

Utjecaj promjera emulzijskih eksploziva smanjene gustoće na brzinu detonacije

Kušek, Matija

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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:169:462789>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-25**



Repository / Repozitorij:

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



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

**UTJECAJ PROMJERA EMULZIJSKIH EKSPLOZIVA SMANJENE GUSTOĆE
NA BRZINU DETONACIJE**

Diplomski rad

Matija Kušek

R 312

Zagreb, 2024.



KLASA: 602-01/24-01/132
URBROJ: 251-70-11-24-2
U Zagrebu, 20.9.2024

Matija Kušek, student


RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/24-01/132, URBROJ: 251-70-11-24-1 od 01.07,2024. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

UTJECAJ PROMJERA EMULZIJSKIH EKSPLOZIVA SMANJENE GUSTOĆE NA BRZINU DETONACIJE

Za voditelja ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada izv.prof.dr.sc. Vinko Škrlec nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i suvoditeljicu dr.sc. Ivana Dobrilović.

Voditelj




(potpis)

izv.prof.dr.sc. Vinko Škrlec

(titula, ime i prezime)


Suvoditeljica


.....
(potpis)

dr.sc. Ivana Dobrilović

.....
(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za
završne i diplomske ispite:

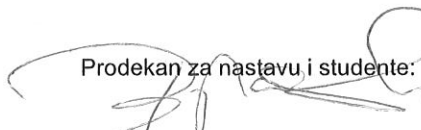


(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Mario Klanfar

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:



(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje
Pašić

(titula, ime i prezime)

UTJECAJ PROMJERA EMULZIJSKIH EKSPLOZIVA SMANJENE GUSTOĆE NA
BRZINU DETONACIJE

MATIJA KUŠEK

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za rudarstvo i geotehniku
Pierottijeva 6, 10 002 Zagreb

Sažetak

Emulzijski eksplozivi smanjene gustoće koriste se zbog svojih pogodnih detonacijskih i eksplozivnih svojstava, osobito u uvjetima gdje je potrebno smanjiti štetne učinke miniranja, poput seizmičkog utjecaja na okolne objekte. Emulzijski eksplozivi, senzibilizirani materijalima manje gustoće, omogućuju smanjenje udarnog djelovanja detonacijske energije na stijensku masu. Ovaj rad istražuje utjecaj promjera emulzijskih eksploziva smanjene gustoće na brzinu detonacije. Mjerenja su provedena s različitim promjerima eksploziva i dva načina iniciranja, analizirajući zavisnost brzine detonacije i promjera eksploziva.

Ključne riječi: eksploziv smanjene gustoće, brzina detonacije, promjer eksploziva

Diplomski rad sadrži: 31 stranica, 9 tablica, 15 slika i 11 referenci.

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta
Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Dr. sc. Vinko Škrlec, izvanredni profesor RGNF

Komentorica: Dr.sc. Ivana Dobrilović

Ocjenjivači: Dr.sc. Vinko Škrlec, izvanredni profesor RGNF
Dr.sc. Mario Dobrilović, redoviti profesor RGNF
Dr.sc. Siniša Stanković, docent RGNF

Datum obrane: 30. rujna 2024.

THE EFFECT OF DIAMETER OF LOW DENSITY EMULSION EXPLOSIVES ON
DETONATION VELOCITY

MATIJA KUŠEK

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Mining Engineering and Geotechnics,
Pierottijeva 6, 10 002 Zagreb

Abstract

Low-density emulsion explosives are used due to their favorable detonating and explosive properties, especially in conditions where it is necessary to reduce the harmful effects of blasting, such as seismic impact on nearby structures. Emulsion explosives, sensitized with lower density materials, allow for the reduction of the shock effect of detonation energy on the rock mass. This paper investigates the influence of the diameter of low-density emulsion explosives on detonation velocity. Measurements were conducted with various explosive diameters and two initiation methods, analyzing the dependence between detonation velocity and explosive diameter.

Keywords: low-density explosives; velocity of detonation, explosive diameter

Thesis contains: 31 pages, 9 tables, 15 figures and 11 references.

Original in: Croatian

Thesis deposited at: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Associate Professor Vinko Škrlec, PhD

Tech. assistance: PhD Ivana Dobrilović

Reviewers: Associate Professor Vinko Škrlec, PhD
Full Professor Mario Dobrilović, PhD
Assistant Professor Siniša Stanković, PhD

Date of defense: September 30th, 2024

SADRŽAJ

1. UVOD	5
2. EKSPLOZIVI	6
2.1. Emulzijski eksplozivi	7
2.2. Eksplozivi smanjene gustoće	8
3. MINERSKO TEHNIČKE KARAKTERISTIKE EKSPLOZIVA	10
3.1. Volumen i specifični tlak plinova eksplozije	10
3.2. Radna sposobnost eksploziva	10
3.3. Kritična masa i promjer	11
3.4. Energija eksploziva	11
3.5. Bilanca kisika	12
3.6. Temperatura eksplozije	12
3.7. Brizantnost eksploziva	12
3.8. Osjetljivost na udar	13
3.9. Prijenos detonacije	14
3.10. Brzina detonacije	14
4. ODREĐIVANJE BRZINE DETONACIJE	15
4.1. Mjerenje brzine detonacije emulzijskih eksploziva smanjene gustoće	17
4.2. Rezultati mjerenja brzine detonacije po pojedinim promjerima	20
4.3. Analiza rezultata mjerenja brzine detonacije po pojedinim promjerima	22
7. ZAKLJUČAK	29
8. LITERATURA	30

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Opća podjela eksplozivnih tvari (Dobrilović 2008).....	7
Slika 3-1. Trauzlova proba (Krsnik, 1989).....	10
Slika 3-2. Hessova proba (Krsnik, 1989)	13
Slika 4-1. Kontinitro AS Explomet 2 (Kontinitro, 2019).....	15
Slika 4-2. Emulzijski eksploziv smanjene gustoće.....	16
Slika 4-3. Ekspandirani polistiren (EPS).....	17
Slika 4-4. Shema čelične cijevi.....	18
Slika 4-5. Shema mjerenja brzine (TED)	19
Slika 4-6. Shema mjerenja brzine (TED+B)	19
Slika 4-7. Grafički prikaz srednjih vrijednosti promjera i brzina – 1. segment	22
Slika 4-8. Grafički prikaz srednjih vrijednosti promjera i brzina – 2. segment	24
Slika 4-9. Grafički prikaz srednjih vrijednosti promjera i brzina – 3. segment	25
Slika 4-10. Grafički prikaz srednjih vrijednosti promjera i brzina – 4. segment	26
Slika 4-11. Grafički prikaz srednjih vrijednosti promjera i brzina – 5. segment	27
Slika 4-12. Grafički prikaz srednjih vrijednosti promjera i brzina po ukupnoj duljini cijevi	28

POPIS TABLICA

Tablica 4-1. Specifikacije emulzijske matrice (Dobrilović et al., 2016).	16
Tablica 4-2. Srednje vrijednosti geometrijskih parametara čeličnih cijevi.	19
Tablica 4-3. Srednje vrijednosti udaljenosti osjetila po segmentima.	20
Tablica 4-4. Srednje vrijednosti brzine detonacije za pojedine promjere na 1. segmentu. .	20
Tablica 4-5. Srednje vrijednosti brzine detonacije za pojedine promjere na 2. segmentu. .	21
Tablica 4-6. Srednje vrijednosti brzine detonacije za pojedine promjere na 3. segmentu. .	21
Tablica 4-7. Srednje vrijednosti brzine detonacije za pojedine promjere na 4. segmentu. .	21
Tablica 4-8. Srednje vrijednosti brzine detonacije za pojedine promjere na 5. segmentu. .	21
Tablica 4-9. Srednje vrijednosti izmjerenih brzina detonacije za pojedine promjere po cijeloj duljini segmenata.	22

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
P	g/cm^3	gustoća
T	$^{\circ}\text{C}$	temperatura
p	bar	tlak
V	dm^3	volumen
m	Kg	masa
\emptyset, R	cm	vanjski promjer cijevi
pH	-	ph vrijednost
d	mm	debljina stijenke cijevi
L	mm	duljina cijevi
ϕ	mm	unutarnji promjer cijevi
b	mm	udaljenost od početka cijevi do prvog osjetila
a	mm	udaljenost između osjetila
VOD	m/s	srednja brzina detonacije
v_d	m/s	brzina detonacije

1. UVOD

Primjenom klasičnih gospodarskih eksploziva i uobičajenih metoda miniranja uz podešavanje parametara morskog polja, u neposrednoj okolini objekata često se ne postiže se dovoljna redukcija potencijalno štetnih utjecaja miniranja uz zadovoljavajuće drobljenje stijene odnosno učinak miniranja. Zbog toga je došlo do razvoja eksploziva smanjene gustoće (engl. *Low Density Explosives, LDE*) koji imaju povoljnije minersko-tehničke karakteristike koje osiguravaju mogućnost primijene u uvjetima miniranja gdje upotreba klasičnih gospodarski eksploziva ne zadovoljava te iste uvjete.

Temeljna izvedba eksploziva smanjene gustoće bazira se na smanjenju gustoće eksploziva, a samim time se smanjuje i brzina detonacije.

Brzina detonacije je, po definiciji, brzina prostiranja detonacijskog vala kroz eksploziv. Neposredno iza fronte vala nalazi se zona kemijskih reakcija unutar koje se oslobađa toplina detonacija koja zagrijava visokostlačene plinovite produkte. Oni su nositelji djelovanja eksploziva u stijenskoj sredini te ekspanzijom obavljaju frakturiranje i fragmentiranje stijene.

Svrha ovog rada je odrediti utjecaj promjera emulzijskih eksploziva na brzinu detonacije kod iniciranja takvih eksploziva detonatorom (TED) i iniciranja detonatorom s pojačnikom (TED+B).

2. EKSPLOZIVI

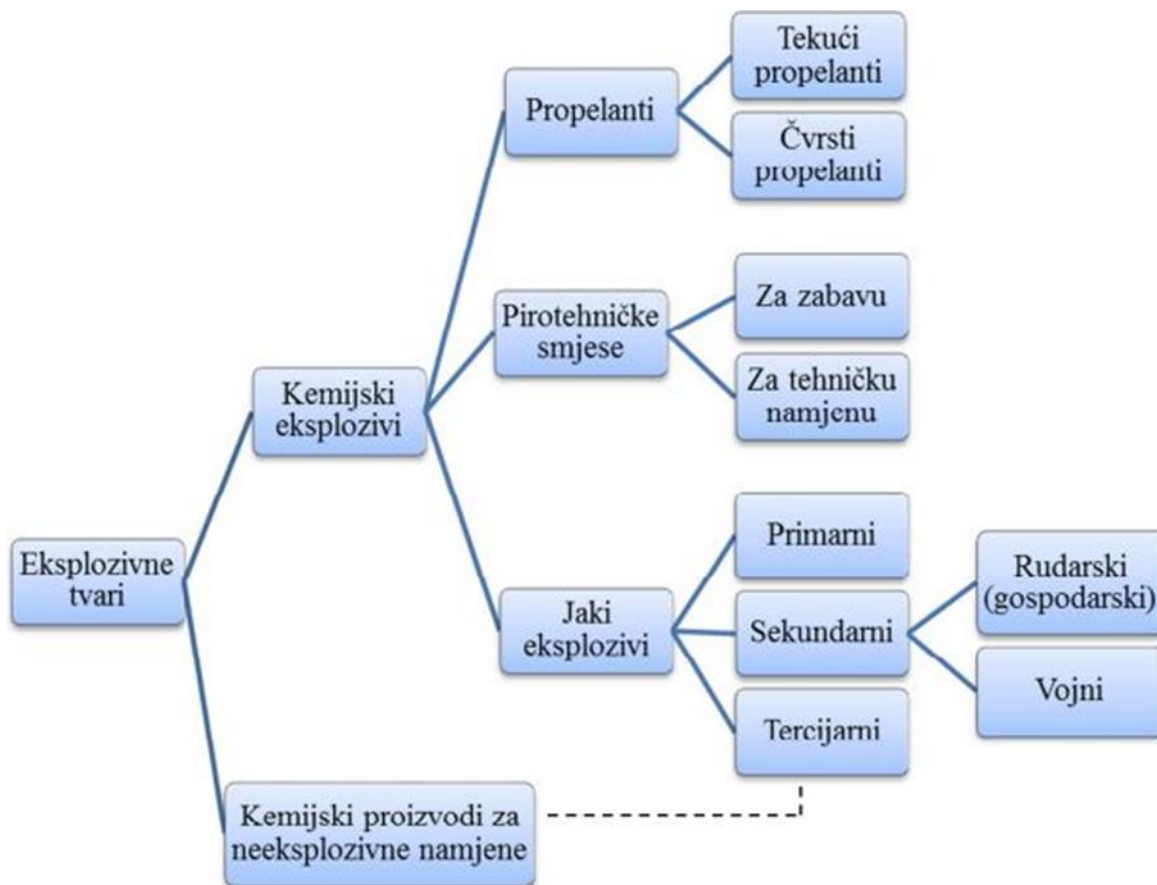
Eksplzivne tvari ili eksplozivi su kemijski spojevi ili smjese koje imaju sposobnost da pod utjecajem vanjskog energetskog impulsa detoniraju, odnosno da se kemijski razlažu u vrlo kratkom vremenskom razdoblju i pritom oslobađaju znatnu količinu plinova i topline (Krsnik 1989).

Upotreba eksploziva je mnogostruka. Eksploziv se koristi u vojne svrhe, u strojarstvu, automobilskoj i avioindustriji, čak i u medicini. Primjenjuje se i pri izradi spomenika (*White Horse*, SAD). Najviše eksploziva (u jedinicama mase) koristi u rudarstvu i građevinarstvu (Ester 2005).

U rudarstvu se najčešće koriste eksplozivi iz kategorije jakih eksploziva (engl. *High explosives*). Ovi eksplozivi se dijele na primarne (inicijalne), sekundarne (brizantne) i tercijarne eksplozive.

Primarni ili inicirajući eksplozivi, kako se još nazivaju, koriste se za iniciranje detonacije drugih eksploziva i na prvom su mjestu u lancu iniciranja (Bohanek 2013). Njihova su osnovna svojstva iznimna osjetljivost na vanjske impulse te sposobnost razvijanja maksimalne brzine detonacije u jako kratkom vremenu. Zbog tih se svojstava koriste u različitim vrstama detonatora. Najčešće korišteni inicijalni eksplozivi u praksi su: živin fulminat, olovni azid, srebrni azid, olovni stifemat, tetraacil i diazodinitrofenol.

Sekundarni eksplozivi su manje osjetljivi na početne impulse te za postizanje stabilne detonacije zahtijevaju znatno veću energiju. Iz navedenog razloga iniciraju se inicijalnim sredstvima koja sadrže primarne eksplozive. Slika 2-1 prikazuje opću podjelu eksplozivnih tvari.



Slika 2-1. Opća podjela eksplozivnih tvari (Dobrilović 2008).

Temeljem kemijskog sastava, eksplozivi se mogu dodatno podijeliti na monomolekularne eksplozive i na eksplozivne smjese.

2.1. Emulzijski eksplozivi

Proizvodnja emulzijskih eksploziva temelji se na miješanju neeksplozivnih komponenti kako bi se dobila emulzijska matrica. Tako dobivena matrica nije eksploziv i nema eksplozivnih svojstava, njezina gustoća i homogenost ne podržavaju detonacijski proces, te se mora senzibilizirati kako bi se mogla koristiti kao eksploziv. Senzibilizacija uključuje dodavanje supstanci matrici koje smanjuju gustoću i uvode male mjehuriće ispunjene plinom tzv. „vruće točke“ (engl. *Hot Spots*). Pri detonaciji mjehurići plina (vruće točke) apsorbiraju energiju, zagrijavajući se na visoke temperature te tako omogućuju održavanje detonacije

stabilnom. Koriste se fizičke i kemijske metode senzibilizacije, pri čemu je odabir metode povezan s vrstom emulzijskog eksploziva bilo u patronima ili bilo u rasutom stanju.

Fizička senzibilizacija se koristi za proizvodnju emulzijskih eksploziva u patronama te uključuje dodavanje staklenih ili polimernih mikrosfera emulzijskoj matrici, ali ponekad se koristi i perlit. Količina senzibilizirajućeg sredstva u konačnoj formulaciji emulzijskih eksploziva obično se kreće od 1 % do 4 % maseno, ovisno o vrsti mikrosfera i željenoj gustoći. Polimerne mikrosfere učinkovitije su u smanjenje gustoće od staklenih (Mendes et al. 2014).

Kemijska senzibilizacija uključuje kemijsku reakciju između senzibilizirajuće otopine i oksidacijskog sredstva u matrici emulzijskog eksploziva. Kao kemijska senzibilizirajuća sredstva uglavnom se koriste otopine natrijeva nitrita. Njihova upotreba temelji se na reakciji između natrijeva nitrita i kiseline amonijeva nitrata u prisutnosti tiouree. Ta reakcija proizvodi dušik koji u obliku mikro mjehurića, ispunjava cijeli volumen emulzije, smanjujući gustoću i stvarajući „vruće točke“ (Kramarczyk et al. 2022.). Kemijska senzibilizacija može biti problematična u hladnim okruženjima ponekad zahtijevajući dodatnu acidifikaciju kako bi se postigla željena brzina reakcija (Mertuszka & Kramarczyk 2021.).

Emulzijski eksplozivi nude brojne prednosti u odnosu na druge vrste eksploziva, čineći ih izuzetno atraktivnim za različite primjene, osobito u industriji rudarstva i građevine. Ove prednosti obuhvaćaju sigurnost, prilagodljivost, ekološke aspekte, performanse i otpornost na teške uvjete.

2.2. Eksplozivi smanjene gustoće

Eksplozivi smanjene gustoće (engl. *Low-density explosives*, LDE) su oni čija gustoću iznosi manje od $0,80 \text{ g/cm}^3$, dok se eksplozivi gustoće manje od $0,20 \text{ g/cm}^3$ nazivaju eksplozivima jako smanjene gustoće (engl. *Ultra low-density explosives*, ULDE) (Baranov et al, 1996).

Eksplozivi smanjene gustoće koriste se kod:

- iskopa tunela,

- izrada podzemnih prostorija,
- izrada podzemnih odlagališta radioaktivnog otpada,
- zavarivanje metala eksplozivom,
- oblikovanje metala eksplozivom,
- izrada umjetničkih djela korištenjem energije eksploziva i sl.,
- smanjenje udarnog djelovanja eksploziva na okolinu minske bušotine,
- miniranja stijena male čvrstoće,
- konturna miniranja – bolja zaštita i očuvanje stabilnosti konturne površine u odnosu na miniranja s komercijalnim eksplozivima,
- smanjenje problema s lošim odlomom stijene u stopi etaže,
- smanjenje prekoprofilnog iskopa,
- poboljšanje fragmentacije i smanjenje troškova miniranja u odnosu na komercijalne eksplozive,
- smanjenje štetnih utjecaja miniranja na okoliš i
- rastavljanje bojeve municije.

Dobivaju se na način da se postojećim eksplozivima, odnosno eksplozivnim smjesama smanji gustoća dodavanjem inertnog ili eksplozivnog materijala značajno manje gustoće.

Materijali koji se dodaju eksplozivima mogu se svrstati u dvije grupe:

1. Materijali koji imaju mogućnost sagorijevanja, odnosno mogućnost sudjelovanja u kemijskoj reakciji oksidacije (polistiren, ekspandirani polistiren, poliuretanska pjena, ugljen u prahu, piljevina i drveno brašno, otpaci proizvodnje šećera, ljuske žitarica i kikirikija, granule celuloze i sl.).
2. Inertni materijali, odnosno materijali koji nisu podložni fizičkim, kemijskim ili biološkim promjenama te nemaju ulogu goriva u eksplozivu (perliti, vermakuliti, staklene mikrokuglice, plastične mikrokuglice i sl.) (Škrlec, 2015).

3. MINERSKO TEHNIČKE KARAKTERISTIKE EKSPLOZIVA

3.1. Volumen i specifični tlak plinova eksplozije

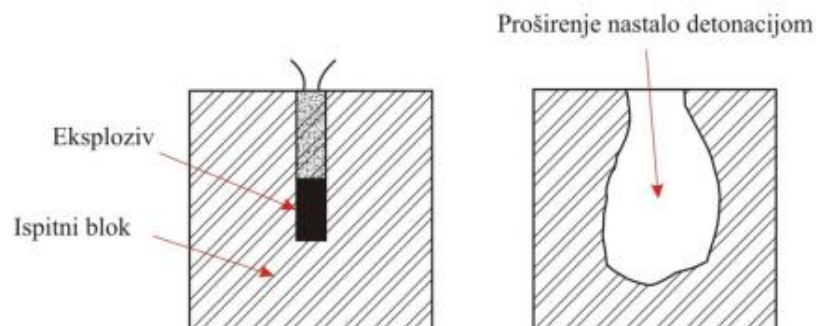
Količina plinova koji nastaju tijekom detonacije eksploziva ovisi o vrsti eksploziva. Volumen plinova nastalih detonacijom 1 kg eksploziva izražava se u dm^3 i mjeri se pri temperaturi od 0°C i tlaku od 1 bar.

Specifični tlak odnosi se na maksimalni tlak koji nastaje tijekom detonacije 1 kg eksploziva u prostoru od 1 dm^3 , izražen u barima (Krsnik, 1989).

Tlak plinova ovisi o količini proizvedenih plinova, temperaturi eksplozije i volumenu u kojem je izvedena eksplozija. Kod brizantnih eksploziva tlak plinova može doseći i nekoliko tisuća bara (Škrlec, 2015).

3.2. Radna sposobnost eksploziva

Snaga ili radna sposobnost eksploziva određuje se putem Trauzlove probe. Test se provodi na olovnom cilindru promjera 200 mm i visine 200 mm, u čijem se središtu buši otvor promjera 25 mm i dubine 125 mm. U taj otvor stavlja se 10 g eksploziva s električnim detonatorom, a ostatak otvora puni se suhim pijeskom. Nakon detonacije eksploziva, otvor se proširi, a njegova nova zapremina mjeri se pomoću vode iz kalibrirane menzure. Volumen proširenja, izražen u cm^3 , mjerilo je radne sposobnosti eksploziva (Krsnik, 1989). Na slici 3-1. prikazana je Trauzlova proba.



Slika 3-1. Trauzlova proba (Krsnik, 1989)

Danas se, s obzirom na visoku gustoću olova ($\rho = 11,35 \text{ g/cm}^3$), umjesto njega koriste lakši materijali poput aluminija ($\rho = 2,70 \text{ g/cm}^3$) koji olakšavaju rukovanje (Škrlec, 2015).

3.3. Kritična masa i promjer

Na brzinu detonacije eksploziva uvelike utječe promjer patrone odnosno minske bušotine. Ukoliko je promjer nedovoljne veličine detonacija može izostati ili može doći do prekida detonacije. Kritični promjer definira najmanji potrebni promjer da bi se postigla stabilna deformacija za pojedinu eksplozivnu tvar ili smjesu.

Kritična masa eksploziva predstavlja najmanju masu eksploziva koja se može dovesti do potpune detonacije, a zatim se preko kritične mase određuje kritični promjer patrone eksploziva kod koje je moguća detonacija.

Kritični promjer može iznositi reda veličine 1 mm kod npr. pentrita pa do nekoliko desetaka centimetara kod nekih gospodarskih eksploziva.

3.4. Energija eksploziva

Eksplozivna detonacija oslobađa veliku količinu energije, koja se javlja u dva osnovna oblika: udarna energija i plinska energija.

Udarna energija rezultat je visokog tlaka na fronti detonacije, odgovorna za lomljenje stijenske mase. Ova energija ovisi o gustoći punjenja, svojstvima eksploziva i brzini detonacije. Kako se udarni val udaljava od središta detonacije, tlak i energija opadaju, a udarni val prelazi u elastični val.

Plinska energija, s druge strane, nastaje ekspanzijom plinova visokog tlaka i temperature nakon prolaska detonacijske fronte. Ova energija omogućuje širenje pukotina u stijenskoj masi i raspršivanje materijala (Škrlec, 2015).

3.5. Bilanca kisika

Bilanca kisika ima važnu ulogu u razvoju otrovnih plinova. Ova bilanca predstavlja omjer kisika prisutnog u eksplozivu i kisika potrebnog za potpunu oksidaciju svih gorivih tvari unutar eksploziva.

Ako nakon eksplozije ostane višak kisika, bilanca je pozitivna, što može dovesti do stvaranja otrovnih dušikovih oksida. S druge strane, manjak kisika rezultira negativnom bilancom, pri čemu dolazi do nepotpune oksidacije i oslobađanja manje energije. Kada je bilanca kisika uravnotežena, oslobađa se maksimalna količina energije iz eksplozivnog punjenja.

Gospodarski eksplozivi trebali bi imati blago pozitivnu ili uravnoteženu bilancu kisika. Negativna bilanca može dovesti do stvaranja otrovnog ugljičnog monoksida, dok izrazito pozitivna bilanca uzrokuje stvaranje još otrovnijih dušikovih oksida. Pri izračunu bilance kisika treba uzeti u obzir kisik potreban za izgaranje obloge patrone, kao i kisik potreban za oksidaciju ugljene prašine prilikom miniranja (Krsnik, 1989).

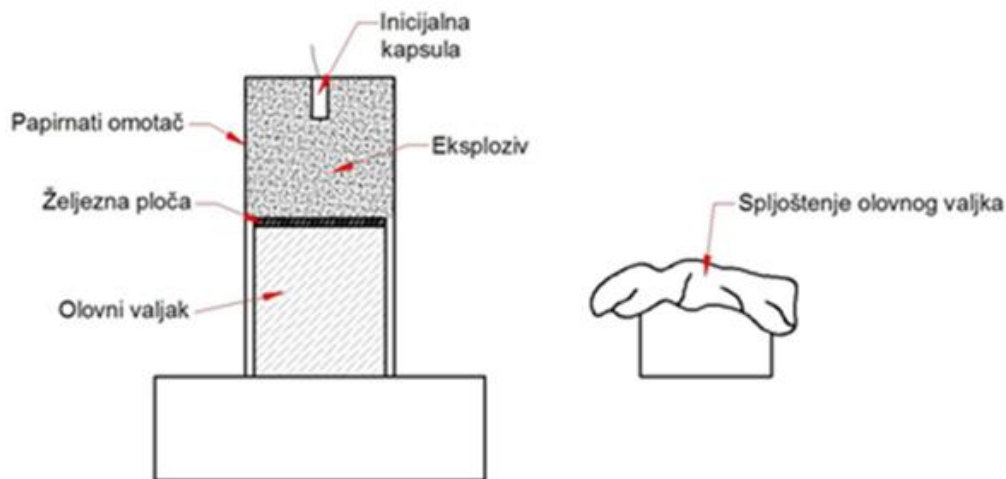
3.6. Temperatura eksplozije

Temperatura eksplozije predstavlja maksimalnu temperaturu koja se postiže detonacijom eksploziva u uvjetima konstantnog volumena. Teoretski, ona varira između 1000°C i 6000°C, no stvarne temperature su niže zbog hlađenja plinova u dodiru sa stijenom. Stvarne temperature koje nastaju detonacijom gospodarskih eksploziva obično se kreću između 2100°C i 4200°C.

3.7. Brizantnost eksploziva

Brizantnost, ili radna snaga eksploziva, odnosi se na razorno djelovanje eksploziva koje je rezultat dinamičkog udara proizvoda detonacije na okolnu sredinu.

Brizantnost se određuje različitim metodama, uključujući Hessovu probu i Kastovu metodu. Hessova proba provodi se tako da se na dva olovna valjka stavi čelični cilindar sa 100 g eksploziva, koji se zatim detonira rudarskom kapicom br. 8. Deformacija olovnih valjaka mjerilo je brizantnosti, izražena u milimetrima, kako je prikazano na slici 3-2. Kastova metoda uključuje mjerenje deformacije bakrenog cilindra određenih dimenzija (Ester, 2005).



Slika 3-2. Hessova proba (Krsnik, 1989)

3.8. Osjetljivost na udar

Osjetljivost na udar bitna je značajka eksploziva koja ovisi o njegovom kemijskom sastavu, a mora biti u određenim granicama kako bi se osiguralo sigurno rukovanje i transport. Eksplozivi koji se koriste u gospodarske svrhe trebaju biti neosjetljivi ili vrlo malo osjetljivi na udar i trenje.

Postoje dva načina ispitivanja osjetljivosti na udar. Prvi način uključuje Kastov aparat u koji se spušta uteg mase 2 kg s određene visine. Visina u centimetrima s koje se uteg spušta šest puta bez izazivanja detonacije mjerilo je osjetljivosti eksploziva. Drugi način, poznat kao BAM metoda, uključuje postupno povećanje kinetičke energije spuštanjem utega različitih masa s različitih visina. Osjetljivost se određuje prema kombinaciji mase utega i visine pada pri kojoj ne dolazi do detonacije.

3.9. Prijenos detonacije

Prijenos detonacije odnosi se na maksimalnu udaljenost između dvije eksplozivne patrone pri kojoj se detonacija jedne prenosi na drugu.

Testiranje se provodi tako da se dvije patrone mase 100 g i promjera 30 mm postave na ravnu pješčanu površinu, udaljene 4 cm jedna od druge. Jedna se patrona inicira rudarskom kapicom br. 8, a ako dođe do prijenosa detonacije na drugu patronu, razmak između patrona se povećava dok se ne utvrdi maksimalna udaljenost pri kojoj još uvijek dolazi do prijenosa detonacije. Kod vodoplastičnih eksploziva prijenos detonacije moguć je samo u slučaju međusobnog kontakta (Krsnik, 1989).

3.10. Brzina detonacije

Brzina detonacije ključna je karakteristika eksploziva, izravno povezana s brizantnošću, što je brzina kojom se detonacijski val širi od točke inicijacije do kraja eksplozivnog naboja (Krsnik, 1989). Na nju utječu različiti faktori kao što su: gustoća punjenja, kritični promjer eksplozivnog punjenja, snaga početnog impulsa koji se dovodi eksplozivnoj tvari.

4. ODREĐIVANJE BRZINE DETONACIJE

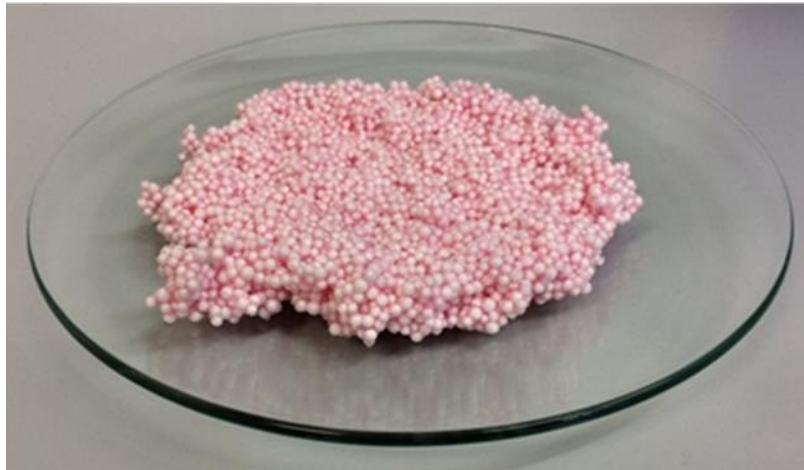
Brzina detonacije mjeri se prema zahtjevima norme *HRN EN 13631-14:2004 Eksplozivi za civilnu uporabu. Jaki eksplozivi 14. dio: Određivanje brzine detonacije (EN 13631.14:2004)*.

Brzina detonacije mjerena je pri svakom ispitivanju, a za mjerenje je korišten elektronski sat Explomet 2. Uređaj radi s točnošću od +/- 0,01 mikrosekunde te posjeduje mogućnost izračunavanja brzine detonacije i do 15.000 m/s. Raspodjela optičkih osjetila može biti potpuno nasumična jer je uređaj sposoban samostalno razaznati njihov poredak. On omogućuje rad s dvostrukim pojačanim optičkim osjetilima te za oko 30 % smanjuje trošak po metru optičkog kabela. Uređaj je prikazan na slici 4-1.



Slika 0-1. Kontinitro AS Explomet 2 (Kontinitro, 2019).

Za potreba mjerenja korišten je emulzijski eksploziv smanjene gustoće prikazana na slici 4-2. Gustoća eksploziva smanjena je dodavanjem granula ekspaniranog polistirena (EPS) u emulzijsku matricu. EPS je prosijan na sitima otvora 1,5 mm do 3,5 mm, a volumni omjer emulzijske matrice i EPS iznosi 40:60 odnosno maseni omjer emulzijske matrice i EPS iznosi 96,45:3,55.



Slika 0-2. Emulzijski eksploziv smanjene gustoće.

Specifikacije korištene emulzijske matrice za izradu emulzijskih eksploziva smanjene gustoće dane su u tablici 4-1.

Tablica 4-1. Specifikacije emulzijske matrice (Dobrilović et al., 2016).

Oznaka	Jedinica	Vrijednost
Udio dušika	%	24,8-26,5
pH (otopine oksidansa)	-	4,3
Gustoća	g/cm ³	1,40
Viskoznost pri 25°C (vratilo br. 7, 20 okr/min)	stabilnost	270

Gustoća emulzijske matrice određena je eksperimentalno, u skladu s normom *HRN EN 13631-13:2003: Eksplozivi za civilnu uporabu. Jaki eksplozivi, dio 14: Određivanje gustoće (EN 13631-13:2003)*.

Ekspandirani polistiren, odnosno EPS, se uglavnom koristi kao materijal za toplinsku i zvučnu izolaciju u građevinarstvu, a sama proizvodnja EPS-a započela je 1954. godine pod zaštićenim imenom *styropor*. EPS korišten u ovom mjerenju, proizveden je tehnologijom suspenzijske polimerizacije, a gustoće je $\rho = 0,019 \text{ g/cm}^3$. Na slici 4-3. prikazane su granule korištenog ekspaniranog polistirena.



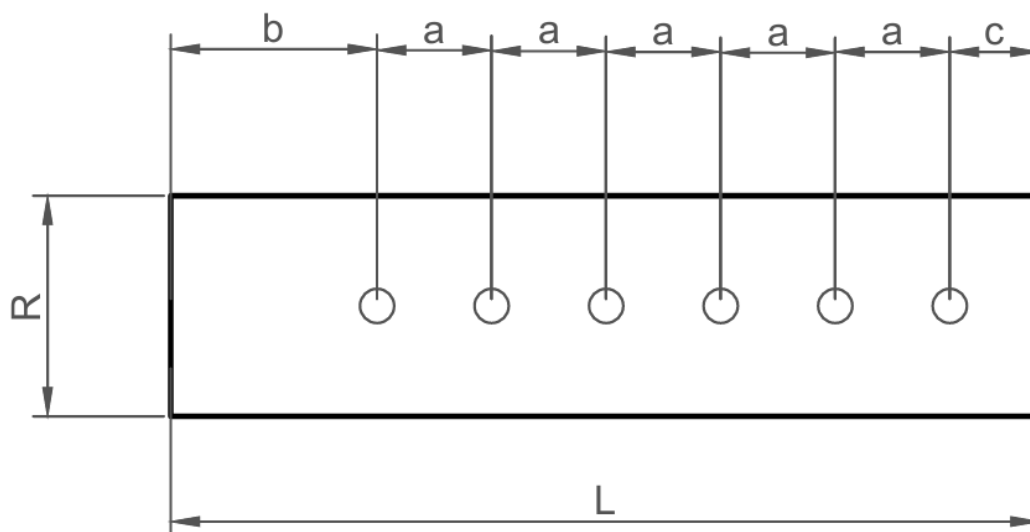
Slika 0-3. Ekspandirani polistiren (EPS).

4.1. Mjerenje brzine detonacije emulzijskih eksploziva smanjene gustoće

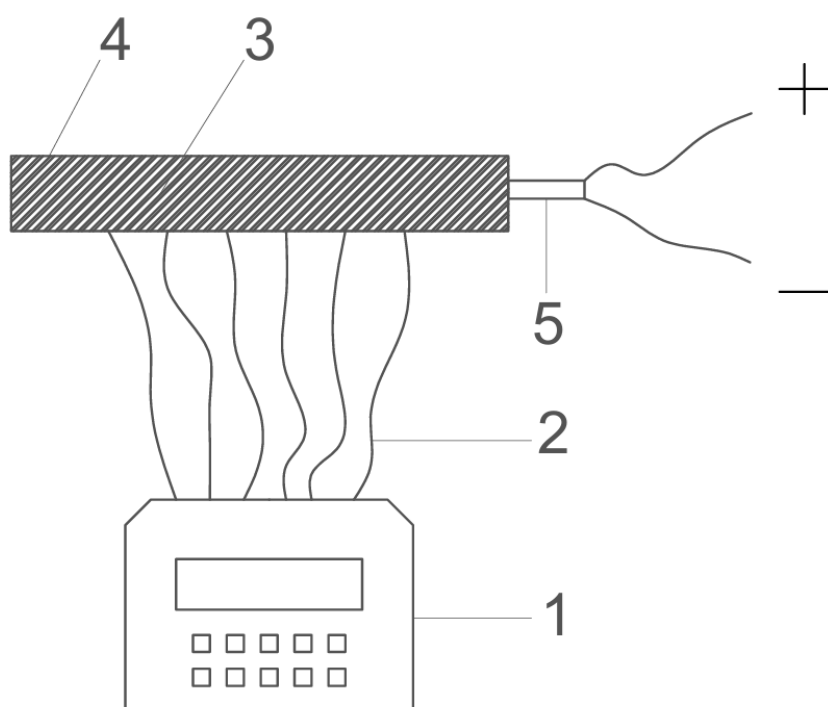
Mjerenje brzine detonacije (engl. *Velocity of Detonation*, VOD) provedeno je u uvjetima zatvorenosti odnosno u čeličnim cijevima, pri čemu su korištene čelične cijevi različitih promjera (R). Na slici 4-4. prikazan je uzdužni presjek čeličnih cijevi. Uzorci su inicirani pomoću trenutnih električnih detonatora (TED) i trenutnih električnih detonatora s pojačnicima (TED+B) mase 20 g. Shematski prikaz mjerenja je prikazan na slici 4-5. Za oba načina iniciranja, obavljeno je po tri mjerenja za svaki promjer, što je ukupno činilo 15 mjerenja po detonatoru, koristeći pet različitih promjera čeličnih cijevi. Prije postavljanja osjetila u otvore, izmjerena je osna udaljenost između otvora.

Geometrijski parametri korištenih cijevi za svako mjerenje, uključujući vanjski promjer, unutarnji promjer, debljinu stijenke i duljinu cijevi, prikazani su u tablici 4-2.

Brzina detonacije mjerena je osjetilima postavljenima na pet segmenata duž čeličnih cijevi. Srednje vrijednosti udaljenosti osjetila po svakom segmentu prikazane su u tablici 4-3.



Slika 4-4. Shema čelične cijevi

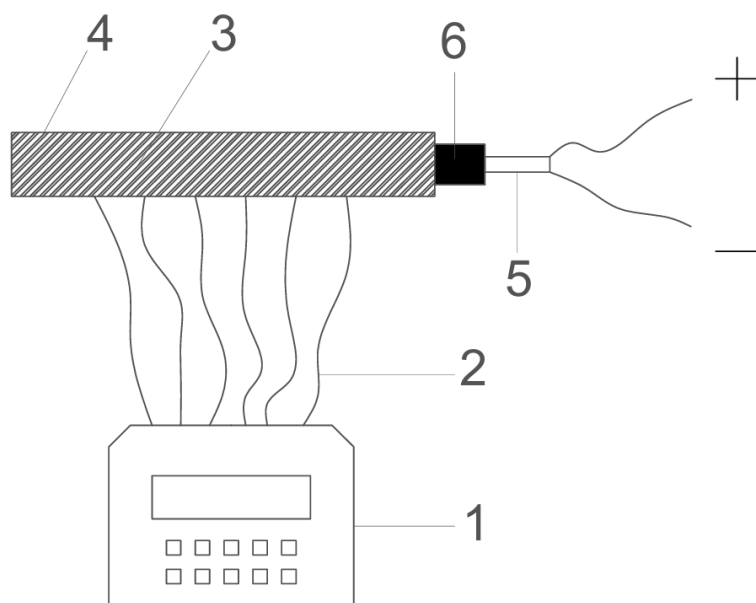


Kazalo:

- 1 - Uređaj za mjerenje brzine detonacije
- 2 - Osjetila za mjerenje brzine detonacije
- 3 - Emulzijski eksploziv smanjene gustoće

- 4 - Čelična cijev
- 5 - Trenutni električni detonator

Slika 4-5. Shema mjerenja brzine (TED)



Kazalo:

- 1 - Uređaj za mjerenje brzine detonacije
- 2 - Osjetila za mjerenje brzine detonacije
- 3 - Emulzijski eksploziv smanjene gustoće
- 4 - Čelična cijev
- 5 - Trenutni električni detonator
- 6 - Pojačnik

Slika 4-6. Shema mjerenja brzine (TED+B)

Tablica 4-2. Srednje vrijednosti geometrijskih parametara čeličnih cijevi.

Vanjski promjer cijevi, \varnothing (mm)	Unutarnji promjer cijevi, ϕ (mm)	Debljina stjenke cijevi, d (mm)	Duljina cijevi, L (mm)
34,2	29,6	2,3	999,0
48,7	41,2	3,9	1000,7
51,3	46,2	2,6	993,8
61,1	52,5	4,3	1005,7
76,4	70,6	3,1	998,9

Tablica 4-3. Srednje vrijednosti udaljenosti osjetila po segmentima.

Inicijalno sredstvo	Udaljenost od početka cijevi do prvog osjetila, b (mm)	Udaljenost između prvog i drugog osjetila, a_1 (mm)	Udaljenost između drugog i trećeg osjetila, a_2 (mm)	Udaljenost između trećeg i četvrtog osjetila, a_3 (mm)	Udaljenost između četvrtog i petog osjetila, a_4 (mm)	Udaljenost između petog i šestog osjetila, a_5 (mm)
TED	469,3	100,7	100,4	99,9	99,9	99,3
TED + B	467,7	100,0	100,1	99,7	100,3	100,1
TED	478,3	100,1	99,8	99,3	100,1	99,8
TED +	462,8	96,6	99,9	100,5	99,7	99,7
TED	463,1	100,5	100,2	100,7	100,2	100,1
TED + B	463,1	101,5	101,0	100,9	100,6	101,5
TED	473,0	98,3	98,8	99,2	98,6	97,5
TED + B	476,0	102,6	103,1	102,5	102,9	102,3
TED	470,6	100,4	99,9	99,9	98,3	98,6
TED + B	465,2	100,2	99,7	100,9	100,4	100,2

4.2. Rezultati mjerenja brzine detonacije po pojedinim promjerima

Izmjerene vrijednosti brzine detonacije za pojedine promjere i načine iniciranja, iniciranje trenutnim električnim detonatorom (TED) i iniciranje trenutnim električnim detonatorom s pojačnikom (TED+B) dane su u tablicama od 4-4. do 4-9. S obzirom da je brzina mjerena sa 6 osjetila na 5 segmenata rezultati su prikazani po pojedinim segmentima i po cijeloj duljini segmenata.

Tablica 4-4. Srednje vrijednosti brzine detonacije za pojedine promjere na 1. segmentu.

1. segment				
TED		TED+B		Razlika VOD (m/s)
R (mm)	VOD (m/s)	R (mm)	VOD (m/s)	
29,5	2790	29,6	2601	-189
41,2	2654	41,2	2811	157
46,2	3063	46,2	2850	-213
52,3	3228	52,6	2807	-421
70,7	2463	70,6	3195	732

Tablica 4-5. Srednje vrijednosti brzine detonacije za pojedine promjere na 2. segmentu.

2. segment				
TED		TED+B		Razlika VOD (m/s)
R (mm)	VOD (m/s)	R (mm)	VOD (m/s)	
29,5	2639	29,6	2748	109
41,2	2604	41,2	2525	-79
46,2	2919	46,2	2754	-165
52,3	2869	52,6	2980	111
70,7	2830	70,6	2720	-110

Tablica 4-6. Srednje vrijednosti brzine detonacije za pojedine promjere na 3. segmentu.

3. segment				
TED		TED+B		Razlika VOD (m/s)
R (mm)	VOD (m/s)	R (mm)	VOD (m/s)	
29,5	2618	29,6	2508	-110
41,2	2882	41,2	3159	277
46,2	2735	46,2	3022	287
52,3	2972	52,6	3481	509
70,7	5014	70,6	2989	-2025

Tablica 4-7. Srednje vrijednosti brzine detonacije za pojedine promjere na 4. segmentu.

4. segment				
TED		TED+B		Razlika VOD (m/s)
R (mm)	VOD (m/s)	R (mm)	VOD (m/s)	
29,5	2850	29,6	2976	126
41,2	2784	41,2	2623	-161
46,2	2944	46,2	2898	-46
52,3	2933	52,6	2777	-156
70,7	2321	70,6	3385	1064

Tablica 4-8. Srednje vrijednosti brzine detonacije za pojedine promjere na 5. segmentu.

5. segment				
TED		TED+B		Razlika VOD (m/s)
R (mm)	VOD (m/s)	R (mm)	VOD (m/s)	
29,5	2790	29,6	2559	-231
41,2	2596	41,2	2661	65
46,2	2724	46,2	2873	149
52,3	2788	52,6	2652	-136
70,7	2553	70,6	2874	321

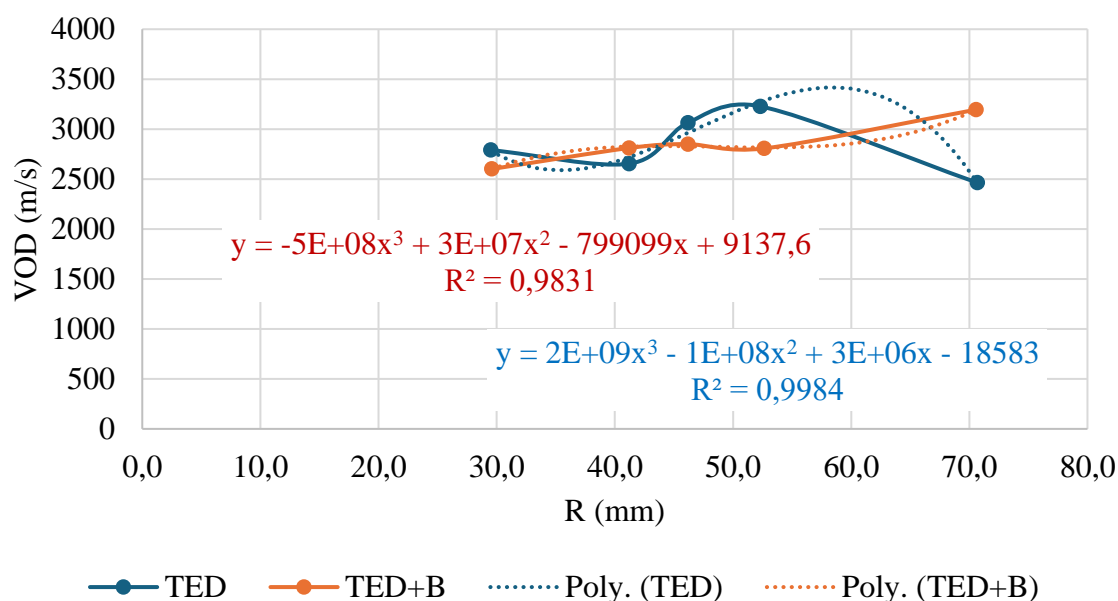
Tablica 4-9. Srednje vrijednosti izmjerenih brzina detonacije za pojedine promjere po cijeloj duljini segmenata.

Cijela duljina segmenata				
TED		TED+B		Razlika VOD (m/s)
R (mm)	VOD (m/s)	R (mm)	VOD (m/s)	
29,5	2738	29,6	2678	-60
41,2	2704	41,2	2756	52
46,2	2877	46,2	2880	3
52,3	2958	52,6	2940	-18
70,7	3036	70,6	3044	8

4.3. Analiza rezultata mjerenja brzine detonacije po pojedinim promjerima

Za rezultate mjerenja brzine detonacije po pojedinim promjerima i načinima iniciranja napravljena je regresijska analiza. Za regresijsku analizu korištene su regresije polinomima drugog stupnja i trećeg stupnja te regresija s potencijom ovisno koja je krivulja dala najveće slaganja s rezultatima mjerenja. Rezultati regresijskih analiza za pojedine promjere po segmentima i po cijeloj duljini segmenata su prikazane dijagramima na slikama od 4-7. do 4-12.

1. segment cijevi



Slika 4-7. Grafički prikaz srednjih vrijednosti promjera i brzina – 1. segment

Iz dijagrama na slici 4-7. je vidljivo da se zavisnost brzine detonacije od promjera emulzijskih eksploziva smanjene gustoće za iniciranje detonatorom (TED) može izračunati prema izrazu 4-1 uz koeficijent determinacije $R^2 = 0,9984$ odnosno 99,84 %:

$$v_d = 2E + 09R^3 - 1E + 08 R^2 + 3E + 06R - 18583 \quad (4-1)$$

gdje je:

c – brzina detonacije (m/s),

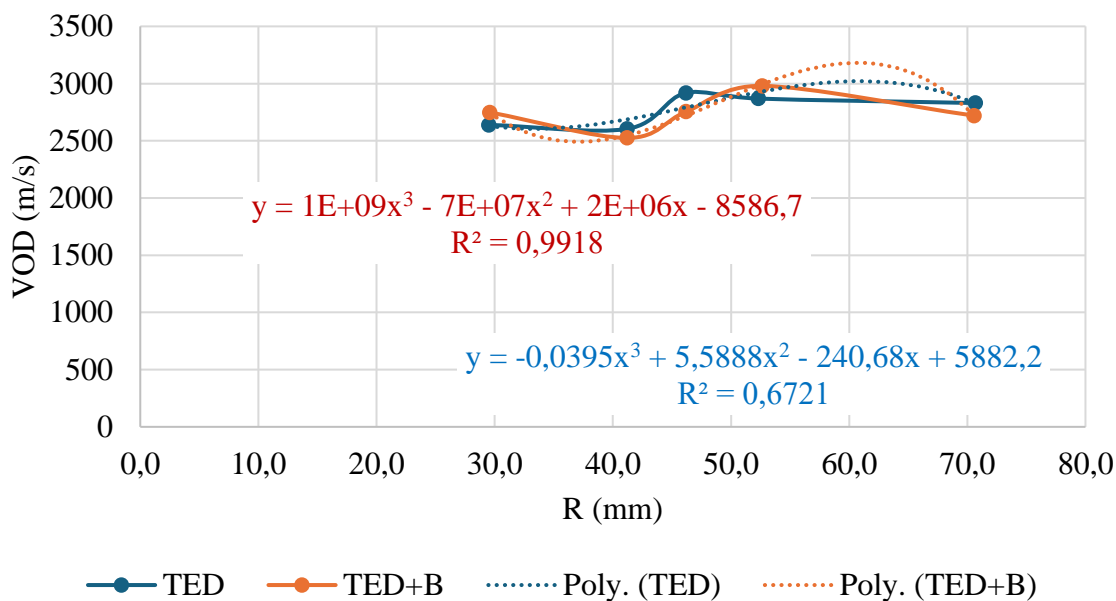
R – promjer eksploziva (mm).

Iz dijagrama na slici 4-7. je vidljivo da se zavisnost brzine detonacije od promjera emulzijskih eksploziva smanjene gustoće za iniciranje detonatorom s pojačnikom (TED+B) može izračunati prema izrazu 4-2 uz koeficijent determinacije $R^2 = 0,9831$ odnosno 98,31 %:

$$v_d = -5E + 08R^3 + 3E + 07 R^2 - 799099R + 9137,6 \quad (4-2)$$

Iz tablice 4-4. i iz dijagrama na slici 4-7. vidljivo je da je najveća brzina detonacije za iniciranje detonatorom (TED) izmjerena kod promjera 52,3 mm i iznosi 3228 m/s, a za iniciranje detonatorom s pojačnikom (TED+B) kod promjera 70,6 mm i iznosi 3195 m/s. Najveća razlika između izmjerenih brzina detonacije u istom promjeru, a kod različitih načina iniciranja je izmjerena kod promjera od 70,6 mm i iznosi 732 m/s.

2. segment cijevi



Slika 4-8. Grafički prikaz srednjih vrijednosti promjera i brzina – 2. segment

Iz dijagrama na slici 4-8. je vidljivo da se zavisnost brzine detonacije od promjera emulzijskih eksploziva smanjene gustoće za iniciranje detonatorom (TED) može izračunati prema izrazu 4-3 uz koeficijent determinacije $R^2 = 0,6721$ odnosno 67,21 %:

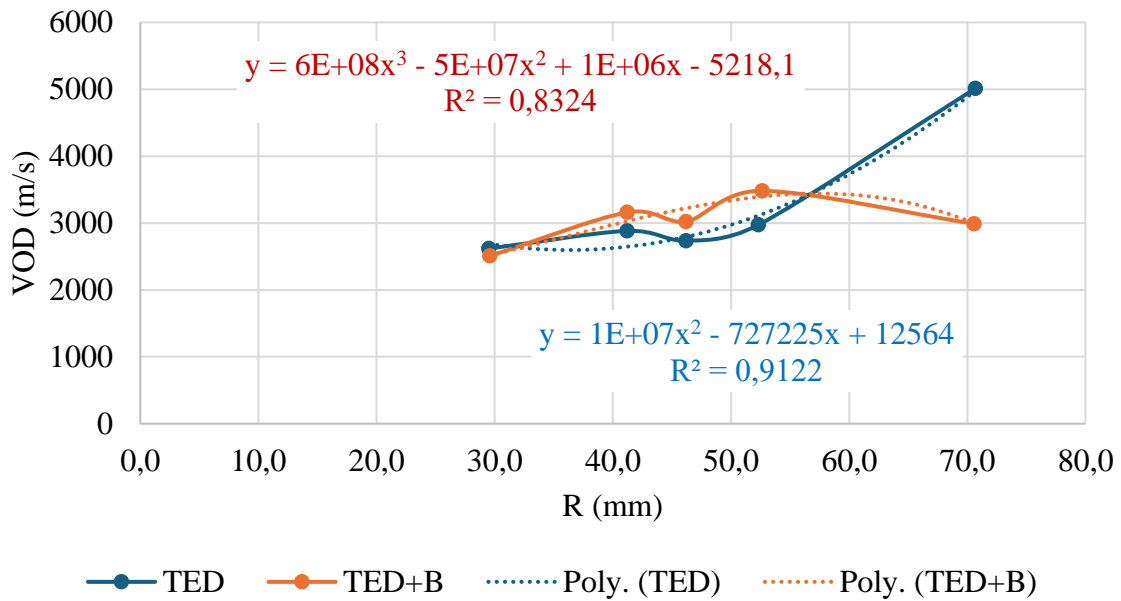
$$v_d = -0,0395R^3 + 5,5888 R^2 - 240,68R + 5882,2 \quad (4-3)$$

Iz dijagrama na slici 4-8. je vidljivo da se zavisnost brzine detonacije od promjera emulzijskih eksploziva smanjene gustoće za iniciranje detonatorom s pojačnikom (TED+B) može izračunati prema izrazu 4-4 uz koeficijent determinacije $R^2 = 0,9918$ odnosno 99,18 %:

$$v_d = 1E + 09R^3 - 7E + 07 R^2 + 2E + 06R - 8586,7 \quad (4-4)$$

Iz tablice 4-5. i iz dijagrama na slici 4-8. vidljivo je da je najveća brzina detonacije za iniciranje detonatorom (TED) izmjerena kod promjera 46,2 mm i iznosi 2919 m/s, a za iniciranje detonatorom s pojačnikom (TED+B) kod promjera 52,6 mm i iznosi 2980 m/s. Najveća razlika između izmjerenih brzina detonacije u istom promjeru, a kod različitih načina iniciranja je izmjerena kod promjera od 46,2 mm i iznosi 165 m/s.

3. segment cijevi



Slika 4-9. Grafički prikaz srednjih vrijednosti promjera i brzina – 3. segment

Iz dijagrama na slici 4-9. je vidljivo da se zavisnost brzine detonacije od promjera emulzijskih eksploziva smanjene gustoće za iniciranje detonatorom (TED) može izračunati prema izrazu 4-5 uz koeficijent determinacije $R^2 = 0,9122$ odnosno 91,22 %:

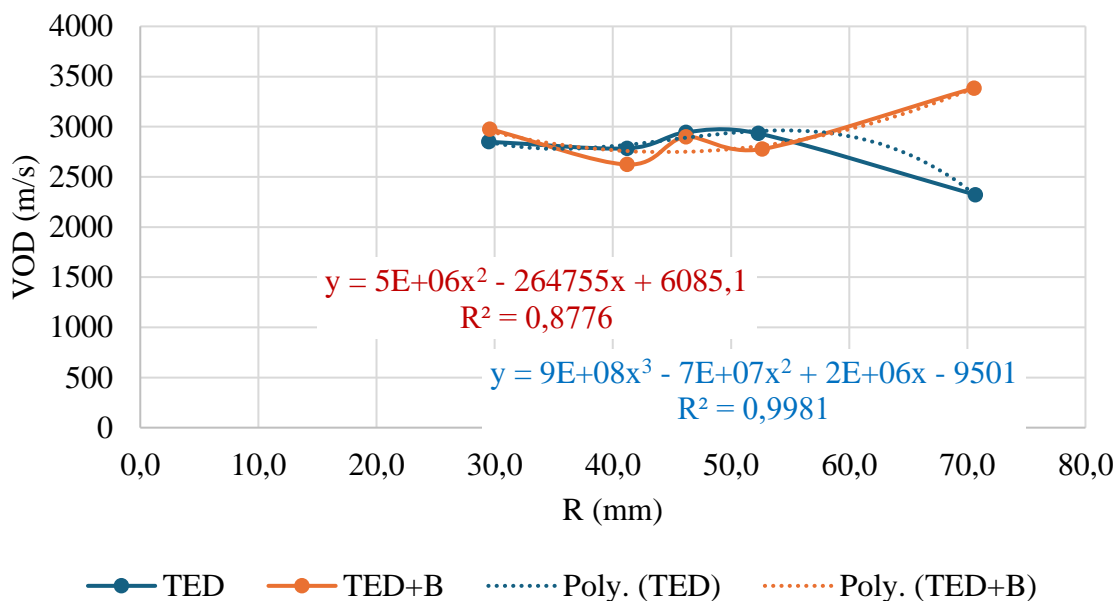
$$v_d = 1E + 07R^2 - 727225 R + 12564 \quad (4-5)$$

Iz dijagrama na slici 4-9. je vidljivo da se zavisnost brzine detonacije od promjera emulzijskih eksploziva smanjene gustoće za iniciranje detonatorom s pojačnikom (TED+B) može izračunati prema izrazu 4-6 uz koeficijent determinacije $R^2 = 0,8324$ odnosno 83,124 %:

$$v_d = 6E + 08R^3 - 5E + 07 R^2 + 1E + 06R - 5218,1 \quad (4-6)$$

Iz tablice 4-6. i iz dijagrama na slici 4-9. vidljivo je da je najveća brzina detonacije za iniciranje detonatorom (TED) izmjerena kod promjera 70,6 mm i iznosi 5014 m/s, a za iniciranje detonatorom s pojačnikom (TED+B) kod promjera 52,6 mm i iznosi 3481 m/s. Najveća razlika između izmjerenih brzina detonacije u istom promjeru, a kod različitih načina iniciranja je izmjerena kod promjera od 70,6 mm i iznosi 2025 m/s.

4. segment cijevi



Slika 4-10. Grafički prikaz srednjih vrijednosti promjera i brzina – 4. segment

Iz dijagrama na slici 4-10. je vidljivo da se zavisnost brzine detonacije od promjera emulzijskih eksploziva smanjene gustoće za iniciranje detonatorom (TED) može izračunati prema izrazu 4-7 uz koeficijent determinacije $R^2 = 0,9981$ odnosno 99,81 %:

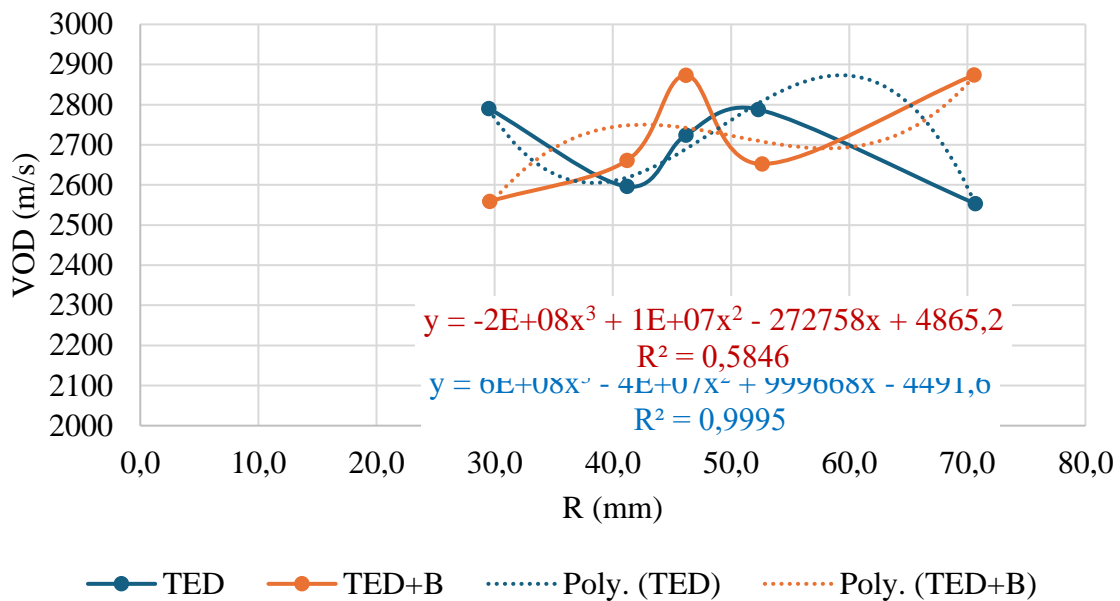
$$v_d = 9E + 08R^3 - 7E + 07 R^2 + 2E + 06R - 9501 \quad (4-7)$$

Iz dijagrama na slici 4-10. je vidljivo da se zavisnost brzine detonacije od promjera emulzijskih eksploziva smanjene gustoće za iniciranje detonatorom s pojačnikom (TED+B) može izračunati prema izrazu 4-8 uz koeficijent determinacije $R^2 = 0,8776$ odnosno 87,76 %:

$$v_d = 5E + 06 R^2 - 264755R + 6085,1 \quad (4-8)$$

Iz tablice 4-7. i iz dijagrama na slici 4-10. vidljivo je da je najveća brzina detonacije za iniciranje detonatorom (TED) izmjerena kod promjera 46,2 mm i iznosi 2944 m/s, a za iniciranje detonatorom s pojačnikom (TED+B) kod promjera 70,6 mm i iznosi 3385 m/s. Najveća razlika između izmjerenih brzina detonacije u istom promjeru, a kod različitih načina iniciranja je izmjerena kod promjera od 70,6 mm i iznosi 1064 m/s.

5. segment cijevi



Slika 4-11. Grafički prikaz srednjih vrijednosti promjera i brzina – 5. segment

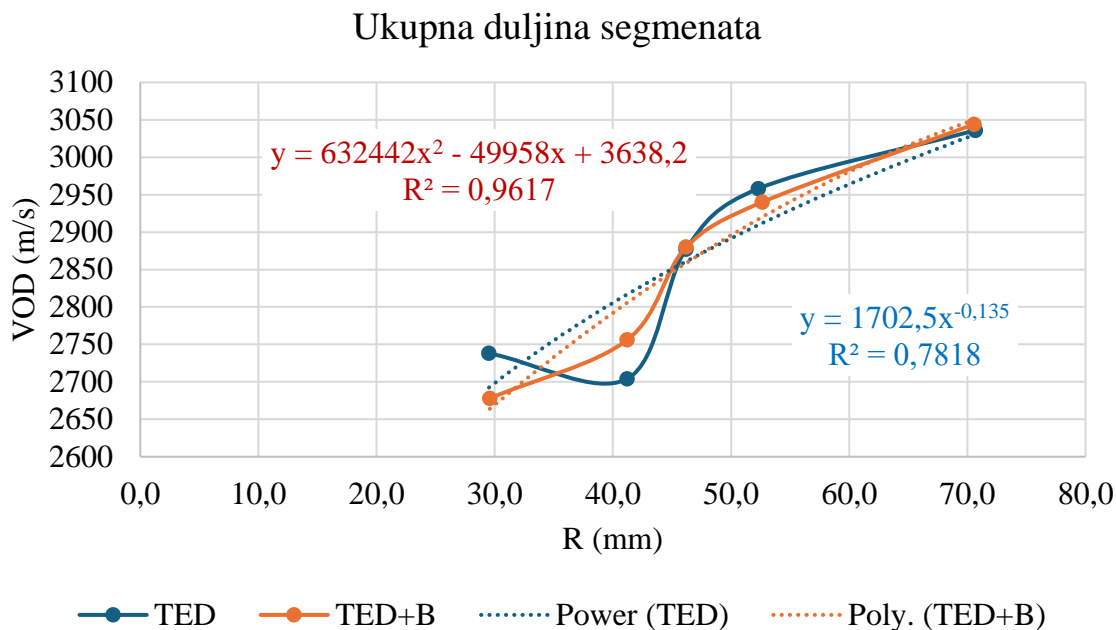
Iz dijagrama na slici 4-11. je vidljivo da se zavisnost brzine detonacije od promjera emulzijskih eksploziva smanjene gustoće za iniciranje detonatorom (TED) može izračunati prema izrazu 4-9 uz koeficijent determinacije $R^2 = 0,9995$ odnosno 99,95 %:

$$v_d = 96E + 08R^3 - 4E + 07 R^2 + 999668R - 4491,6 \quad (4-9)$$

Iz dijagrama na slici 4-11. je vidljivo da se zavisnost brzine detonacije od promjera emulzijskih eksploziva smanjene gustoće za iniciranje detonatorom s pojačnikom (TED+B) može izračunati prema izrazu 4-10 uz koeficijent determinacije $R^2 = 0,5846$ odnosno 58,46 %:

$$v_d = -2E + 08 R^3 + 1E + 07 R^2 - 272758R + 4865,2 \quad (4-10)$$

Iz tablice 4-8. i iz dijagrama na slici 4-11. vidljivo je da je najveća brzina detonacije za iniciranje detonatorom (TED) izmjerena kod promjera 29,5 mm i iznosi 2790 m/s, a za iniciranje detonatorom s pojačnikom (TED+B) kod promjera 70,6 mm i iznosi 2874 m/s. Najveća razlika između izmjerenih brzina detonacije u istom promjeru, a kod različitih načina iniciranja je izmjerena kod promjera od 70,6 mm i iznosi 321 m/s.



Slika 4-12. Grafički prikaz srednjih vrijednosti promjera i brzina po ukupnoj duljini cijevi

Iz dijagrama na slici 4-12. je vidljivo da se zavisnost brzine detonacije od promjera emulzijskih eksploziva smanjene gustoće za iniciranje detonatorom (TED) može izračunati prema izrazu 4-11 uz koeficijent determinacije $R^2 = 0,7818$ odnosno 78,18 %:

$$v_d = 1702,5R^{-0,135} \quad (4-11)$$

Iz dijagrama na slici 4-12. je vidljivo da se zavisnost brzine detonacije od promjera emulzijskih eksploziva smanjene gustoće za iniciranje detonatorom s pojačnikom (TED+B) može izračunati prema izrazu 4-12 uz koeficijent determinacije $R^2 = 0,9617$ odnosno 96,17 %:

$$v_d = 632442R^2 - 49958R + 3638,2 \quad (4-12)$$

Iz tablice 4-9. i iz dijagrama na slici 4-12. vidljivo je da je najveća brzina detonacije za iniciranje detonatorom (TED) izmjerena kod promjera 70,6 mm i iznosi 3036 m/s, a za iniciranje detonatorom s pojačnikom (TED+B) kod promjera 70,6 mm i iznosi 3044 m/s. Najveća razlika između izmjerenih brzina detonacije u istom promjeru, a kod različitih načina iniciranja je izmjerena kod promjera od 29,5 mm i iznosi 60 m/s.

7. ZAKLJUČAK

Utjecaj promjera emulzijskih eksploziva smanjene gustoće na brzinu detonacije određen je s ispitivanjima na poligonu s ukupno 30 uzoraka, od čega 6 uzoraka po pojedinom promjeru. Za svaki promjer je ispitano po 3 uzorka iniciranih detonatorom i 3 uzorka iniciranih detonatorom s pojačnikom.

Promjer emulzijskih eksploziva smanjene gustoće su bili u rasponu od 29,5 mm do 70,6 mm.

Brzina detonacije je izmjerena na 5 segmenata sa 6 osjetila. Rezultati mjerenja brzine detonacije su prikazani po pojedinim segmentima kao i po cijeloj duljini segmenata.

Gledajući po segmentima, brzina emulzijskih detonacije eksploziva smanjene gustoće ima jako veliko rasipanje. Kod iniciranja detonatorom uočena je veća zavisnost brzine detonacije od promjera emulzijskih eksploziva smanjene gustoće nego kod iniciranja detonatorom s pojačnikom.

Gledajući ukupnu duljina segmenata, uočena je veća zavisnost brzine detonacije od promjera emulzijskih eksploziva smanjene gustoće kod iniciranja detonatorom s pojačnikom.

Kod oba iniciranja najbolja zavisnost brzine detonacije od promjera eksploziva uočena je na 1. segmentu. To se može objasniti utjecajem inicijalnog sredstva odnosno blizinom osjetila mjestu iniciranja.

Kod iniciranja detonatorom došlo je do porasta brzine detonacije za približno 300 m/s s povećanjem promjera.

Kod iniciranja detonatorom s pojačnikom došlo je do porasta brzine detonacije za približno 400 m/s s povećanjem promjera.

Preporuka je da se obavi još mjerenja brzine detonacije za više različitih promjera emulzijskog eksploziva smanjene gustoće kako za iniciranje detonatorom tako i za iniciranje detonatorom s pojačnikom kako bi se dobila što bolja slika zavisnosti utjecaja promjera eksploziva na brzinu detonacije.

8. LITERATURA

BARANOV, E.G., VEDIN, A.T., BONDARENKO, I.F., (1996): *Mining and Industrial Applications of Low – Density Explosives*. A.A.Balkema, 116 pp, Rotterdam.

DOBRILOVIĆ, M. (2008). *Raspoloživa energija tlačnog udarnog vala udarne cjevčice i njezina primjena u iniciranju elektroničkog detonatora*, doktorska disertacija, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.

DOBRILOVIĆ, M., ŠKRLEC, V., BOHANEK, V., STANKOVIĆ, S. (2016): The properties of the low density emulsion based explosives, *Proceeding of 19th seminar on New Trends in Research of Energetic Materials*, Pardubice, Czech Republic, pp 462 – 468.

ESTER, Z. (2005): *Miniranje I - Eksplozivne tvari, svojstva i metode ispitivanja*, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 176 str., Zagreb

HRN EN 13631-14:2004 Eksplozivi za civilnu uporabu. Jaki eksplozivi 14. dio: Određivanje brzine detonacije (EN 13631.14:2004).

Kontinitro, 2024. Explomet2 series. URL: <https://www.kontinitro.com/explomet-2/> (29.8.2024.)

KRAMARCZYK, B., SUDA, K., KOWALIK, P., SWIATEK, K., JASZCZ, K. AND JAROSZ, T. (2022). *Emulsion Explosives: A Tutorial Review and Highlight of Recent Progress. Materials*, [online] 15(14), p.4952.

KRSNIK, J. (1989): *Miniranje*, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 180 str., Zagreb

MENDES, R., RIBEIRO, J., PLAKSIN, I., CAMPOS, J. AND TAVARES, B. (2014). *Differences between the detonation behavior of emulsion explosives sensitized with glass or with polymeric micro-balloons*. Journal of Physics: Conference Series, 500(5), p.052030.

MERTUSZKA P., KRAMARCZYK, B. (2021). *Study of the Influence of Sensitizer Content on the Density of a Bulk Emulsion Explosive Used in Underground Operations*. Central European Journal of Energetic Materials, 18(4), pp.429–447.

ŠKRLEC, V. (2015): *Analiza primjenjivosti eksploziva smanjene gustoće za gospodarska miniranja*, Disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 205 pp, Zagreb.