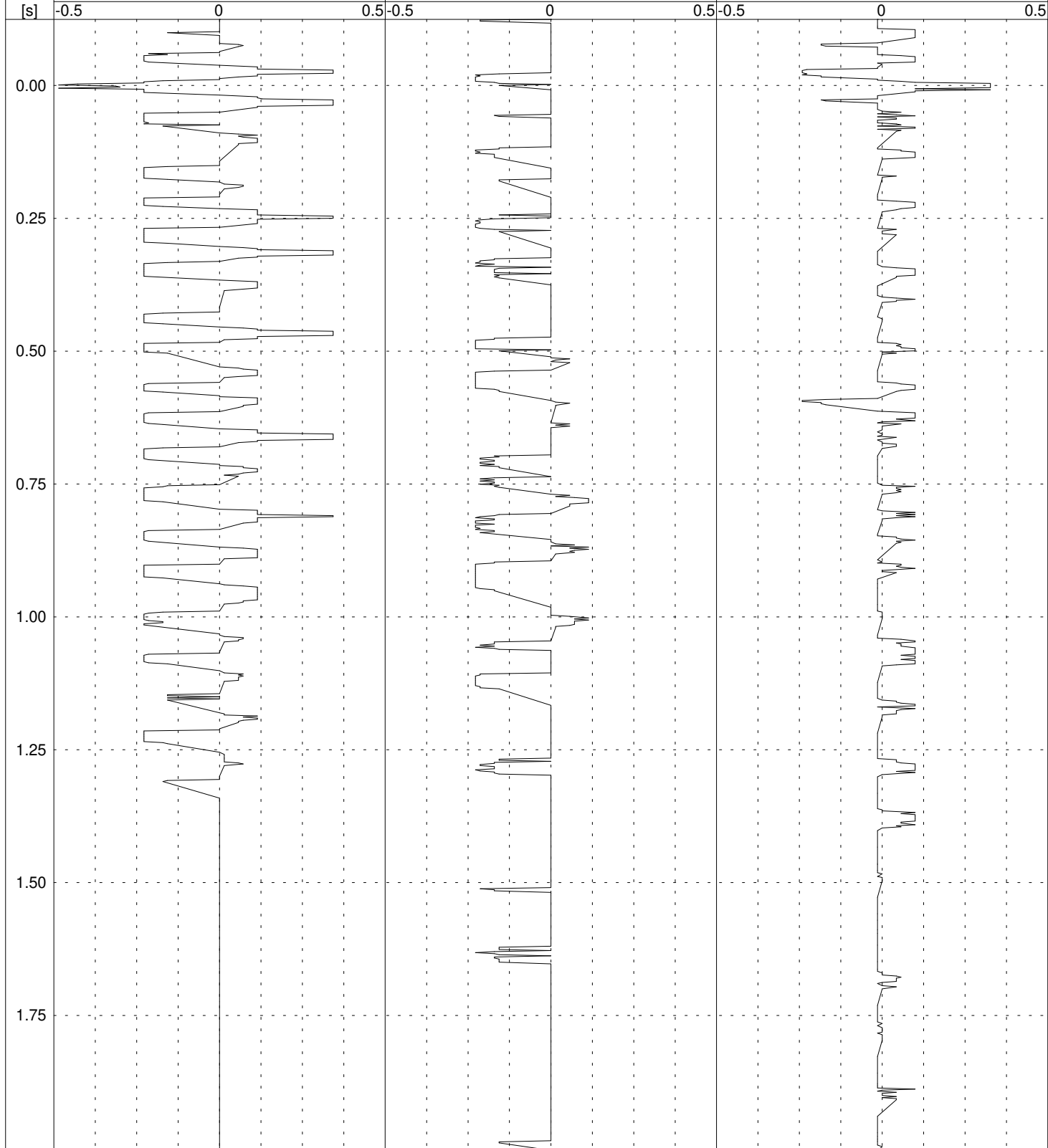
Instrument S/N	308	Client:
Event number	1335	Operation:
Date & time	Sat 7 Aug 2010 13:05:25	Location:
Reg Length	2.655968 s / 0.997 kHz	Operator:
Vector max (ch 1-3)	0.69 mm/s at 0.489 s	Notes:
Timescale	0.4 s/div	

	Channel 1	Channel 2	Channel 3
Input	Geo	Geo	Geo
Unit	mm/s	mm/s	mm/s
Trig level	0.5	0.5	0.5
Pk	0.657	0.413	0.355
Diff m/s <sup>2</sup>	0.132	0.106	0.11
Integ $\mu$ m	10.8	12.3	15.2
Frq(zx) Hz	12.8	10.6	29.3

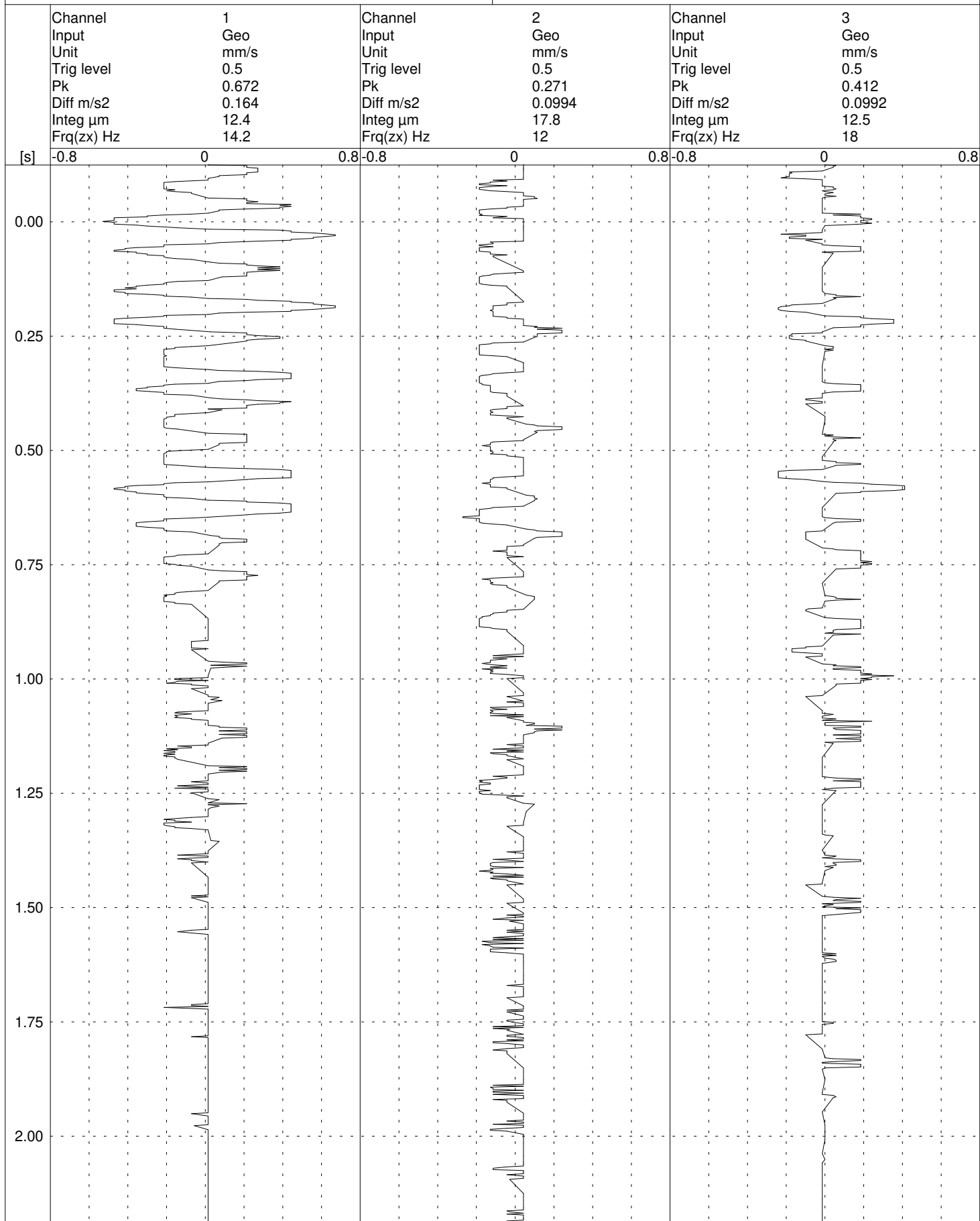


Instrument S/N	308	Client:	
Event number	1343	Operation:	
Date & time	Wed 18 Aug 2010 14:21:49	Location:	
Reg Length	2.130391 s / 0.997 kHz	Operator:	
Vector max (ch 1-3)	0.61 mm/s at -0.001 s	Notes:	
Timescale	0.25 s/div		

	Channel 1	Channel 2	Channel 3
Input	Geo	Geo	Geo
Unit	mm/s	mm/s	mm/s
Trig level	0.5	0.5	0.5
Pk	0.486	0.228	0.327
Diff m/s <sup>2</sup>	0.114	0.0958	0.113
Integ $\mu$ m	16.8	20.6	6.96
Frq(zx) Hz	19.9	22.7	21.8

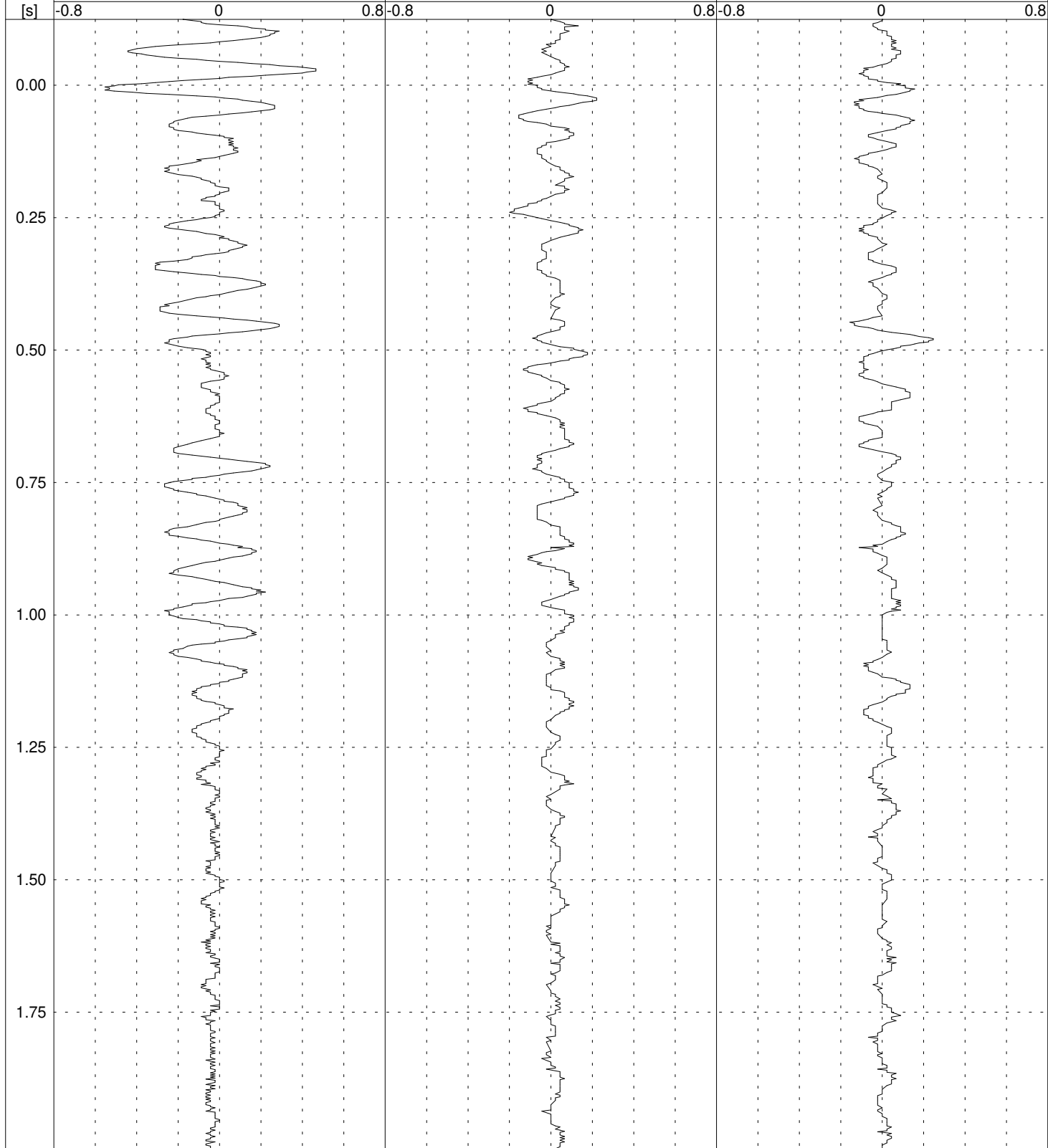


Instrument S/N	308	Client:	
Event number	1346	Operation:	
Date & time	Mon 23 Aug 2010 13:42:17	Location:	
Reg Length	2.316951 s / 0.997 kHz	Operator:	
Vector max (ch 1-3)	0.73 mm/s at 0.185 s	Notes:	
Timescale	0.25 s/div		



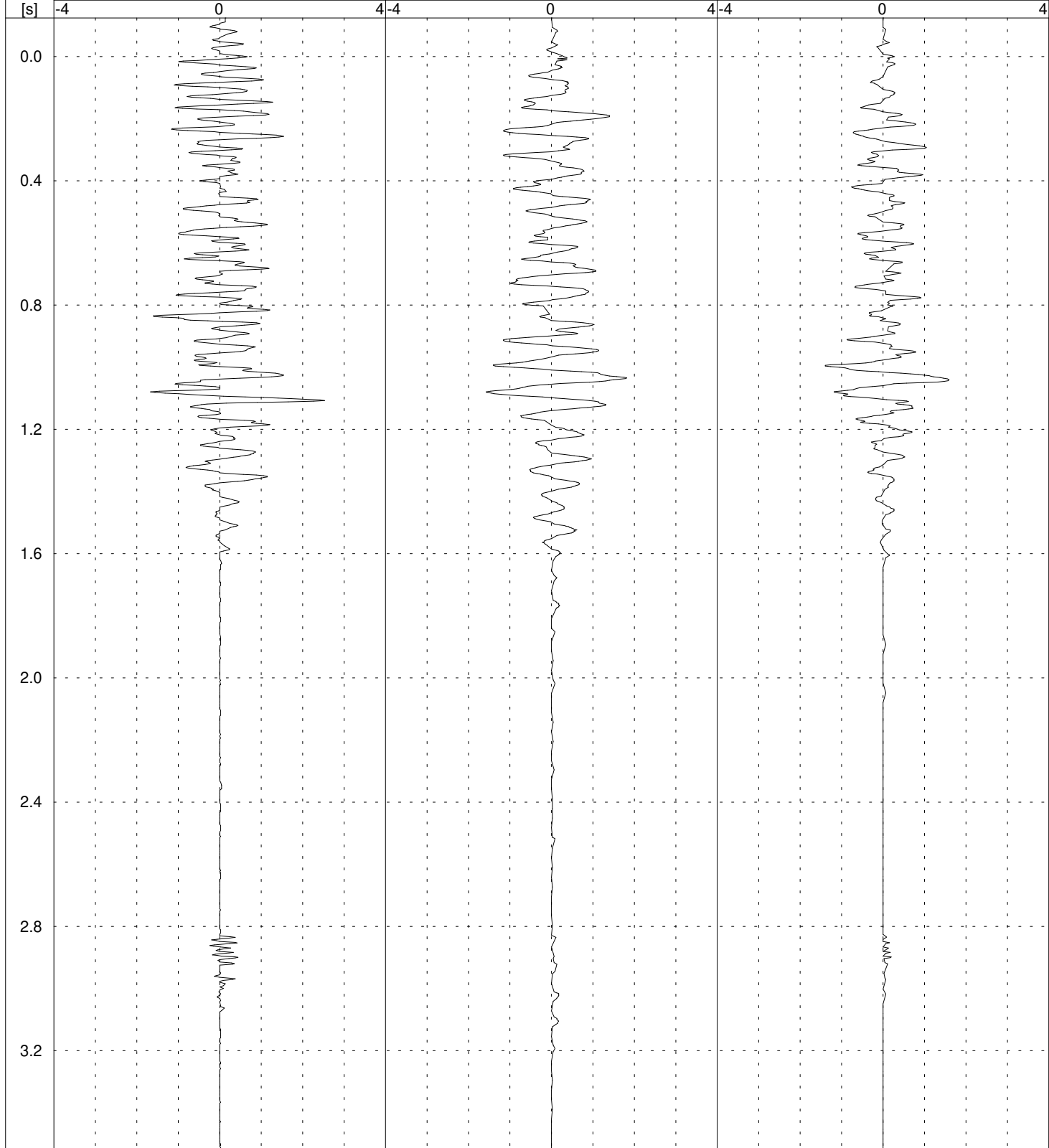
Instrument S/N	120	Client:	
Event number	1365	Operation:	
Date & time	Tue 14 Sep 2010 13:19:35	Location:	
Reg Length	2.137412 s / 0.997 kHz	Operator:	
Vector max (ch 1-3)	0.57 mm/s at 0.008 s	Notes:	
Timescale	0.25 s/div		

	Channel 1	Channel 2	Channel 3
Input	Geo	Geo	Geo
Unit	mm/s	mm/s	mm/s
Trig level	0.5	0.5	0.5
Pk	0.554	0.222	0.246
Diff m/s <sup>2</sup>	0.0553	0.0331	0.0335
Integ $\mu$ m	8.19	6.65	8.17
Frq(zx) Hz	13.8	15.6	13.5



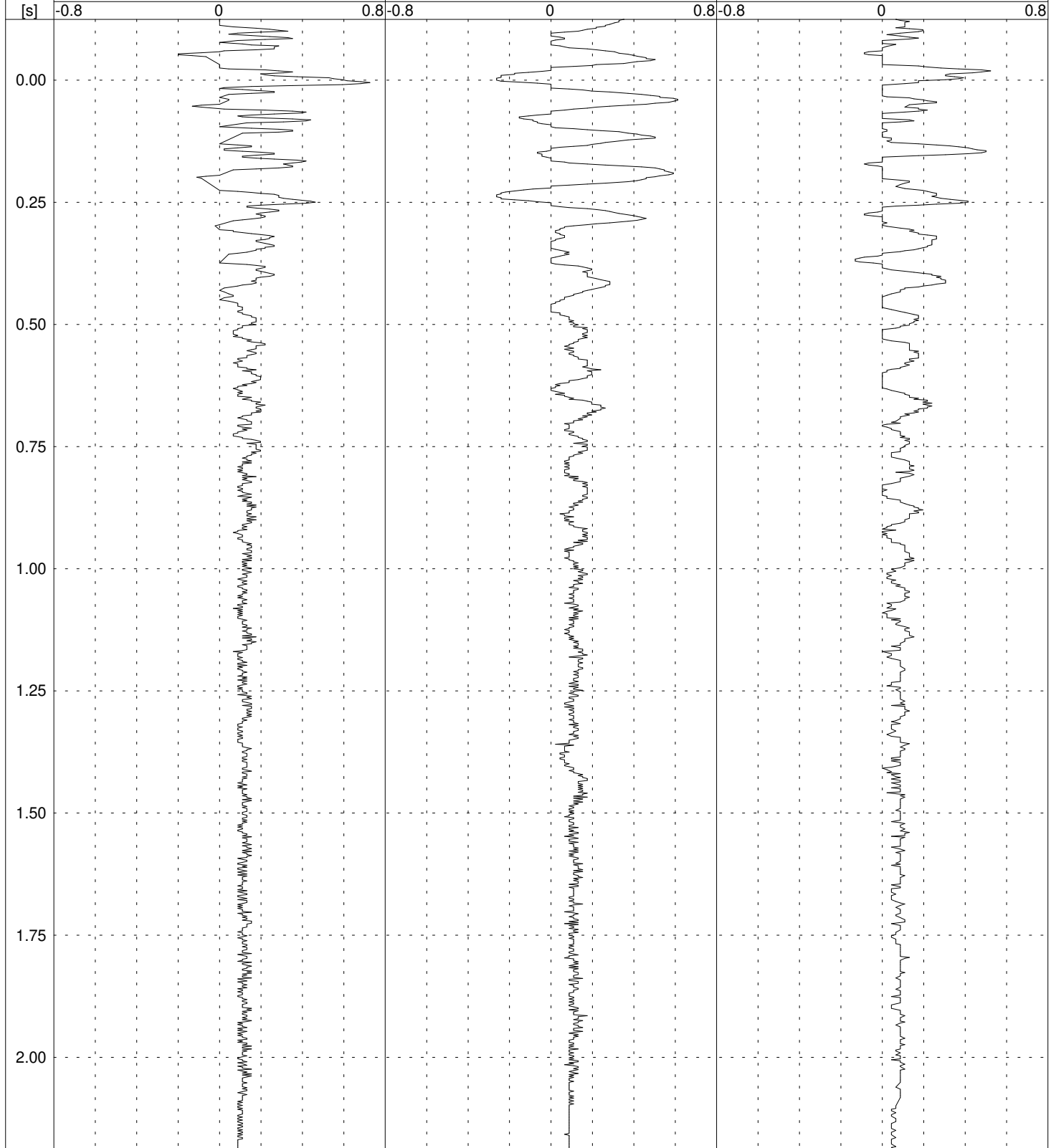
Instrument S/N	110	Client:	
Event number	1696	Operation:	
Date & time	Tue 14 Sep 2010 13:19:53	Location:	
Reg Length	3.648947 s / 0.997 kHz	Operator:	
Vector max (ch 1-3)	2.73 mm/s at 1.107 s	Notes:	
Timescale	0.4 s/div		

	Channel 1	Channel 2	Channel 3
Input	Geo	Geo	Geo
Unit	mm/s	mm/s	mm/s
Trig level	0.6	0.6	0.6
Pk	2.531	1.817	1.591
Diff m/s <sup>2</sup>	0.384	0.186	0.201
Integ $\mu$ m	64.4	57.7	36.1
Frq(zx) Hz	20.8	11.1	12.2



Instrument S/N	110	Client:	
Event number	1730	Operation:	
Date & time	Sat 25 Sep 2010 14:31:38	Location:	
Reg Length	2.316951 s / 0.997 kHz	Operator:	
Vector max (ch 1-3)	0.75 mm/s at 0.005 s	Notes:	
Timescale	0.25 s/div		

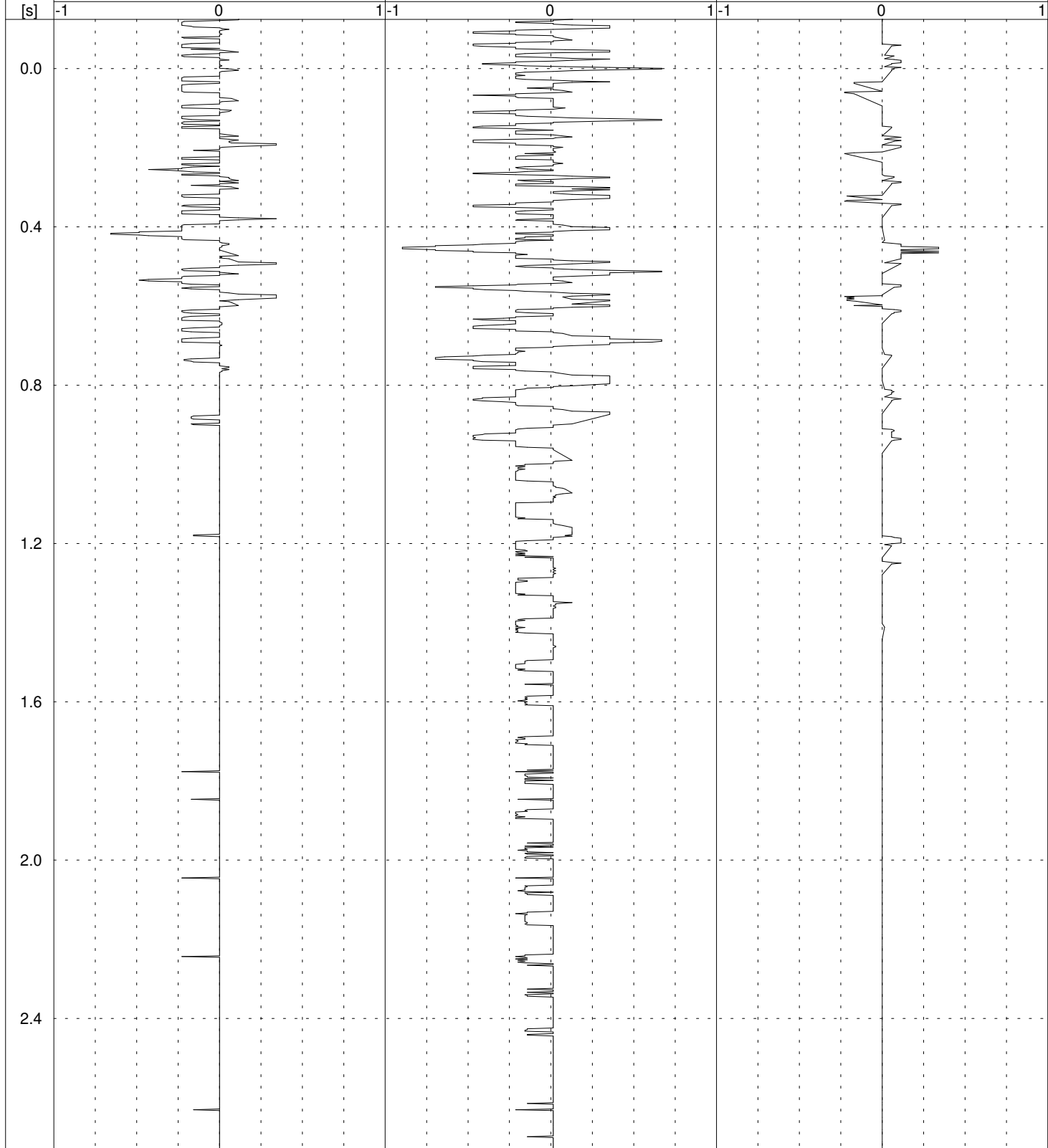
	Channel 1	Channel 2	Channel 3
Input	Geo	Geo	Geo
Unit	mm/s	mm/s	mm/s
Trig level	0.6	0.6	0.6
Pk	0.726	0.613	0.523
Diff m/s <sup>2</sup>	0.115	0.0546	0.0706
Integ $\mu$ m	11.5	20.8	15
Frq(zx) Hz	12.2	10.6	11.9





Instrument S/N	308	Client:
Event number	1396	Operation:
Date & time	Wed 6 Oct 2010 12:29:22	Location:
Reg Length	2.860582 s / 0.997 kHz	Operator:
Vector max (ch 1-3)	0.96 mm/s at 0.451 s	Notes:
Timescale	0.4 s/div	

	Channel 1	Channel 2	Channel 3
Input	Geo	Geo	Geo
Unit	mm/s	mm/s	mm/s
Trig level	0.5	0.5	0.5
Pk	0.657	0.897	0.341
Diff m/s <sup>2</sup>	0.128	0.156	0.113
Integ $\mu$ m	32.2	27.9	5.79
Frq(zx) Hz	11.9	10.4	11.6



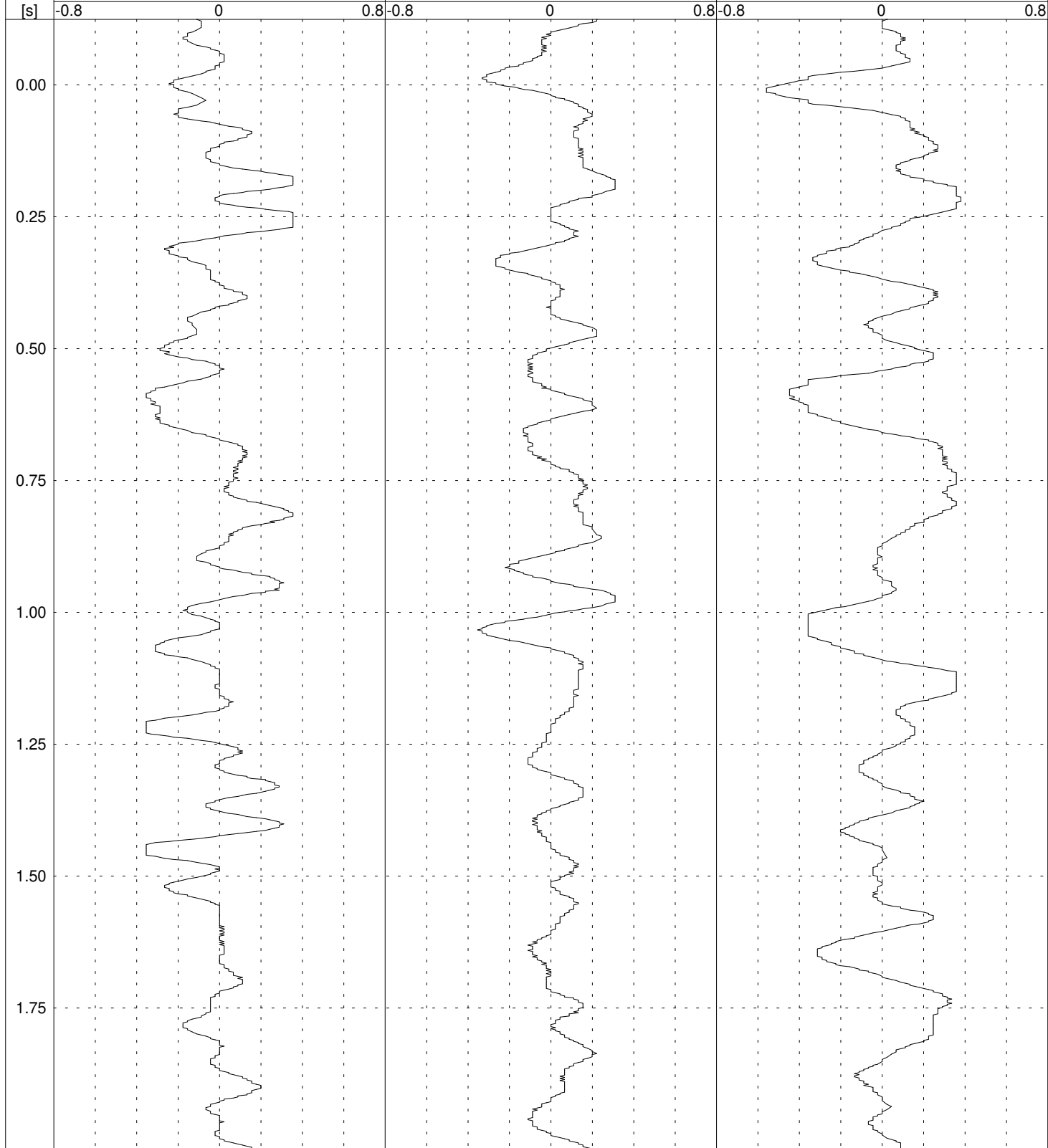
## **Prilog 6**

Odštampani velosigrami izmerenih potresa od zemljotresa primenom seizmografa ABEM Vibraloc za sledeće datume i merna mesta:

- 03.11.2010. u 01h 57min 03s , (MM1)
- 03.11.2010. u 01h 57min 09s , (MM1)
- 03.11.2010. u 01h 57min 29s , (MM11)
- 03.11.2010. u 01h 57min 59s , (MM11)

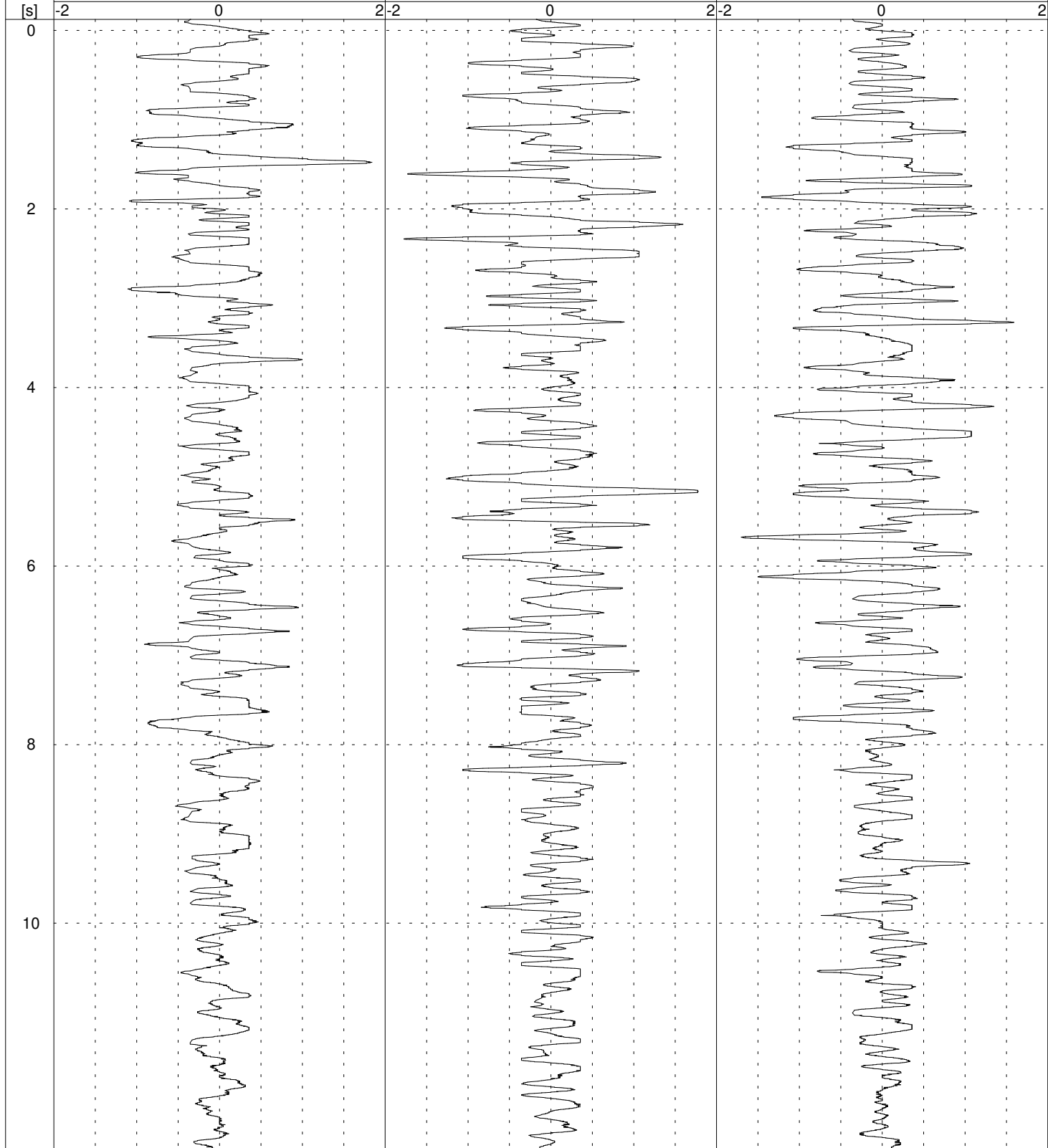
Instrument S/N	120	Client:	
Event number	1380	Operation:	
Date & time	Wed 3 Nov 2010 02:57:03	Location:	
Reg Length	2.146439 s / 0.997 kHz	Operator:	
Vector max (ch 1-3)	0.62 mm/s at 0.005 s	Notes:	
Timescale	0.25 s/div		

	Channel 1	Channel 2	Channel 3
Input	Geo	Geo	Geo
Unit	mm/s	mm/s	mm/s
Trig level	0.5	0.5	0.5
Pk	0.355	0.355	0.560
Diff m/s <sup>2</sup>	0.0387	0.0276	0.0335
Integ $\mu$ m	27.7	17.5	31.4
Frq(zx) Hz	4.05	7.91	6.08

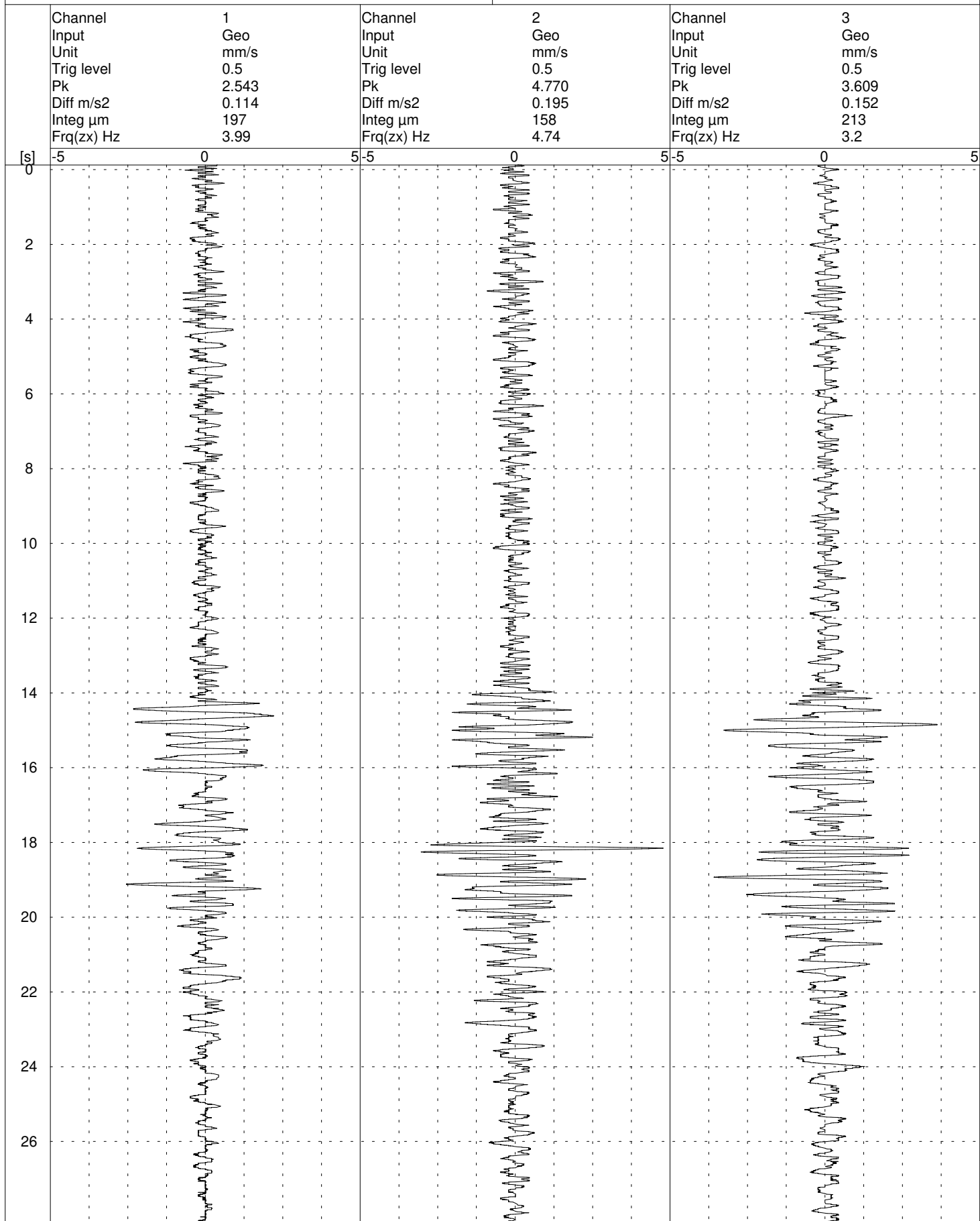


Instrument S/N	120	Client:
Event number	1381	Operation:
Date & time	Wed 3 Nov 2010 02:57:09	Location:
Reg Length	12.68205 s / 0.997 kHz	Operator:
Vector max (ch 1-3)	2.16 mm/s at 1.603 s	Notes:
Timescale	2 s/div	

	Channel 1	Channel 2	Channel 3
Input	Geo	Geo	Geo
Unit	mm/s	mm/s	mm/s
Trig level	0.5	0.5	0.5
Pk	1.862	1.773	1.746
Diff m/s <sup>2</sup>	0.127	0.149	0.134
Integ $\mu$ m	86.7	94.4	81.7
Frq(zx) Hz	3.54	3.64	5.04

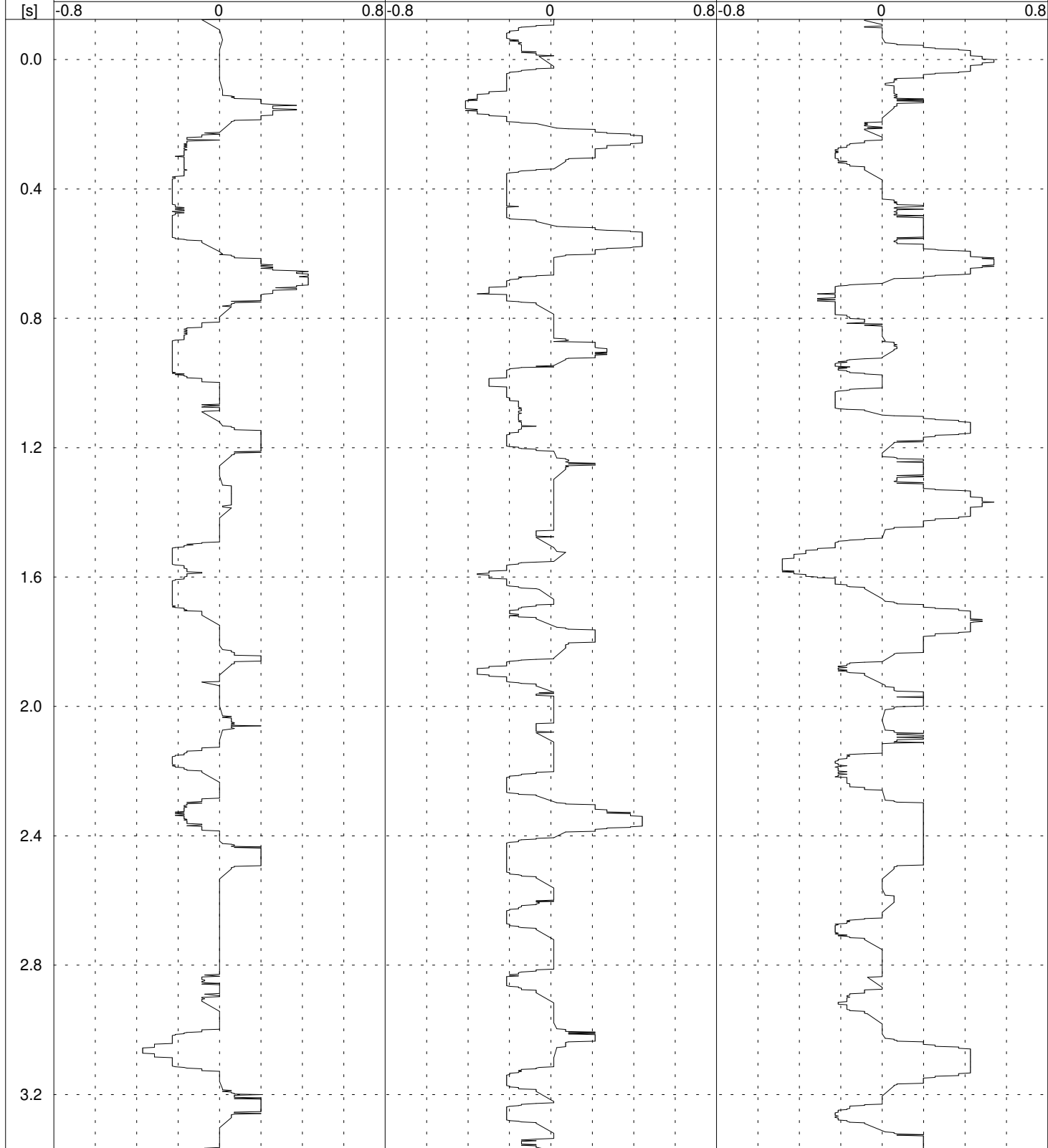


Instrument S/N	308	Client:
Event number	1422	Operation:
Date & time	Wed 3 Nov 2010 02:57:29	Location:
Reg Length	28.34102 s / 0.997 kHz	Operator:
Vector max (ch 1-3)	5.91 mm/s at 18.155 s	Notes:
Timescale	2 s/div	



Instrument S/N	308	Client:
Event number	1423	Operation:
Date & time	Wed 3 Nov 2010 02:57:59	Location:
Reg Length	3.500501 s / 0.997 kHz	Operator:
Vector max (ch 1-3)	0.68 mm/s at 0.626 s	Notes:
Timescale	0.4 s/div	

	Channel 1	Channel 2	Channel 3
Input	Geo	Geo	Geo
Unit	mm/s	mm/s	mm/s
Trig level	0.5	0.5	0.5
Pk	0.429	0.441	0.654
Diff m/s <sup>2</sup>	0.0677	0.0852	0.0815
Integ $\mu$ m	28.7	45.2	48.8
Frq(zx) Hz	3.08	3.58	4.05



## BIOGRAFIJA

Milanka Negovanović, dipl. inž. rudarstva rođena je 02.10.1978. godine u Aranđelovcu. Osnovnu školu i Gimnaziju završila je u Aranđelovcu sa odličnim uspehom. Diplomirala je 2005. godine na Rudarsko – geološkom fakultetu u Beogradu, rudarski odsek, smer - Površinska eksploatacija ležišta mineralnih sirovina, sa prosečnom ocenom svih položenih ispita u toku studija 9.05. Dobitnik je Nagrade “Milutin Milanković” za najboljeg studenta rudarskog odseka 1999. god. i Nagrade Norveške Ambasade 2002.god. među 500 najboljih studenata Srbije. Diplomski rad iz oblasti bušenja i miniranja odbranila je sa ocenom 10.

Pripravnički ispit položila je u firmi " Nemetali A.D." Topola 2007. godine. Tokom pripravničkog staža učestvovala je u organizaciji i izvođenju miniranja na površinskim kopovima "Kamenica", "Krečana" i "Brezovac", izradi dnevnika miniranja, sprovođenju tehničkih mera zaštite, organizaciji rada u cilju ostvarivanja predviđenih kapaciteta. Od 2007. godine pohađa doktorske studije na Rudarsko-geološkom fakultetu u Beogradu, studijski program - Rudarsko inženjerstvo. Položila je sve ispite predviđene programom doktorskih studija sa prosečnom ocenom 9.80. Odlukom br. 06-419/20-13, Veća Naučnih oblasti tehničkih nauka Univerziteta u Beogradu od 04.02.2013.god. prihvaćena je tema doktorske disertacije.

Na Rudarsko-geološkom fakultetu zaposlena je od 2008. godine kao stručni saradnik u Laboratoriji za bušenje i miniranje. Zvanje istraživač saradnik stekla je 2012 godine. Odlukom br.S1-38/5 Izbornog Veća Rudarsko-geološkog fakulteta od 20.02.2014.god. izabrana je u nastavno zvanje asistent za užu naučnu oblast Eksploatacija čvrstih mineralnih sirovina i mehanika stena, na Katedri za površinsku eksploataciju ležišta mineralnih sirovina. U zvanju asistenta ima zaduženja za održavanje vežbi iz predmeta „Osnove bušenja i miniranja“, „Bušenje i miniranje na površinskim kopovima“, „Eksploatacija i obrada kamena“, „Specijalne metode miniranja i rušenja objekata“, „Seizmika miniranja“ i dr. Autor je ili koautor većeg broja naučnih i stručnih radova objavljenih u međunarodnim časopisima i zbornicima radova sa Međunarodnih i domaćih Konferencija i Simpozijuma iz oblasti bušenja i miniranja. Koautor je šest tehničkih rešenja. Učesnik je u izradi većeg broja Projekata, Studija i Elaborata. Istraživač na Projektima Tehnološkog razvoja TR17013 i TR33003 Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije. Član je Centra za miniranje i Udruženja za unapređenje rudarske struke i nauke.

Prilog 7.

## Izjava o autorstvu

Potpisani-a Milanka Negovanović

broj indeksa R701/07

### Izjavljujem

da je doktorska disertacija pod naslovom

**MODEL PREDVIĐANJA POTRESA OD MINIRANJA NA POVRŠINSKIM KOPOVIMA  
PRIMENOM SIMULACIONE METODE MONTE KARLO I FAZI LOGIKE**

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da predložena disertacija u celini ni u delovima nije bila predložena za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova,
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršio/la autorska prava i koristio intelektualnu svojinu drugih lica.

Potpis doktoranda

U Beogradu, 30.03.2015.god.

Milanka Negovanović



Prilog 8.

## Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Ime i prezime autora Milanka Negovanović

Broj indeksa R 701/07

Studijski program Rudarsko inženjerstvo

Naslov rada Model predviđanja potresa od miniranja na površinskim kopovima primenom simulacione metode Monte Karlo i fazi logike

Mentor dr Igor Miljanović, vanredni profesor

Potpisana Milanka Negovanović

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predao/la za objavljivanje na portalu **Digitalnog repozitorijuma Univerziteta u Beogradu**.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog zvanja doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada.

Ovi lični podaci mogu se objaviti na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

**Potpis doktoranda**

U Beogradu, 30.03.2015.god.



Prilog 9.

## Izjava o korišćenju

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Svetozar Marković“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

**MODEL PREDVIĐANJA POTRESA OD MINIRANJA NA POVRŠINSKIM KOPOVIMA  
PRIMENOM SIMULACIONE METODE MONTE KARLO I FAZI LOGIKE**

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim priložima predao/la sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio/la.

1. Autorstvo
2. Autorstvo - nekomercijalno
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima
5. Autorstvo – bez prerade
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci, kratak opis licenci dat je na poleđini lista).

**Potpis doktoranda**

U Beogradu, 30.03.2015.god.

Миланка Гервановић

1. Autorstvo - Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.
2. Autorstvo – nekomercijalno. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
3. Autorstvo - nekomercijalno – bez prerade. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja dela.
4. Autorstvo - nekomercijalno – deliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada.
5. Autorstvo – bez prerade. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
6. Autorstvo - deliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.