

Netipične vrijednosti kod mjerenja seizmičkih utjecaja miniranja

Katalinić, Mateja

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:245159>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-16**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Diplomski studij rudarstva

**NETIPIČNE VRIJEDNOSTI KOD MJERENJA SEIZMIČKIH UTJECAJA
MINIRANJA**

Diplomski rad

Mateja Katalinić

R-264

Zagreb, 2021

NETIPIČNE VRIJEDNOSTI KOD MJERENJA SEIZMIČKIH UTJECAJA MINIRANJA

Mateja Katalinić

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za rudarstvo i geotehniku
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Brzina oscilacija tla osnovni je kriterij za ocjenu ugroženosti objekata od štetnih seizmičkih utjecaja miniranja. Postavljanjem instrumenata za praćenje seizmičkih utjecaja mogu se izmjeriti brzine oscilacija tla, na temelju kojih se određuju dozvoljene mase eksplozivnog punjenja po stupnju iniciranja. Međutim, izmjereni podaci najčešće se ne provjeravaju prije nego se upotrijebe u proračunu pa se često koriste i pogrešno izmjerene vrijednosti, što može znatno utjecati na rezultat. U ovom radu provjeriti će se izmjereni podaci primjenom zakona statistike te dati preporuka kako najbolje potvrditi izmjerene vrijednosti.

Ključne riječi: seizmički utjecaji, brzina čestica tla, outlier, sigma pravilo
Završni rad sadrži: 45 stranice, 13 tablica, 25 slika, 2 priloga, i 24 reference.
Jezik izvornika: Hrvatski
Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb
Mentori: Dr.sc. Siniša Stanković, docent RGNF
Dr.sc. Dalibor Kuhinek, izvanredni profesor RGNF
Ocjenjivači: Dr.sc. Siniša Stanković, docent RGNF
Dr.sc. Dalibor Kuhinek, izvanredni profesor RGNF
Dr.sc. Vinko Škrlec, docent RGNF
Dr.sc. Vječislav Bohanek, izvanredni profesor RGNF

ATYPICAL VALUES IN MEASURING SEISMIC IMPACTS OF BLASTING

Mateja Katalinić

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Mining Engineering and Geotechnics
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

Peak particle velocity is the basic criterion for assessing the vulnerability of buildings to the harmful seismic effects of blasting. By setting instruments for monitoring seismic impacts, ground vibrations can be determined on the basis of which the permitted amounts of explosive charge are determined. However, the measured data are usually not verified before they are used in the calculation, so erroneous measured values are often used, which can significantly affect the result. In this paper, the measured data will be verified by applying the law of statistics and a recommendation will be given on how to best confirm the measured values.

Keywords: seismic effects, peak particle velocity, outlier, sigma rule

Thesis contains: 45 pages, 13 tables, 25 figures, 2 appendixes, i 24 references.

Original in: Croatian

Archived in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisors: Assistant Professor Siniša Stanković, PhD

Associate Professor Dalibor Kuhinek, PhD

Reviewers: Assistant Professor Siniša Stanković, PhD
Associate Professor Dalibor Kuhinek, PhD
Assistant Professor Vinko Škrlec, PhD
Associate Professor Vječislav Bohanek, PhD

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. MINERSKI RADOVI	2
2.1. Eksplozija, detonacija, eksplozivi.....	4
2.2. Gospodarski eksplozivi.....	6
2.2.1. Primjena gospodarskih eksploziva u miniranju	6
2.3. Inicijalna sredstva za gospodarska miniranja	7
2.4. Utjecaj sustava iniciranja na seizmičko djelovanje miniranja.....	8
3. ŠTETNI UTJECAJI MINIRANJA	10
3.1. Zračni udarni val.....	10
3.2. Odbacivanje odminirane stijenske mase.....	12
4. SEIZMIČKI UTJECAJI MINIRANJA	13
4.1. Određivanje radijusa sigurnosti i brzine oscilacija tla	16
4.2. Norme za određivanje dozvoljenih brzina oscilacija tla ili stijenskih masa.....	20
5. NETIPIČNE VRIJEDNOSTI KOD MJERENJA	25
5.1. Mjerne pogreške	25
5.2. Netipične vrijednosti.....	25
5.3. Mjerenje brzine oscilacija i obrada podataka	27
5.4. Validacija vrijednosti mjerenja brzina vibracija tla.....	30
6. OBRADA PODATAKA I INTERPRETACIJA REZULTATA	34
6.1. Određivanje netipičnih vrijednosti	35
6.2. Izuzimanje netipičnih vrijednosti	38
6.3. Dozvoljena količina eksplozivnog punjenja	39
7. ZAKLJUČAK	43
8. LITERATURA	44

POPIS SLIKA

Slika 2-1 Minska bušotina (TRG, 2021)	3
Slika 2-2 Drobljenje i odvajanje stijenske mase (TRG, 2021)	3
Slika 2-3 Eksplozivna pretvorba (Dobrilović, 2008).....	4
Slika 2-4 Detonacijski proces u patroni eksploziva (Dobrilović i dr., 2019)	5
Slika 2-5 Područje djelovanja eksploziva u stijeni (Vusilović, 2015).....	6
Slika 2-6 Inicirajući niz (Dobrilović, 2008)	8
Slika 3-1 Faze zračnog udara.....	10
Slika 4-1 Dijagram za određivanje faktora udaljenost (Stanković, 2011).....	20
Slika 4-2 Dijagram granica brzina čestica za određene tipove konstrukcija u funkciji frekvenciji prema DIN 4150 (Stanković, 2011)	22
Slika 4-3 Grafički prikaz brzina oscilacija tla u funkciji frekvencije prema normi USBM RI8507 i OSMRE (Vusilović, 2015)	22
Slika 5-1 Normalna distribucija (Wikipedia, 2021)	26
Slika 5-2 Instantel Minimate Plus	27
Slika 5-3 Geofon (Instantel, 2021)	28
Slika 5-4 Princip rada geofona (Minimate Plus Operate Manual, 2015)	28
Slika 5-5 Izvještaj mjerenja (Stanković, 2011).....	29
Slika 5-6 Dijagram za određivanje brzine oscilacija	31
Slika 5-7 Usporedba eksperimentalnog PPV-a u ovisnosti o svedenoj udaljenosti	32
Slika 6-1 Određivanje outlier-a primjenom pravila 1 sigma	35
Slika 6-2 Određivanje outlier-a primjenom pravila 2 sigma	36
Slika 6-3 Određivanje outlier-a primjenom pravila 3 sigma	36
Slika 6-4 Određivanje outlier-a primjenom pravila 4 sigma	37
Slika 6-5 Regresijska krivulja s punim skupom podataka.....	38
Slika 6-6 Regresijska krivulja dobivena nakon izuzimanja mjerenja označenih kao outlier primjenom pravila 1 sigma.....	38
Slika 6-7 Regresijska krivulja bez outlier-a potvrđenih pravilom 2 sigma	39
Slika 6-8 Q/R dijagram.....	42

POPIS TABLICA

Tablica 3-1 Štete uzrokovane djelovanjem zračnog udarnog vala	11
Tablica 4-1 Klasifikacija potresa prema kriteriju S.V. Medved-a.....	15
Tablica 4-2 Određivanje nekorigitirane vertikalne komponente	19
Tablica 4-3 Vrijednosti faktora vrste zgrade	19
Tablica 4-4 Vrijednosti vrste materijala	20
Tablica 4-5 Vrijednosti faktora trajanja minerskih radova.....	20
Tablica 4-6 Granične vrijednosti brzina oscilacija prema normi DIN 4150	21
Tablica 4-7 Granična vrijednost parametara prema Swedish Standard SS 4604866	23
Tablica 4-8 Dopuštene vrijednosti komponentnih brzina čestica za određeni frekvencijski raspon prema British Standard 7385	24
Tablica 5-1 Očekivani udio populacije unutar pojedine standardne devijacije.....	27
Tablica 5-2 Sumaran prikaz empirijskih modela za predviđanje najveće brzine čestica	33
Tablica 6-1 Broj potencijalnih outlier-a	37
Tablica 6-2 Dozvoljene količine eksplozivnog punjenja za određene udaljenosti.....	41

POPIS PRILOGA

Prilog 1: Regresijske krivulje i pripadajuće jednačbe

Prilog 2: Dozvoljene količine eksplozivnog punjenja za određene udaljenosti

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I MJERNIH JEDINICA

Oznaka	Mjerna jedinica	Značenje
R_r	m	duljina odbacivanja
n		pokazatelj djelovanja eksplozije
R	m	radijus odloma minske bušotine
w	m	linija najmanjeg otpora
s	cm	maksimalan pomak
A	cm	maksimalna amplituda
v	m/s	maksimalna brzina
a	cm/s ²	maksimalno ubrzanje
f	Hz	frekvencija oscilacija
R_s	m	radijus ugrožene zone pri miniranju
K		koeficijent seizmičkog djelovanja eksplozije
α		koeficijent zavisan o pokazatelju djelovanja eksplozije
$Q (W)$	kg	masa jednovremenog detoniranog eksplozivnog punjenja
$v (PPV)$	mm/s	brzina oscilacija tla
$D (R)$	m	udaljenost između minskog polja i mjesta opažanja
x		eksponent količine punjenja
y		eksponent faktora stijene
k_m		koeficijent načina miniranja
n_p		koeficijent prigušenja seizmičkih valova na putu širenja

v_0	mm/s	nekorigirana vertikalna komponenta brzina oscilacija tla
F_d		faktor najkraće udaljenosti od mjesta miniranja do promatranog objekta
F_t		faktor trajanja minerskih radova
F_k		faktor kvalitete gradnje promatranog objekta
c_p	m/s	brzina primarnih valova
F_b		faktor vrste zgrade
F_m		faktor materijala od kojeg je zgrada izgrađena
k		koeficijent karakteristika stijena i uvjeta praćenja
n		koeficijent oscilacija stijenskog masiva
SD	m/kg ^{1/2}	svedena udaljenost

1. UVOD

Miniranje je ekonomična i održiva metoda koja se najčešće koristi u rudarstvu i građevinarstvu. Iako ova metoda ima brojne prednosti, određeni štetni utjecaji su neizbježni. Pravilnim projektiranjem i izvođenjem radova moguće ih je smanjiti na prihvatljivu razinu. Najznačajnija štetna djelovanja miniranja zasigurno su seizmički utjecaji, koji se određuju na temelju normi, proračuna ili preporuka. Brzina oscilacija tla predstavlja osnovni kriterij za ocjenu ugroženosti objekata od seizmičkih utjecaja i u izravnoj je vezi s količinom eksplozivnog punjenja i udaljenosti mjesta opažanja od minskog polja. Iz tog razloga, javlja se potreba za praćenjem seizmičkih utjecaja kada se miniranja izvode u blizini objekata. Postavljanjem instrumenta za praćenje seizmičkih utjecaja miniranja, mogu se odrediti brzine oscilacija tla, a na temelju kojih se izračunavaju dozvoljene količine eksplozivnog punjenja. Međutim, često se mogu pojaviti pogreške u mjerenju koje, ako se uključe u proračun, mogu drastično promijeniti rezultat. U postojećoj literaturi ne postoje zapisi o provjeri rezultata prije nego se unesu u aplikaciju ili grafikone koji daju jednadžbu regresijske krivulje iz koje se izračunavaju dopuštene količine eksploziva. Također, ne postoji ni standardizirana metoda kojom se podaci provjeravaju.

U ovom radu prikazati će se utjecaj neprihvatljivih mjerenja na izračun dozvoljene količine eksplozivnog punjenja i odrediti optimalna metoda, kojom se u minerskoj praksi mogu provjeriti izmjereni podaci kako bi se dobili optimalni rezultati.

2. MINERSKI RADOVI

Iskop u stijenama prvobitno zahtijeva njeno razaranje što je moguće ostvariti mehanički, upotrebom raznih alata i strojeva ili primjenom eksploziva. Miniranje je postupak kontrolirane upotrebe eksploziva čije djelovanje razara stijenu u sipki materijal, pogodan za daljnju upotrebu. Bušenje i miniranje stijenske mase smatraju se prvom fazom proizvodnog procesa u većini rudarskih i dijelom građevinskih operacija. Primjena miniranja je široka, a najčešće se koristi u vojne svrhe, za dobivanje mineralne sirovine, izgradnju građevinskih objekata i prometnica, u poljoprivredi, šumarstvu i dr. (Deković, 2009).

Prema Zakonu o eksplozivnim tvarima te proizvodnji i prometu oružja (NN 70/2017) miniranja se dijele na podzemna, nadzemna i specijalna miniranja. Podzemna miniranja uključuju sve radnje miniranja u svrhu eksploatacije mineralne sirovine. U nadzemna miniranja spadaju miniranja na površini te miniranja u graditeljstvu, pri krčenju šuma ili usitnjavanja velikih komada stijena. Specijalna miniranja obuhvaćaju miniranja građevina, ledenih površina na jezerima i rijekama, podvodna miniranja, tehnološka miniranja, miniranja kod seizmičkih istraživanja i pri izradi tunela i drugih podzemnih prostorija. Postupak miniranja nastoji se izvesti sa što manjom količinom eksploziva, a da se dobije što povoljniji učinak kako ne bi bilo potrebe za naknadnim usitnjavanjem razorene stijenske mase, što se postiže odabirom najpovoljnije metode miniranja. Odabir metode ovisi o raznim čimbenicima poput strukturnih obilježja stijenske mase, tražene granulacije odminirane stijenske mase, prirodnoj raspucalosti, uvjetima stabilnosti radne i završne kosine te mjera sigurnosti. Čimbenici koji utječu na miniranje sadržani su u projektu miniranja kojim se određuje vrsta i količina eksploziva, geometrija bušenja, vrsta usporivača i upaljača te način otpucavanja. Postupak miniranja sastoji se od nekoliko koraka koji se ponavljaju te na taj način napreduje iskop u stijenskoj masi (Dobrilović, 2008):

- 1) označavanja mjesta minskih bušotina
- 2) izrada minskih bušotina
- 3) punjenje bušotina eksplozivom
- 4) spajanje bušotina u minsko polje
- 5) paljenje mina
- 6) provjera učinka miniranja
- 7) transport usitnjene stijenske mase

Na slici 2-1 prikazana je minska bušotina koja će se ispuniti eksplozivom te se spojiti sa

ostalim bušotinama u minsko polje, dok slika 2-2 prikazuje odvajanje i drobljenje stijenske mase nakon detoniranja po određenom rasporedu paljena.



Slika 2-1 Minska bušotina (TRG, 2021)

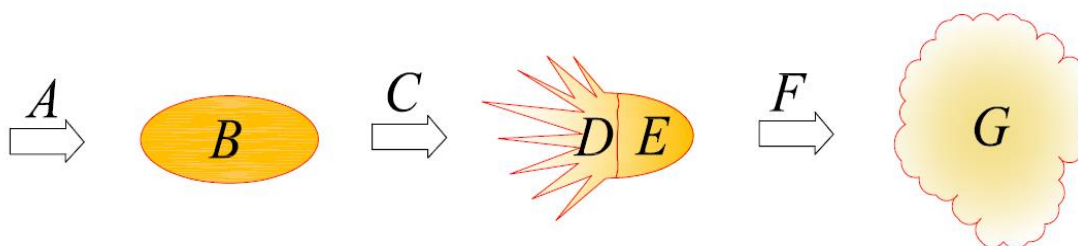


Slika 2-2 Drobljenje i odvajanje stijenske mase (TRG, 2021)

2.1. Eksplozija, detonacija, eksplozivi

Eksplozija je fizikalni proces koji može biti posljedica prirodnog djelovanja ili ljudske aktivnosti. Različiti autori različito definiraju pojam eksplozije pa se tako prema Sućeski (2001) eksplozija definira kao egzotermna, vrlo brza pretvorba početne tvari ili sustava uz ekspanziju nastalih plinovitih produkata. Prema Johanssonu i Perssonu (1970) eksplozija je vrlo brza ekspanzija tvari od početnog volumena do mnogo većeg volumena. Dremić (1991) definira eksploziju kao proces u kojem dolazi do brzog oslobađanja energije u ograničenom volumenu.

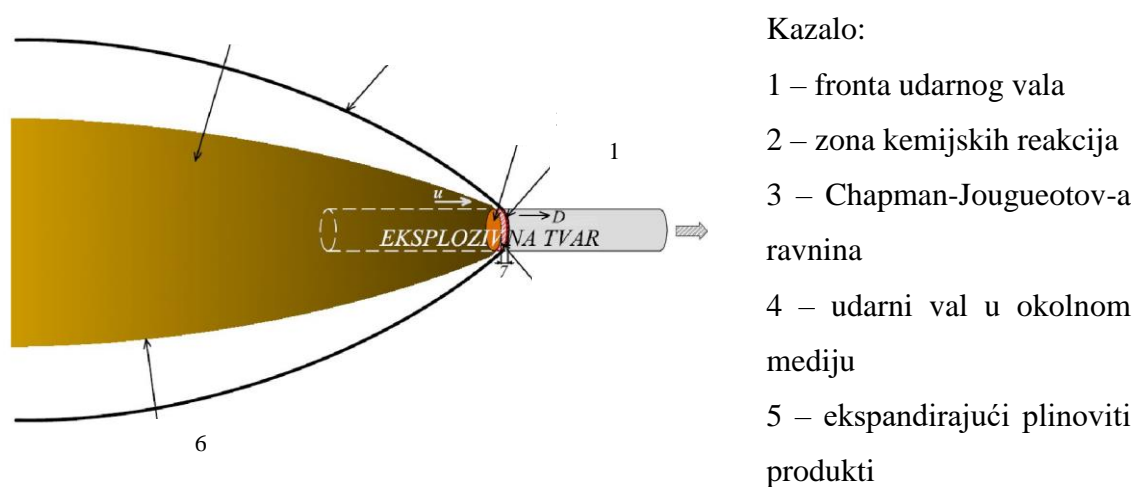
Prema karakteru procesa pretvorbe eksplozije se dijele na kemijske, fizikalne i nuklearne. Eksplozija se može odvijati kao detonacija ili kao sagorijevanje te se obje reakcije, ovisno o namjeni, koriste za dobivanje korisnog rada. Detonacija eksplozivne tvari ili sagorijevanje posljedica su dovođenja energetskog impulsa, koji inicijalno kidaju međumolekularne veze te potiče kemijsku reakciju slobodnih atoma s kisikom. Shematski prikaz eksplozivne pretvorbe prikazan je na slici 2-3.



Slika 2-3 Eksplozivna pretvorba (Dobrilović, 2008)

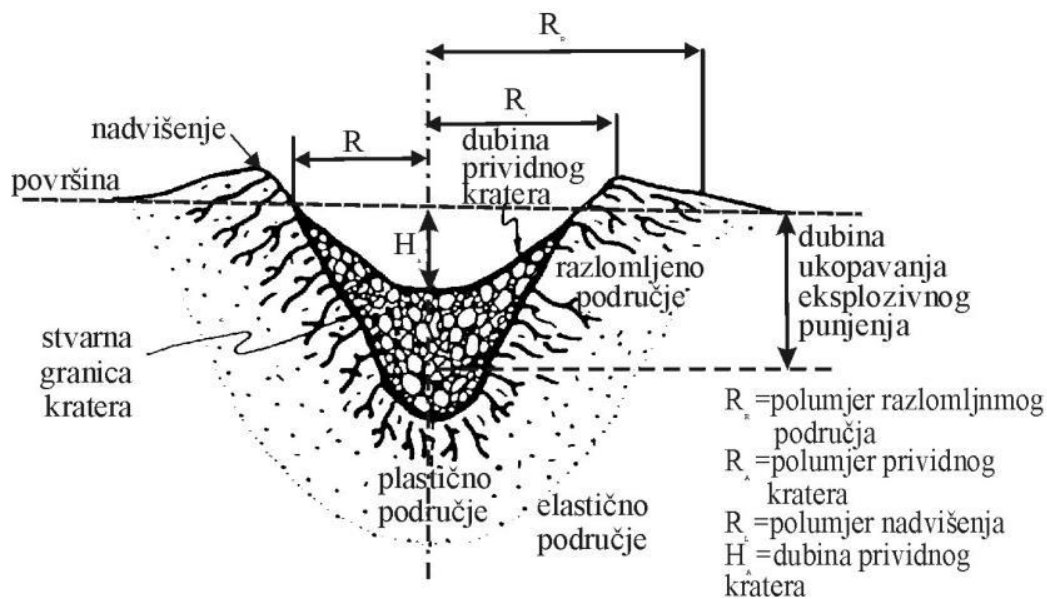
Dovođenjem inicijalnog impulsa eksplozivnoj tvari te zbog njenih svojstava dolazi do detonacije. Detonacija je egzotermna kemijska reakcija oksidacije kojom se početna eksplozivna tvar izmijeni u vrlo kratkom vremenu. Početni energetski impuls može biti električni, toplinski, mehanički, trenje itd. Tijekom odvijanja stabilne detonacije, energija koja je oslobođena kemijskim reakcijama potpuno se pretvara u energiju stlačenih plinovitih produkata, čija ekspanzija podržava detonacijski val. Detonacija može biti i nestabilna zbog fizičke ili kemijske promjene unutar eksplozivne tvari, koja može uzrokovati gubitke energije, pri čemu može doći do smanjenja brzine udarnog vala i tlaka u fronti detonacijskog vala. Iz tog razloga, lokalno dovedena energija eksplozivnoj tvari nije dovoljna za iniciranje kemijskih reakcija, ukupna potrebna energija i brzina detonacije se smanjuju te dolazi do prekida odvijanja detonacijskog procesa. Energetski materijali, da bi detonirali, moraju imati

svojstva eksploziva i inicijalni impuls mora imati dovoljnu energiju za poticanje stabilne detonacije. Na slici 2-4 prikazan je detonacijski proces u patroni eksploziva.



Slika 2-4 Detonacijski proces u patroni eksploziva (Dobrilović i dr., 2019)

Detonacijom eksplozivnog naboja tlačni udarni val izaziva tlačna i vlačna naprezanja u okolnoj stijeni, pri čemu u stijeni nastaju trajne, plastične i elastične deformacije, oscilacije čestica stijene koje su prostorno podijeljene u tri zone. U prvoj zoni, uslijed djelovanja tlačnih naprezanja koja su veća od tlačne čvrstoće stijene, dolazi do drobljenja i usitnjavanja stijenske mase. Druga zona je područje trajne deformacije gdje nastaju radijalne i koncentrične pukotine. U trećoj zoni, zbog osciliranja čestica stijene izazvanih valnim poremećajima, dolazi do elastičnih deformacija. Na slici 2-5 prikazana su područja djelovanja eksplozije u stijeni. Prolaskom kroz stijenu, valno prenesena energija se prigušuje zbog povećanja mase stijene koja oscilira udaljavanjem vala od izvora poremećaja, gubitaka zbog prolaska vala u sredstvo manje gustoće u pukotinama, nehomogenosti materijala itd. Seizmički valovi (tlačni valovi) šire se brzinom zvuka u određenom sredstvu (Stanković, 2011).



Slika 2-5 Područje djelovanja eksploziva u stijeni (Vusilović, 2015)

Eksplozivne tvari podrazumijevaju sve materijale i kemijske spojeve koje nisu nužno eksplozivi te koji pod određenim uvjetima i okolnostima mogu eksplodirati. Eksplozivi su materijali i proizvodi koji se primjenjuju u različite svrhe uz korištenje energije koja se oslobađa eksplozijom. Općenito, eksplozivi su spojevi koji sadrže kisik, dušik i gorivo-oksidirajuće elemente, ugljik i vodik.

2.2. Gospodarski eksplozivi

Gospodarski (rudarski) eksplozivi su energetske materijali, koji mijenjaju potencijalnu kemijsku energiju u kinetičku energiju udarnih valova i energiju ekspanzije plinovitih produkata kemijske reakcije. Najčešće su to smjese sastavljene od goriva (kemijski spojevi koji su nositelji ugljika i vodika), oksidansa (nositelji kisika) i senzibilizatora (potiču i održavaju stabilnu detonaciju).

Rudarski eksplozivi dijele se na amonij-nitrat praškaste, ANFO eksplozive, plastične, emulzijske i vodoplastične ili *slurry* eksplozive. Eksplozivi se dijele i prema raznim značajkama poput karaktera eksplozije, namjene, položaju eksplozivne tvari u inicijalnom nizu te osjetljivosti eksploziva prema vanjskom impulsu, agregatnom stanju, konzistenciji, uporabnom pakiranju itd. (Dobrilović, 2008).

2.2.1. Primjena gospodarskih eksploziva u miniranju

Primjena gospodarskih eksploziva najekonomičniji je izvor energije za dobivanje mineralnih sirovina, potrebe građenja i temeljenje objekata u čvrstim materijalima.

Formiranjem velikih minskih polja moguće je odjednom odminirati desetke tisuća kubnih metara stijene (Dobrilović i dr., 2019). No, zbog tehničke i normativne prirode postoje ograničenja veličine minskog polja. Tehnička ograničenja imaju utjecaj na veličinu minskog polja, odnosno smanjuju ukupan broj bušotina, a uzrokovana su karakteristikama primijenjenog sustava iniciranja te mogućim seizmičkim utjecajima miniranja. Karakteristike stijene, osobine eksploziva koji se koristi i vrsta miniranja utječu na potrošnju eksploziva. Ovisno o primijenjenim parametrima, veći dio volumena stijenske mase koja se minirala pripremljen je na željenu granulaciju. Ukoliko su parametri miniranja dobro određeni te ako je kvaliteta upotrijebljenih sredstava zadovoljavajuća, neće doći do štetnih utjecaja na okolinu nakon otpucavanja. Potrebno je detaljno analizirati pojedine faze procesa miniranja kako bi se postigao željeni učinak miniranja, uz maksimalnu sigurnost pri radu i uz što manje troškove eksploatacije mineralne sirovine.

Prednosti uporabe eksploziva:

- jednostavnost procesa
- iskop velikih volumena masa velikom brzinom
- minimalne pripreme stijenskog masiva
- relativno mala specifična potrošnja eksploziva
- minimalna potrošnja drugih energenata i alata
- minimalni štetni utjecaji na okoliš u optimiziranim uvjetima miniranja
- relativno mali utrošak ljudske radne snage i logistike u procesu miniranja
- niski troškovi dobivanja mineralne sirovine

Nedostaci uporabe eksploziva:

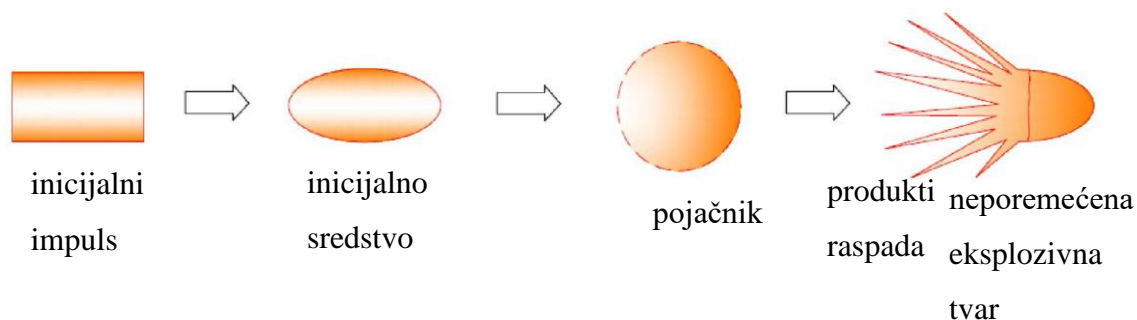
- seizmički utjecaji miniranja
- odbacivanje materijala i prašina
- buka i zračni udar
- plinoviti produkti detonacije

2.3. Inicijalna sredstva za gospodarska miniranja

Inicijalni sustavi prenose raspoloživu energiju naprave za iniciranje do eksploziva i potiču ga na stabilnu detonaciju. U Europi su se počeli razvijati u 17. stoljeću. Crni barut, čiji je sastav otkriven nekoliko stoljeća ranije, bio je u rasutom stanju. Nemogućnost kontrole

vremena sagorijevanja baruta u rasutom stanju uzrokovala je niz nesreća. Iz tog razloga, tražen je sigurniji način iniciranja. Inicijalni sustavi moraju biti sposobni obaviti sigurno i potpuno iniciranje eksplozivnog punjenja u mogućim uvjetima rada i okoline (Dobrilović, 2008).

Slika 2-6 prikazuje inicirajući niz.



Slika 2-6 Inicirajući niz (Dobrilović, 2008)

Glavno punjenje mina udarnim patronama s inicijalnim sredstvom može se aktivirati električno i neelektrično s upaljačima (detonirajući i sporogoreći štapin) ili detonatorima (rudarska kapica, električni upaljači i detonatori i sl.). Električno aktiviranje obavlja se električnim detonatorom, vodičima električne struje i dinamo-strojevima za paljenje mina. Neelektrično aktiviranje obavlja se s udarnim patronama sa sporogorećim štapinom i rudarskom kapicom, detonirajućim štapinom ili suvremenim NONEL sustavom. Detonatori i upaljači mogu se aktivirati odmah prilikom paljenja (trenutni) i u nekom vremenskom intervalu od trenutka paljenja (vremenski).

2.4. Utjecaj sustava iniciranja na seizmičko djelovanje miniranja

Zatajivanje iniciranja punjenja minskih bušotina narušava prostorno vremenski slijed otpucavanja, zbog čega dolazi do gubitka raspoložive energije u dijelu nedetoniranih punjenja i neželjenog stupnja drobljena stijene. Dio djelujućeg mehaničkog rada, koji se ne utroši na daljnje drobljenje stijene, pretvara se u energiju seizmičkih valova. Također, zatajivanjem minskih bušotina mogu se lokalno promijeniti geometrijske karakteristike samog minskog polja, što uzorkuje povećanje izbojnice i razmak između susjednih bušotina. U tom slučaju može doći do potpunog izostanka drobljenja, stijenska masa pomiče se u smjeru slobodne površine i gotovo sva energija susjednih bušotina pretvara se u energiju

seizmičkih valova. Osim štetnih seizmičkih utjecaja, može doći i do ostalih štetnih utjecaja miniranja.

Za kvalitetno izvođenje miniranja značajan je vremenski redoslijed otpucavanja minskih bušotina u shemi otpucavanja. Kašnjenje detonacije ili usporenje otpucavanja osigurava optimalan proces mehaničkog drobljenja stijene, ali i optimalno doziranje oslobođene energije detonacije u vremenu i po jedinici volumena stijenske mase. Također, osigurava smanjenje štetnih djelovanja poput seizmičkih utjecaja miniranja. Otpucavanje eksplozivnog punjenja uzrokuje i potresne efekte na okolinu koji se mjere na potencijalno ugroženim područjima. Do povećanja seizmičkih utjecaja miniranja dolazi i ukoliko dođe do preklapanja vremenskih intervala kašnjenja (Stanković, 2011).

3. ŠTETNI UTJECAJI MINIRANJA

Miniranje stijenske mase uzrokuje i nepoželjne pojave, koje mogu izazvati oštećenja na objektima u blizini. Najveći dio oslobođene energije eksplozivnog punjenja troši se na razaranje stijene, a manji dio te energije pretvara se u kinetičku energiju seizmičkih i zračnih valova. Nastali valovi šire se radialno na sve strane. U minerskoj praski, štetni i nepoželjni utjecaji detonacije eksplozivnog naboja na objekte u blizini, definiraju se kao nekontrolirani mehanički rad.

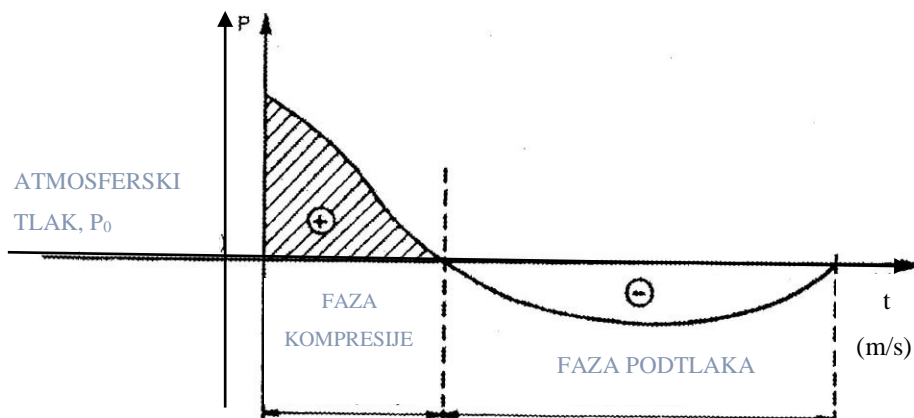
Nepoželjne posljedice miniranja:

- seizmički utjecaji miniranja
- zračni udarni val
- odbacivanje minirane stijenske mase
- prašina i štetni plinovi

Štetna djelovanja seizmičkih valova, koja su detaljno objašnjena u sljedećem poglavlju, manifestiraju se kao oscilacije i elastične deformacije stijene i predstavljaju umjetni potres, a mjesto eksplozije je njegov epicentar.

3.1. Zračni udarni val

Naglim povećanjem tlaka plinova uslijed miniranja nastaje zračni udar koji se može podijeliti na fazu kompresije i fazu podtlaka (slika 3-1). U fazi kompresije dolazi do stlačivanja i zgušnjavanja zraka u pravcu širenja zračnog udarnog vala, dok se u fazi podtlaka kreće u obrnutom pravcu.



Slika 3-1 Faze zračnog udara

Na tlak zračnog udarnog vala utječu brojni čimbenici:

- vrsta i količina eksploziva
- položaj eksplozivnog naboja
- udaljenost od mjesta eksplozije
- razmak između minskih bušotina i način iniciranja minskog punjenja
- konfiguracija terena
- atmosferske prilike
- duljina i kvaliteta čepa

Pojava sekundarnog zvuka, kojeg uzrokuje reakcija objekata, izaziva reakciju kod ljudi koji će posljedice zračnog udara bolje podnesti na otvorenom. Pravilnim proračunom razmaka između bušotina, linijom najmanjeg otpora i duljinom čepa smanjuje se zračni udarni val. U tablici 3-1 prikazane su štete koje mogu nastati djelovanjem zračnog udarnog vala .

Tablica 3-1 Štete uzrokovane djelovanjem zračnog udarnog vala

Tlak udarnog vala		Opis štete
(mbar)	(Pa)	
$2 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-5}$	Prag čujnosti
0,14	14	Vibracije stakla i kuhinjskog stakla
0,21	21	Uznemiravanje ljudi
2,1	210	Bez oštećenja
7	700	Lom slabije učvršćenog stakla
21	2 100	Lom dobro učvršćenog stakla
210	21 000	Oštećenje na građevinama, pucanje bubnjića u uhu
1 000	100 000	Rušenje zidova od cigle, pukotine u betonu
2 000	200 000	Rušenje betonskih konstrukcija, velike štete, oštećenje unutrašnjih organa kod ljudi

2 500	250 000	Smrt
4 000	400 000	

3.2. Odbacivanje odminirane stijenske mase

Do razbacivanja minirane stijene može doći zbog različitih uzroka kao što su krivo određivanje linije najmanjeg otpora, premali čep minske bušotine i neadekvatno čepljenje minskih bušotina te zbog nepravilnosti na etažnoj kosini i kod bušenja. Iz tog razloga, kako bi se navedeni uzroci uklonili, potrebno je pregledati stijenu prije miniranja. Osim toga, potrebno je odrediti optimalne parametre miniranja i obaviti kontrolu bušenja i čepjenja minskih bušotina (Stanković, 2011).

Povećanjem mase eksplozivnog naboja raste daljina odbacivanja minirane mase. Daljina odbacivanja fragmenata stijene ovisi o liniji najmanjeg otpora (w) i pokazatelju djelovanja eksplozije (n) te se može aproksimativno odrediti prema formuli (Gustaffson, 1973):

$$R_r = 255 \cdot n^{0,75} \cdot \sqrt[3]{w} \text{ (m)} \quad (3-1)$$

gdje je:

R_r – duljina odbacivanja (m)

$n = \frac{R}{w}$ - pokazatelj djelovanja eksplozije

R – radijus odloma minske bušotine (m)

w – linija najmanjeg otpora (m)

4. SEIZMIČKI UTJECAJI MINIRANJA

Energija prenesena na stijenu prilikom miniranja raspodijelila se na slijedeći način (Berta, 1990):

- lom in situ – < 1%
- deformacija stijenske mase iza bušotine – < 1%
- lom stijene u blizini bušotine - 1,5-2%
- odbacivanje stijenske mase – < 1%
- pomicanje stijenske mase – 4%
- razlom – 15%
- zračni udarni val – 38-39%
- seizmički utjecaji – 40%

Prema tome, najveći dio oslobođene energije spada u štetne utjecaje miniranja. Prilikom miniranja, dio energije eksplozivnog naboja pretvara se u kinetičku energiju seizmičkih valova, koji se šire radijalno od mjesta miniranja. Seizmički valovi mogu uzrokovati nepoželjna i štetna djelovanja na građevinskim objektima u neposrednoj blizini. S obzirom na to da čovjek može osjetiti i oscilacije koje ne predstavljaju opasnost za konstrukcije objekata, njihovo djelovanje najčešće se procjenjuje.

Štetna djelovanja seizmičkih valova predstavljaju slabi potres, a mjesto eksplozije je epicentar. Iniciranjem minskog polja nastaju različite vrste seizmičkih valova koji se dijele u dvije grupe. Jednu skupinu čine primarni (*P*) i sekundarni (*S*) valovi koji se šire iz jednog izvora u svim smjerovima kroz unutrašnjost Zemlje. U drugu skupinu spadaju površinski, Rayleigh-ovi i Love-ovi valovi koji se šire približno paralelno s površinom Zemlje i nastali su interakcijom unutrašnjih valova s površinom ili zbog razlike u gustoći materijala. Prilikom prolaska vala kroz materijal, može doći do elastičnih deformacija ako je snaga vala manja od elastične čvrstoće materijala. Ukoliko val premaši čvrstoću materijala može doći do trajnih, plastičnih deformacija. Prolazak seizmičkih valova kroz stijensku masu uzrokuje vibracije tla. Seizmički valovi se na mjestu opažanja pojavljuju s različitom amplitudom i određenim zakašnjenjem. Primarni i sekundarni valovi, koji prolaze unutar stijene, imaju veću brzinu od površinskih valova. Površinski valovi imaju najveću amplitudu pomaka i najmanju frekvenciju te su najveći problem za objekte. Gibanje tla izazvano djelovanjem potresnog vala ovisi o eksplozivnom punjenju, vrsti eksploziva i geologiji terena. Veće količine eksplozivnog punjenja uzrokovati će veće pomake i manje frekvencije. Također,

ako je područje u kojem se minira kamenito i s tanjim pokrovom, frekvencije će biti manje, a pomaci veći (Brnelić, 2020).

Jačina potresa izazvanih postupkom miniranja ovisi o količini i vrsti eksplozivnog punjenja, sredini kroz koju se valovi šire i udaljenosti od mjesta iniciranja, a može se izraziti:

1. maksimalnim pomakom, $s = A$ (4-1)

2. maksimalnom brzinom, $v = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot A$ (4-2)

3. maksimalnim ubrzanjem, $a = 4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot A$ (4-3)

gdje je:

A – maksimalna amplituda (cm)

f – frekvencija oscilacija (Hz)

Domet i brzina rasprostiranja seizmičkih valova ovise o vrsti stijene i prigušenju koje se javlja u stijeni. Prigušenje potresnih valova ovisi o frekvenciji seizmičkih valova i određenim svojstvima stijene kao što su sastav, struktura, porozitet, raspucanost, zasićenost stijene vodom, temperaturi te o rasipanju i disipaciji energije (Dobrilović, 2008). U praksi se na temelju najveće rezultantne brzine oscilacija tla određuje stupanj intenziteta potresa. 1963. godine potresi su klasificirani prema kriteriju S.V. Medveda, ovisno o količini i vrsti oštećenja objekata, prema pripadajućoj vrijednosti rezultantne brzine oscilacija. U tablici 4-1 prikazana je klasifikacija potresa. Različite brzine oscilacija tla uzrokuju različita oštećenja, od manjih poput otpadanja žbuke do oštećenja većih razmjera.

Tablica 4-1 Klasifikacija potresa prema kriteriju S.V. Medved-a

Stupanj potresa	Brzina oscilacija (cm/s)	Karakteristike potresa
1.	<0,2	Oscilacije mogu registrirati jedino instrumenti
2.	0,2-0,4	Oscilacije se osjete samo u potpunoj tišini
3.	0,4-0,8	Oscilacije osjete osobe koje su obavještene o miniranju
4.	0,8-1,5	Oscilacije osjeća veći broj ljudi i pojavljuje se zveckanje
5.	1,5-3,0	Počinje osipanje žbuke; nastaju oštećenja na starijim zgradama
6.	3,0-6,0	Veće pukotine na žbuci; oštećenja zgrada lako uočljiva
7.	6,0-12,0	Pojava oštećenja na solidnijim zgradama; padaju komadi žbuke; nastaju tanke pukotine u zidovima i dimnjacima; počinje klizanje vodom zasićenog pjeskovitog tla
8.	12,0-24,0	Nastaju znatna oštećenja zgrada; pojavljuju se velike pukotine u zidovima i konstrukcijama, dimnjaci se ruše; odvaljuje se žbuka; počinje obrušavanje kosina uz rub tektonskih pukotina; u slabo vezanim stijenama nastaju trajne deformacije
9.	24,0-48,0	Zgrade se ruše; pojava velikih pukotina u zidovima i stijenama; odronjavanje čvrstih kosina; obrušavanje rubnih dijelova slabo vezanih stijena i tla sistemom nepovoljno orijentiranih pukotina
10.	48,0-96,0	Nastaju velika razaranja i rušenja zgrada; pukotine u čvrstim stijenama; zarušavanje rubnih dijelova u slabo vezanim srednje čvrstim stijenama; zarušavanje jamskih hodnika
11.-12.	> 96,0	Znatna obrušavanja kosina u čvrstim stijenama

Vrednovanje utjecaja seizmičkog djelovanja miniranja na objekte sastoji se od tri koraka (Dowding, 1985):

1. procjena oscilacija tla izazvanih miniranjem u blizini objekta
2. analiza podataka kako bi se dobila procjena reakcije objekta na oscilacije
3. postavljanje graničnih vrijednosti brzina oscilacija, odnosno odaziva objekta kako bi se spriječila oštećenja

4.1. Određivanje radijusa sigurnosti i brzine oscilacija tla

Kriteriji za određivanje radijusa sigurne zone podijeljeni su dvije skupine. U prvoj skupini nalaze se kriteriji kojima je sigurna udaljenost određena na temelju maksimalne količine eksplozivnog punjenja po stupnju milisekundnog otpucavanja. Druga skupina uključuje kriterije koji na temelju maksimalne količine eksplozivnog punjenja po stupnju milisekundnog otpucavanja određuju intenzitet potresa na objektu koji se želi zaštititi. Određivanje veličine radijusa sigurnosti primjenjivalo se prije metode izračuna brzina oscilacija tla i danas se više ne koristi (Stanković, 2011). Za određivanje sigurne udaljenosti objekata od mjesta na kojemu se izvodi miniranja najčešće se koristi formula prema M. F. Drukovaniju:

$$R_s = K \alpha \sqrt[3]{Q} \quad (4-4)$$

gdje je:

R_s – radijus ugrožene zone pri miniranju (m)

K – koeficijent seizmičkog djelovanja u stijeni

α – koeficijent zavisan o pokazatelju djelovanja eksplozije

Q – količina eksplozivnog punjenja koje detonira trenutno (kg)

Radius ugrožene zone moguće je izračunati prema formuli Genschela:

$$R_s = 7 \sqrt[3]{Q^2} \quad (4-5)$$

gdje je:

R_s – radijus ugrožene zone pri miniranju (m)

Q – masa jednovremenog detoniranog eksplozivnog punjenja (kg)

Osim navedenih metoda, radijus sigurne zone moguće je odrediti i prema metodi S.V. Medveda.

Ugroženost pojedinog objekta od štetnih seizmičkih djelovanja ocjenjuje se na temelju brzina oscilacija tla ili stijena, koje je izazvala detonacija eksploziva. Ako je poznata udaljenost mjesta opažanja od minskog polja te masa eksplozivnog punjenja koja detonira trenutno, moguće je izračunati brzinu oscilacija tla ili stijene u željenoj točki. Osim navedenih parametara, brzina oscilacija tla ili stijena je u izravnoj vezi i s fizičko-mehaničkim te inženjersko-geološkim karakteristikama stijene. Prema različitim metodama moguće je izračunati brzinu oscilacija tla.

Prema U.S. Bureau of Mines Bulletin 656 (Nichols i dr., 1971) brzinu oscilacija moguće je izračunati po formuli:

$$v = 714 \left(\frac{D}{W^x} \right)^y \text{ (mm/s)} \quad (4-6)$$

gdje je:

v – brzina oscilacija tla (mm/s)

D – udaljenost između minskog polja i mjesta opažanja (m)

W – masa jednovremenog detoniranog eksplozivnog punjenja (kg)

x – eksponent količine punjenja (uzima se 0,5)

y – eksponent faktora stijene (uzima se -1.6)

Formula za izračun brzine oscilacija prema Sadovskom:

$$v = k_m \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{n_p} \text{ (cm/s)} \quad (4-7)$$

gdje je:

v – brzina oscilacija tla (cm/s)

k_m – koeficijent načina miniranja

Q – masa jednovremenog detoniranog eksplozivnog punjenja (kg)

R – udaljenost između minskog polja i mjesta opažanja (m)

n_p – koeficijent prigušenja seizmičkih valova na putu širenja

Prema ISEE Blasters Handbook 18th Edition (2011):

$$v = 1725 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.6} \text{ (mm/s)} \quad (4-8)$$

gdje je:

v – brzina oscilacija tla (mm/s)

D – udaljenost između minskog polja i mjesta opažanja (m)

W – masa jednovremenog detoniranog eksplozivnog punjenja (kg)

Prema švedskoj normi brzina oscilacija tla iznosi:

$$v = v_0 F_k F_d F_t \quad (4-9)$$

gdje je:

v – brzina oscilacija tla (cm/s)

v_0 – nekorrigirana vertikalna komponenta brzina oscilacija tla (mm/s)

F_d – faktor najkraće udaljenosti od mjesta miniranja do promatranog objekta

F_t – faktor trajanja minerskih radova

F_k – faktor kvalitete gradnje promatranog objekta

Nekorigirana vertikalna komponenta određuje se prema tablici 4-2 ili se može izračunati po formuli ako je poznata Q prostiranja primarnih valova stijene na kojoj je temeljena zgrada koja se promatra.

$$v_0 = \frac{c_p}{65} \quad (4-10)$$

gdje je:

v_0 – nekorrigirana vertikalna komponenta brzina oscilacija tla (mm/s)

c_p – brzina primarnih valova (m/s)

Tablica 4-2 Određivanje nekorrigirane vertikalne komponente

Sastav tla	v_0 (mm/s)
Nepovezani šljunak, pijesak i glina	18
Čvrst šljunak, pješčenjak, meki vapnenac	35
Granit, gnajs, čvrsti vapnenac, pješčenjak, dijabaz	70

Faktor kvalitete gradnje objekta koji se promatra (F_k) produkt je faktora materijala (F_m) od kojega je zgrada izrađena i faktora vrste zgrade (F_b).

$$F_k = F_b F_m \quad (4-11)$$

gdje je:

F_k – faktor kvalitete gradnje promatranog objekta

F_b – faktor vrste zgrade

F_m – faktor materijala od kojeg je zgrada izgrađena

U tablici 4-3 prikazana je vrijednost faktora vrste zgrade, a u tablici 4-4 faktora materijala.

Tablica 4-3 Vrijednosti faktora vrste zgrade

Broj	Vrsta zgrade ili građevinske konstrukcije	Vrijednost F_b
1	Teške konstrukcije (mostovi, bunker, lukobrani)	1,70
2	Industrijske i uredske zgrade	1,20
3	Standardne stambene zgrade	1,00
4	Specijalno osjetljive zgrade s velikim lukovima ili konstrukcije s velikim rasponima, crkve i muzeji	0,65
5	Povijesne zgrade u lošem stanju	0,50

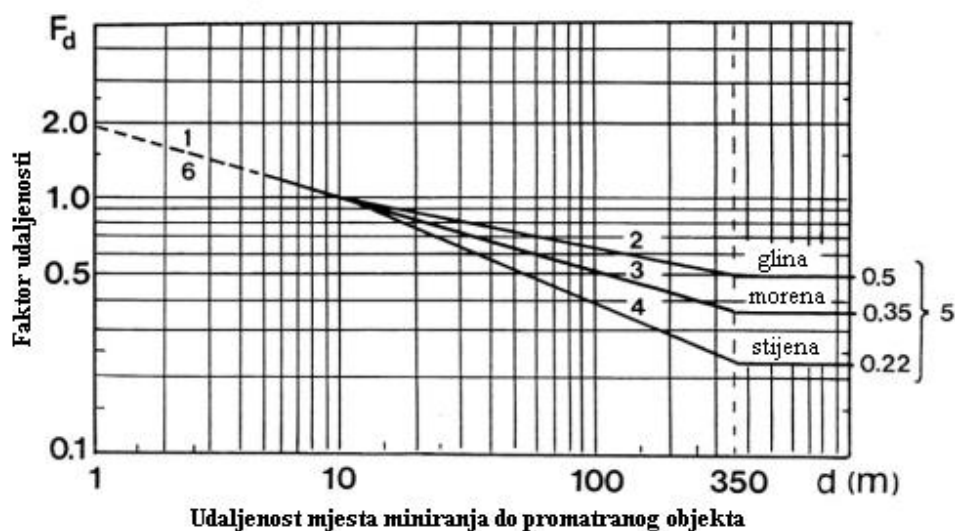
Tablica 4-4 Vrijednosti vrste materijala

Broj	Vrsta građevinskog materijala	Vrijednost F_m
1	Armirani beton, drvo, željezo	1,20
2	Nearmirani beton, klinker opeka, opeka	1,00
3	Porozni beton	0,75
4	Umjetni blokovi	0,65

Faktor trajanja minerskih radova također se određuje prema tablici 4-5, a faktor udaljenosti pomoću dijagrama prikazanog na slici 3-4.

Tablica 4-5 Vrijednosti faktora trajanja minerskih radova

Vrsta minerskih aktivnosti	Vrijednost F_t
Građevinski radovi na tunelima, cestama, iskopima temelja	1,0
Stacionarni radovi, kamenolomi, rudnici	0,75-1,0



Slika 4-1 Dijagram za određivanje faktora udaljenost (Stanković, 2011)

4.2. Norme za određivanje dozvoljenih brzina oscilacija tla ili stijenskih masa

Dozvoljene brzine oscilacija tla ili stijena za različite vrste i stanje objekata nisu normirane hrvatskim propisima. Najčešće se koriste međunarodne norme DIN 4150, USBM

RI8507 i OSMRE, ISO 4866:1990. Osim navedenih normi, još se koriste British Standard 7385 i Swedish Standard SS 4604866. Svaka norma ima različite granične vrijednosti unutar kojih su određene veličine dopuštenih oscilacija za pojedine kategorije građevina (Stanković, 2011). Dozvoljene veličine određuju se na temelju brzine oscilacija tla v (mm/s) i frekvencije f (Hz).

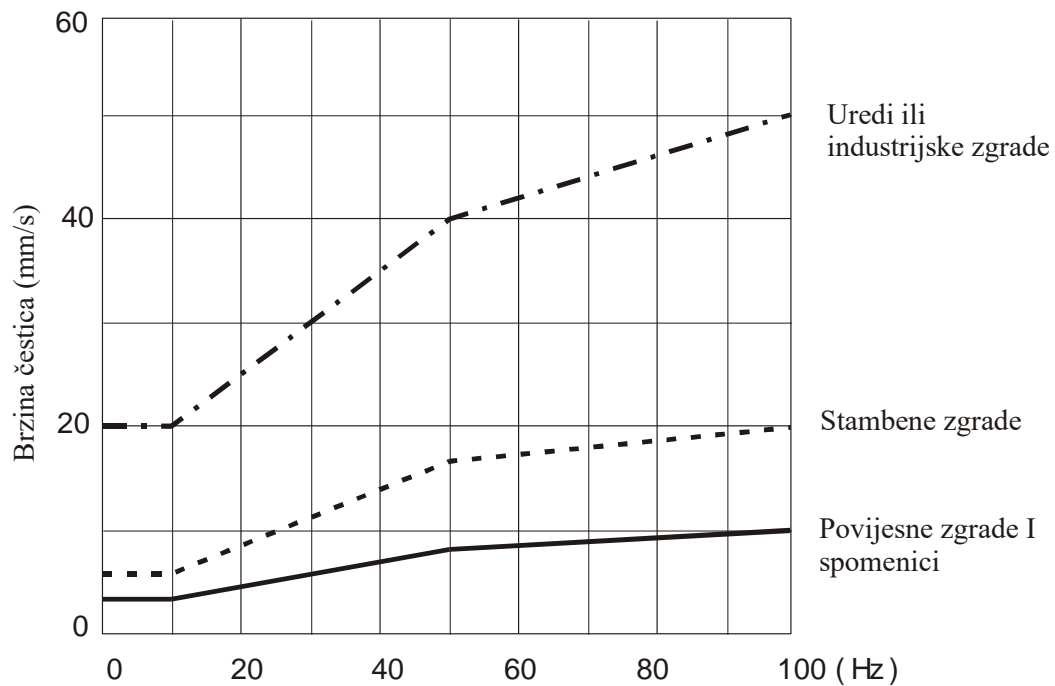
Norma DIN 4150

Norma DIN 4150 prihvaćena je za hrvatsku normu. U tablici 4-6 prikazane su granične vrijednosti brzina oscilacija prema ovoj normi. Ovisno o tipu građevine te o mjestu mjerenja, razlikuju se veličine dozvoljenih brzina oscilacija.

Tablica 4-6 Granične vrijednosti brzina oscilacija prema normi DIN 4150

Kategorija zgrade	Temelji			Pod najvišeg kata u zgradi
	< 10 (Hz)	10 Hz-50 Hz	50 Hz-100 Hz	Bilo koja frekvencija
Uredske/industrijske zgrade	20 mm/s	(20-40) mm/s	(40-50) mm/s	40 mm/s
Stambene zgrade sa žbukanim zidovima	5 mm/s	(5-15) mm/s	(15-20) mm/s	15 mm/s
Povijesne i druge osjetljive zgrade	3 mm/s	(3-8) mm/s	(8-10) mm/s	8 mm/s

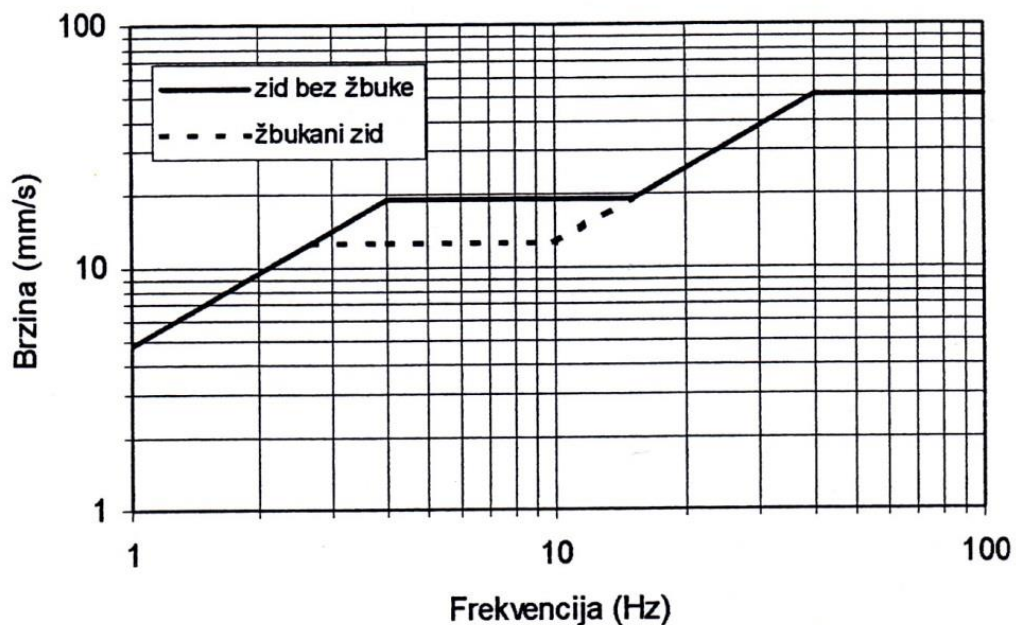
Osim brzine oscilacija tla, u obzir su uzete i frekvencije nastale iz izvora vibracija. Prema tome, može se zaključiti da se povećanjem frekvencije povećava i dozvoljena brzina oscilacija tla. Miniranje najčešće uzrokuje frekvencije oscilacija u granicama od 20-100 Hz, dok su one manje od 10 Hz najopasnije. Slika 4-2 prikazuje dijagram dozvoljenih brzina oscilacija, ovisno o frekvenciji, za određenu vrstu konstrukcije.



Slika 4-2 Dijagram granica brzina čestica za određene tipove konstrukcija u funkciji frekvenciji prema DIN 4150 (Stanković, 2011)

USBM RI8507 i OSMRE

Sjedinjene Američke države kriterij štetnog seizmičkog utjecaja miniranja utvrdile su preko odnosa brzine i frekvencije oscilacija što je grafički prikazano na slici 4-3.



Slika 4-3 Grafički prikaz brzina oscilacija tla u funkciji frekvencije prema normi USBM RI8507 i OSMRE (Vusilović, 2015)

ISO 4866:1990

Internacionalna norma ISO 4866:1990 obrađuje mjerenje vibracija na građevinama, a isključuje mjerenja zračnog udarnog vala kao i drugih djelovanja dinamičkih tlakova zraka. Odnosi se na sve podzemne i površinske objekte osim nuklearnih elektrana i brana. Iako isključuje mjerenja zračnog udarnog vala i drugih djelovanja dinamičkih tlakova zraka, uzeta je u obzir reakcija građevina na takve pobude. Procjena utjecaja oscilacija na određeni objekt dobivena je iz odaziva objekta na vibracije, a odaziv objekta ovisi o pobudi. Norma ISO 4866:1990 kontrolira metode mjerenja pod utjecajem izvora pobude. Ograničenje brzine oscilacija tla ili stijena nije određeno normom te ga države ili regije donose za svoje područje (Stanković, 2011).

Swedish Standard SS 4604866

Kriterij štetnog seizmičkog utjecaja miniranja određen je graničnom vrijednosti jednog ili više parametara (tablica 4-7).

Tablica 4-7 Granična vrijednost parametara prema Swedish Standard SS 4604866

Tip građevine	Granična vrijednost parametara		
	Pomak (mm)	Brzina (mm/s)	Ubrzanje (mm/s ²)
Armiranobetonske građevine	-	200	-
Visoke stambene zgrade (moderna gradnja ili gradnja armiranobetonskim okvirima)	0,4	100	-
Strop kaverne u čvrstoj stijeni raspona 15-18 m	-	70-100	-
Stambene zgrade (cigleni zid)	-	70	-
Betonski objekt (nearmirani)	-	35	-
Švedski Nacionalni Muzej (zgrada muzeja)	25	-	-
Švedski Nacionalni muzej (osjetljivi izložbeni primjerci)	5	-	-
Računalni centar	0,1	-	2,5
Kontrolna soba s prekidačima	-	-	0,5-2

British standard 7385

Velika Britanija je utvrdila kriterij seizmičkog utjecaja miniranja preko odnosa brzine i frekvencije oscilacija. Dopuštene vrijednosti brzine oscilacija u odnosu na frekvenciju promatranih oscilacija za pojedine građevine prikazane su u tablici 4-8.

Tablica 4-8 Dopuštene vrijednosti komponentnih brzina čestica za određeni frekvencijski raspon prema British Standard 7385

Vrsta objekta	Dopuštene vrijednosti komponentnih brzina čestica za određeni frekventni raspon	
	4Hz – 15 Hz	> 15 Hz
Armirane ili rešetkaste konstrukcije (industrijske i poslovne hale)	50 mm/s kod 4 Hz i više	
Nearmirane ili lake rešetkaste konstrukcije (stambene ili komercijalne zgrade)	15 mm/s kod 4 Hz uz povećanje do 20 mm/s kod 15 Hz	20 mm/s kod 15 Hz uz povećanje do 50 mm/s kod 40 Hz i više

5. NETIPIČNE VRIJEDNOSTI KOD MJERENJA

Svrha mjerenja je odrediti brojčanu vrijednost mjerene veličine. Djelovanjem slučajnih utjecaja te ograničenih mogućnosti korekcije sustavnih djelovanja, mjerenja nisu savršena. Mjerni rezultat predstavlja aproksimaciju ili procjenu vrijednosti mjerene veličine. Matematički model mjerenja uključuje različite utjecajne veličine koje nisu točno poznate te se procjenjuju. Manjak informacija o utjecajnim veličinama, promjene rezultata u uvjetima ponovljivosti i nesigurnost pridružena matematičkom modelu doprinosi nesigurnosti mjernog rezultata. Precizna mjerenja značajna su za sva područja ljudske djelatnosti (Runje, 2014).

5.1. Mjerne pogreške

Odstupanje izmjerene vrijednosti veličine od referentne vrijednosti veličine naziva se mjerna pogreška. Prema uzroku nastajanja razlikuju se sustavne, slučajne i grube pogreške. Sustavne pogreške se tijekom ponovljenih mjerenja ne mijenjaju ili se mijenjaju na predvidiv način. Uzrokovane su poznatim uzrocima koje je potrebno ukloniti. S obzirom na to da su poznatog iznosa, njihovo djelovanje na mjerni rezultat može se smanjiti korekcijom rezultata. Slučajne pogreške mijenjaju se na nepredvidiv način te se iz tog razloga ne mogu ukloniti. Uzrokuju ih nestalni uvjeti mjerenja, a obrađuju se statistički. Grube pogreške značajno odstupaju od ostalih rezultata. Najčešće nastaju zbog poremećaja u uređaju i okolini ili uslijed krivog očitavanja ili zapisivanja rezultata. Ovakav tip pogrešaka moguće je lako primijetiti zbog velikog odstupanja. Mjerenja u kojima su prepoznate grube pogreške potrebno je ponoviti na ispravan način. Ponekad je potrebno koristiti statističke testove kako bi se razlikovale slučajne i grube pogreške (Runje, 2014).

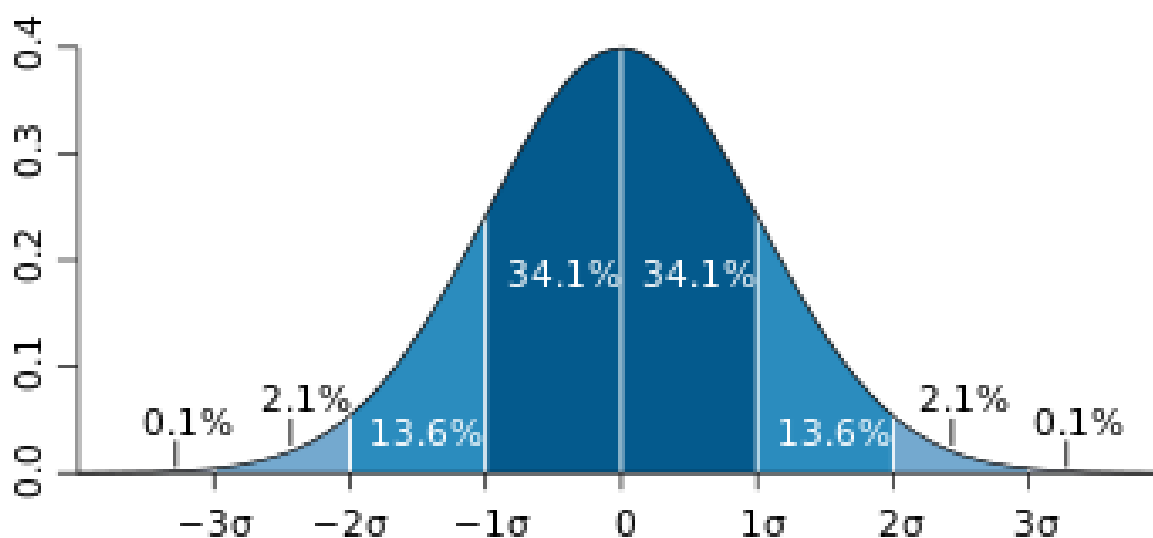
5.2. Netipične vrijednosti

Netipična vrijednost (eng. outlier) statistički je pojam koji u statističkoj literaturi još uvijek nije precizno definiran. Najčešće predstavlja vrijednosti koje značajno odstupaju od ostalih vrijednosti, odnosno, koje su značajno veće ili manje u odnosu na druge podatke. Pojava netipičnih vrijednosti najčešće je posljedica:

- 1) pogrešno obavljenog mjerenja ili unosa podataka u bazu
- 2) podatak ne dolazi iz populacije koja se promatra u kontekstu promatranog problema
- 3) podatak je točno izmjeren i unesen u bazu podataka, no predstavlja rijetku pojavu

Vrijednosti koje značajno odstupaju od ostalih potrebno je detektirati i ukloniti ili riješiti koristeći robusne metode modeliranja koje nisu osjetljive na takve vrijednosti. Netipične vrijednosti mogu značajno utjecati na rezultat analize. Stoga, potrebno ih je pažljivo analizirati prije nego se donese odluka o izbacivanju iz postupka obrade podataka ili zadržavanju kao neuobičajenih primjera iz populacije koja se promatra. Outlieri se često nazivaju i „lošim“ opažanjima koja se mogu pojaviti slučajno u bilo kojoj distribuciji (Hekimoglu i Koch, 2000).

Jednodimenzionalna „dobra“ opažanja potječu iz normalne distribucije. Standardna devijacija, koja se označava grčim slovom σ , označava mjeru raspršenosti u osnovnom skupu. Odnosno, pokazuje koliko elementi skupa odstupaju od prosjeka u apsolutnom iznosu. U praksi se najčešće pretpostavlja da su podaci približno normalno distribuirani. U skladu s tom pretpostavkom, oko 68% podataka nalazi se unutar jedne standardne devijacije, oko 95% podataka nalazi se unutar dvije standardne devijacije, a unutar tri standardne devijacije nalazi se približno 99,7% podataka. Ovo jednostavno pravilo naziva se pravilo 3-sigma (68-95-99,7) ili empirijsko pravilo i često se koristi za otkrivanje netipičnih vrijednosti, tj. za grubu procjenu s obzirom na standardnu devijaciju, uz pretpostavku da je populacija normalna. Na slici 5-1 prikazan je dijagram normalno distribuiranih podataka.



Slika 5-1 Normalna distribucija (Wikipedia, 2021)

Dopuštanje odstupanja od prosjeka izrazito je važno jer niti jedan proces ne može raditi pod savršenim uvjetima. U tablici 5-1 prikazane su numeričke vrijednosti dobivene iz pravila za normalno distribuirane podatke korištene u ovom radu.

Tablica 5-1 Očekivani udio populacije unutar pojedine standardne devijacije

Sigma razina	Očekivani udio populacije unutar raspona (%)
1 σ	68,27
2 σ	95,45
3 σ	99,73
4 σ	99,9937

5.3. Mjerenje brzine oscilacija i obrada podataka

Brzine oscilacija tla mjere se na određenoj udaljenosti od minskog polja koristeći seizmografe koji se mogu postaviti na tlo ili objekt. Danas postoji nekoliko proizvođača uređaja za praćenje seizmičkih utjecaja miniranja. Instanetel inc. vodeći je proizvođač takvih uređaja s obzirom na mogućnosti samog uređaja te na računalnu programsku podršku i prihvaćenost od strane korisnika. Primjer ovakvog tipa uređaja je Instanetel Minimate Plus (slika 5-2). Mjerni sustav sastoji se od mjernog uređaja i osjetila, odnosno geofona prikazanog na slici 5-3. Brzina oscilacija mjeri se kontinuirano u određenom vremenskom intervalu. Geofone je potrebno postaviti na čvrstu podlogu pomoću tri nožice, nakon čega se opterećuje prikladnim utegom i priključuje na instrument. Prilikom njihova postavljanja, svitak osjetila radijalne komponente mora biti u smjeru minske bušotine.

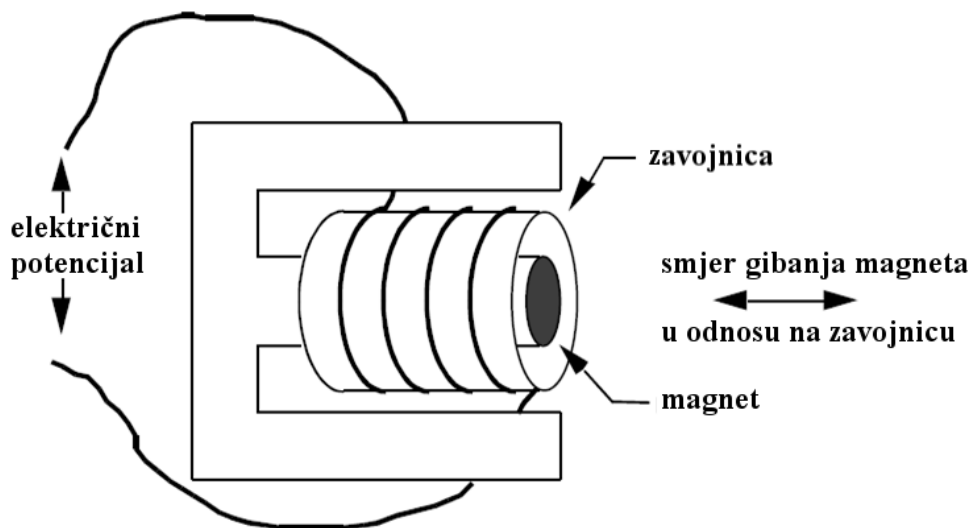


Slika 5-2 Instanetel Minimate Plus



Slika 5-3 Geofon (InstanTel, 2021)

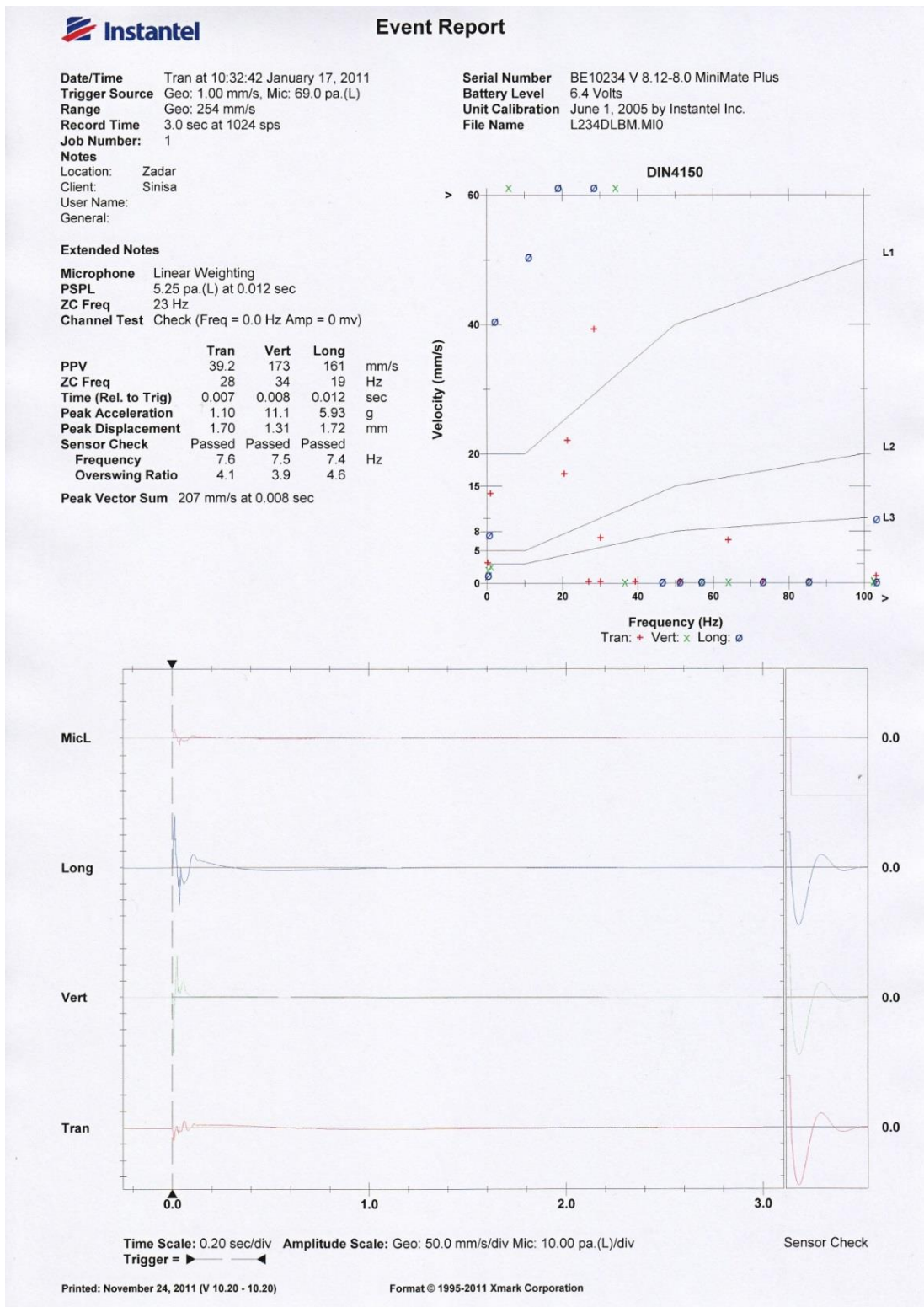
S obzirom na to da su geofoni trokomponentne izvedbe, razlikuju se tri komponente mjerenih brzina oscilacija: vertikalna, longitudinalna (radijalna) i transverzalna. Time je omogućeno istovremeno mjerenje brzina oscilacija unutar tri prostorne, međusobno okomite osi. Princip rada geofona bazira se na principu elektromagnetske indukcije. Slika 5-4 prikazuje načelan princip rada geofona. Magnet, koji prolazi kroz zavojnicu, pomiče se energijom eksplozije. Zavojnica se zbog svoje inercije ne pomiče, a rezultirajuće gibanje magneta u odnosu na zavojnicu inducira napon koji je proporcionalan brzini čestica (Minimate Plus Operate Manual, 2015).



Slika 5-4 Princip rada geofona (Minimate Plus Operate Manual, 2015)

Inducirani napon u vremenu dovodi se mjernom uređaju. Nakon detonacije geofon registrira po jednu nepravilnu krivulju koja se dobije na seizmogramu nastalog seizmičkog poremećaja. S dobivenih snimaka računaju se brzine pojedinih komponenti oscilacija.

Podaci s mjernog uređaja prenose se na računalo koristeći računalni program „Blastware“. Za svako mjerno mjesto posebno se ispisuje izvještaj mjerenja (slika 5-5).



Slika 5-5 Izvještaj mjerenja (Stanković, 2011)

5.4. Validacija vrijednosti mjerenja brzina vibracija tla

Kombinacija bušenja i miniranja ekonomična su i održiva metoda za iskop stijenske mase ili za građevinske radove, ali štetni utjecaji ovih postupaka su gotovo neizbježni. Seizmički utjecaji, zbog potencijalnog štetnog djelovanja na obližnje objekte i ljude, detaljno se istražuju. Dio oslobođene energije eksplozivnog punjenja pretvara se u kinetičku energiju seizmičkih valova. Valovi koji se šire na sve strane od mjesta detonacije dolaze do određenog objekta u kojem izazivaju dinamička naprezanja koja, ako pređu graničnu čvrstoću materijala, uzrokuju trajne deformacije. Brzine oscilacija tla ili stijena izazvane miniranjem, temeljni su kriterij za ocjenu ugroženosti objekata od štetnih seizmičkih utjecaja. Intenzitet potresa ovisi o upotrijebljenoj količini eksploziva i udaljenosti od mjesta miniranja, karakteristikama tla ili stijene te načinu miniranja (Mesec, 2005). Njihovu međusobnu ovisnost izrazio je Sadovski preko ranije navedenog izraza 4-7.

Intenzitet vibracija uslijed miniranja danas se uglavnom izražava koristeći izraze za brzinu čestica (*PPV*) koja uključuje svedenu udaljenost (*SD*). Svedena udaljenost definira se kao stvarna udaljenost od mjesta iniciranja, podijeljena s drugim korijenom količine eksploziva koji detonira po stupnju paljenja. Veza između *PPV* i *SD* može se izraziti kao:

$$PPV = kSD^{-n} \quad (5-1)$$

gdje je:

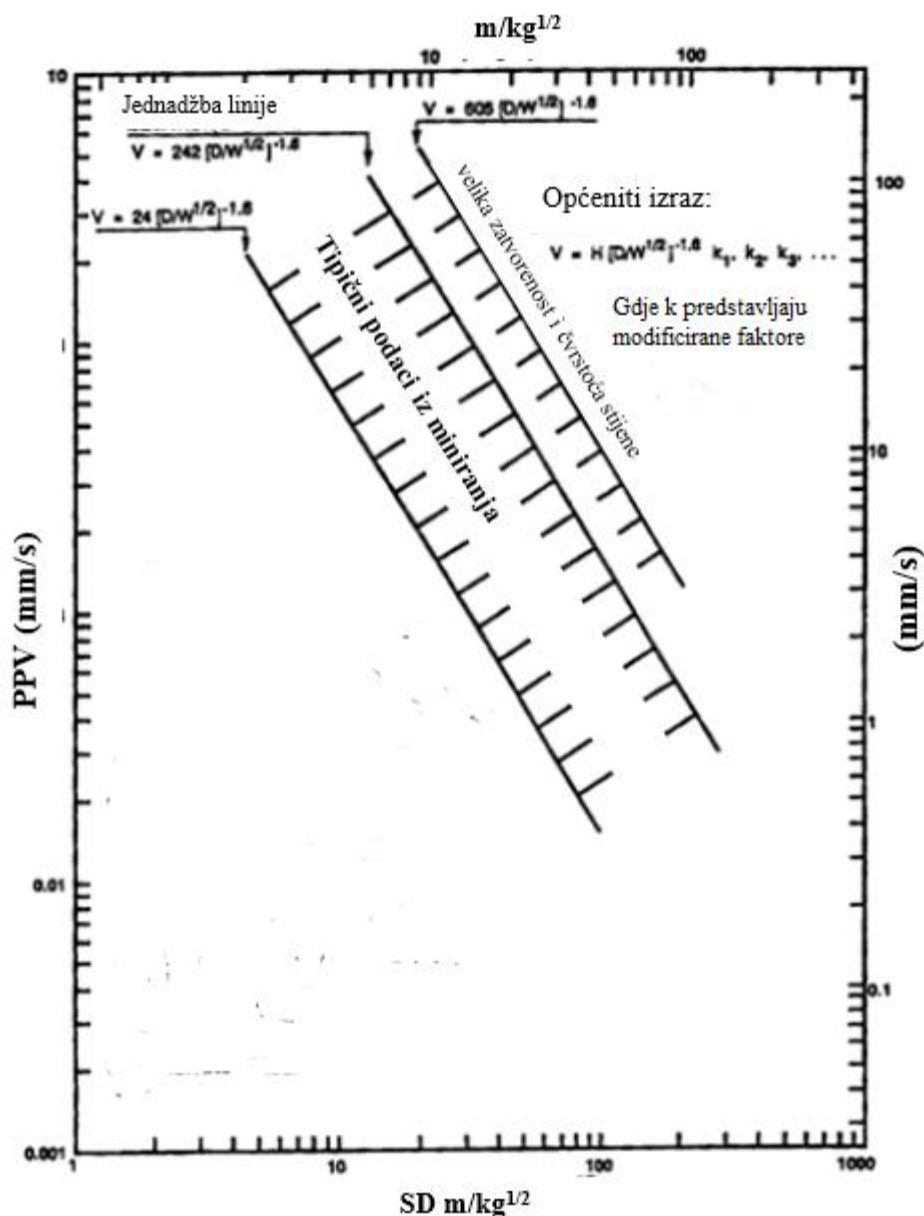
PPV – brzina čestica (m/s)

SD – svedena udaljenost ($m/kg^{\frac{1}{2}}$) definirana kao omjer udaljenosti od mjesta punjenja *R* (m) i kvadratnog korijena eksplozivnog punjenja *Q* (kg)

k – koeficijent karakteristika stijena i uvjeta praćenja

n – koeficijent oscilacija stijenskog masiva

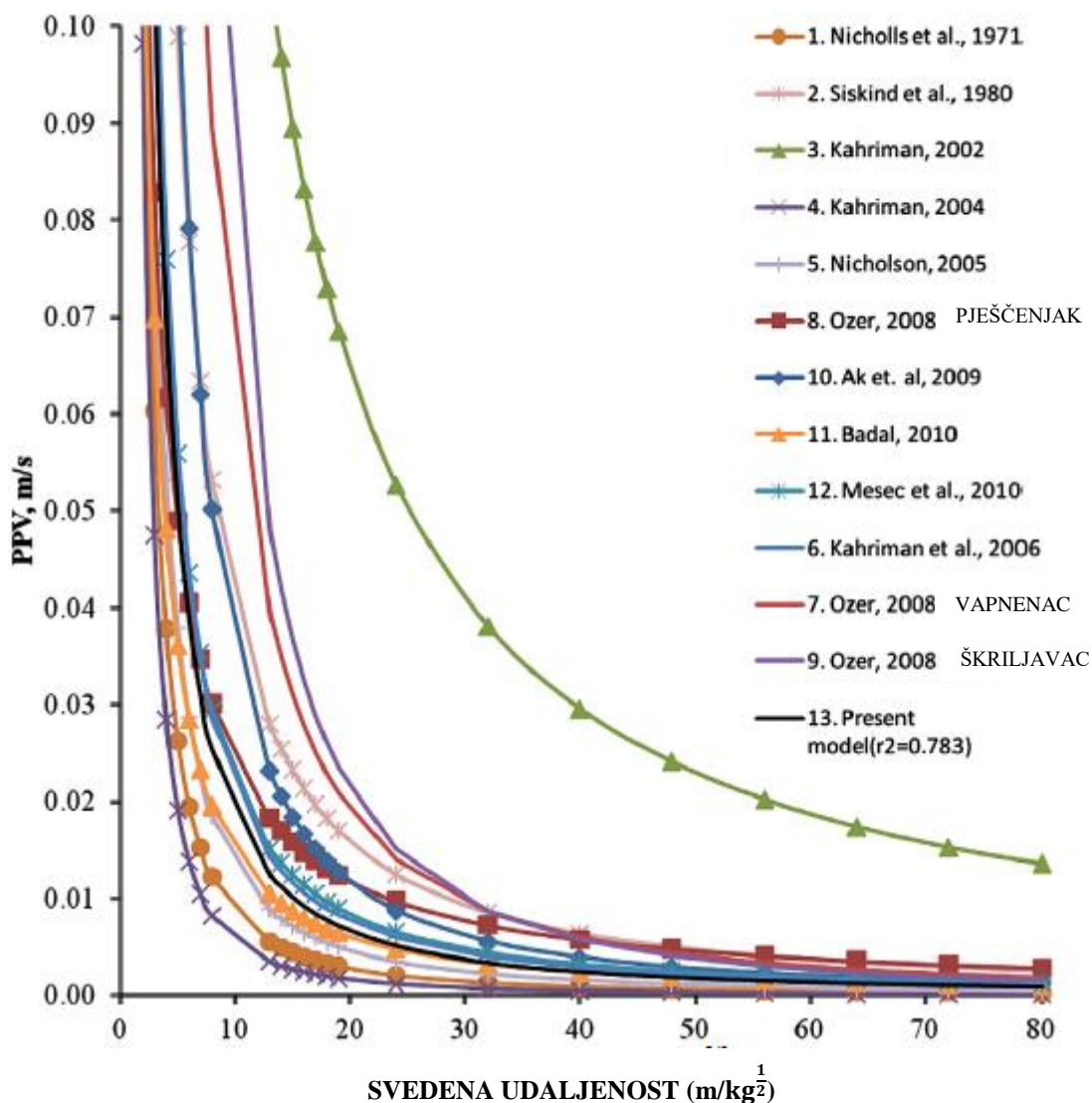
U ovom radu se zbog jednostavnijeg vizualnog prikaza koristila resultantna brzina (*PVS*) umjesto sve tri komponente *PPV*. Određivanje očekivanih vibracija na temelju svedene udaljenosti može se odrediti i grafičkom metodom. Dijagram za određivanje brzina oscilacija prikazan je na slici 5-6. Izračunata svedena udaljenost se na horizontalnoj osi projicira vertikalno dolje do presijecanja s linijom predviđenih potresa. Od mjesta presijecanja povlači se horizontalna linija do vertikalne osi s koje se očitava predviđena brzina oscilacija.



Slika 5-6 Dijagram za određivanje brzine oscilacija

Danas postoje brojni modeli za predviđanje brzine čestica slični izrazu 5-1, a razvijeni su za različita tla i stijene. Svaki razvijeni model predviđa vrijednost *PPV*-a na odgovarajućem mjestu, ali ne i za druge lokacije te je više smjernica nego točan podatak. Trinaest različitih autora prikupili su 1089 podataka dobivenih tijekom određenih projekata ili eksploatacije u kamenolomima, a koji su se odnosili na *PPV* i svedenu udaljenost kod različitih vrsta stijena (Kumar i dr., 2016). Podaci su analizirani statistički ili neuronskim mrežama. Na slici 5-7 prikazan je graf eksperimentalnog *PPV*-a u ovisnosti o svedenoj udaljenosti za eksperimentalna istraživanja. Podaci su prikazani različitim simbolima koji predstavljaju

različite studije. U Hrvatskoj se zbog sličnih geoloških uvjeta najčešće koristi prediktor koji su razvili Mesec i dr. (Mesec i dr., 2010).



Slika 5-7 Usporedba eksperimentalnog PPV-a u ovisnosti o svedenoj udaljenosti

Empirijski odnos između $PPV-a$ i svedene udaljenosti razvijeni su nakon analize eksperimentalnih podataka. Parametri stijene koji utječu na širenje seizmičkih valova su prikupljeni i dodijeljeni eksperimentalnim podacima, nakon čega su predložene empirijske jednadžbe za procjenu $PPV-a$. U tablici 5-2 dan je sumaran prikaz empirijskih modela za predviđanje brzine čestica od nekoliko različitih autora (Kumar i dr., 2016).

Tablica 5-2 Sumaran prikaz empirijskih modela za predviđanje najveće brzine čestica

Broj	Autori	Empirijski model
1	Duvall i Petkof (1959)	$v = k \left(\frac{R}{Q^{\frac{1}{2}}} \right)^{-b}$
2	Langefors i Kihlstrom (1963)	$v = k \left(\frac{Q}{R^{\frac{2}{3}}} \right)^{\frac{b}{2}}$
3	Ambraseys i Hendron (1968)	$v = k \left(\frac{R}{Q^{\frac{1}{3}}} \right)^{-b}$
4	Nicholls i dr. (1971)	$v = 0,362D^{-1,63}$
5	IS 6922 (1973)	$v = k \left(\frac{Q^{\frac{2}{3}}}{R} \right)^{-1,25}$
6	Siskind i dr. (1980)	$v = 0,828D^{-1,32}$
7	Gosh i Daemen (1983)	$v = k \left(\frac{R}{Q^{\frac{1}{3}}} \right)^{-b} e^{\alpha R}$
8	Pal Roy (1991)	$v = n + k \left(\frac{R}{Q^{\frac{1}{3}}} \right)^{-1}$
9	CMRI (1993)	$v = n + k \left(\frac{R}{Q^{\frac{1}{2}}} \right)^{-1}$
10	Kahriman et al. (2006)	$v = 0,561D^{-1,432}$
11	Rai i dr. (2005)	$v = k(vD^2)^b$
12	Nicholson (2005)	$v = 0,438D^{-1,52}$
13	Ak i dr. (2009)	$v = 1,367D^{-1,59}$
14	Ozer (2008) pješčenjak	$v = 0,257D^{-1,03}$
15	Ozer (2008) škriljavac	$v = 6,31D^{-1,9}$
16	Ozer (2008) vapnenac	$v = 3,02D^{-1,69}$
17	Badal (2010)	$v = 0,29D^{-1,296}$
18	Mesec i dr. (2010)	$v = 0,508D^{-1,37}$

6. OBRADA PODATAKA I INTERPRETACIJA REZULTATA

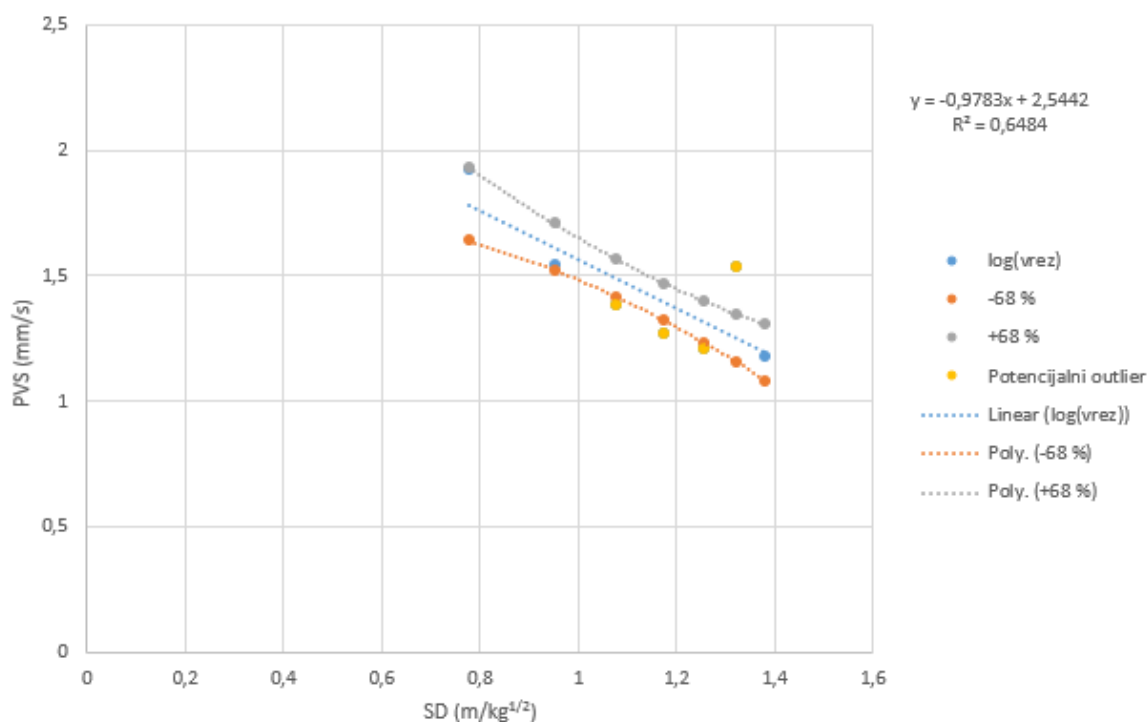
Seizmički utjecaji miniranja uglavnom se određuju na temelju mjerenja obavljenih prilikom izvođenja rudarskih radova. Izmjerene vrijednosti unose se u grafikone ili aplikacije pri čemu se dobije jednadžba regresijske krivulje s , obično, intervalom pouzdanosti od 95% prema kojoj se izračunavaju dozvoljene količine eksplozivnog punjenja. Međutim, u proračun ne bi trebalo uključiti sve izmjerene podatke. Izmjerene vrijednosti obično se ne provjeravaju i zbog toga se u razvoj modela često uključuju i pogrešne vrijednosti, što može dati krive rezultate. Regresijska krivulja u kojoj su uključene pogrešne mjerne vrijednosti i regresijska krivulja u kojoj nema pogrešnih mjerenja daju različite jednadžbe, a time i različite dozvoljene količine eksplozivnog punjenja. Naime, pogrešno određene dopuštene količine eksploziva mogu imati neželjene posljedice za proizvođača i okolinu. Ako se pogrešno izmjerena vrijednost nalazi iznad linije najboljeg uklapanja povećati će se troškovi bušenja i miniranja, a u slučaju da se nalazi ispod linije najboljeg uklapanja, povećava se mogućnost oštećenja objekata u neposrednoj blizini zbog korištenja veće količine eksplozivnog punjenja. Kako bi se navedene situacije izbjegle, potrebno je provjeriti i potvrditi izmjerene vrijednosti.

Ukoliko se zadovolje određeni preduvjeti, moguće je identificirati pogrešne mjerne vrijednosti. Instrumente kojima se prate vibracije izazvane miniranjem potrebno je postaviti na unaprijed određenoj udaljenosti od eksplozije, pri čemu treba biti najmanje 3 instrumenta za svaki smjer od interesa, a poželjno je 5 ili više (Stanković i dr., 2019). Nakon što se obavi miniranje potrebno je potvrditi izmjerene vrijednosti. Regresijska krivulja najbolje se prilagođava originalnim vrijednostima u dijagramu raspršenosti. Izmjerene vrijednosti koje se nalaze bliže prediktoru mogu se prihvatiti kao prave vrijednosti, a one dalje od prediktora potencijalno su pogrešne i treba ih potvrditi.

U ovom radu provjerene su i potvrđene izmjerene vrijednosti aktiviranjem 17 minskih bušotina dubine 3 m i promjera 89 mm na kamenolomu „Busišta 2“ koji se nalazi oko 4 km SI od sela Smilčić i oko 1 km sjeverno od ceste Smilčić-Karin primjenom pravila 1-4 sigma. Od 5 do 8 mjernih instrumenata postavljeno je u jednu liniju na različitim udaljenostima od mjesta miniranja. U nastavku je prikazan postupak obrade podataka pomoću računalnog programa Microsoft Excel na primjeru minske bušotine B-3.

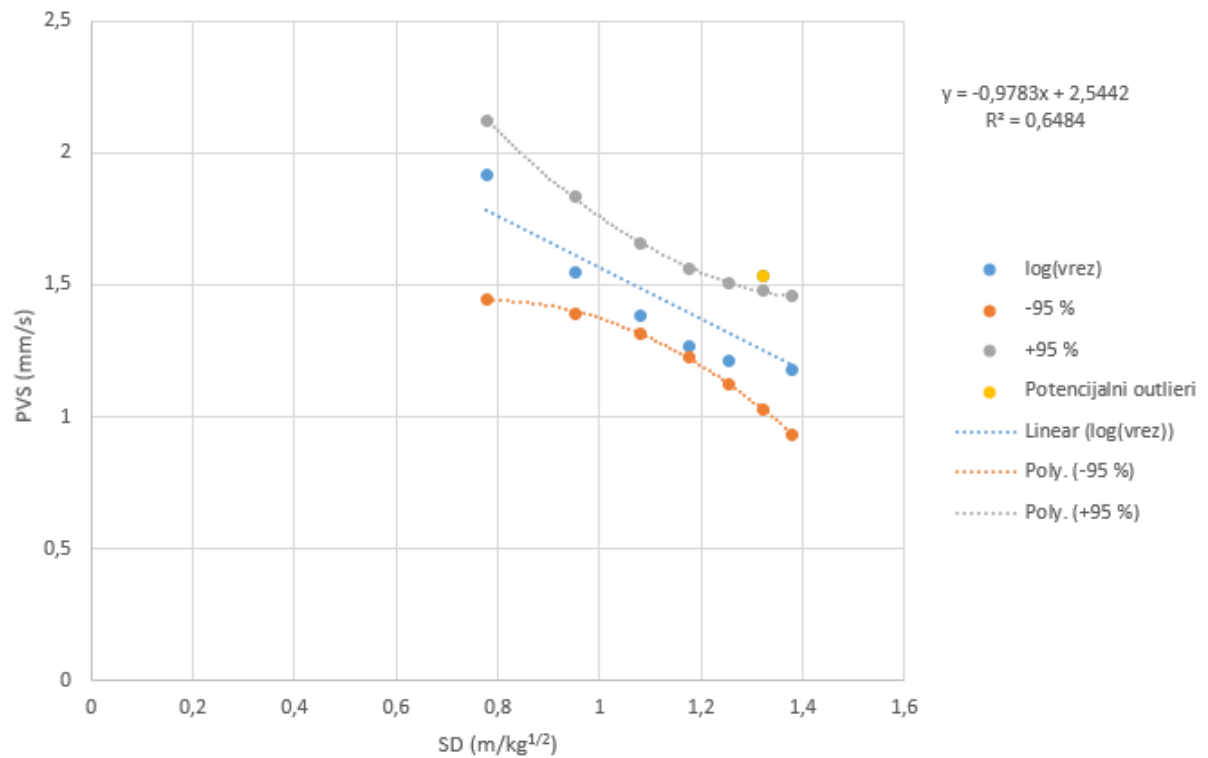
6.1. Određivanje netipičnih vrijednosti

Prvi korak u obradi podataka je određivanje netipičnih vrijednosti. Nakon što izmjereni podaci uneseni u program, kreirani su *PVS/SD* dijagrami. Na dijagramu je aproksimiran pravac koji približno opisuje zadani konačan skup točaka. Točke koje značajno odstupaju od pravca potencijalno su pogrešne. Kako bi se ta pretpostavka potvrdila, u prvom slučaju primijenjena je statistička metoda 1 sigma prema kojoj se prave vrijednosti nalaze unutar intervala $\pm 68\%$. Podaci koji se nalaze izvan tih granica predstavljaju outlier i potrebno ih je izuzeti od ostalih izmjerenih vrijednosti. Na slici 6-1, krivulje u sivoj i narančastoj boji predstavljaju 1 sigma granice. Na slici je jasno vidljivo da četiri točke, označene žutom bojom, znatno odskoču od pravca i nalaze izvan zadanog intervala te ih je stoga potrebno izbaciti iz daljnje analize. U gotovo svim slučajevima, pola ili više izmjerenih vrijednosti izbačeno je primjenom ovog pravila.



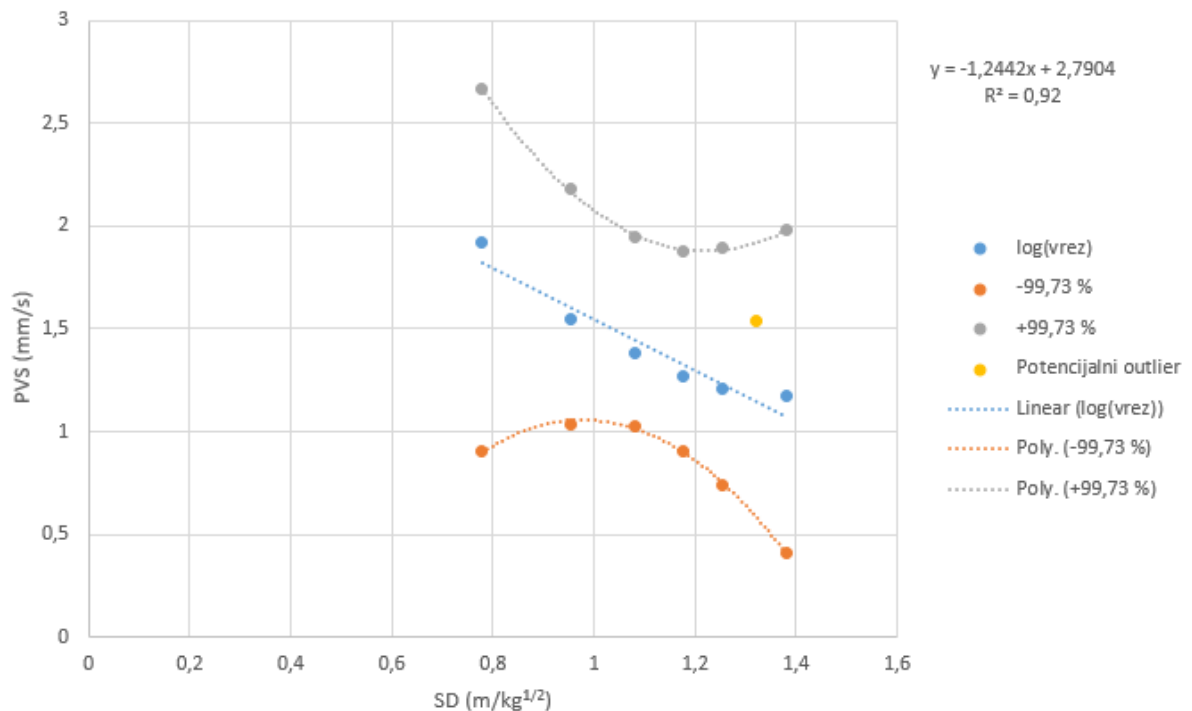
Slika 6-1 Određivanje outlier-a primjenom pravila 1 sigma

Nakon što su određene vrijednosti koje se nalaze izvan 1 sigma granica, postupak je ponovljen u skladu s pravilom 2 sigma. U samo dva slučaja su se sve vrijednosti nalazile unutar zadanog intervala od $\pm 95\%$, dok se u ostalim primjerima uglavnom jedna vrijednost označila kao potencijalan outlier.

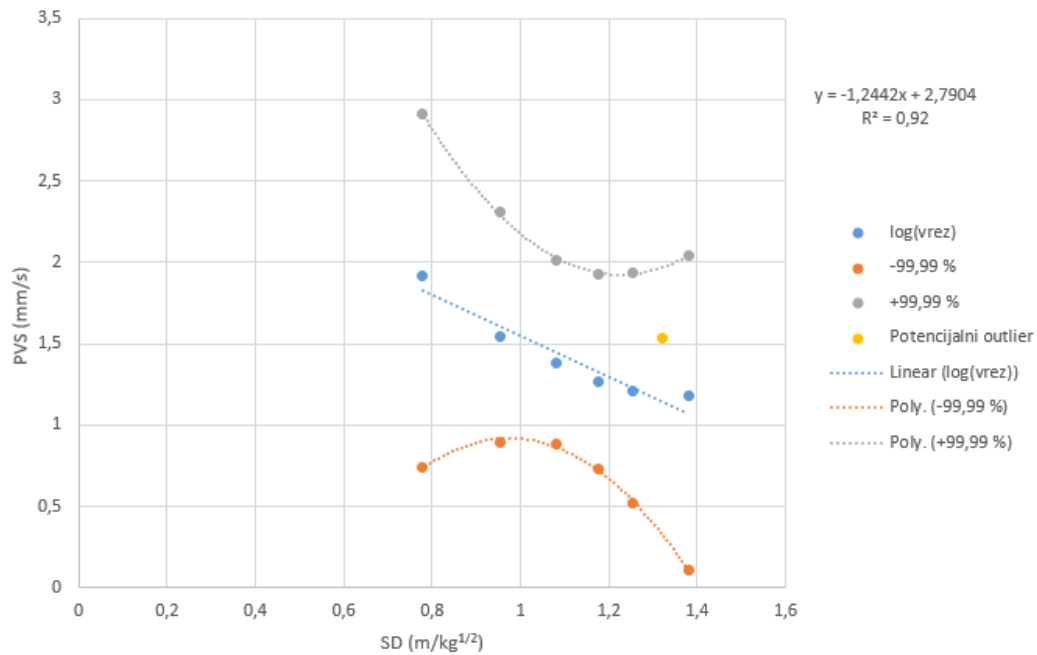


Slika 6-2 Određivanje outlier-a primjenom pravila 2 sigma

Označeni outlier nakon toga se potvrđivao primjenom pravila 3 i 4 sigma. U oba slučaja niti jedna izmjerena vrijednost ne izlazi izvan zadanih granica. Isti rezultat dobio se kod svih 17 bušotina. Slika 6-4 i 6-5 prikazuje primjenu pravila 3 i 4 sigma.



Slika 6-3 Određivanje outlier-a primjenom pravila 3 sigma



Slika 6-4 Određivanje outlier-a primjenom pravila 4 sigma

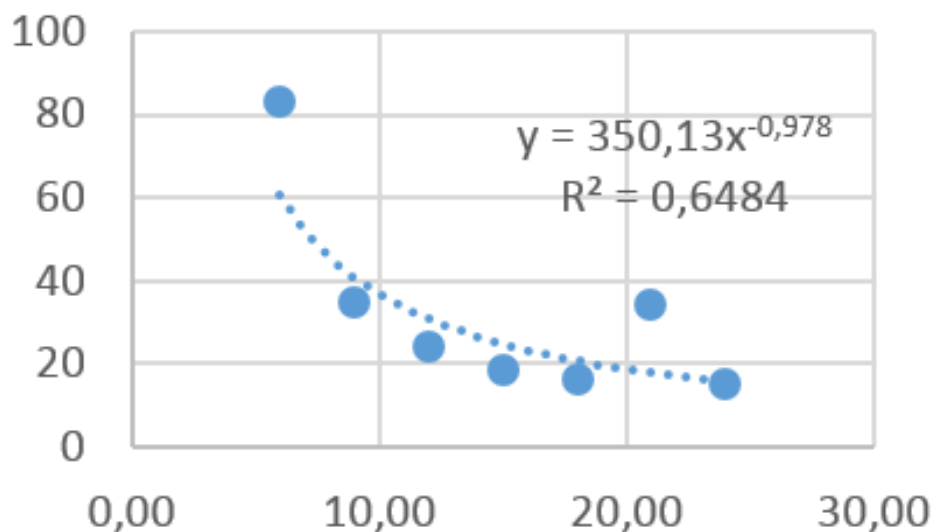
Tablica 6-1 prikazuje broj detektiranih outlier-a u odnosu na ukupni broj izmjerenih vrijednosti, ovisno o primijenjenom pravilu, za svaku bušotinu.

Tablica 6-1 Broj potencijalnih outlier-a

Bušotina	Potencijalni outlier-i			
	sigma 1	sigma 2	sigma 3	sigma 4
B1	3/7	1/7	-	-
B2	5/7	1/7	-	-
B3	4/7	1/7	-	-
B4	6/8	2/8	-	-
B5	3/8	2/8	-	-
B6	3/8	1/8	-	-
B7	4/8	1/8	-	-
B8	5/8	-	-	-
B9	3/8	2/8	-	-
B10	4/8	2/8	-	-
B11	4/8	2/8	-	-
B12	3/7	1/7	-	-
B13	2/7	1/7	-	-
B14	2/7	1/7	-	-
B15	3/7	1/7	-	-
B16	2/6	1/6	-	-
B17	2/5	-	-	-

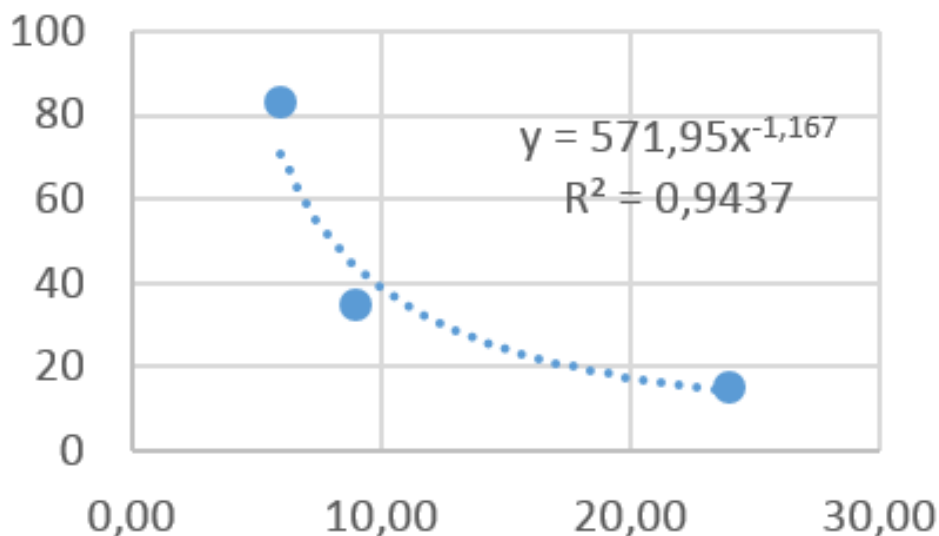
6.2. Izuzimanje netipičnih vrijednosti

Izmjerene vrijednosti koje su prethodno označene kao netipične izuzete su od ostalih mjerenja i dobivene su jednadžbe regresijske krivulje. Na slici 6-5 nalazi se regresijska krivulja u kojoj su sadržana sva mjerenja.



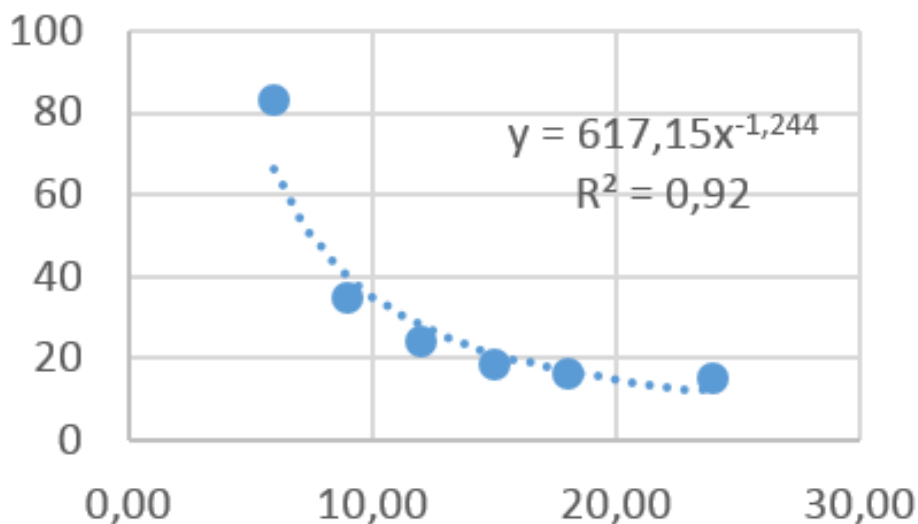
Slika 6-5 Regresijska krivulja s punim skupom podataka

Slika 6-6 prikazuje jednadžbu regresijske krivulje dobivenu nakon što su izuzeta četiri mjerna mjesta koja su prema pravilu jedne standardne devijacije prethodno označena kao potencijalan outlier.



Slika 6-6 Regresijska krivulja dobivena nakon izuzimanja mjerenja označenih kao outlier primjenom pravila 1 sigma

Regresijska krivulja i njena jednadžba bez izmjerene vrijednosti prepoznate kao outlier primjenom pravila 2 sigma prikazana je na slici 6-7.



Slika 6-7 Regresijska krivulja bez outlier-a potvrđenih pravilom 2 sigma

S obzirom na to da se unutar 3 i 4 standardne devijacije nalaze sve izmjerene vrijednosti koje nije potrebno izbaciti iz proračuna, oba slučaja se neće posebno analizirati jer rezultati odgovaraju prvom slučaju.

6.3. Dozvoljena količina eksplozivnog punjenja

Na temelju jednadžbi regresijske krivulje dobivenih nakon prethodno opisane obrade, potrebno je izračunati dozvoljene količine punjenja po stupnju paljenja za određene udaljenosti od mjesta miniranja.

Prvi korak u proračunu dopuštenih količina eksplozivnog punjenja je odrediti vrijednost svedene udaljenosti. Svedena udaljenosti izvedena je iz izraza za predviđanje vršne brzine čestica:

$$SD = \left(\frac{PVS}{k}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (6-1)$$

gdje je:

SD – svedena udaljenost ($m/kg^{\frac{1}{2}}$)

PVS – najveća brzina čestica (mm/s)

k – koeficijent karakteristika stijena i uvjeta praćenja

n – koeficijent oscilacija stijenskog masiva

Koeficijenti k i n očitani su iz jednadžbe regresijske krivulje. S obzirom na to da se u Hrvatskoj koristi norma HRN DIN 4150, brzina čestica korištena u proračunu određena je u skladu s normom i iznosi 20 mm/s.

Nakon što su izračunate vrijednosti svedene udaljenosti, može se dobiti količina eksplozivnog punjenja prema formuli:

$$Q = \left(\frac{R}{SD}\right)^2 \quad (6-2)$$

gdje je:

Q – masa jednovremeno detoniranog eksplozivnog punjenja (kg)

R – udaljenost između minskog polja i mjesta opažanja (m)

SD – svedena udaljenost ($\text{m}/\text{kg}^{\frac{1}{2}}$)

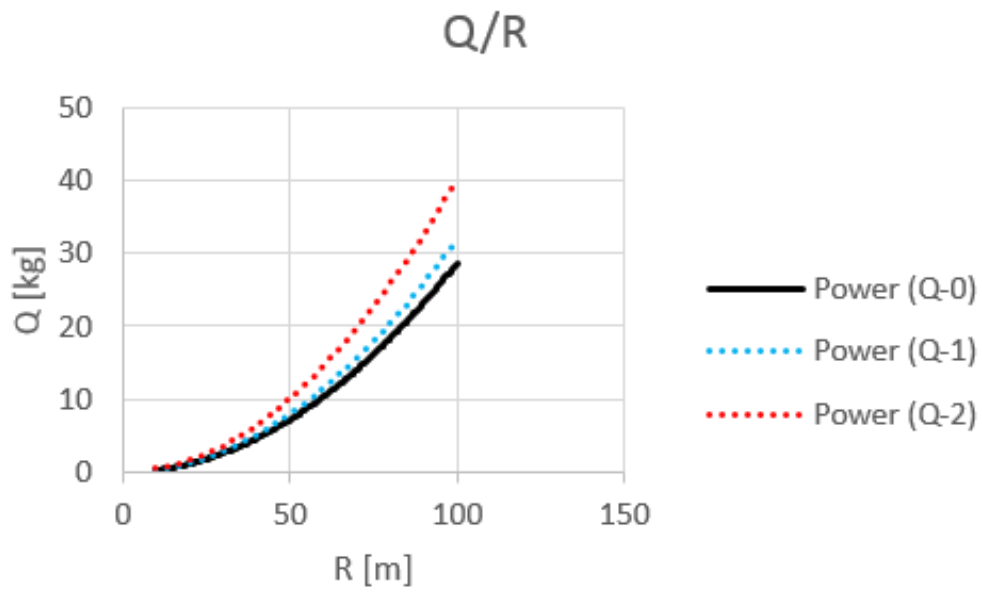
U tablici 6-1 prikazane su vrijednosti izračunatih količina dozvoljenog eksplozivnog punjenja za sva tri obrađena slučaja. Q_0 predstavlja dopuštenu količinu eksplozivnog punjenja u slučaju kada niti jedna vrijednost nije isključena iz analize. Dozvoljena količina eksplozivnog punjenja Q_1 dobivena je nakon što je primijenjeno pravilo jedne standardne devijacije, a Q_2 dvije standardne devijacije. Osim toga, prikazani su postoci koji daju podatak o smanjenju, odnosno povećanju dozvoljene količine eksplozivnog punjenja nakon što su se pojedina mjerenja izbacila primjenom pravila 1 i 2 sigma, u odnosu na početni slučaj kada su sve vrijednosti uključene u proračun. U danom primjeru vidljivo je da je u slučaju s primjenom pravila 2 sigma, kada je izuzeta samo jedna vrijednost, dozvoljena količina punjenja za istu udaljenost otpucavanja od mjesta opažanja gotovo 41% veća u od one u kojoj su stršeće vrijednosti uključene u proračun. Osim bušotine B-3, za još 9 bušotina u kojima su outlier-i izuzeti prema pravilu dvije standardne devijacije, dobiveno je povećanje dozvoljene količine punjenja za 3,58% do 22,60%, dok za dvije bušotine nisu detektirane netipične vrijednosti izvan 2 sigma te se za njih nije računala Q . Dopuštene količine eksplozivnog punjenja, određene prema podacima koji se nalaze unutar jedne standardne devijacije, veće su u odnosu na osnovni slučaj za 0,22% do 21,68% kod 7 bušotina te iznimno, u jednom slučaju, 90%. Rezultati pokazuju da u intervalu $\pm 99,7\%$ i $\pm 99,9\%$ nema netipičnih vrijednosti koje je potrebno izbaciti i sva mjerenja su uključena u proračun. S druge strane, unutar jedne standardne devijacije, u gotovo svim primjerima, pola ili više izmjerenih rezultata je prepoznato kao outlier te su izbačeni iz proračuna, ali su se nalazili

unutar dvije standardne devijacije. Primjenom pravila 2 sigma većinom je isključeno samo jedno mjerno mjesto. Stoga, pravilo 2 sigma pokazalo se optimalnim za određivanje netipičnih vrijednosti koje je potrebno izbaciti iz daljnjih proračuna. Detaljan prikaz dobivenih vrijednosti nalazi se u prilogu 1.

Tablica 6-2 Dozvoljene količine eksplozivnog punjenja za određene udaljenosti

B3					
R (m)	Q₀ (kg)	Q₁ (kg)	Q₂ (kg)	%₁	%₂
10	0,29	0,32	0,40	111,30	140,56
20	1,15	1,28	1,61	111,30	140,56
30	2,58	2,87	3,63	111,30	140,56
40	4,59	5,11	6,45	111,30	140,56
50	7,17	7,98	10,08	111,30	140,56
60	10,33	11,49	14,52	111,30	140,56
70	14,06	15,64	19,76	111,30	140,56
80	18,36	20,43	25,81	111,30	140,56
90	23,24	25,86	32,66	111,30	140,56
100	28,69	31,93	40,32	111,30	140,56

Na slici 6-8 prikazan je primjer Q/R dijagrama koji prikazuje izračunate dopuštene količine eksploziva za određenu udaljenost mjesta opažanja od mjesta miniranja. Dijagram je dobiven koristeći podatke iz prethodno opisane tablice. Na dijagramu je jasno vidljiva razlika u količini dozvoljenog eksplozivnog punjenja za iste udaljenosti. Osnovna krivulja crne boje predstavlja izračunate količine Q koristeći sve izmjerene vrijednosti. Plava krivulja dobivena je na temelju vrijednosti koje se nalaze unutar jedne standardne devijacije, a crvena krivulja na temelju onih mjerenja koji se nalaze unutar dvije standardne devijacije.



Slika 6-8 Q/R dijagram

7. ZAKLJUČAK

Nakon što su podaci izmjereni prilikom probnog miniranja na kamenolomu „Busišta 2“ provjereni i potvrđeni primjenom pravila 1-4 sigma, ovisno o primijenjenom pravilu, utvrđene su razlike u izračunu dozvoljenih količina eksplozivnih punjenja. Primjenom pravila 1 sigma, većina izmjerenih vrijednosti su prepoznate kao netipične i isključene su iz daljnje analize. S druge strane, gotovo sve vrijednosti su primjenom pravila 2 sigma potvrđene kao ispravne. U većini slučajeva, samo su jedna ili dvije vrijednosti predstavljale moguću pogrešku. Te vrijednosti kontrolirane su primjenom pravila 3 i 4 sigma pri čemu nisu prepoznate kao stršće i nisu isključene iz proračuna. Međutim, uključivanjem svih mjerenja u proračun dobivene su i do 40% manje dozvoljene količine eksplozivnog punjenja nego kada su određena mjerenja isključena iz proračuna primjenom pravila 1 i 2 sigma. U pojedinim slučajevima primjena metode 1 sigma u konačnici je dala veće dozvoljene količine eksplozivnog punjenja, ali je veliki broj izmjerenih vrijednosti prepoznat kao potencijalan outlier, dok je primjenom metode 2 sigma većina tih vrijednosti prepoznata kao ispravna. Iz navedenog, može se zaključiti da je primjena pravila 2 sigma (95%) najprimjerenija metoda za prepoznavanje i određivanje netipičnih vrijednosti koje je potrebno izbaciti iz proračuna i metoda koja proizvođaču osigurava ekonomičnost. Naime, primjenom ovog pravila u obradi podataka na kraju se dobiju veće vrijednosti dopuštene količine eksploziva koje mogu detonirati odjednom, a da se pri tome ne povećava mogućnost nastanka šteta na okolnim objektima. Odnosno, oscilacije izazvane miniranjem i dalje će biti u dopuštenim granicama, uz optimizirane količine eksplozivnog punjenja po stupnju paljena.

8. LITERATURA

- BERTA, G. 1990. *Explosives: An engineering tool*. Milano: Italesplosivi.
- BRNELIĆ, K. 2020. *Miniranje kao postupak eksploatacije sirovine za proizvodnju cementa u kamenolomu Koromačno*. Diplomski rad. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
- DEKOVIĆ, Z. 2009. *Optimizacija modela upravljanja rizicima vezanim uz minerske radove pri izboju cestovnih tunela u kršu*. Doktorska disertacija. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
- DOBRILOVIĆ, M. 2008. *Raspoloživa energija tlačnog udarnog vala udarne cjevčice i njezina primjena u iniciranju električnog detonatora*. Doktorska disertacija. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
- DOBRILOVIĆ, M., BOHANEK, V. ŠKRLEC, V. 2019. *Eksplzivni i razvoj društva*. Godišnjak Akademije tehničkih znanosti Hrvatske 2019, str. 104-120.
- DOWDING, C.H. 1985. *Blast vibration monitoring and control*. Evanston, Illinois: Northwestern University.
- DREMIN, A.N. 1991. *Physics and Chemistry of Explosions*. The New Scientific Trends. Proc. of 18th Symposium on Explosive Materials, International Part, str. 79-91.
- GUSTAFSSON, R. 1973. *Swedish Blasting Technique*. Gothenburg: SPI.
- HEKIMOGLU, S. KOCH, K.R.. 2000. *How can reliability of the test for outliers be measured*. Allg Vermessungs-Nachrichten, 107 (7) 247–254.
- INSTANTEL, 2015. *Minimate Plus Operate manual*. InstanTEL.
- ISEE, 2011. *Blasters Handbook 18th Edition*. Cleveland, Ohio: International Society of Explosives Engineers.
- JOHANSSON, C.H. PERSSON, P.A. 1970. *Detonics of High Explosives*. London: Academic Press.
- KUMAR, R., CHOUDHURY, D. BHARGAVA, K. 2016. Determination of blast-induced ground vibrations equations for rocks using mechanical and geological properties. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 8 (2016) 341-349.
- MESEC, J. 2005. *Dopuštene količine eksplozivnog punjenja ovisno o relativnoj seizmičkoj osjetljivosti stijenskih masa*. Rudarsko-geološko-naftni zbornik. Vol. 17. str 61-72.
- NARODNE NOVINE br. 70/17, 141/20. *Zakon o eksplozivnim tvarima te proizvodnji i prometu oružja*. Zagreb: Narodne novine d.d.
- NICHOLLS, H.R., JOHNSON, C.F., DUVALL, W.I. 1971. *Blasting vibrations and their effects on structures*. United States Bureau of Mines, Bulletin 656.

RUNJE, B. *Teorija i tehnika mjerenja*. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje.

STANKOVIĆ, S. 2011. *Određivanje ovisnosti brzina oscilacija tla o parametrima miniranja*. Doktorska disertacija. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

STANKOVIĆ, S., DOBRILOVIĆ, M., ŠKRLEC, V. *Optimal positioning of vibration monitoring instruments and their impact on blast-induced seismic influence results*. Archives of Mining Sciences, str. 591-607.

SUĆESKA, M. 2001. *Eksplozije i eksplozivi – njihova mirnodopska primjena*. Zagreb: Brodarski institut.

VUSILOVIĆ, T. 2015. *Utjecaji na okoliš i mjere zaštite okoliša tijekom miniranja na EP „Špica“, Ljubeščica*. Završni rad. Varaždin: Sveučilište Sjever – odjel za graditeljstvo.

WEB IZVORI:

INSTANTEL, 2021. *Advanced Sensors & Accessories*. URL:

<https://www.instantel.com/products/advanced-sensors-accessories> (29.8.2021.)

TOEWS, M.W., 2007. *Normal distribution*. URL:

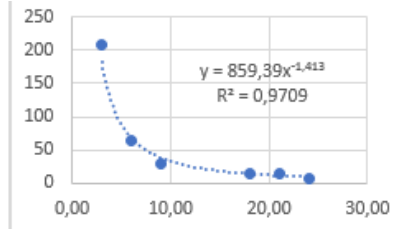
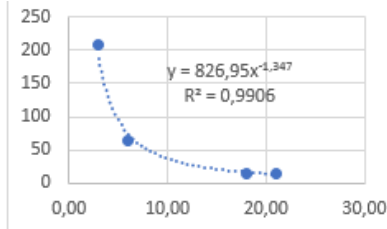
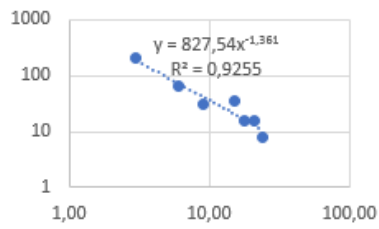
https://en.wikipedia.org/wiki/Normal_distribution#/media/File:Standard_deviation_diagram.svg (11.8.2021.)

TRG d.o.o., 2021. *Miniranje*. URL: <http://www.trg.hr/djelatnosti/rudarstvo/miniranje> (2.8.2021.)

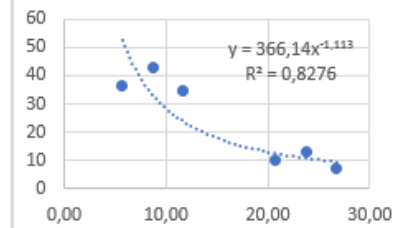
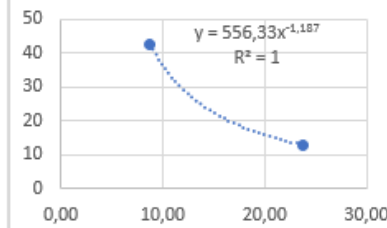
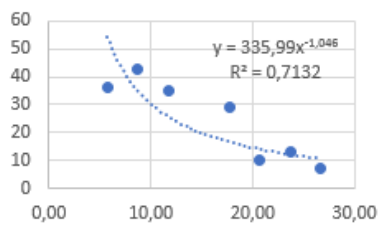
PRILOZI

Prilog 1: Regresijske krivulje i pripadajuće jednadžbe

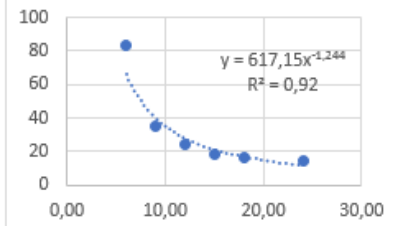
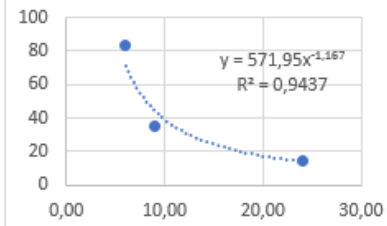
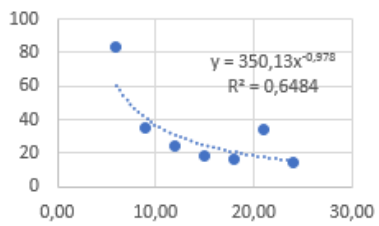
B1



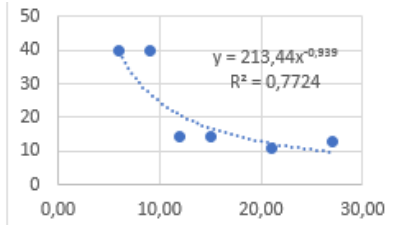
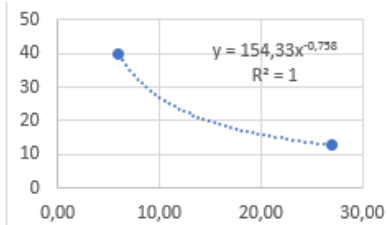
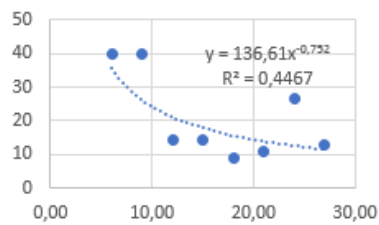
B2



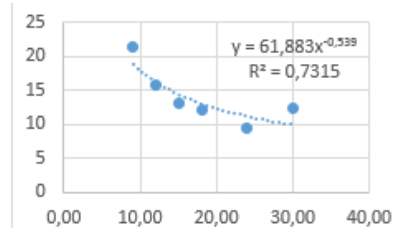
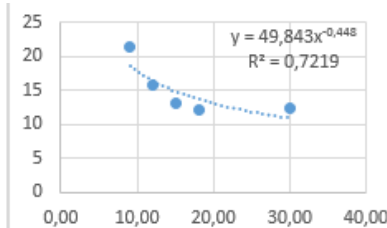
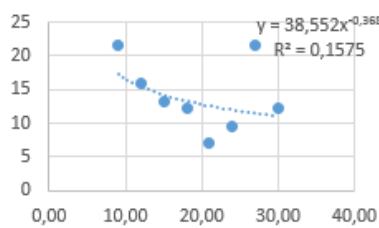
B3



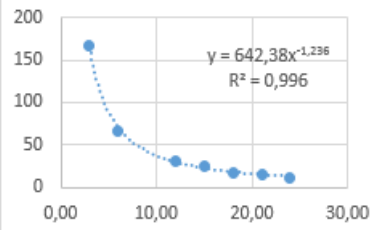
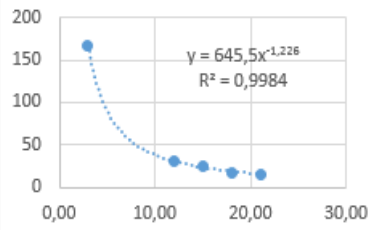
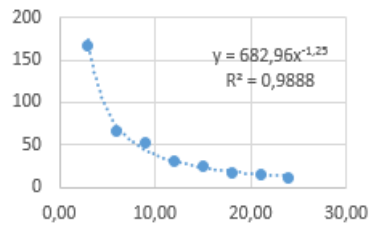
B4



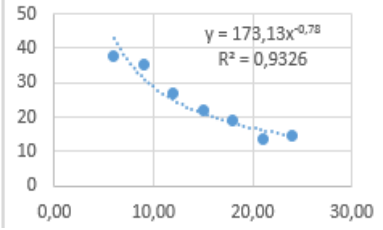
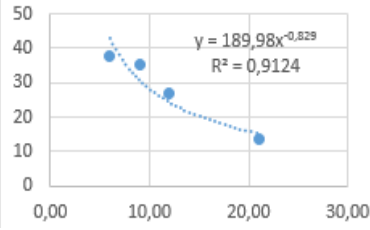
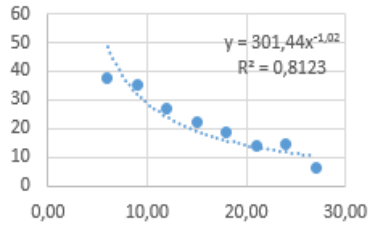
B5



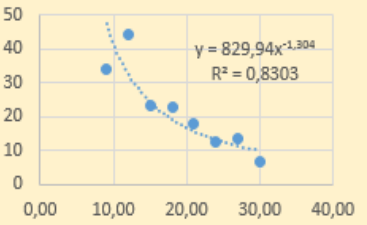
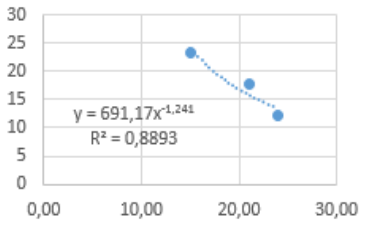
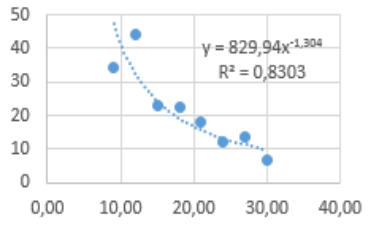
B6



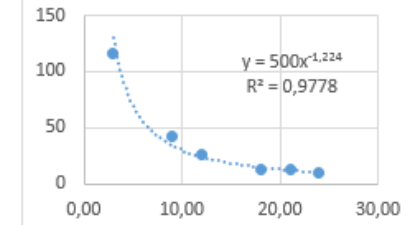
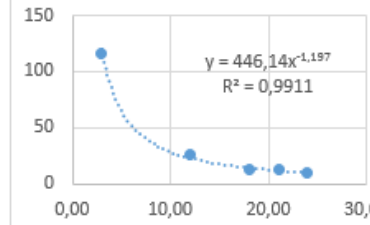
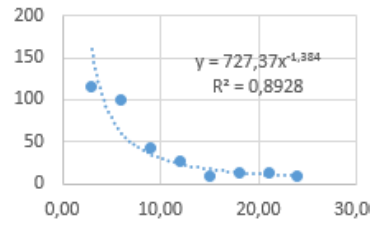
B7



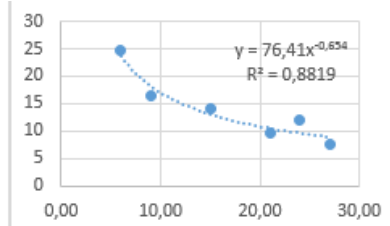
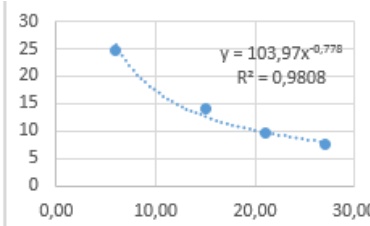
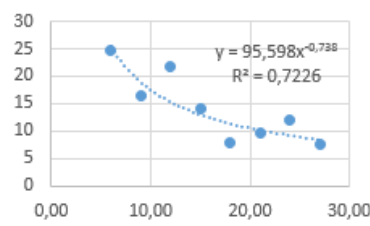
B8



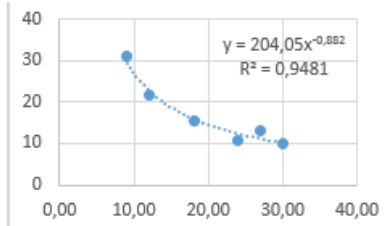
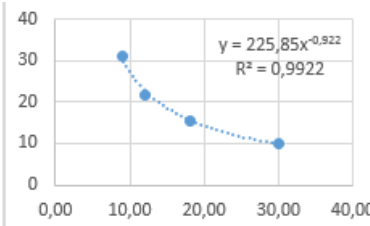
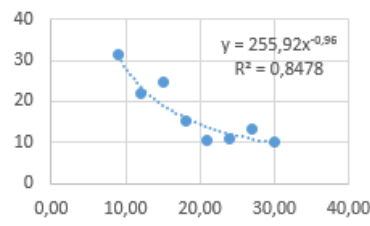
B9



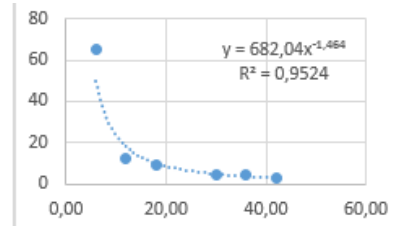
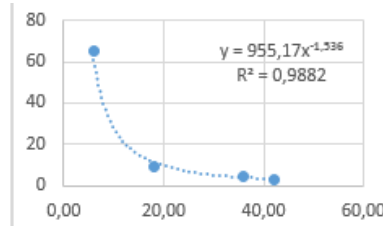
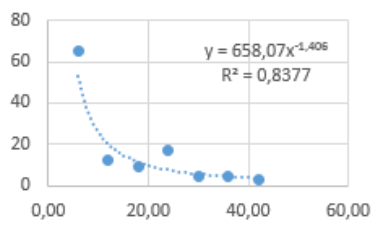
B10



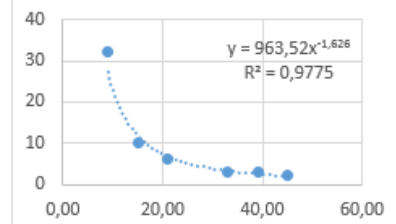
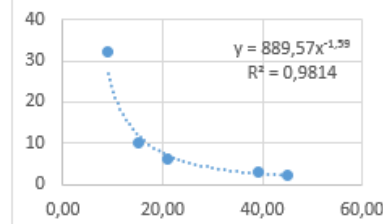
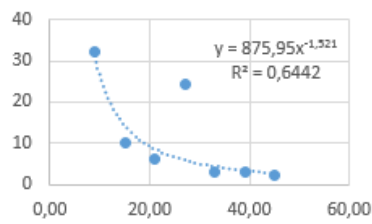
B11



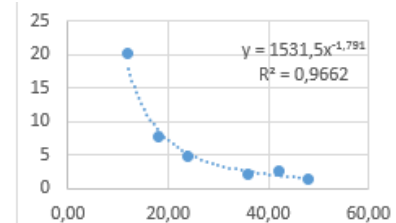
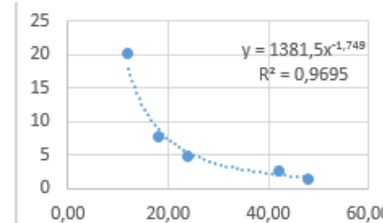
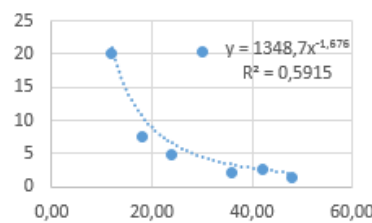
B12



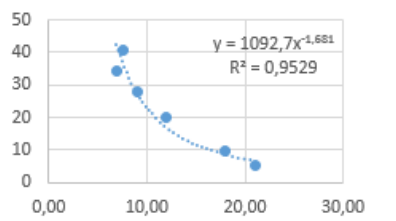
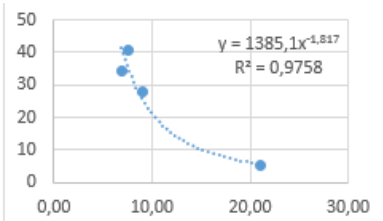
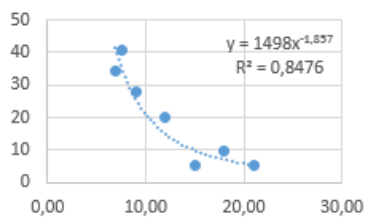
B13



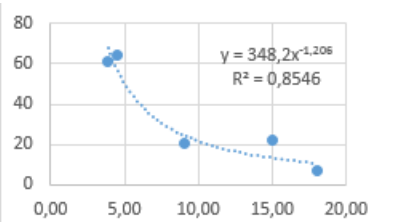
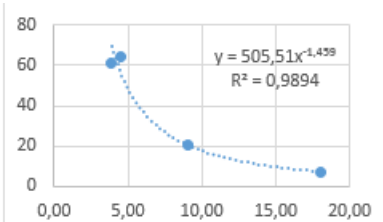
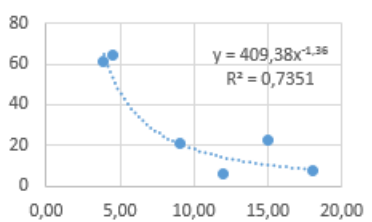
B14



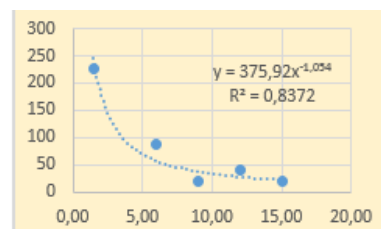
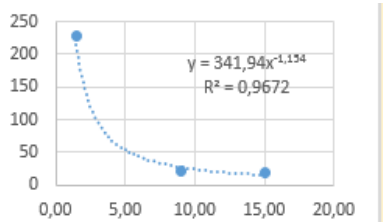
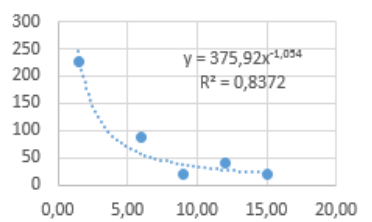
B15



B16



B17



Prilog 2: Dozvoljene količine eksplozivnog punjenja za određene udaljenosti

B1					
R	Q ₀	Q ₁	Q ₂	% ₁	% ₂
10	0,42	0,40	0,49	94,57	115,94
20	1,68	1,59	1,95	94,57	115,94
30	3,79	3,58	4,39	94,57	115,94
40	6,73	6,37	7,81	94,57	115,94
50	10,52	9,95	12,20	94,57	115,94
60	15,15	14,33	17,57	94,57	115,94
70	20,62	19,50	23,91	94,57	115,94
80	26,94	25,47	31,23	94,57	115,94
90	34,09	32,24	39,52	94,57	115,94
100	42,09	39,80	48,80	94,57	115,94

B2					
R	Q ₀	Q ₁	Q ₂	% ₁	% ₂
10	0,45	0,37	0,54	81,15	118,57
20	1,82	1,47	2,15	81,15	118,57
30	4,09	3,32	4,85	81,15	118,57
40	7,27	5,90	8,62	81,15	118,57
50	11,35	9,21	13,46	81,15	118,57
60	16,35	13,27	19,38	81,15	118,57
70	22,25	18,06	26,38	81,15	118,57
80	29,06	23,59	34,46	81,15	118,57
90	36,78	29,85	43,61	81,15	118,57
100	45,41	36,85	53,85	81,15	118,57

B3					
R	Q ₀	Q ₁	Q ₂	% ₁	% ₂
10	0,29	0,32	0,40	111,30	140,56
20	1,15	1,28	1,61	111,30	140,56
30	2,58	2,87	3,63	111,30	140,56
40	4,59	5,11	6,45	111,30	140,56
50	7,17	7,98	10,08	111,30	140,56
60	10,33	11,49	14,52	111,30	140,56
70	14,06	15,64	19,76	111,30	140,56
80	18,36	20,43	25,81	111,30	140,56
90	23,24	25,86	32,66	111,30	140,56
100	28,69	31,93	40,32	111,30	140,56

B4					
-----------	--	--	--	--	--

R	Q ₀	Q ₁	Q ₂	% ₁	% ₂
10	0,60	0,46	0,65	75,48	106,96
20	2,41	1,82	2,58	75,48	106,96
30	5,43	4,10	5,81	75,48	106,96
40	9,66	7,29	10,33	75,48	106,96
50	15,09	11,39	16,14	75,48	106,96
60	21,73	16,40	23,24	75,48	106,96
70	29,57	22,32	31,63	75,48	106,96
80	38,63	29,15	41,31	75,48	106,96
90	48,89	36,90	52,29	75,48	106,96
100	60,35	45,55	64,55	75,48	106,96

B5					
R	Q ₀	Q ₁	Q ₂	% ₁	% ₂
10	2,82	1,70	1,51	60,06	53,56
20	11,30	6,79	6,05	60,06	53,56
30	25,42	15,27	13,62	60,06	53,56
40	45,20	27,15	24,21	60,06	53,56
50	70,62	42,42	37,82	60,06	53,56
60	101,69	61,08	54,46	60,06	53,56
70	138,42	83,13	74,13	60,06	53,56
80	180,79	108,58	96,83	60,06	53,56
90	228,81	137,42	122,54	60,06	53,56
100	282,48	169,66	151,29	60,06	53,56

B6					
R	Q ₀	Q ₁	Q ₂	% ₁	% ₂
10	0,35	0,35	0,36	98,16	103,58
20	1,41	1,38	1,46	98,16	103,58
30	3,17	3,11	3,28	98,16	103,58
40	5,63	5,53	5,83	98,16	103,58
50	8,80	8,64	9,12	98,16	103,58
60	12,67	12,44	13,13	98,16	103,58
70	17,25	16,93	17,87	98,16	103,58
80	22,53	22,12	23,34	98,16	103,58
90	28,52	27,99	29,54	98,16	103,58
100	35,21	34,56	36,46	98,16	103,58

B7					
-----------	--	--	--	--	--

R	Q ₀	Q ₁	Q ₂	% ₁	% ₂
10	0,49	0,44	0,39	89,42	80,67
20	1,96	1,75	1,58	89,42	80,67
30	4,41	3,94	3,55	89,42	80,67
40	7,83	7,01	6,32	89,42	80,67
50	12,24	10,95	9,87	89,42	80,67
60	17,63	15,76	14,22	89,42	80,67
70	23,99	21,45	19,35	89,42	80,67
80	31,34	28,02	25,28	89,42	80,67
90	39,66	35,46	31,99	89,42	80,67
100	48,96	43,78	39,50	89,42	80,67

B8					
R	Q ₀	Q ₁	Q ₂	% ₁	% ₂
10	0,33	0,33		100,48	
20	1,32	1,33		100,48	
30	2,97	2,98		100,48	
40	5,28	5,30		100,48	
50	8,25	8,29		100,48	
60	11,88	11,93		100,48	
70	16,16	16,24		100,48	
80	21,11	21,21		100,48	
90	26,72	26,85		100,48	
100	32,99	33,15		100,48	

B9					
R	Q ₀	Q ₁	Q ₂	% ₁	% ₂
10	0,56	0,56	0,52	100,54	93,58
20	2,22	2,23	2,08	100,54	93,58
30	5,00	5,03	4,68	100,54	93,58
40	8,89	8,93	8,32	100,54	93,58
50	13,89	13,96	12,99	100,54	93,58
60	19,99	20,10	18,71	100,54	93,58
70	27,22	27,36	25,47	100,54	93,58
80	35,55	35,74	33,26	100,54	93,58
90	44,99	45,23	42,10	100,54	93,58
100	55,54	55,84	51,97	100,54	93,58

B10					
R	Q ₀	Q ₁	Q ₂	% ₁	% ₂
10	1,44	1,44	1,66	100,22	115,10
20	5,77	5,78	6,64	100,22	115,10
30	12,97	13,00	14,93	100,22	115,10
40	23,06	23,11	26,54	100,22	115,10
50	36,03	36,11	41,47	100,22	115,10
60	51,89	52,00	59,72	100,22	115,10
70	70,62	70,78	81,29	100,22	115,10
80	92,24	92,44	106,17	100,22	115,10
90	116,75	117,00	134,37	100,22	115,10
100	144,13	144,44	165,89	100,22	115,10

B11					
R	Q ₀	Q ₁	Q ₂	% ₁	% ₂
10	0,49	0,40	0,52	80,39	104,49
20	1,98	1,59	2,06	80,39	104,49
30	4,44	3,57	4,64	80,39	104,49
40	7,90	6,35	8,26	80,39	104,49
50	12,35	9,93	12,90	80,39	104,49
60	17,78	14,29	18,58	80,39	104,49
70	24,20	19,45	25,29	80,39	104,49
80	31,61	25,41	33,03	80,39	104,49
90	40,00	32,16	41,80	80,39	104,49
100	49,39	39,70	51,60	80,39	104,49

B12					
R	Q ₀	Q ₁	Q ₂	% ₁	% ₂
10	0,69	0,65	0,81	93,75	115,95
20	2,78	2,60	3,22	93,75	115,95
30	6,25	5,86	7,25	93,75	115,95
40	11,11	10,42	12,89	93,75	115,95
50	17,37	16,28	20,14	93,75	115,95
60	25,01	23,44	29,00	93,75	115,95
70	34,04	31,91	39,47	93,75	115,95
80	44,46	41,68	51,55	93,75	115,95
90	56,27	52,75	65,24	93,75	115,95
100	69,46	65,12	80,54	93,75	115,95

B13					
R	Q ₀	Q ₁	Q ₂	% ₁	% ₂
10	0,69	0,84	0,85	121,68	122,60
20	2,78	3,38	3,41	121,68	122,60
30	6,25	7,60	7,66	121,68	122,60
40	11,11	13,52	13,62	121,68	122,60
50	17,36	21,12	21,28	121,68	122,60
60	25,00	30,42	30,65	121,68	122,60
70	34,03	41,40	41,72	121,68	122,60
80	44,44	54,08	54,49	121,68	122,60
90	56,25	68,44	68,96	121,68	122,60
100	69,44	84,50	85,13	121,68	122,60

B14					
R	Q ₀	Q ₁	Q ₂	% ₁	% ₂
10	0,66	0,79	0,79	119,99	119,81
20	2,63	3,15	3,15	119,99	119,81
30	5,91	7,10	7,08	119,99	119,81
40	10,51	12,61	12,59	119,99	119,81
50	16,42	19,71	19,68	119,99	119,81
60	23,65	28,38	28,34	119,99	119,81
70	32,19	38,63	38,57	119,99	119,81
80	42,05	50,45	50,38	119,99	119,81
90	53,22	63,86	63,76	119,99	119,81
100	65,70	78,83	78,71	119,99	119,81

B15					
R	Q ₀	Q ₁	Q ₂	% ₁	% ₂
10	0,96	0,94	0,86	98,40	89,46
20	3,83	3,77	3,43	98,40	89,46
30	8,62	8,48	7,71	98,40	89,46
40	15,32	15,08	13,71	98,40	89,46
50	23,94	23,56	21,42	98,40	89,46
60	34,47	33,92	30,84	98,40	89,46
70	46,92	46,17	41,98	98,40	89,46
80	61,28	60,31	54,83	98,40	89,46
90	77,56	76,33	69,39	98,40	89,46
100	95,76	94,23	85,67	98,40	89,46

B16					
R	Q ₀	Q ₁	Q ₂	% ₁	% ₂
10	1,18	1,19	0,88	101,22	74,19
20	4,72	4,78	3,50	101,22	74,19
30	10,62	10,75	7,88	101,22	74,19
40	18,88	19,11	14,01	101,22	74,19
50	29,50	29,86	21,89	101,22	74,19
60	42,48	43,00	31,52	101,22	74,19
70	57,82	58,53	42,90	101,22	74,19
80	75,53	76,45	56,04	101,22	74,19
90	95,59	96,75	70,92	101,22	74,19
100	118,01	119,45	87,56	101,22	74,19

B17					
R	Q ₀	Q ₁	Q ₂	% ₁	% ₂
10	0,38	0,73		190,90	
20	1,53	2,92		190,90	
30	3,44	6,57		190,90	
40	6,12	11,68		190,90	
50	9,56	18,25		190,90	
60	13,76	26,27		190,90	
70	18,73	35,76		190,90	
80	24,47	46,71		190,90	
90	30,97	59,12		190,90	
100	38,23	72,98		190,90	



KLASA: 602-04/21-01/125
URBROJ: 251-70-11-21-2
U Zagrebu, 13.09.2021.

Mateja Katalinić, studentica

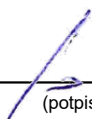
RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/21-01/125, URBROJ: 251-70-11-21-1 od 27.04.2021. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

NETIPIČNE VRIJEDNOSTI KOD MJERENJA SEIZMIČKIH UTJECAJA MINIRANJA

Za voditelja ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada Doc.dr.sc. Siniša Stanković nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i suvoditelja Izv.prof.dr.sc. Dalibor Kuhinek .

Voditelj

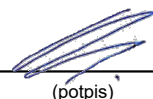


(potpis)

Doc.dr.sc. Siniša Stanković

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za
završne i diplomske ispite:

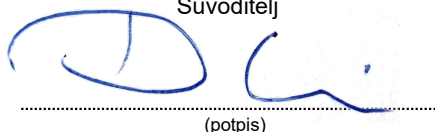


(potpis)

Doc.dr.sc. Dubravko
Domitrović

(titula, ime i prezime)

Suvoditelj

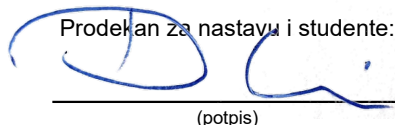


(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Dalibor Kuhinek

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:



(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Dalibor
Kuhinek

(titula, ime i prezime)