

Određivanje kritičnog promjera emulzijskih eksploziva smanjene gustoće

Šušković Mustafa, Lucija

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:169:384388>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-31**



Repository / Repozitorij:

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



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

**ODREĐIVANJE KRITIČNOG PROMJERA EMULZIJSKIH EKSPLOZIVA
SMANJENE GUSTOĆE**

Diplomski rad

Lucija Šušković Mustafa

R311

Zagreb, 2024.



KLASA: 602-01/24-01/30
URBROJ: 251-70-11-24-2
U Zagrebu, 14.02.24

Lucija Šušković Mustafa, studentica

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/24-01/30, URBROJ: 251-70-11-24-1 od 12.02.2024. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

ODREĐIVANJE KRITIČNOG PROMJERA EMULZIJSKIH EKSPLOZIVA SMANJENE GUSTOĆE

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 suvoditelja Prof.dr.sc. Mario Dobrilović.

Voditelj

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Vinko Škrlec

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Mario Klanfar

(titula, ime i prezime)

Suvoditelj

(potpis)

Prof.dr.sc. Mario Dobrilović

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje
Pašić

(titula, ime i prezime)

ODREĐIVANJE KRITIČNOG PROMJERA EMULZIJSKIH EKSPLOZIVA SMANJENE GUSTOĆE

Lucija Šušković Mustafa

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

Sažetak

Zbog sve veće urbanizacije javlja se potreba za izvođenjem opreznih miniranja kako bi se što manje oštetila okolna stjenska masa te da se očuva njena fizikalno-mehanička svojstva van zone miniranja i da se smanji potencijalno štetni utjecaj miniranja na okolne objekte. Tipični eksplozivi koji se koriste u rudarstvu ne zadovoljavaju tražene zahtjeve za izvođenjem opreznih miniranja stoga je potrebno odrediti minersko-tehničke karakteristike emulzijskih eksploziva smanjene gustoće. Ispitivanjem na poligonu određen je kritični promjer i brzina detonacije za ispitivani emulzijski eksploziv smanjene gustoće iniciran trenutnim električnim detonatorom i trenutnim električnim detonatorom s pojačnikom

Ključne riječi: eksploziv smanjene gustoće, kritični promjer, brzina detonacije
Završni rad sadrži: 30 stranice, 3 tablica, 20 slika i 27 reference.
Jezik izvornika: Hrvatski
Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb
Mentori: Dr.sc. Vinko Škrlec, izvanredni profesor RGNF
Komentor: Dr.sc. Mario Dobrilović, redoviti profesor RGNF
Ocjenjivači: Dr.sc. Vinko Škrlec, izvanredni profesor RGNF
Dr.sc. Mario Dobrilović, redoviti profesor RGNF
Dr.sc. Siniša Stanković, docent RGNF
Dr.sc. Vječislav Bohanek, izvanredni profesor RGNF
Dr.sc. Tomislav Korman, izvanredni profesor RGNF

DETERMINATION OF THE CRITICAL DIAMETER FOR LOW DENSITY EMULSION EXPLOSIVES

Lucija Šušković Mustafa

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

Abstract

Due to increasing urbanization, there is a need to carry out careful blasting in order to damage the surrounding rock mass as little as possible and to preserve its physical and mechanical properties outside the blasting zone and to reduce the potentially harmful impact of blasting on surrounding objects. Typical explosives that are used in mining do not meet the requirements for careful blasting, so it is necessary to determine the mining-technical characteristics of low-density emulsion explosives. The critical diameter and detonation velocity of the tested low-density emulsion explosive, that was initiated by an instantaneous electric detonator and an instantaneous electric detonator with booster, were determined by field tests.

Keywords: low density explosives, critical diameter, detonation velocity

Thesis contains: 30 pages, 3 tables, 20 figures, and 27 references.

Original in: Croatian

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

Supervisors: Associate Proffesor Vinko Škrlec, PhD

Tech. assistance: Full Proffesor Mario Dobrilović, PhD

Reviewers: Associate Proffesor Vinko Škrlec, PhD
Full Proffesor Mario Dobrilović, PhD
Assistant Proffesor Siniša Stanković, PhD
Associate Proffesor Vječislav Bohanek, PhD
Associate Proffesor Tomislav Korman, PhD

Defence date: February 22, 2024, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. EKSPLOZIVI SMANJENE GUSTOĆE.....	3
2.1. Materijali kojima se postiže smanjenje gustoće.....	5
2.1.1. Perlit.....	5
2.1.2. Vermikulit.....	6
2.1.3. Staklene mikrokuglice	7
2.1.4. Plastične mikrokuglice	7
2.1.5. Polistiren	8
2.1.6. Ekspandirani polistiren	9
2.1.7. Poliuretanska pjena	10
2.1.8. Ugljen u prahu	11
2.1.9. Piljevina i drveno brašno	12
2.1.10. Ostali	12
3. MINERSKO-TEHNIČKE KARAKTERISTIKE EKSPLOZIVA.....	14
3.1. Brzina detonacije	14
3.2. Radna sposobnost eksploziva.....	14
3.3. Osjetljivost na udar	15
3.4. Prijenos detonacije.....	15
3.5. Brizantnost eksploziva.....	16
3.6. Energija eksploziva.....	17
3.7. Volumen i specifični tlak plinova eksplozije	17
3.8. Bilanca kisika	17
3.9. Temperatura eksplozije.....	18
3.10. Kritična masa i promjer.....	18
4. METODOLOGIJA MJERENJA BRZINE DETONACIJE EKSPLOZIVA SMANJENE GUSTOĆE.....	19
4.1. Mjerenje brzine detonacije eksploziva smanjene gustoće	21
5. REZULTATI I ANALIZA REZULTATA.....	25
6. ZAKLJUČAK.....	27
7. LITERATURA	28

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Dijagram tlaka plinova u odnosu na volumen za ANFO eksploziv i eksploziv smanjene gustoće (Rock 2004).....	4
Slika 2-2. Zrnca perlita (Wikipedia, 2023).....	6
Slika 2-3. Zrnca vermakulita (Okorder, 2023)	6
Slika 2-4. Staklene mikrokuglice (Bariteworld, 2023).....	7
Slika 2-5. Plastične mikrokuglice (Lucky rubber plastic manufacture, 2023)	8
Slika 2-6. Polistiren (Intekpolimer, 2021).....	9
Slika 2-7. Ekspandirani polistiren (Epstec, 2015).....	10
Slika 2-8. Poliuretanska pjena(CEW, 2024).....	11
Slika 2-9. Ugljen u prahu (Indiamart, 2024)	11
Slika 2-10. Drveno brašno (iBuilder, 2015)	12
Slika 2-11. Otpaci iz prerade šećerne trske (Wikipedia, 2014).....	13
Slika 3-1. Određivanje radne sposobnosti eksploziva Trauzlovom probom (Krsnik, 1989)	14
Slika 3-2. Hessova proba (Krsnik, 1989)	16
Slika 4-1. Kontinitro AS Explomet 2 (Kontinitro, 2019).....	19
Slika 4-2. Emulzijski eksploziv smanjene gustoće.....	20
Slika 4-3. Ekspandirani polistiren (EPS).....	21
Slika 4-4. Shematski prikaz određivanja brzine detonacije (inicirano električnim detonatorom).....	22
Slika 4-5. Shematski prikaz određivanja brzine detonacije (inicirano električnim detonatorom s pojačnikom)	22
Slika 4-6. Postav mjerenja za promjer 50 mm a) iniciranje električnim detonatorom b) iniciranje električnim detonatorom s pojačnikom.	23
Slika 5-1. Zavisnost brzine detonacije od promjera naboja – iniciranje TED s pojačnikom.	25

POPIS TABLICA

Tablica 4- 1. Specifikacije emulzijske matrice (Dobrilović et al., 2016).....	20
Tablica 4- 2. Rezultati mjerenja – iniciranje trenutnim električnim detonatorom	23
Tablica 4- 3. Rezultati mjerenja – iniciranje trenutnim električnim detonatorom s pojačnikom	24

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
L	mm	duljina patrone
\emptyset	mm	promjer patrone
a	mm	razmak između osjetila
v_1	m/s	brzina detonacije
v_{sr}	m/s	srednja vrijednost brzine
ρ	g/cm ³	gustoća
v	m/s	brzina
°C	-	temperatura
p	bar	tlak
-	%	udio dušika
pH	-	pH vrijednost

1. UVOD

Miniranje je tehnološki postupak razaranja i drobljenja stijenske mase, materijala i objekata primjenom energije eksploziva. Za uspješno miniranje potrebno je poznavanje fizikalno-mehaničkih svojstava stijenske mase te minersko-tehničke karakteristike eksploziva.

Ukupna učinkovitost eksploziva u određenoj sredini ovisi o količini oslobođene energije prilikom eksplozije punjenja i iskorištenost oslobođene energije putem obavljenog mehaničkog rada na materijal sredine u kojoj se vrši miniranje.

Oslobođena energija prilikom detonacije javlja se u dva osnovna oblika, kao udarna energija koja nastaje kao posljedica visokog tlaka na detonacijskoj fronti te kao potisna energija, odnosno energija ekspanzije plinova visokog tlaka i temperature. Udarne je energije zaslužna za lom stijenske mase dok potisna energija omogućuje drobljenje i frakturiranje stijene.

Pojam oprezna miniranja (engl. *controlled blasting*) odnosi se na one metode miniranja čija je osnovna svrha očuvanje stabilnosti i što manje oštećenje stijenske mase izvan granica iskopa. Opreznim se miniranjem nastoji smanjiti koncentracija oslobođene energije, odnosno smanjivanje uloge udarnog vala kao glavnog mehanizma loma stijene.

To se postiže na nekoliko načina:

- razdjelnim punjenjem minske bušotine (engl. *decking*),
- korištenjem patrona znatno manjeg promjera u odnosu na promjer minske bušotine (engl. *decoupling*),
- smanjenjem brzine detonacije eksploziva i
- smanjenjem gustoće eksploziva (Škrlec, 2015).

Eksplozivi smanjene gustoće su dobar izbor za navedena oprezna miniranja zbog svojih minersko-tehničkih karakteristika. U minersko-tehničke karakteristike eksploziva spadaju brzina detonacije, gustoća eksploziva, mogućnosti iniciranja, temperatura paljenja, osjetljivost na udar, osjetljivost na trenje, brizantnost i radna sposobnost eksploziva.

Eksplozivi smanjene gustoće izvode se tako da se postojećem eksplozivu smanji gustoća dodavanjem materijala koji ima znatno manju gustoću od gustoće eksploziva, no treba uzeti

u obzir da se smanjenjem gustoće smanjuje i brzina detonacije te tlak udarnog vala. Samim time je smanjena i količina energije, odnosno manja su naprezanja, po jedinici volumena stijene (Škrlec,2015).

2. EKSPLOZIVI SMANJENE GUSTOĆE

Zbog sve veće potražnje za minerskim radovima u već izgrađenim područjima, potrebne su nove tehnike i svojstva eksploziva koje će biti dovoljno snažne da razlome stijensku masu, a da istovremeno ne oštete okolnu stijensku masu. Takva se miniranja nazivaju opasnim miniranjima.

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).

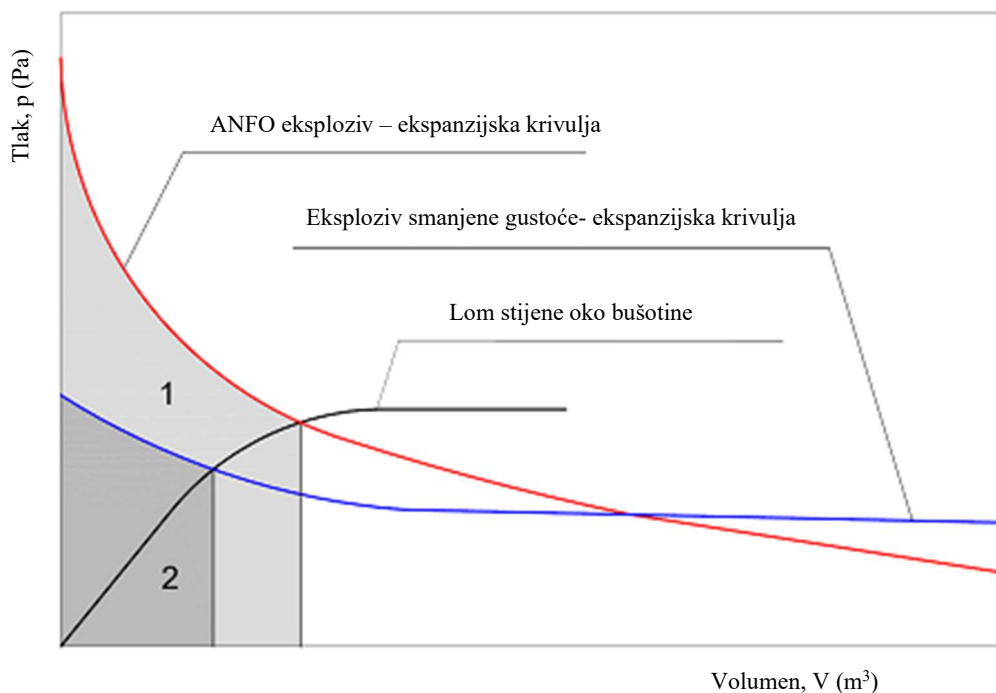
Eksplozivi smanjene gustoće koriste se kod:

- 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.

Upotrebom eksploziva smanjene gustoće, u odnosu na ostale gospodarske eksplozive, smanjuje se udio udarne energije, koja je zaslužna za lom stijenske mase, a ima veći udio u potisnoj energiji plinovitih produkata, koja je zaslužna za širenje pukotina i potiskivanje, što

dovodi do toga da izvršeni rad nije puno manji, a postignuta je dovoljna razlomljenost stijenske mase.

Na slici 2-1. prikazan je odnos tlaka i volumena prilikom korištenja eksploziva smanjene gustoće i ANFO eksploziva.



Slika 2-1. Dijagram tlaka plinova u odnosu na volumen za ANFO eksploziv i eksploziv smanjene gustoće (Rock 2004)

Gustoća je fizikalno svojstvo eksplozivne tvari i predstavlja odnos mase eksplozivne tvari i njenog volumena. Smanjenjem gustoće eksplozivne tvari smanjuje se brzina detonacije i tlak detonacijskog udarnog vala.

Smanjenje gustoće eksploziva izvodi se tako da mu se dodaje materijal koje ima znatno nižu gustoću od samog eksploziva. Materijali koji se dodavaju eksplozivima dijele se u dvije skupine:

1. Inertni materijali (perliti, vermikuliti, staklene mikrokuglice i sl.)
2. Materijali koji imaju mogućnost sagorijevanja, tj. mogućnost sudjelovanja u kemijskoj reakciji oksidacije (polistiren, poliuretanska pjena, ugljen u prahu, piljevina, grane celuloze i sl.)

Da bi eksplozivi smanjene gustoće bili izvedivi i s ekonomskog i tehnološkog stajališta, trebaju biti zadovoljeni određeni uvjeti (Škrlec, 2015):

- dostupnost sredstva za razrjeđenje na tržištu,
- jednostavnost rukovanja sredstvom za razrjeđenje,
- sredstvo za razrjeđenje mora imati malu gustoću, optimalno manju od $0,15 \text{ g/cm}^3$,
- sredstvo za razrjeđenje ne bi se smjelo razdvajati od eksploziva,
- mogućnost jednostavnog punjenja minskih bušotina i
- niska cijena miniranja u odnosu na miniranje s eksplozivom kojeg zamjenjuje.

Već se dugi niz godina istraživači bave smanjivanjem gustoće eksploziva radi smanjivanja brzine detonacije, tlaka i naprezanja u stijeni uz povoljnu razlomljenost stijenske mase pa valja spomenuti Jacksona koji je 1993. godine smanjio gustoću vodenih gelova granulama amonijeva nitrata i kuglicama ekspandiranog polistirena te je takav eksploziv nazvao „vodeni gel male snage“ (engl. *Low strength water gel explosives*). Izmjerio je brzine detonacije u 6 rasponu od 2400 m/s do 3000 m/s za gustoće od $0,40 \text{ g/cm}^3$ do $0,70 \text{ g/cm}^3$ (Jackson, 1993). Armstrong i Moxon su 1990. godine smanjili gustoću emulzijskih eksploziva miješanjem triju vrsta emulzijskih matrica uz dodatak 1,5% masenog udjela staklenih mikrokuglica, polistirena, perlita ili piljevine te su dobili eksploziv gustoća od $0,8 \text{ g/cm}^3$ do $1,05 \text{ g/cm}^3$ (Škrlec, 2015).

2.1. Materijali kojima se postiže smanjenje gustoće

2.1.1. Perlit

Perlit je kemijski inertan materijal s pH vrijednosti 7. To je eruptivni aluminijsko-silikatni mineral pjenaste građe sa visokim udjelom vode, koji uglavnom nastaje hidratacijom minerala opsidijana (vulkansko staklo). Zagrijavanjem do 871°C dolazi do omekšavanja zbog prelaska vode u vodenu paru koja napuhuje materijal te se volumen povećava 7 do 16 puta. Gustoća ekspandiranog perlita iznosi $\rho = 0,03-0,150 \text{ g/cm}^3$.

Perlit se sastoji od 70-75% SiO_2 , 12-15% Al_2O_3 , 3-4% Na_2O , 3-5% K_2O , 0.5-2%, Fe_2O_3 , 0,2-0,7% MgO , 0,5-1,5%, CaO i 3-5% H_2O u kristalnoj rešetci (Škrlec, 2015). Zrnca perlita prikazana su na slici 2-2.



Slika 2-2. Zrnca perlita (Wikipedia, 2023)

2.1.2. Vermikulit

Vermikuliti su skupina minerala koji nastaju iz tinjaca gubitkom alkalija, na mjesto kojih primaju vodu. Žarenjem gube vodu i povećavaju obujam te se šire u smjeru okomitom na slojeve (Hrvatska enciklopedija, 2013 – 2024).

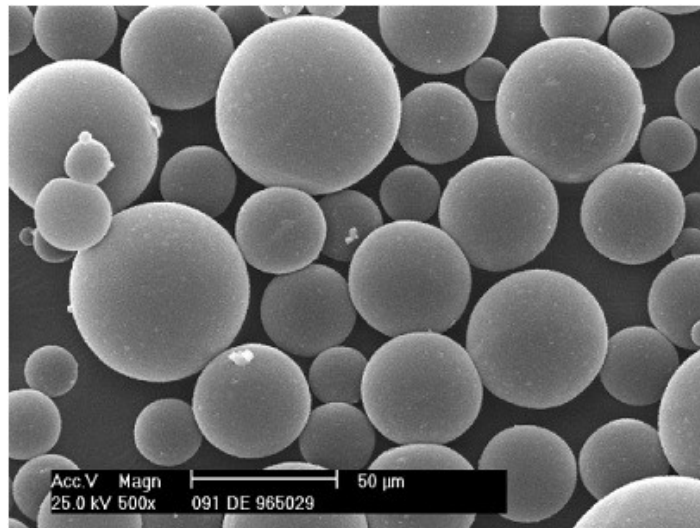
Negoriv je, bez mirisa, netopljiv u vodi i ima veliku otpornost prema djelovanju kiselina i lužina što ga svrstava u kemijski inertne materijale. Gustoća vermikulita iznosi $\rho = 0,07-0,13 \text{ g/cm}^3$ (Škrlec, 2015). Zrnca Vermakulita prikazana su na slici 2-3.



Slika 2-3. Zrnca vermikulita (Okorder, 2023)

2.1.3. Staklene mikrokuglice

Staklene mikrokuglice napravljene su od smjese borosilikata i CaHNaO_2 . Promjera su od $5\mu\text{m}$ do $180\mu\text{m}$ i gustoće $\rho = 0,06 - 0,8 \text{ g/cm}^3$. Često se koriste kao senzibilizator emulzijskih eksploziva, vodenih gelova i heavy-ANFO eksploziva (Cospheric, 2020). Na slici 2-4. prikazane su staklene mikrokuglice.



Slika 2-4. Staklene mikrokuglice (Bariteworld, 2023)

2.1.4. Plastične mikrokuglice

Plastične mikrokuglice nastaju dovođenjem topline plinu koji ekspandira u jako malim sferama obloženim ljuskom od polimera. Prilikom ekspanzije plina dolazi do povećanja volumena kuglica do 40 puta u odnosu na početni volumen. Krajnja veličina takvih ekspanziranih plastičnih mikrokuglica je oko $90\mu\text{m}$, a gustoća u rasutom stanju $0,03 \text{ g/cm}^3$ (Silva, 2007). Na slici 2-5. prikazane su plastične mikrokuglice.



Slika 2-5. Plastične mikrokuglice (Lucky rubber plastic manufacture, 2023)

2.1.5. **Polistiren**

Polistiren je polimerni materijal koji zbog raznolikosti u primjeni, lake preradljivosti i relativno niske cijene zauzima četvrto mjesto u ukupnoj svjetskoj potrošnji plastomera.

Obični polistiren (homopolimer), nazivan samo polistiren, proziran je, sličan staklu, lake bojivosti, tvrd ali krhak, male udarne žilavosti. Nastaje radikalskom polimerizacijom stirena, većinom u masi ili vodenoj suspenziji. Gustoća polistirena iznosi $\rho = 0,02-0,003 \text{ g/cm}^3$. (Hrvatska enciklopedija, 2013 – 2024.) Na slici 2-6. prikazane su kuglice polistirena.



Slika 2-6. Polistiren (Intekpolimer, 2021)

2.1.6. Ekspandirani polistiren

Pjenasti polistiren (ekspandirani, celularni, PS-E; u nas poznat kao *stiropor*) proizvodi se impregniranjem polistirena lakohlapljivim kapljevinama, koje zagrijavanjem ekspandiraju i stvaraju ćelijastu strukturu materijala. Tako nastaje tzv. čvrsta pjena, vrlo lagana, izvanredan materijal za toplinsku i zvučnu izolaciju u građevinarstvu, za ambalažu robe osjetljive na udar, za izradbu plovaka, pojaseva za spašavanje, dijelova čamaca i pontona. Prema običnomu polistirenu boljih je mehaničkih svojstava i poboljšane kemijske postojanosti, rabi se za izradbu kućišta i dijelova aparata i instrumenata, uredskoga, školskoga, kućanskoga, kozmetičkoga i medicinskog pribora i dr. (Hrvatska enciklopedija, 2013 – 2024).

Zrnca ekspandiraju povećavajući svoj volumen za 30 do 50 puta, a gustoća se smanji s oko $0,60 \text{ g/m}^3$ na $0,01 \text{ g/m}^3$ do $0,03 \text{ g/m}^3$. Na slici 2-7. prikazane su kuglice ekspandiranog polistirena.



Slika 2-7. Ekspandirani polistiren (Epstec, 2015)

2.1.7. Poliuretanska pjena

Poliuretansku pjenu (skraćeno “PU pjena”) prvi puta je sintetizirano profesor Otto Bayer, 1937. godine. Zbog svoje inovativnosti i kvalitete primjenjuje se i danas u automobilske industriji, graditeljstvu (zbog odličnih termalnih karakteristika), izradi namještaja, cipela i industriji madraca (Biosan, 2023).

Prednosti poliuretanske pjene su visoka mehanička čvrstoća, otpornost na kiseline i lužine te niska apsorpcija vode (1,3% u 28 dana). Gustoća poliuretanske pjene iznosi $\rho = 0,019-0,040 \text{ g/cm}^3$ (Oriolik, 2023). Na slici 2-8. prikazana je poliuretanska pjena.



Slika 2-8. Poliuretanska pjena(CEW, 2024)

2.1.8. Ugljen u prahu

Ugljen u prahu je praškasta tvorevina nastala mehaničkim drobljenjem ugljena koji se koristi u proizvodnji željeza i čelika, proizvodnji kalupa, kao aditiv u asfaltima i sl. Gustoća ugljenog praha iznosi $\rho = 0,27-0,50 \text{ g/cm}^3$, ovisno o veličini čestica i vrsti ugljena. (African pegmatite, 2023). Na slici 2-9 prikazan je ugljen u prahu.



Slika 2-9. Ugljen u prahu (Indiamart, 2024)

2.1.9. Piljevina i drveno brašno

Piljevina je otpadna drvena građa koja nastaje kao nuspojava piljenja, odnosno onaj dio drvene građe kojeg usitnjavaju zupci pile. Danas se, uz koru drveta i druge nusproizvode drvene ind., koristi za loženje visokih peći (Proleksis eksciklopedia, 2012) .

Gustoća piljevine koja se koristi za smanjenje gustoće eksploziva iznosi $\rho = 0,10-0,35 \text{ g/cm}^3$ (Rock et al, 2005).

Drveno brašno se proizvodi od piljevine, strugotina ili panjeva. Na slici 2-10. prikazano je drveno brašno.



Slika 2-10. Drveno brašno (iBuilder, 2015)

2.1.10. Ostali

Od ostalih materijala koji se koriste za smanjivanje gustoće eksplozivnog punjenja valja spomenuti otpad iz prerade šećerne trske čija gustoća iznosi $\rho = 0,12-0,18 \text{ g/cm}^3$ koji je prikazan na slici 2-11. Nadalje, koriste se ljuske žitarica i kikirikija (gustoća ljusaka zobi iznosi $\rho = 0,128 \text{ g/cm}^3$), granule celuloza koje su nastale recikliranjem celuloze čija gustoća iznosi $\rho = 0,16-0,29 \text{ g/cm}^3$ i reciklirana guma.



Slika 2-11. Otpaci iz prerade šećerne trske (Wikipedia, 2014)

3. MINERSKO-TEHNIČKE KARAKTERISTIKE EKSPLOZIVA

3.1. Brzina detonacije

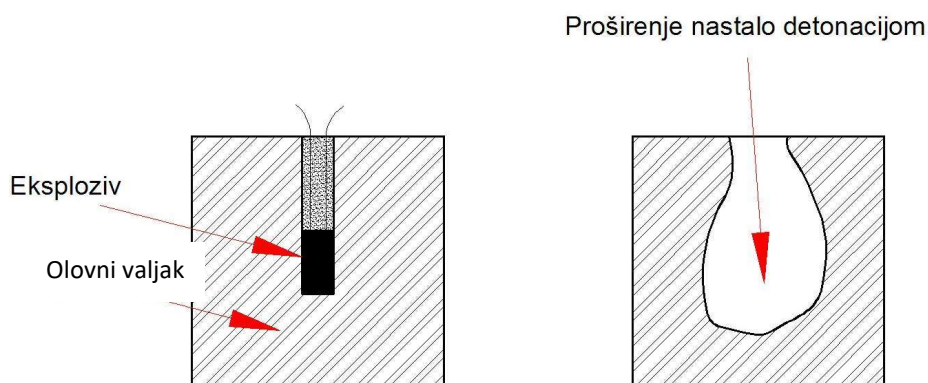
Brzina detonacije je karakteristika eksploziva o kojoj ovisi brizantnost eksploziva te označava brzinu kojom se detonacijski val širi od mjesta iniciranja do kraja eksplozivnog naboja (Krsnik, 1989).

Brzina detonacije ovisi o

- gustoći punjenja,
- kritičnom promjeru eksplozivnog punjenja,
- snazi inicijalnog impulsa dovedenog eksplozivnoj tvari.

3.2. Radna sposobnost eksploziva

Radna sposobnost, odnosno snaga eksploziva, određuje se Trauzlovom probom. Proba se izvodi na način da se u sredini olovnog cilindra, promjera 200 mm i visine 200 mm, nalazi bušotina promjera 25 mm i dubine 125 mm. Na dno bušotine postavi se eksploziv mase 10 g zajedno s trenutnim električnim detonatorom, dok se ostatak bušotine popuni sitnim suhim pijeskom. Detonacijom eksploziva dolazi do proširenja bušotine te se zatim ista ispuni vodom iz kalibrirane menzure pa se na taj način izmjeri volumen u cm^3 . Nakon što se od dobivenog volumena odbije prvobitni volumen, koji iznosi $61,3 \text{ cm}^3$, izračunat je volumen proširenja u cm^3 koji služi kao mjerilo radne sposobnosti eksploziva (Krsnik, 1989). Na slici 3-1. prikazana je Trauzlova proba



Slika 3-1. Određivanje radne sposobnosti eksploziva Trauzlovom probom (Krsnik, 1989)

Danas se, s obzirom na veliku gustoću olova, kao zamjena koriste i drugi materijali za izradu cilindra. Naime, olovo ima gustoću $\rho = 11,35 \text{ g/cm}^3$, zbog čega je otežano rukovanje takvim blokom pa je stoga aluminij, čija gustoća iznosi $\rho = 2,70 \text{ g/cm}^3$, dobra zamjena (Škrlec, 2015).

3.3. Osjetljivost na udar

Osjetljivost na udar je karakteristika eksploziva koja ovisi o kemijskom sastavu te mora biti u određenim granicama kako bi se moglo sigurno rukovati i transportirati eksploziv. Gospodarski eksplozivi moraju biti neostjetljivi ili vrlo malo osjetljivi na udar i trenje.

Ispitivanje osjetljivosti na udar provodi se na dva načina. Prvi je ispitivanje osjetljivosti na udar Kastovim aparatom. Ispitivanje se provodi spuštanjem utega od 2 kg na Kastov aparat u kojem je eksploziv. Mjerilo osjetljivosti je visina u cm s koje se šest puta spušta navedeni uteg, a da pri tome niti jednom ne dođe do detonacije eksploziva u Kastovom aparatu. Drugi način je korištenjem BAM metode. U navedenoj se metodi osjetljivost na udar ispituje padom utega različitih masa s različitih visina sa postupnim povećavanjem kinetičke energije udara. Osjetljivost na udar je ona veličina mase utega i visine pada pri kojoj još nije došlo do detonacije.

3.4. Prijenos detonacije

Prijenos detonacije predstavlja maksimalnu udaljenost između dvije patrone pri kojoj se detonacija jedne patrone prenese na drugu.

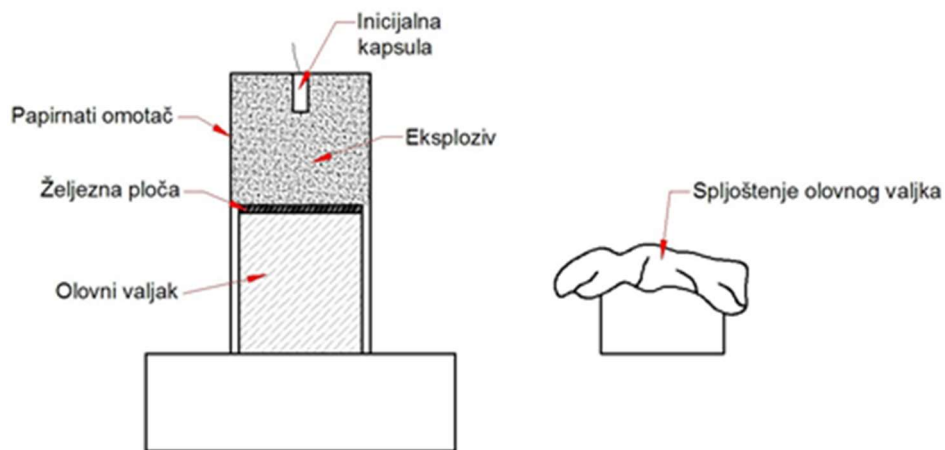
Ispitivanje prijenosa detonacije izvodi se na način da se dvije patrone eksploziva, mase 100g i promjera 30mm, postave na ravnu pješčanu podlogu. Patrone leže na istom pravcu te su udaljene četiri cm. Jedna patrone se inicira rudarskom kopicom br.8 i ukoliko dođe do prijenosa detonacije na drugu patronu, onda se povećava razmak patrona sve dok se utvrdi najveća udaljenost pri kojoj još dolazi do prijenosa detonacije.

Kod vodoplastičnih eksploziva do prijenosa detonacije dolazi samo međusobnim kontaktom (Krsnik, 1989).

3.5. Brizantnost eksploziva

Brizantnost eksploziva, odnosno radna snaga, definira se kao razorno djelovanje eksploziva koje je rezultat dinamičkog udara produkata detonacije na okolnu sredinu.

Brizantnost eksploziva određuje se na nekoliko načina, a neki od primjera su Hessova proba i Kastova metoda. Ispitivanje Hessovom probom se provodi tako da se na dva olovna valjka, promjera 40mm i visine 50mm, stavi takni čelični cilindar sa 100 g eksploziva koji se inicira rudarskom kapičom br.8. Zbog detonacije se olovni valjci deformiraju te je ta deformacija, izražena u mm, mjerilo brizantnosti, kao što je i prikazano na slici 3-2. Prema Kastovoj se metodi mjeri deformacija bakrenog cilindra, promjera 7mm i visine 10,5 mm (Ester, 2005).



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

3.6. Energija eksploziva

Detonacijom se oslobađa velika količina energije koja se pojavljuje u dva osnovna oblika. Prva od njih je udarna energija koja se javlja kao posljedica visokog tlaka na fronti detonacije. Udarne je energija zaslužna za lom stijenske mase i ovisi o gustoći eksplozivnog punjenja, svojstvima eksploziva i brzini detonacije. Kako se udarni val udaljava od središta detonacije tako se amplituda tlaka i energija smanjuju te udarni val prelazi u elastični val. Drugi oblik je plinska, odnosno potisna energija. Potisna energija nastaje ekspanzijom plinova visokog tlaka i temperature koji se stvaraju nakon prolaska detonacijske fronte. Potisna je faza zaslužna za širenje pukotina u stijenskoj masi i razbacivanje materijala (Škrlec, 2015).

3.7. Volumen i specifični tlak plinova eksplozije

Količina plinova koji se razviju prilikom detonacije eksploziva ovise o vrsti eksploziva. Volumen plinova nastalih prilikom detonacije 1 kg eksploziva izražava se u dm^3 , a mjeri se pri temperaturi od 0°C i tlaku 1 bar.

Specifičan tlak je maksimalan tlak koji nastaje pri detonaciji 1 kg eksploziva u prostoru od 1 dm^3 te se izražava u barima (Krsnik, 1989).

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

3.8. Bilanca kisika

Bilanca kisika ima značajan utjecaj na razvijanje otrovnih plinova. Ona podrazumijeva odnos količine kisika koju sadrži eksploziv i količinu kisika koja je potrebna za potpunu oksidaciju svih gorivih tvari u sastavu eksploziva.

Ukoliko ostane količina kisika u suvišku nakon eksplozije, onda je bilanca kisika pozitivna (jače pozitivna bilanca kisika dovodi do toga da se dio potencijalne energije eksplozivnog punjenja potroši na endotermne reakcije pri stvaranju otrovnih dušikovih oksida), a ako nastane manjak kisika onda je bilanca negativna (oslobođena je manja količina energije punjenja zbog nepotpunog sagorijevanja). Ukoliko ne nastane ni višak ni manjak kisika, onda je bilanca kisika uravnotežena (oslođa se maksimalna količina energije eksplozivnog punjenja).

Gospodarski eksplozivi moraju imati malo pozitivnu bilancu kisika ili uravnoteženu bilancu kisika. Negativna bilanca kisika dovodi do nepotpunog oksidiranja, odnosno do stvaranja ugljičnog monoksida (CO) koji je otrovan, a kod jače pozitivne bilance kisika dolazi do stvaranja dušikovog oksida (NO) koji je još otrovniji.

Kod proračuna bilance kisika treba uzeti u obzir kisik koji je potreban za izgaranje obloge patrone, a prilikom miniranja u ugljenu potrebno je uzeti u obzir i kisik koji je potreban za djelomičnu oksidaciju ugljene prašine koja se nalazi u minskoj bušotini ili je nastala prilikom detonacije (Krsnik, 1989).

3.9. Temperatura eksplozije

Temperatura eksplozije je maksimalan iznos temperature koja nastaje detonacijom eksploziva uz pretpostavku konstantnog volumena. Teoretski iznosi između 1000°C i 6000°C, no iznos stvarne temperature je uvijek niži od navedenih vrijednosti zbog hlađenja plinova u dodiru s okolnom stijenom. Stvarne temperature nastale detonacijom gospodarskih eksploziva iznose između 2100°C i 4200°C.

3.10. 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.

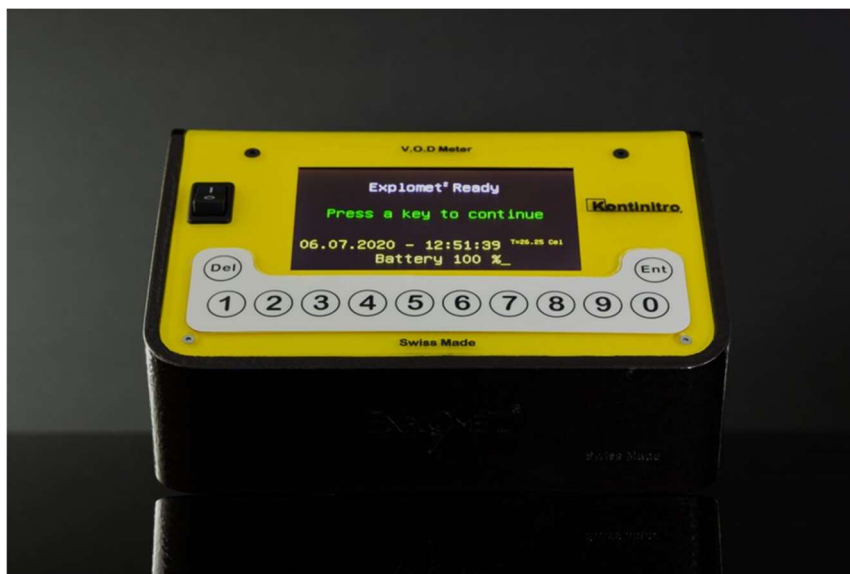
Kritični promjer može iznositi reda veličine 1 mm kod npr. pentrita pa do nekoliko desetaka centimetara kod nekih gospodarskih eksploziva.

4. METODOLOGIJA MJERENJA BRZINE DETONACIJE EKSPLOZIVA SMANJENE GUSTOĆE

Brzina detonacije eksploziva predstavlja važnu karakteristiku eksploziva jer o njoj ovisi brizantnost eksploziva, a prema njenom se iznosu ocjenjuje adekvatnost eksploziva za pojedinu uporabu.

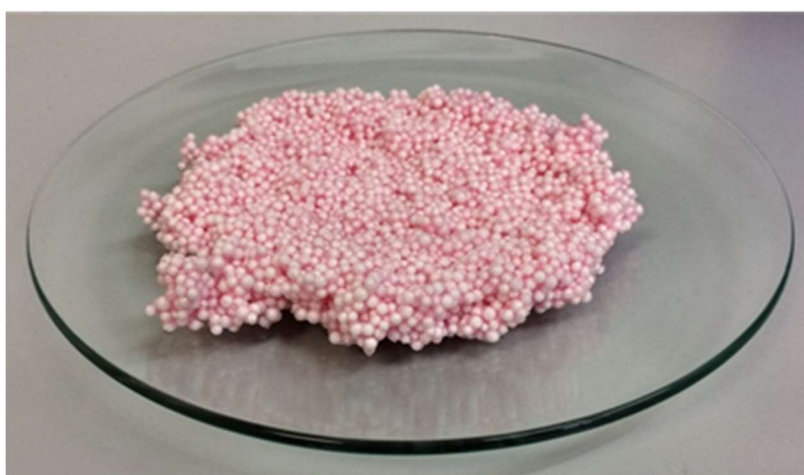
Brzina detonacije mjeri se prema zahtjevima norme *HRN EN 13631-14:2004 Ekspozivi za civilnu uporabu. Jaki ekspozivi 14. dio: Određivanje brzine detonacije (EN 13631.14:2004)*.

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 4-1. 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. Emulzijska matrica je koloidna mješavina otopljena u vodi koja je disperzirana u uljnoj fazi. Emulzijska matrica kao takva nema eksplozivna svojstva, već senzibilizacijom pomoću zrnaca koje sadrže zrak, tj. plinsku fazu, u obliku staklenih mikrokuglica, granuliranog amonijeva nitrata ili perlita koje predstavljaju tzv. vruće točke, postaje eksplozivna. Specifikacije emulzijske matrice dane su u tablici 4-1.



Slika 4-2. Emulzijski eksploziv smanjene gustoće

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 uporanu. 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 mjeranju, proizveden je tehnologijom suspenzijske polimerizacije, a gustoće je $\rho = 0,019 \text{ g/cm}^3$. Na slici 4-3. prikazane su granule ekspandiranog polistirena.



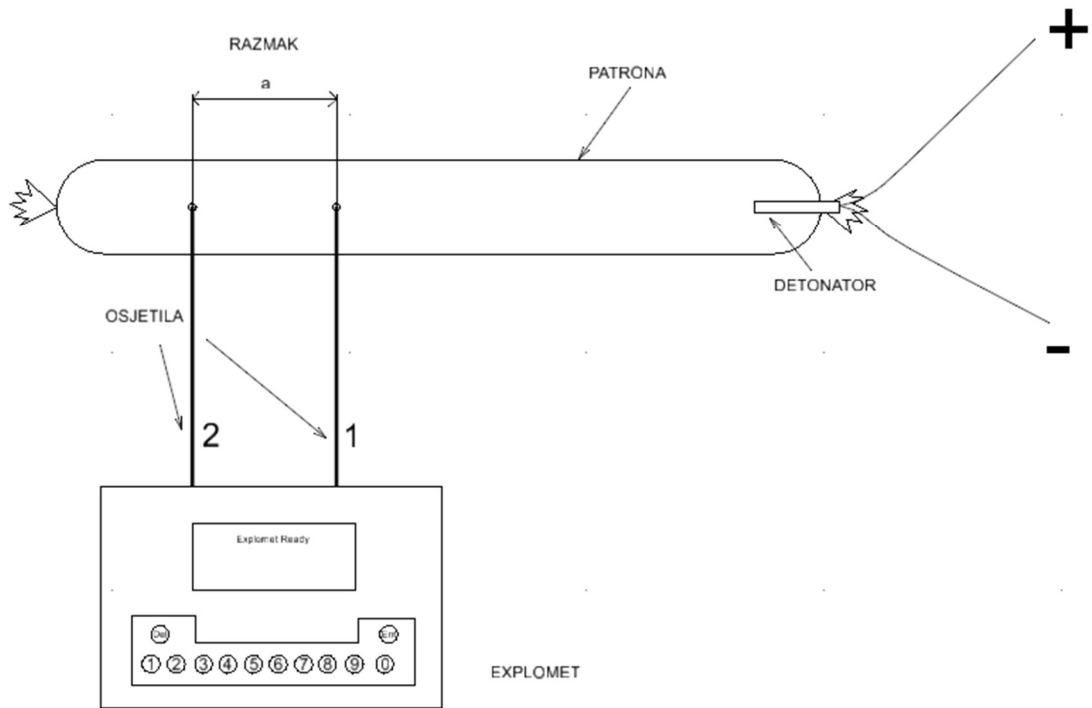
Slika 4-3. Ekspandirani polistiren (EPS)

4.1. Mjerenje brzine detonacije eksploziva smanjene gustoće

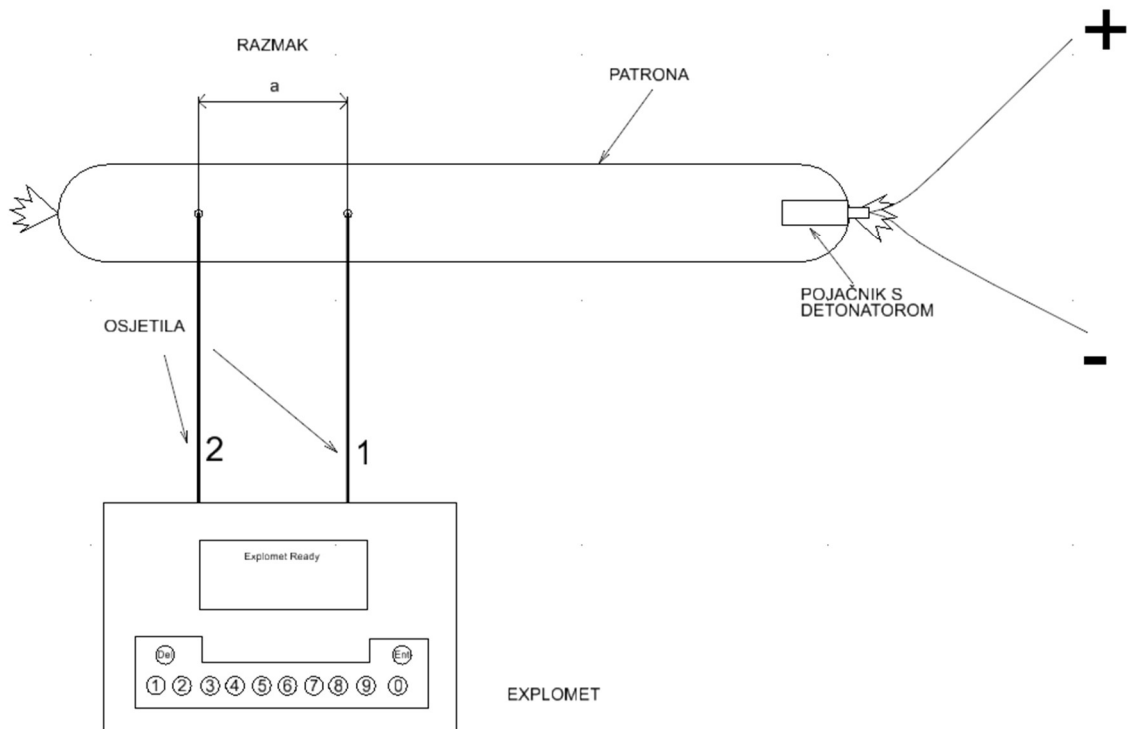
Mjerenje brzine detonacije je izvedeno u uvjetima otvorenosti u različitim promjerima naboja eksploziva pomoću uređaja Explomet i to sa dva osjetila.

Udaljenost između osjetila je iznosila 100 mm, a prvo osjetilo je postavljeno na udaljenosti od 380 mm od mjesta iniciranja.

Uzorci su inicirani na dva načina, trenutnim električnim detonatorima i trenutnim električnim detonatorima s pentritskim pojačnicima mase 20 g. Prije postavljanja osjetila u otvore, izmjerena je osna udaljenost između otvora. Za iniciranje s trenutnim električnim detonatorima provedena su po 3 mjerenja za svaki promjer, a za iniciranje s trenutnim električnim detonatorima s pojačnicima provedena su po 2 mjerenja za svaki pojedini promjer. Shematski prikaz mjerenja prikazan je na slikama 4-4. i 4-5, a na slici 4-6 prikazan je postav mjerenja za promjer 50 mm za oba načina iniciranja.



Slika 4-4. Shematski prikaz određivanja brzine detonacije (inicirano električnim detonatorom)



Slika 4-5. Shematski prikaz određivanja brzine detonacije (inicirano električnim detonatorom s pojačnikom)



Slika 4-6. Postav mjerenja za promjer 50 mm a) iniciranje električnim detonatorom b) iniciranje električnim detonatorom s pojačnikom.

U tablicama 4-2. i 4-3. prikazani su rezultati mjerenja

Tablica 4- 2. Rezultati mjerenja – iniciranje trenutnim električnim detonatorom

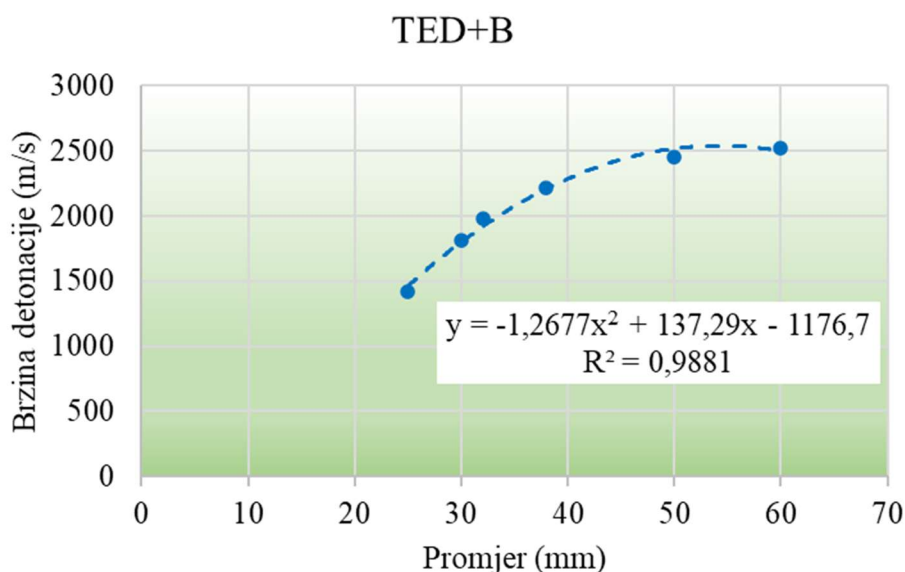
Red. Br.	Duljina patrone, L (mm)	Promjer patrone, \varnothing (mm)	Razmak između osjetila, a (mm)	Izmjerena brzina detonacije, v_1 (m/s)	Srednja vrijednost brzine detonacije, v_{sr} (m/s)
1.	500	60	100	2392	2344
2.	500	60	100	2219	
3.	500	60	100	2420	
4.	500	50	100	2373	2373
5.	500	50	100	-	-
6.	500	50	100	-	-

Tablica 4- 3. Rezultati mjerenja – iniciranje trenutnim električnim detonatorom s pojačnikom

Red. Br.	Duljina patrone, L (mm)	Promjer patrone, \varnothing (mm)	Razmak između osjetila, a (mm)	Izmjerena brzina detonacije, v_1 (m/s)	Srednja vrijednost brzine detonacije, v_{sr} (m/s)
1.	500	60	100	2597	2525
2.	500	60	100	2453	
3.	500	50	100	2480	2458
4.	500	50	100	2435	
5.	500	38	100	2236	2214
6.	500	38	100	2191	
7.	500	32	100	2013	1978
8.	500	32	100	1942	
9.	500	30	100	1847	1817
10.	500	30	100	1786	
11.	500	25	100	1436	1417
12.	500	25	100	1397	
13.	500	22	100	-	-

5. REZULTATI I ANALIZA REZULTATA

Za rezultate mjerenja brzine detonacije napravljena je regresijska analiza s promjerom emulzijskih eksploziva smanjene gustoće. Za regresijsku analizu korištena je regresija polinomom drugog stupnja. Zavisnost brzine detonacije od promjera emulzijskih eksploziva smanjene gustoće za iniciranje trenutnim električnim detonatorima s pojačnicima prikazana je dijagramom na slici 5-1. Za iniciranje samo s trenutnim električnim detonatorima nije prikazana zavisnost brzine detonacije od promjera naboja iz razloga što nema dovoljno različitih promjera te nije moguće prikazati istu.



Slika 5-1. Zavisnost brzine detonacije od promjera naboja – iniciranje TED s pojačnikom.

Iz rezultata u tablici 4-2. je vidljivo da kritični promjer za ispitivani emulzijski eksploziv smanjene gustoće iniciran trenutnim električnim detonatorom iznosi 50 mm. To je promjer kod kojega je jedanput u tri mjerenja dokazana stabilna detonacija mjerenjem brzine detonacije dok je u dva puta došlo do izostanka detonacije. Kod promjera od 60 mm je u sva tri mjerenja dokazana stabilna detonacija mjerenjem brzine detonacije pri čemu srednja vrijednost brzine iznosi $v_{sr} = 2344$ m/s.

Iz rezultata u tablici 4-3. je vidljivo da kritični promjer za ispitivani emulzijski eksploziv smanjene gustoće iniciran trenutnim električnim detonatorom s pojačnikom iznosi 22 mm. To je promjer kod kojega nije dokazana stabilna detonacija mjerenjem brzine detonacije dok je kod prvog većeg promjera, 25 mm, dokazana stabilna brzina detonacije u dva mjerenja pri čemu srednja vrijednost brzine iznosi $v_{sr} = 1417$ m/s.

Iz dijagrama na slici 5-1 je vidljivo da se zavisnost brzine detonacije od promjera eksploziva smanjene gustoće može izračunati prema izrazu 5-1 uz koeficijent determinacije $R^2 = 0,9881$ odnosno 98,81 %:

$$v_d = -1,2677d^2 + 137,29 d - 1176,7, \quad (5-1)$$

gdje je:

v_d – brzina detonacije (m/s),

d – promjer eksploziva (mm).

Iz dijagrama na slici 5-1 i iz tablice 4-3 vidljivo je da srednja vrijednost brzine detonacije emulzijskih eksploziva smanjene gustoće raste s promjerom naboja iniciranih trenutnim električnim detonatorom s pojačnikom od početnih 1417 m/s za promjer 25 mm do 2525 m/s za promjer 60 mm. Također je vidljivo da se je brzina detonacije, kod dva najveća promjera (50 mm i 60 mm) ustabilila na vrijednosti oko 2500 m/s s jako malim odstupanjem između ta dva promjera (68 m/s).

6. ZAKLJUČAK

Kritični promjer emulzijskih eksploziva smanjene gustoće određen je s ispitivanjima na poligonu s ukupno 19 uzoraka.

Kritični promjer za ispitivani emulzijski eksploziv smanjene gustoće iniciran trenutnim električnim detonatorom iznosi 50 mm. Kod tog promjera dokazana je stabilna brzina detonacije jedanput u tri mjerenja dok je u dva puta došlo do izostanka detonacije. Kod prvog većeg promjera, 60 mm, je u sva tri mjerenja dokazana stabilna detonacija mjerenjem brzine detonacije pri čemu srednja vrijednost brzine iznosi $v_{sr} = 2344$ m/s.

Kritični promjer za ispitivani emulzijski eksploziv smanjene gustoće iniciran trenutnim električnim detonatorom s pojačnikom iznosi 22 mm. Kod tog promjera nije dokazana stabilna detonacija mjerenjem brzine detonacije. Kod prvog većeg promjera, 25 mm, dokazana je stabilna brzina detonacije u dva mjerenja pri čemu srednja vrijednost brzine iznosi $v_{sr} = 1417$ m/s.

Zabilježen je rast srednja vrijednosti brzine detonacije emulzijskih eksploziva smanjene gustoće s promjerom naboja iniciranih trenutnim električnim detonatorom s pojačnikom od početnih 1417 m/s za promjer 25 mm do 2525 m/s za promjer 60 mm.

Vrijednost brzina detonacije se ustabilila kod dva najveća promjera (50 mm i 60 mm) na vrijednosti oko 2500 m/s s jako malim odstupanjem između ta dva promjera (68 m/s).

Preporuka je da se obavi po još mjerenje brzine detonacije za svaki promjer emulzijskog eksploziva smanjene gustoće za iniciranje trenutnim električnim detonatorom kako bi se imalo po tri ispitivanja za svaki promjer kako je i kod iniciranja eksploziva samo s trenutnim električnim detonatorima.

7. LITERATURA

African Pegmatite, 2023. Coal dust application. URL: <https://mineralmilling.com/coal-dust-applications-uses/> (9.2.2024.)

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

Bariteworld, 2023. Hollow Glass Microspheres. URL: <https://bariteworld.com/industrial-minerals-products/hollow-glass-microspheres/> (9.2.2024.)

Biosan, 2023. Što je to poliuretanska pjena? URL: <https://biosan-madraci.hr/sto-je-poliuretanska-pjena/?cn-reloaded=1> (9.2.2024.)

CEW, 2024. How Is Polyurethane Foam Made? URL: <https://www.cewheelsinc.com/polyurethane-foam-made/> (9.2.2024.)

Cospheric, 2020. Hollow Glass Microspheres. URL: https://www.cospheric.com/hollow_glass_microspheres_beads_powders.htm (9.2.2024.)

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.

Epstec, 2015. EPS. URL: <https://www.epstec.com/what-is-the-expanded-polystyrene-eps-block-process-in-detail/> (9.2.2024.)

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

HRN EN 13631-13:2003: *Eksplozivi za civilnu uporabu. Jaki eksplozivi. 14. dio: Određivanje gustoće (EN 13631-13:2003)*

HRN EN 13631-14:2004 *Ekspozivi za civilnu uporabu. Jaki ekspozivi 14. dio: Određivanje brzine detonacije (EN 13631.14:2004).*

Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2013 – 2024. URL: <https://www.enciklopedija.hr/clanak/vermikuliti> (9.2.2024.)

Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2013 – 2024. URL: <https://www.enciklopedija.hr/clanak/polistiren> (9.2.2024.)

iBuilder, 2015. Drveno brašno. URL: <https://ibuilder.hr.techinfus.com/doska/drevesnaya-muka/> (9.2.2024.)

Indiamart, 2024. Coal powder. URL: <https://www.indiamart.com/proddetail/coal-powder-9655805748.html> (9.2.2024.)

Intekpolimer, 2021. Polistiren. URL: <https://www.intekpolimer.com/polistiren> (9.2.2024.)

JACKSON, M M., (1993): Low Strength Water Gel Explosive, In Proceedings ISEE Annual Conference, Pp 493-499 (The International Society of Explosives Engineers: Cleveland) pp 493-501

Kontinitro, 2024. Explomet2 series. URL: <https://www.kontinitro.com/explomet-2/> (9.2.2024.)

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

Lucky rubber plastic manufacture, 2023. Plastic hollow balls. URL: <https://www.precise-rubber.com/e-ab06-23%20plastic%20microspheres.html> (9.2.2024.)

Okorder, 2023. Vermiculite. URL: https://www.okorder.com/p/expanded-vermiculite-agriculture-vermiculite-bulk_924859.html (9.2.2024.)

Oriolik, 2023. URL: <https://www.oriolik.com/> (9.2.2024.)

Proleksis enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2012. URL: <https://proleksis.lzmk.hr/55759/> (9.2.2024.)

SILVA G.C.O., (2007): Development, Characterization and Application of a Reactive Bulking Agent for Wall Control. Disertacija. Queen's University Kingston, Pp 370, Ontario.

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

Wikipedia, 2023. Perlite, URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Perlite> (9.2.2024.)

Wikipedia, 2014. Bagasse. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Bagasse> (9.2.2024.)