

Brzina i tlakovi detonacijskog procesa eksploziva smanjene gustoće s dodatkom ekspandiranog polistirena

Jurić, Fran

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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:169:695692>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**



Repository / Repozitorij:

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



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

**BRZINA I TLAKOVI DETONACIJSKOG PROCESA EKSPLOZIVA SMANJENE
GUSTOĆE S DODATKOM EKSPANDIRANOG POLISTIRENA**

Diplomski rad

Fran Jurić

R-201

Zagreb, 2019.

BRZINA I TLAKOVI DETONACIJSKOG PROCESA EKSPLOZIVA SMANJENE GUSTOĆE S DODATKOM EKSPANDIRANOG POLISTIRENA

Fran Jurić

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

Sažetak

U radu su prikazana svojstva i sastav eksploziva, detonacijska svojstva te njihov utjecaj na izvedbu miniranja. Navedeni su postupci smanjivanja gustoća eksploziva i utjecaj gustoće eksploziva na detonacijska svojstva eksploziva. U radu se nalaze ispitivanja koja upućuju na uspješnost fragmentacije stijena primjenom eksploziva smanjene gustoće.

Ključne riječi: eksplozivi, eksplozivi smanjene gustoće, brzina detonacije, tlak detonacije, fragmentacija stijene, EPS

Završni rad sadrži: 46 stranice, 8 tablica, 18 slika, i 34 reference.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentori: Dr. sc. Mario Dobrilović, izvanredni profesor, RGNF

Pomagao pri izradi: Dr. sc. Mario Dobrilović, izvanredni profesor, RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Mario Dobrilović, izvanredni profesor, RGNF
Dr. sc. Vinko Škrlec, docent, RGNF
Dr. sc. Vječislav Bohanek, docent, RGNF

VELOCITY AND DETONATION PRESSURE OF LOW DENSITY EXPLOSIVES WITH EXPANDED POLYSTYRENE

Fran Jurić

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

Abstract

This thesis describes the properties and composition of explosives, as well as their detonation properties and the effects of those properties on blasting. The properties of lowering the explosive density and the effect of explosive density are also described. The thesis also contains the results of tests which illustrate the effectiveness of rock fragmentation while using lower density explosives.

Keywords: explosives, low density explosives, velocity detonation, detonation pressure, rock fragmentation, EPS

Thesis contains: 46 pages, 8 tables, 18 figures, and 34 references.

Original in: Croatian

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

Supervisors: Associate Professor Mario Dobrilović, PhD

Tech. assistance: Associate Professor Mario Dobrilović, PhD

Reviewers: Associate Professor Mario Dobrilović, PhD

Assistant Professor Vinko Škrlec, PhD

Assistant Professor Vječislav Bohanek, PhD

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. SVOJSTVA EKSPLOZIVA.....	2
2.1. SASTAV EKSPLOZIVA.....	4
2.2. FIZIKLANO-KEMIJSKE KARAKTERISTIKE EKSPLOZIVA.....	4
2.2.1. Gustoća.....	5
2.2.2. Bilanca kisika.....	5
2.2.3. Tlak detonacije.....	6
2.2.4. Volumen plinova eksplozije.....	7
2.2.5. Temperatura eksplozije.....	7
2.3. DETONACIJSKE KARAKTERISTIKE EKSPLOZIVA.....	8
2.3.1. Gustoća eksploziva.....	8
2.3.2. Brzina detonacije.....	8
2.3.3. Mogućnosti iniciranja.....	9
2.3.4. Temperatura paljenja eksploziva.....	9
2.3.5. Osjetljivost eksploziva na udar.....	9
2.3.6. Osjetljivost eksploziva na trenje.....	10
2.3.7. Brizantnost i radna sposobnost.....	11
3. EKSPLOZIVI SMANJENE GUSTOĆE.....	14
3.1. MATERIJALI ZA SMANJENJE GUSTOĆE.....	17
3.1.1. Perlit.....	17
3.1.2. Vermikulit.....	18
3.1.3. Staklene mikrokuglice.....	18
3.1.4. Plastične mikrokuglice.....	19
3.1.5. Polistiren.....	20
3.1.6. Ekspandirani polistiren (stiropor).....	20
3.1.7. Poliuretanska pjena.....	21
3.1.8. Ugljen u prahu.....	21
3.1.9. Piljevina i drveno brašno.....	22
3.1.10. Otpaci iz prerade šećerne trske.....	23
3.1.11. Ljuske žitarica i kikirikija.....	23
3.1.12. Granule celuloze.....	24
4. UTJECAJ EKSPLOZIVA NA FRAGMENTACIJU STIJENSKE MASE.....	25

4.1. SVOJSTVA STIJENSKE MASE.....	26
4.1.1. Čvrstoća stijene.....	26
4.1.2. Volumna gustoća.....	27
4.1.3. Deformabilnost.....	27
4.1.1. Diskontinuiteti.....	29
4.2. KONTROLABILNI PARAMETRI MINIRANJA.....	30
4.2.1. Visina kosine (etaže).....	30
4.2.2. Inklinacija (kut nagiba) minske bušotine.....	30
4.2.3. Čepljenje minske bušotine.....	30
4.2.4. Probušenje.....	31
4.2.5. Izbojnica i razmak između minskih bušotina.....	31
4.2.6. Razmak minskih bušotina.....	32
4.2.7. Odstupanje (devijacija) minskih bušotina.....	32
4.2.8. Promjer minske bušotine.....	32
5. TLAK I BRZINA DETONACIJE EKSPLOZIVA SMANJENE GUSTOĆE.....	33
6. ZAKLJUČAK.....	43
7. LITERATURA.....	44

POPIS SLIKA

Slika 2-1 Uređaj za ispitivanje eksploziva na udar (Ozm research, 2018).....	10
Slika 2-2 Uređaj za ispitivanje eksploziva na trenje (Ozm research, ..2018).....	11
Slika 3-1 Zrnca perlita (Seedsnpots, 2018).....	17
Slika 3-2 Zrnca vermikulita (Veliki rečnik, 2016).....	18
Slika 3-3 Staklene mikrokuglice (Wikipedia, 2009).....	19
Slika 3-4 Plastične mikrokuglice (Everychina, 2018).....	19
Slika 3-6 Zrnca ekspandiranog polistirena (Polistireninio putplasćio asociacija, 2017).....	20
Slika 4-7 Poliuretanska pjena (Oriolik, 2015).....	21
Slika 3-8 Ugljen u prahu (Indiamart, 2018).....	22
Slika 3-9 Drveno brašno (Xsreality, 2018).....	22
Slika 3-10 Otpaci iz prerade šećerne trske (Wikipedia Commons, 2013).....	23
Slika 3-11 Granule celuloze (Arhiteko d.o.o, 2018).....	24
Slika 5-1 Graf ovisnosti brzine detonacije, tlaka detonacije i tlaka u bušotini o gustoći eksploziva Permonex V19.....	35
Slika 5-2 Graf ovisnosti brzine detonacije, tlaka detonacije i tlaka u bušotini o gustoći ANFO-eksploziva	37
Slika 5-3 Graf ovisnosti brzine detonacije, tlaka detonacije i tlaka u bušotini o gustoći eksploziva Lambex sa dodatkom granuliranog EPS-a.....	39
Slika 5-4 Graf ovisnosti brzine detonacije, tlaka detonacije i tlaka u bušotini o gustoći eksploziva Lambex sa dodatkom mehanički usitnjenim EPS-om.....	40
Slika 5-5 Graf ovisnosti brzine detonacije, tlaka detonacije i tlaka u bušotini o gustoći emulzijske matrice sa dodatkom EPS-a.....	42
Slika 5-6 Graf ovisnosti brzina detonacije o gustoći eksploziva.....	42

POPIS TABLICA

Tablica 1-1 Bilanca kisika eksplozivnih tvari (Savić, 2000).....	6
Tablica 3-1 Komercijalni eksplozivi smanjene gustoće (Škrlec, 2015).....	16
Tablica 5-1 Teoretski parametri eksploziva Permonex V19 (Škrlec, 2015).....	33
Tablica 5-2 Gustoće eksplozivnih smjesa sastavljenih od amonij-nitratno praškastih eksploziva s dodatkom EPS-a (Škrlec, 2015).....	34
Tablica 5-3 Gustoće ANFO-eksploziva s dodatkom EPS-a (Škrlec, 2015).....	35
Tablica 5-4 Teoretski parametri eksploziva Lambex 1 (Škrlec, 2015).....	37
Tablica 5-5 Gustoće emulzijskih eksploziva s dodatkom EPS-a (Škrlec, 2015).....	38
Tablica 5-6 Gustoća emulzijske matrice s dodatkom EPS-a (Škrlec, 2015).....	41

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
p_d	Pa	tlak detonacije
v_d	m/s	brzina detonacije
ρ	kg/m ³	gustoća
W_{max}	J	ukupni rad bez gubitaka
c_v	J/kgK	specifični kapacitet topline pri konstantnom volumenu
dT	K	promjena temperature
p_b	Pa	tlak detonacije na bušotinu
B	%	brizantnost
EPS	-	ekspandirani polistiren
XPS	-	ekstrudirani polistiren
σ_c	Pa	jednoosna tlačna čvrstoća
F	N	sila
A	m ²	površina
m	kg	masa
V	m ³	volumen
ε_l	-	relativna duljinska deformacija
Δl	m	razlika duljina uzorka
l_0	m	početna duljina uzorka
ε_d	-	relativna poprečna deformacija
Δd	m	razlika širine uzorka
d_0	m	početna širina uzorka
E	Pa	Youngov modul
α	°	smjer nagiba diskontinuiteta u odnosu na sjever
β	°	kut pada diskontinuiteta u odnosu na horizontalnu ravninu
B	m	izbojnica

d	m	promjer minske bušotine
g	kg/dm ³	gustoća eksplozivnog punjenja u minskoj bušotini
E_g	-	relativna snaga eksploziva za glavni eksplozivni naboj
s	kg/m ³	pokazatelj minirljivosti stijene
v	-	koeficijent uklještenosti stijene pri dnu minske bušotine
m	-	koeficijent gustoće minskih bušotina
S	m	razmak minskih bušotina

1. UVOD

Današnja primjena eksploziva je mnogostruka. Primjena eksploziva prisutna je u mnogim granama industrije, medicini, te filmskoj umjetnosti i vatrometima.

Rudarski (gospodarski, civilni, privredni) eksplozivi su prema sastavu najčešće smjese koje tijekom detonacije potencijalnu kemijsku energiju pretvaraju u toplinsku te dalje u kinetičku energiju udarnog vala i energiju ekspanzije plinovitih produkata kemijske reakcije. Energija udarnog vala i s visokim tlakom ekspanzije plinovitih produkata eksplozije u obliku mehaničkog rada troši se na drobljenje, pomicanje i odlamanje stijenske mase. Dio oslobođene energije troši se na korisni rad za drobljenje stijene dok dio nepovoljno djeluje na okolinu u obliku seizmičkog djelovanja, odnosno potresnog djelovanja, zračnog udarnog vala i odbacivanje odminiranog materijala.

U urbanim područjima dolazi do sve veće potrebe za opreznim miniranjima. Drugim riječima miniranjem se želi razlomiti stijena, a s druge strane, što manje oštetiti stijenska masu u kojoj se izvodi miniranje, u svrhu očuvanja fizičko-mehaničkih svojstava te iste stijenske mase i proizvesti što manje štetnih utjecaja na okoliš.

U tu se svrhu nastoji proizvesti eksploziv koji bi imao takva detonacijska svojstva tj. minersko-tehnička obilježja koja bi omogućila primjenu za oprezna miniranja. Takve uvijete zadovoljavaju eksplozivi smanjene gustoće.

Osnovno načelo njihovog djelovanja proizlazi iz ovisnosti tlaka detonacije o produktu gustoće i brzine detonacije. Također smanjenjem gustoće eksploziva smanjuje se specifična masa punjenja iskazana po jedinici volumena minirane stijene. Na taj način smanjena je i količina oslobođene energije koja djeluje na jedinični volumen stijene čime su manja izazvana naprezanja.

2. SVOJSTVA EKSPLOZIVA

Eksplozivi (lat. *explodere* - raspasti se), su stabilni kemijski spojevi ili smjesa spojeva koje imaju sposobnost da pod utjecajem određenog vanjskog impulsa u obliku topline, udara, trenja i sl. izazivaju ekstremno brzi proces oksidacije odnosno detoniraju, razvijajući pritom znatnu količinu plinova i topline (Krsnik, 1989).

Prilikom ekspanzije plinova koji su pod većim pritiskom od sredine u kojoj nastaju, dolazi do pretvorbe energije eksplozije u mehanički rad, što rezultira rušenjem i razaranjem. Eksplozija se karakterizira količinom oslobođene energije, ali je bitnija brzina kojom se ta energija oslobađa. Količina oslobođene energije u jedinici vremena predstavlja snagu eksploziva.

Da bi nastupio proces kemijskog razlaganja eksplozivne tvari, molekulama treba dovesti minimalnu potrebnu energiju odnosno energiju aktiviranja. Ovisno o načinu na koji se dovodi energija aktiviranja, razlaganje eksplozivnih tvari može se odvijati na tri načina:

- Gorenjem
- Deflagracijom
- Detonacijom

Gorenju su podložne sve eksplozivne tvari ovisno o temperaturi i vremenu izlaganja visokim temperaturama. Temperatura gorenja je najčešće niža od temperature eksplozije. Gorenje eksploziva odvija se na temelju kemijski ugrađenog kisika u eksplozivu, bez prisustva kisika iz zraka, brzinom od nekoliko mm/s pa do više cm/s.

Deflagracija ili brzo gorenje je proces razlaganja eksploziva kod kojega se energija aktiviranja molekula prenosi od sloja do sloja prenošenjem topline, brzinom ispod brzine zvuka odnosno do oko 1300 m/s.

Detonacija je proces razlaganja tj. izgaranja eksplozivne tvari sa brzinom većom od brzine zvuka u eksplozivnoj tvari, tj. od 1300 m/s pa do blizu 10000 m/s. Brzina razlaganja eksplozivne tvari procesom detonacije naziva se detonacijska brzina ili brzina detonacije, a povećava se s porastom gustoće eksploziva.

(Savić, 2000)

Eksplozivi se najviše primjenjuju u rudarstvu i građevinarstvu, u eksploataciji nafte i plina, geološkim istražnim radovima, te za specijalna miniranja kao što su podvodna miniranja, konturna miniranja, rušenje građevinskih objekata, obrada metala, miniranje leda i snježnih lavina, miniranje u poljoprivredi i šumarstvu, te za konsolidaciju slabo nosivog tla.

Općenito, eksploziv ima četiri osnovne karakteristike:

- Eksploziv je kemijski spoj ili smjesa koji detonira pod utjecajem udara, trenja ili kombinacijom tih stanja
- Nakon iniciranja, razgrađuje se brzo u eksploziji
- Brzo oslobađa toplinu i plinove pod visokim tlakom koji brzo ekspandiraju u okolinu
- Energija koja se oslobodi detonacijom eksploziva prilikom miniranja ima četiri osnovna učinka:
 - fragmentacija stijene
 - pomicanje stijene
 - vibracija tla
 - zračni udarni val

Da bi spoj ili smjesa imala osobinu eksploziva, mora imati sljedeće osobine:

- pri eksplozivnom procesu oslobađa energiju koja se pretvara u mehanički rad
- proces ima veliku brzinu oslobađanja energije
- proces eksplozije je potpun ili djelomičan, uz uvjet da stvori velike količine vrućih plinova (NATIONAL PARK SERVICES, 2017).

2.1. SASTAV EKSPLOZIVA

Svi gospodarski eksplozivi su smjese više kemijskih spojeva. Te smjese sadrže sve neophodne elemente za odvijanje procesa kemijskog razgrađivanja. Kako bi došlo do potpunog izgaranja eksploziva u zatvorenoj minskoj bušotini, eksplozivi u svom sastavu moraju imati kemijske elemente koji dobro i brzo izgaraju.

Najčešće komponente gospodarskih eksploziva su:

- Gorive komponente potpomažu izgaranju i povećavaju količinu oslobođene energije. Mogu biti u čvrstom ili tekućem stanju (metalni prahovi, dizel gorivo, drveni ugljen i dr.).
- Nosioći kisika ulaze u sastav eksploziva s ciljem osiguravanja potpunog izgaranja komponenti eksploziva. Kao potencijalni nosioći kisika najčešće se koriste nitrati kalija, natrija i amonija.
- Senzibilizatori su tvari koje se dodaju eksplozivima koji po svom kemijskom sastavu nisu osjetljivi na početni impuls, radi povećanja osjetljivosti i radne sposobnosti eksploziva (trotil, nitroglikol, želirani nitroglicerini i dr.).
- Flegmatizatori su tvari koje smanjuju osjetljivost eksploziva, tako što kristale eksplozivne tvari presvuku slojem inertne tvari, čime se sprječava međusobni kontakt kristala i njihovo trenje. Za flegmatizaciju se koriste razne vrste sintetičkih voskova i razne vrste polimera.
- Tvari za sniženje temperature eksplozije dodaju se kako bi se snizila početna temperatura eksplozije, odnosno maksimalna temperatura do koje se pri eksploziji zagriju produkti eksplozije, kako bi se spriječilo samozapaljenje eksplozivne smjese. Što je temperatura eksplozije niža, to je opasnost od detonacije eksploziva veća i obratno. Kao tvari za sniženje temperature koriste se natrijev klorid, kalijev klorid i druge inertne soli.
- Tvari za stabilnost suspenzije i viskoziteta su tvari koje lako hidroliziraju. Najčešće se koristi karboksimetil-celuloze, guar i dr. (Savić, 2000)

2.2. FIZIKALNO - KEMIJSKE KARAKTERISTIKE EKSPLOZIVA

Karakteristike rudarskih eksploziva ovise o sastavu i kvaliteti sirovina za dobivanje eksploziva. Sastav eksploziva mora biti takav da pri eksploziji ne oslobađa štetne plinove ili ostavlja čvrste ostatke.

2.2.1. Gustoća

Gustoća je osobina o kojoj u velikoj mjeri ovise karakteristike eksploziva. Postoji nekoliko gustoća eksploziva, kao što su:

- gustoća punjenja
- kritična gustoća
- gustoća minskog punjenja i dr.

Gustoća punjenja (gustoća patrone eksploziva) predstavlja odnos mase eksploziva i ukupne ukupnog volumena, uključujući sve pore i šupljine među kristalima koje ostaju nakon patroniranja. Gustoća rudarskih eksploziva kreće se od $0,8 \text{ g/cm}^3$ za praškaste eksplozive i do oko $1,6 \text{ g/cm}^3$ za plastične eksplozive.

Kritična gustoća je maksimalna gustoća pri kojoj eksploziv sigurno (stabilno) detonira. Pri daljnjem povećanju gustoće iznad kritične, eksplozija izostaje.

Gustoća minskog punjenja je odnos mase eksploziva i zapremine dijela minske bušotine u koju se stavlja eksploziv (Krsnik, 1989).

2.2.2. Bilanca kisika

Bilanca kisika (uravnoteženost kisika) predstavlja razliku količine kisika koja se nalazi u sastavu eksploziva (kemijski vezanog) i količine koja je potrebna za potpunu oksidaciju.

Ovisno o postojanju molekula kisika u plinovitim produktima razloženog eksploziva, razlikuju se tri slučaja:

- pozitivna bilanca kisika
- uravnotežena (nulta) bilanca kisika
- negativna bilanca kisika

Eksploziv ima pozitivnu bilancu kisika kada u produktima izgaranja ima slobodnog kisika, koji je preostao poslije potpune oksidacije ugljika u CO_2 i vodika u H_2O .

Jako pozitivna bilanca kisika je štetna, jer dolazi do njegovog gorenja i stvaranja dušičnih oksida.

Eksploziv ima nultu (uravnoteženu) bilancu kisika kada u produktima izgaranja nema slobodnih molekula kisika. Takav odnos sastavnih komponenti naziva se stehiometrijskim.

Eksploziv ima negativnu bilancu kisika kada je količina ugrađenog kisika nedovoljna za potpunu oksidaciju svih gorivih elemenata iz eksploziva. Tada se u produktima izgaranja pojavljuje veća količina otrovnih plinova zbog nepotpune oksidacije, kao što su ugljikov

monoksid, oksidi dušika, sumporni plinovi, itd. Također oslobađa se manja količina energije zbog nepotpunog sagorijevanja gorivih tvari u eksplozivu.

Eksplozivi namijenjeni za podzemnu eksploataciju moraju imati pozitivnu bilancu kisika, a eksplozivi namijenjeni za površinsku eksploataciju mogu imati i negativnu bilancu kisika (Savić, 2000). U tablici 1-1 prikazana je bilanca kisika pojedinih eksplozivnih tvari.

Tablica 1-1 Bilanca kisika eksplozivnih tvari (Savić, 2000)

Eksplozivna tvar	Bilanca kisika (%)
Natrijev nitrat	+47,1
Kalijev nitrat	+39,6
Amonijev nitrat	+20,0
Nitroglicerín	+3,52
Nitroglikol	0,00
Heksogen	-21,6
Tetrit	-47,4
Aluminij	-89,0
Drveno brašno	-127,4
Trotil	-74,0
Papir	-130,0
Drveni ugljen	-191,0
Parafin	-346,0

2.2.3. Tlak detonacije

Tlak detonacije je tlak koji se skoro trenutno stvara u zoni detonacije eksploziva. Detonacijski tlak je maksimalni u pravcu kretanja detonacijskog vala, tj. na suprotnom kraju patrone eksploziva od mjesta iniciranja. Veći detonacijski tlak znači veću udarnu energiju eksploziva, a ovisi o detonacijskoj brzini i gustoći te se izračunava teorijski. Tlak nastalih plinova ovisi o količini razvijenih plinova, temperaturi eksplozije i volumenu u kojem je izvedena eksplozija. Detonacijski tlak, kao i detonacijska brzina, je značajna osobina kod primjene eksploziva gdje se koristi udarna energija eksploziva.

Tlak detonacije je moguće mjeriti osjetilima s vrlo brzim odzivom kao što su elektrootporna osjetila i piezo osjetila, ili posrednim metodama mjerenjem tlaka udara metalnih ploča pokretanih detonacijskim valom, zatim mjerenjem brzine udarnih valova u

pojedinin sredinama izazvanih detonacijskim valom, pokusima u vodi itd.(Škrlec, 2015). Tlak detonacije, koji je idealno tlak izreagiranih produkata detonacije, može se približno izraziti se prema obrascu 2-1:

$$P_d = \frac{\rho v_d^2}{4} \quad (2-1)$$

gdje je:

ρ – gustoća eksplozivne tvari (kg/m³),

v_d – brzina detonacije (m/s) i

p_d – tlak detonacije (Pa).

2.2.4. Volumen plinova eksplozije

Volumen plinova eksplozije je volumen plinova koji se stvara razlaganjem eksploziva u procesima eksplozije, a ovisi o vrsti eksploziva. Volumen plinova koji nastaje pri detonaciji 1 kg eksploziva izražava se u dm³, a mjeri se kod temperature 0 °C i tlaka 1 bar. Najveći tlak koji nastaje pri detonaciji 1 kg eksploziva u zatvorenom prostoru volumena 1 dm³ naziva se specifični tlak i izražava se u barima. Specifični tlak može se izračunati na osnovi volumena plinova i temperature eksplozije, a ovisit će o količini razvijenih plinova, temperaturi eksplozije i volumenu u kojem je izvedena eksplozija. Eksplozivi koji proizvode veću količinu plinova eksplozijom, imaju jaču tlačnu energiju tj. energiju pritiska plinova (Savić, 2000).

2.2.5. Temperatura eksplozije

Temperatura eksplozije je temperatura plinskih produkata koji se stvaraju pri kemijskom razlaganju eksploziva uz konstantan volumen . Teorijski temperatura eksplozije može iznositi 1000 - 6000 °C dok kod rudarskih eksploziva temperatura eksplozije kreće se u granicama od 2100 – 4200 °C. Veća temperatura plinova eksplozije rezultira većim pritiskom plinova u bušotini odnosno veću tlačnu energiju eksploziva. Temperatura plinova eksplozije ovisi o količini plinova koji se stvaraju razlaganjem eksploziva i o toplinskoj energiji koja se oslobađa pri razlaganju (Savić, 2000).

2.3. DETONACIJSKE KARAKTERISTIKE EKSPLOZIVA

Odabir eksploziva za miniranje, svojim detonacijskim karakteristikama mora biti u skladu sa fizikalno mehaničkim svojstvima stijene. Učinkovitost i primjenjivost eksploziva ovisit će o oslobođenoj energiji detonacijom produkata reakcije, te količini mehaničkog rada. U detonacijke karakteristike eksploziva spadaju:

- gustoća eksploziva,
- brzina detonacije,
- mogućnosti iniciranja,
- temperatura paljenja,
- osjetljivost na udar,
- osjetljivost na trenje,
- brizantnost i radna sposobnost eksploziva.

2.3.1. Gustoća eksploziva

Gustoća eksploziva predstavlja odnos mase eksplozivne tvari i njenog volumena. Smanjenjem gustoće eksploziva smanjuje se brzina detonacije i tlak detonacijskog udarnog vala. Gustoća komercijalnih rudarskih eksploziva kreće se u granicama od 0,80 g/cm³ do 1,60 g/cm³, gustoća eksploziva smanjene gustoće iznosi manje od 0,80 g/cm³ dok eksplozivi gustoće manje od 0,20 g/cm³ nazivaju se eksplozivi jako smanjene gustoće (Krsnik, 1989).

2.3.2. Brzina detonacije

Brzina detonacije označava brzinu kretanja detonacijskog udarnog vala duž eksplozivnog punjenja. Brzina detonacije kod gospodarskih eksploziva kreće se od 2000 do 7500 m/s. Eksplozivi veće brzine detonacije imaju veću udarnu energiju. Razorna snaga eksploziva ovisi o brzini detonacije. Razorna snaga eksploziva biti će veća, ukoliko je brzina detonacije veća. Ovaj faktor ključan je pri odabiru eksploziva za miniranje. Detonacijska brzina ovisi o gustoći i promjeru patrone eksploziva, vlazi i načinu iniciranja eksploziva. Povećanjem gustoće i promjera patrone do određene granice povećava se i detonacijska brzina eksploziva (Krsnik, 1989). Brzina detonacije ključna je pri odabiru eksploziva za miniranje jer opisuje relativnu snagu odnosno brizantnost eksploziva.

Za mjerenje brzine detonacije primjenjuju su zahtjevi norme HRN EN 13631-14:2004: *Eksplozivi za civilnu uporabu. Jaki eksplozivi.14. dio: Određivanje brzine detonacije* (EN 13631-14:2004).

2.3.3. Mogućnosti iniciranja

Mogućnosti iniciranja ili potvrđivanje deklariranih sustava iniciranja se određuju prema zahtjevima norme HRN EN 13631-10: 2004: *Eksplozivi za civilnu uporabu. Jaki eksplozivi. 10. dio: Metoda za potvrđivanje načina iniciranja* (EN 13631-10:2003).

Primjenjuje se za jake eksplozive, patronirane ili u rasutom stanju te izvan ili unutar zatvorenog prostora.

Eksploziv se inicira sredstvom ili inicijalnim sustavom deklariranim proizvođačem, kao što su detonator, pojačnik ili detonirajući štapin. Detonacija se potvrđuje mjerenjem brzine detonacije te uspoređuje s brzinom deklariranom proizvođačem (HRN EN 13631-10, 2003).

2.3.4. Temperatura paljenja eksploziva

Temperatura paljenja eksploziva je najniža temperatura kod koje dolazi do reakcije eksploziva (eksplozija, paljenje, razlaganje ili sagorijevanje) (UN, 1995).

Za određivanje temperature paljenja koristi se metalna posuda dimenzija Ø 140 mm i dubine 70 mm koja je napunjena Woodovom legurom do maksimalno 20 mm ispod poklopca posude. Woodova legura je slitina bizmuta (50 %), olova (25 %), kositra (12,5 %) i kadmija (12,5 %) s talištem na 60 °C.

Uzorak eksploziva mase 0,5 g stavlja se u staklenu epruvetu. Staklena epruveta s uzorkom eksploziva se stavlja u posudu s Woodovom legurom prethodno zagrijanu na 100 °C.

Epruvete se uranjaju u posudu toliko da se površina eksploziva nalazi do 20 mm ispod nivoa rastopljene Woodove legure. Posuda se zagrijava s porastom temperature od 5 °C u jednoj minuti sve do maksimalne temperature od 360 °C ili dok ne dođe do reakcije.

2.3.5. Osjetljivost eksploziva na udar

Osjetljivost eksploziva na udar ovisi o kemijskom sastavu eksploziva i mora biti unutar određene granice radi sigurnosti pri rukovanju, transportu i upotrebi. Određivanjem osjetljivosti pojedinog eksploziva na udar određuje se razina sigurnosti razina rukovanja i manipulacije eksploziva.

Metoda ispitivanja sastoji se u slobodnom padu utega na eksploziv. Mjerilo osjetljivosti je visina u cm s koje se 6 puta spušta uteg, a da pritom niti jednom ne dođe do detonacije.

Osjetljivost na udar ispituje se padom utega različite mase s različite visine, pri čemu se kinetička energija udara postepeno povećava. Osjetljivost na udar je onaj najveći iznos mase i visine pri kojemu još ne dolazi iniciranja eksploziva, odnosno najmanja energija udara pri kojoj je došlo do reakcije. Na slici 2-1 prikazan je uređaj za ispitivanje osjetljivosti eksploziva na udar.

Osjetljivost na udar se određuje eksperimentalno prema zahtjevima norme HRN EN 13631-4:2004: *Eksplozivi za civilnu uporabu. Jaki eksplozivi. 14. dio: Određivanje osjetljivosti eksploziva na udar* (EN 13631-4:2002).



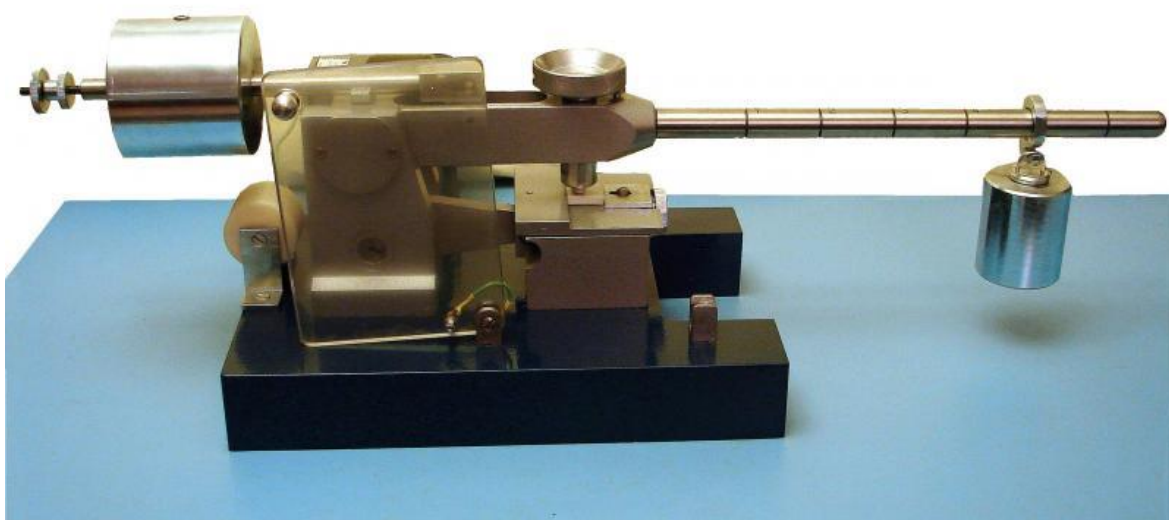
Slika 2-1 Uređaj za ispitivanje eksploziva na udar (Ozm research, 2018)

2.3.6. Osjetljivost eksploziva na trenje

Osjetljivost eksploziva na trenje određuje se pomoću uređaja za ispitivanje eksploziva na trenje. Na slici 2-2 prikazan je uređaj za ispitivanje eksploziva na trenje.

Ispitivanje se vrši tako da se mala količina eksploziva postavlja se na keramičku pločicu i uzorak se opterećuje preko keramičkog valjčića. Pločica se pomiče i primjenjuje se djelovanje sile trenja na uzorak. Tijekom pojedinačnih ispitivanja smanjuje se opterećenje do najmanjeg opterećenja pri kojemu još dolazi do reakcije barem jednom od šest pojedinačnih ispitivanja. Osjetljivost na trenje predstavlja najmanje opterećenje pri kojemu je došlo do reakcije u jednom od šest ispitivanja.

Osjetljivost na trenje se određuje se eksperimentalno prema zahtjevima norme HRN EN 13631-3:2007: *Eksplozivi za civilnu uporabu. Jaki eksplozivi. 14. dio: 3. dio: Određivanje osjetljivosti eksploziva na trenje* (EN 13631-3:2004).



Slika 2-2 Uređaj za ispitivanje eksploziva na trenje (Ozm research, 2018)

2.3.7. Brizantnost i radna sposobnost

Detonacijom eksploziva, oslobođena energija koristi se za obavljanje mehaničkog rada. S obzirom da je mehanički rad nad okolinom obavljen djelovanjem plinovitih produkata na račun toplinske energije oslobođene procesom eksplozije, u idealnim uvjetima, ona se može uzeti kao mjera radne sposobnosti, odnosno potencijalne učinkovitosti eksploziva. S aproksimacijama da se plinoviti produkti ponašaju kao idealni plin, te da je proces eksplozije adijabatski, u kojem nema izmjene topline s okolinom, ukupni rad bez gubitaka se može izraziti kao (Sućeska, 1995):

$$W_{max} = \int c_v dT \quad (2-2)$$

gdje je:

W_{max} – ukupni rad bez gubitaka (J),

c_v – specifični kapacitet topline pri konstantnom volumenu, (J/kgK),

dT – promjena temperature (K).

Ukupni rad je najveći rad koji plinoviti produkti detonacije mogu obaviti ako je njihova unutarnja energija u potpunosti transformirana u mehanički rad. Ukupni idealno transformirani rad se naziva „eksplozivni potencijal“ (Škrlec, 2015).

U stvarnim uvjetima dolazi do različitih gubitaka tijekom procesa, pa je obavljeni mehanički rad uvijek manji od eksplozivnog potencijala. Pri tome moraju se uzeti u obzir uvjeti u kojem se eksplozija odvija te svojstva eksploziva. Radna sposobnost eksploziva je definirana slijedećim parametrima: količinom plinova formiranih reakcijom, oslobođenom toplinom te brzinom detonacije. Utjecaj pojedinog parametra na rad obavljen nad okolinom ovisi o uvjetima u kojima se proces eksplozije odvija (Sućeska, 1995).

Obavljanje mehaničkog rada nad stijenom uzrokovano je i udarnim djelovanjem na stijenu prenesenog udarnog vala i djelovanjem ekspandirajućih produkata detonacije. Metode za određivanje radne sposobnosti eksploziva, brizantnosti ili relativne snage razlikuju se ovisno o pretpostavci autora metoda o mehanizmu djelovanja eksplozije na radnu sredinu. Metode za određivanje brizantnosti, uzimaju generalno u obzir impuls tlaka na granici eksploziv-sredina kao mjeru intenziteta djelovanja eksploziva. Brizantnost je općenito definirana kao razorna sposobnost eksploziva koja je rezultat dinamičkog udara produkata detonacije na okolnu sredinu. U minskoj bušotini, udarno djelovanje produkata detonacije primarno drobi stijenu u zoni širine nekoliko radijusa minske bušotine. Nakon smanjenja tlaka udarnog vala ispod tlačne čvrstoće stijene, on prelazi u elastični val koji napreduje dalje u sredinu.

Tlak na stijenu bušotine može se uz ograničenja približno opisati kao polovica tlaka detonacije što za idealno ponašanje plinova detonacije i potpuno ispunjenju bušotinu daje (Škrlec, 2015):

$$p_b = \frac{\rho v_d^2}{8} \quad (2-3)$$

gdje je:

ρ – gustoća eksplozivne tvari (kg/m³),

v_d – brzina detonacije (m/s) i

p_b – tlak detonacije na bušotinu (Pa).

Bez obzira na konačnu vrijednost stvarnih tlakova u bušotini te redukciju njihovih vrijednosti na stijenci bušotine, oni su direktno zavisni od brzine detonacije eksploziva. Krajnji utjecaj na drobljenje stijene ovisan je i o svojstvima stijene te o njenoj gustoći.

Za eksperimentalno određivanje brizantnosti i radne sposobnosti eksploziva, osmišljeno je više različitih metoda. Kod svih metoda rezultati su izraženi kao relativno određene vrijednosti u odnosu na referentni eksploziv ili kao usporedba učinka više različitih eksploziva. Brizantnost eksploziva u odnosu na neki referentni eksploziv može da se odredi na bazi rezultata bilo kojeg od navedenih testova, na slijedeći način:

$$B = 100 \cdot \frac{\text{Rezultat testa ispitivanog eksploziva}}{\text{Rezultat testa referentnog eksploziva}} (\%)$$

Laboratorijske metode za određivanje brizantnosti i radne sposobnosti eksploziva su:

- mjerenje radne sposobnosti eksploziva olovnim cilindrom – Trauzl,
- relativna radna sposobnost određena pomoću balističkog njihala,
- određivanje brizantnosti eksploziva deformacijom cilindra (po Hessu),
- određivanje brizantnosti eksploziva deformacijom cilindra (po Kastu),
- određivanje brizantnosti eksploziva metodom otiska na čeličnoj ploči,
- određivanje brizantnosti eksploziva širenjem bakrenog cilindra,
- podvodni detonacijski pokus,
- ispitivanje s dvostrukim cijevima,

In situ metode za određivanje brizantnosti i radne sposobnosti eksploziva su:

- linearno povećanje izbojnice,
- određivanje volumena kratera,
- ljevkastih pokusi, itd.

3. EKSPLOZIVI SMANJENE GUSTOĆE

Kod miniranja u svrhu dobivanja mineralne sirovine, cilj je pridobiti što veću količinu odminiranog materijala uz što manju potrošnju eksploziva po jedinici volumena ili mase mineralne sirovine, uz postizanje adekvatnog granulometrijskog sastava odminirane mineralne sirovine kako ne bi bilo potrebno sekundarno miniranje.

Prilikom građevinskih miniranja, odnosno iskopa podzemnih prostorija ili prostora na površini teži se minimalnom oštećenju stijenske mase u okolini iskopa kako se ne bih narušila fizičko – mehanička svojstva stijenske mase u svrhu osiguranja dugotrajne ili trajne stabilnosti. (Škrlec, 2015)

Projektne parametri miniranja ovise o kombinaciji stijenske mase, eksploziva i geometriji miniranja. Izrada svakog plana miniranja ovisi o dvije vrste faktora. Prva vrsta faktora koja utječe na kvalitetu izvedbe miniranja je nekontrolabilan faktor tj. uvjeti stijenske mase, a tu se ubrajaju geologija, karakteristike stijene, udaljenost od susjednih struktura itd. Drugi faktor koji utječe na kvalitetu miniranja je kontrolabilni faktor tj. faktor koji je moguće kontrolirati, a može se svrstati u tri skupine, a to su geometrija miniranja, fizikalno-kemijska svojstva eksploziva i vrijeme. Cilj miniranja je postići što adekvatniju fragmentaciju odminirane stijenske mase, kako bi se osiguralo da troškovi utovara, transporta i naknadnog usitnjavanja budu što manji (Jug, 2016).

Kada se govori o primjeni klasičnih gospodarskih eksploziva i uobičajenim metodama miniranja uz podešavanje parametara minskog polja (kontrolabilni faktor), u neposrednoj okolini objekata često nemamo dovoljnu redukciju potencijalno štetnih utjecaja miniranja uz zadovoljavajuće drobljenje stijene odnosno učinak miniranja.

Eksplozivi smanjene gustoće (engl. *Low Density Explosives, LDE*) imaju povoljnije minersko-tehničke karakteristike koje osiguravaju mogućnost primijene za oprezna miniranja.

Njih je moguće definirati kao eksplozive koji prvenstveno imaju primjenu u rudarstvu za miniranja:

- kod kojih je potrebna što manja razdrobljenost odminiranog materijala, odnosno veće dimenzije fragmenata
- za smanjenje troškova miniranja
- za miniranja kod kojih je nužno ostvariti minimalna oštećenja iza minskog polja

Eksplozivi smanjene gustoće uobičajeno imaju gustoću manju od $0,80 \text{ g/cm}^3$, a eksplozivi kojima je gustoća smanjena ispod $0,20 \text{ g/cm}^3$ nazivaju se eksplozivima jako smanjene gustoće (Škrlec, 2015).

Osnovni princip izvedbe eksploziva smanjene gustoće bazira se na smanjenju gustoće postojećih eksploziva dodavanjem materijala koji ima značajno manju gustoću od samog eksploziva. Materijali koji se dodaju eksplozivima mogu se svrstati u dvije grupe:

- inertni materijali (perliti, vermakuliti, staklene mikrokuglice, plastične mikrokuglice i sl.) i
- materijali koji imaju mogućnost izgaranja, odnosno mogućnost sudjelovanja u kemijskoj reakciji oksidacije (polistiren, ekspanzirani polistiren, poliuretanska pjena, ugljen u prahu, piljevina i drveno brašno, otpaci proizvodnje šećera, ljuske žitarica i kikirikija, granule celuloze i sl.).

Prilikom smanjena gustoće eksploziva smanjuje se specifična masa punjenja, detonacijska brzina i tlak udarnog vala. Smanjenjem detonacijske brzine i tlaka udarnog vala smanjuje se količina oslobođene energije, koja djeluje na stijenu, a time se postižu manja štetna naprezanja na stijensku masu (Škrlec, 2015).

Na tržištu su dostupni određeni eksplozivi smanjene gustoće, u tablici 3-1 prikazani su općeniti podaci komercijalnih eksploziva smanjene gustoće izvađeni iz tehničkih specifikacija za pojedine eksplozive.

Tablica 3-1 Komercijalni eksplozivi smanjene gustoće (Škrlec, 2015)

Naziv	Gustoća (g/cm ³)	Eksploziv	Sredstvo za smanjenje gustoće	Firma	Država	Brzina detonacije (m/s)
Expanfo 100	0,64 - 0,69	ANFO	Plastične mikrokuglice	Sasol Nitro	Južnoafrička republika	-
Expanfo 200	0,68 - 0,74	ANFO	Plastične mikrokuglice	Sasol Nitro	Južnoafrička republika	-
Expanfo 300	0,73 - 0,80	ANFO	Plastične mikrokuglice	Sasol Nitro	Južnoafrička republika	-
LoDex	0,40 - 0,95	ANFO	-	LDE Corporation	Australija	2000 - 3000
SoftLOAD	0,40 - 1,25	ANFO	-	LDE Corporation	Australija	2000 - 3000
XLOAD	0,80 - 1,20	Heavy-ANFO	-	LDE Corporation	Australija	2000 - 3300
BlastLite	-	-	-	Dyno Nobel	-	-
TITAN	-	-	-	Dyno Nobel	-	-
SANFOLD	0,30 - 0,75	Emulzijski	polistiren	Dyno Nobel	Australija	-
ANFO PS	0,46	ANFO	polistiren	Dyno Nobel	Australija	-

3.1. MATERIJALI ZA SMANJENJE GUSTOĆE

Materijale koji se dodaju eksplozivima u svrhu smanjenja gustoće eksploziva dijelimo na inertne materijale te materijale koji imaju mogućnost izgaranja.

3.1.1. Perlit

Perlit je eruptivni aluminijsko-silikatni mineral pjenaste građe, ima relativno visok sadržaj vode. Mehanički se usitnjava te zagrijava na temperature iznad 870 °C. Pri tome molekule vode sadržane u stijeni pretvaraju se u paru, što uzrokuje širenje stijene. Taj proces povećava volumen perlita za 15 do 20 puta. Nastali proizvod je ekspandirani perlit, odnosno bijeli granulat veličine zrna do 6 mm. Pojedinačna zrna se sastoje od više ćelija u kojima je zarobljen zrak. Svrstan je u kemijski inertne materijale s pH vrijednošću 7. Gustoća perlita je od 0,032 g/cm³ do 0,15 g/cm³. Perlit se sastoji od 47,5 % O₂, 33,8 % Si, 7,2 % Al, 3,5 % Cl, 3,4 % Na, 0,6 % Fe, 0,6 % Ca, 0,2 % Mg, 0,2 % elemenata u tragovima i 3 % H₂O u kristalnoj rešetci (Renova d.o.o, 2017). Zrnca ekspandiranog prikazana su na slici 3-1.



Slika 3-1 Zrnca perlita (Seedsnpots, 2018)

3.1.2. Vermikulit

Vermikulit spada u filosilikate. Sirovi vermikulit je ruda zlatno smeđa boje sa slojevitom strukturom. Prilikom zagrijavanja na temperaturi iznad 850°C ., voda iz minerala isparava, dolazi do procesa ekspanzije pri čemu volumen raste 15 do 20 puta, što rezultira stvaranjem rasprsnute pahuljice. Rezultat je koncentrirani oblik strukture pahuljice koji sadrži puno mjehurića zraka. Na taj način dobiva ekspanzirani vermikulit koji sadrži bezbroj malih zračnih jastuka. Zahvaljujući mjehurićima zraka vermikulit ima vrlo malu specifičnu težinu, dobre izolacijske sposobnosti i veliku sposobnost upijanja vode. 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 je od $0,07\text{ g/cm}^3$ do $0,13\text{ g/cm}^3$. (Pšeno d.o.o., 2018)

Zrnca vermikulita prikazana su na slici 3-2.



Slika 3-2 Zrnca vermikulita (Veliki rečnik, 2016)

3.1.3. Staklene mikrokuglice

Kao senzibilizatori emulzijskih eksploziva, vodenih gelova i *heavy*-ANFO eksploziva, koriste se staklene mikrokuglice. Promjer staklenih mikrokuglica je od $10\ \mu\text{m}$ do $200\ \mu\text{m}$, a debljina stjenke im je $1\ \mu\text{m}$. Gustoća im je u rasponu od $0,09\text{ g/cm}^3$ do $0,37\text{ g/cm}^3$ (PQ CORPORATION, 2018). Staklene mikrokuglice prikazane su na slici 3-3.



Slika 3-3 Staklene mikrokuglice (Wikipedia, 2009)

3.1.4. Plastične mikrokuglice

Plastične mikrokuglice su male sferne plastične čestice. Mikrokuglice su sačinjene od polimernih ljuskica koje sadrže plin. Nakon zagrijavanja, plin povećava pritisak te mikrokuglica se širi. Ekspanzijom plina dolazi do povećanja volumena kuglica do 40 puta u odnosu na početni volumen. Krajnja veličina takvih ekspandiranih plastičnih mikrokuglica je oko 90 μm , a gustoća u rasutom stanju 0,03 g/cm^3 (Kish company inc, 2014). Plastične mikrokuglice prikazane su na slici 3-4.



Slika 3-4 Plastične mikrokuglice (Everychina, 2018)

3.1.5. Polistiren

Polistiren je vrsta plastike koja se dobiva iz nafte, a baziran je na spojevima monomera stirena. U građevinskoj industriji se prvenstveno koristi u dva oblika:

- ekspanzirani polistiren (EPS) i
- ekstrudirani polistiren (XPS).

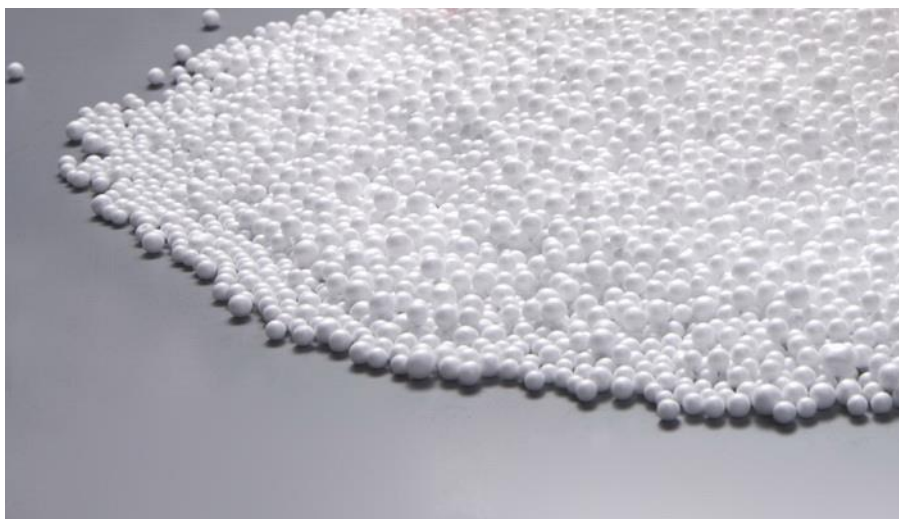
Ekspanzirani polistiren (EPS) se često zove i stiroporom ili bijelim stiroporom, a ekstrudirani polistiren (XPS) tvrdim stiroporom. Gustoća polistirena je od $0,02 \text{ g/cm}^3$ do $0,003 \text{ g/cm}^3$ (Generalić, 2018).

3.1.6. Ekspanzirani Polistiren (Stiropor)

Ekspanzirani polistiren proizvodi se u reaktorima tehnologijom suspenzijske polimerizacije dodavanjem vode, stirena, pentana i ostalih dodataka. Zagrijavanjem parom na oko 100°C svako zrnce ekspanzira na oko 30-50 puta svog prvotnog volumena, a gustoća im se smanji sa oko $0,60 \text{ g/m}^3$ na $0,01 \text{ g/m}^3$ do $0,03 \text{ g/m}^3$.

Tako ekspanzirane granule sazrijevaju na zraku u ventiliranim silosima, nakon čega se ugrađuju u metalne kalupe i sljepljuju u konačni oblik koji se koristi u građevinarstvu kao izolacijski materijal (Arhiteko d.o.o, 2018).

Zrnca ekspanziranog polistirena prikazana su na slici 4-6.



Slika 3-6 Zrnca ekspanziranog polistirena (Polistireninio putplasćio asociacija, 2017)

3.1.7. Poliuretanska pjena

Poliuretanska pjena je polimer koji se sastoji od lanaca organskih jedinica povezanih putem uretanskih veza. Prvenstveno se koristi za termoizolaciju. Dobiva se ekspanzijom poliuretana ili poliizocianurata. Odlikuje se velikom mehaničkom čvrstoćom, odnosno ima veliku otpornost na tlačna naprezanja, savijanje i kidanje. Otporna je na kiseline i lužine, ima malu apsorpciju vode (Oriolik d.d, 2015). Gustoća poliuretanske pjene iznosi od $0,019 \text{ g/cm}^3$ do $0,040 \text{ g/cm}^3$. Poliuretanska pjena je prikazana na slici 3-7.



Slika 4-7 Poliuretanska pjena (Oriolik d.d, 2015)

3.1.8. Ugljen u prahu

Ugljen u prahu nastaje prilikom manipulacije ugljenom, prvenstveno rudarenjem. Veličine čestica ugljenog praha iznose od $0,1 \mu\text{m}$ do 1 mm , iako prevladavaju veličine od $20 \mu\text{m}$ do $50 \mu\text{m}$. Gustoća ugljenog praha je od $0,27 \text{ g/cm}^3$ do $0,50 \text{ g/cm}^3$, ovisno o veličini čestica i vrsti ugljena (World encyclopedic knowledge, 2018). Ugljen u prahu je prikazan na slici 3-8.



Slika 3-8 Ugljen u prahu (Indiamart, 2018)

3.1.9. Piljevina i drveno brašno

Piljevina i drveno brašno nastaju kao otpad u drvenoj industriji tijekom obrade drva. Prilikom proizvodnje eksploziva smanjene gustoće, piljevina koja se dodaje u svrhu smanjivanja gustoće, ima gustoću od $0,10 \text{ g/cm}^3$ do $0,35 \text{ g/cm}^3$ (Škrlec, 2015). Drveno brašno je prikazano na slici 3-9.



Slika 3-9 Drveno brašno (Xsreality, 2018)

3.1.10. Otpaci iz prerade šećerne trske

Proizvodnjom šećera iz šećerne trske, kod gnječenja šećerne trske u mlinovima, na svakih 10 t šećerne trske nastaje 3 t otpadaka u obliku mokrih vlakana, nakon čega se vlakna suše. Gustoća otpadaka iznosi od 0,12 g/cm³ do 0,18 g/cm³ (Wikipedia, 2013). Otpaci iz prerade šećerne trske su prikazani na slici 3-10.



Slika 3-10 Otpaci iz prerade šećerne trske (Wikipedia Commons, 2013)

3.1.11. Ljuske žitarica i kikirikija

Organskog su podrijetla i dobivaju se uzgojem žitarica i kikirikija na poljoprivrednim dobrima. Neki od najčešće korištenih materijala imaju slijedeću gustoću:

- ljuske zobi – $\rho = 0,128 \text{ g/cm}^3$
- ljuske soje – $\rho = 0,40 \text{ g/cm}^3$
- ljuske pšenice – $\rho = 0,50 \text{ g/cm}^3$ (Walker, 2016)

3.1.12. Granule celuloze

Granule celuloze su čvrsti produkti dobiveni od biljnih vlakana i njihovih prerađevina kao što su stare novine, karton, pamuk, slama, piljevina, konoplja, klipovi, pamučni i laneni tekstil i sl. Lagane su i imaju veliku moć upijanja, čak 5 puta više od glinenih materijala. Nasipna gustoća granula celuloze se nalazi u rasponu od $0,16 \text{ g/cm}^3$ do $0,29 \text{ g/cm}^3$ (Arhiteko d.o.o, 2018). Granule celuloze prikazane su na slici 3-11.



Slika 3-11 Granule celuloze (Arhiteko d.o.o, 2018)

4. UTJECAJ EKSPLOZIVA NA FRAGMENTACIJU STIJENSKE MASE

Eksplozivi imaju široku primjenu u industriji. Zbog svoje potencijalne kemijske energije, eksplozivi se upotrebljavaju za eksploataciju mineralnih sirovina te u građevinarstvu pri izgradnji cesta i tunela u čvrstoj stijenskoj masi. Kako bi postigli zadovoljavajuće rezultate miniranja u smislu željene fragmentacije i sigurnosti, potrebno je poznavati vrstu i značajke stijenske mase, kako bi prema njima mogli odabrati vrstu eksploziva, način iniciranja minskog polja te geometriju miniranja.

Izvedba svakog miniranja ovisit će o čimbenicima koji se ne mogu kontrolirati, nekontrolabilnom faktoru tj. uvjeti stijenske mase, te o onima koji se mogu, kontrolabilnom faktoru tj. geometriji miniranja, fizikalno-kemijskim svojstvima eksploziva i vremenu.

Prilikom detonacije eksplozivnog punjenja unutar minske bušotine dolazi do oslobađanja velike količine topline te naglog povećanja tlaka plinovitih produkata. Razvijeni tlak veći je od tlačne čvrstoće materijala koji se minira, a potencijalna energija pretvara se u mehanički rad te dolazi do drobljenja stijenske mase. Detonacijom oslobođena energija raspodjeljuje se na udarnu energiju i energiju plinova. Mehanizam drobljenja stijenske mase može se opisati u 4 faze. U prvoj fazi miniranja, odmah nakon detonacije eksploziva dolazi do drobljenja zone neposredno uz bušotinu kao rezultat djelovanja udarnog vala. U drugoj fazi dolazi do širenja pukotina od bušotine, dok se udarni val rasprostire kao sferni udarac do slobodne površine. U trećoj fazi dolazi do nastajanja vlačnog vala koji se odbija do slobodne površine prema bušotini. U zadnjoj fazi dolazi do ispunjavanja plinovitim produktima već nastalih pukotina te njihovog daljnjeg širenja i pokretanje izlomljene mase. Udarne energija stvara intenzivno drobljenje stijene te nastanak pukotina, a energija plinova ispunjava već nastale pukotine te nastavlja njihovo širenje.

Jedna od upotrebljivanih tehnika za optimizaciju fragmentacije minirane stijenske mase je Kuz-Ram model za predviđanje fragmentacije. Na osnovu poznatih podataka o fizičko-mehaničkim svojstvima stijenske mase, minersko-tehničkim karakteristikama eksploziva i definirane geometrije minskog polja, ovaj model daje vrlo precizno predviđanje granulometrijskog sastava miniranog stijenskog materijala. Obrnutim postupkom, na temelju ovog modela mogu se proračunati i parametri minskog polja koji će dati željenu fragmentaciju.

4.1. SVOJSTVA STIJENSKE MASE

Istraživanje stijenske mase za potrebe miniranja u kamenolomima obuhvaća niz geoinženjerskih i geofizičkih, terenskih i laboratorijskih istražnih radova kojima se dolazi do ključnih pokazatelja koji određuju fragmentaciju odminirane stijenske mase.

Osobine stijenske mase ovise o načinu postanka, te tektonskih aktivnostima kojima je stijenska masa bila izložena. Stijene se različito ponašaju pri različitim brzinama opterećenja, pa se osobine stijena ispituju u kvazistatičkim uvjetima odnosno pri malim brzinama opterećenja i u dinamičkim uvjetima tj. pri velikim brzinama nanošenja odnosno opterećenja kakva se javljaju u stijeni prilikom miniranja.

Često strukturne značajke stijene više utječu na fragmentaciju stijenske mase, nego svojstva eksploziva koji se koriste pri miniranju. Ako je stijenska masa blokovita, tada će fragmentacija stijenske mase ovisiti o vezama između blokova, što znači da će strukturne značajke imati veći utjecaj na veličinu i razdiobu fragmenata od korištenog eksploziva. U slučaju masivne stijene, veličina fragmenata će ovisiti gotovo isključivo o parametrima miniranja, tj. o vrsti eksploziva i geometriji bušenja. Također bitan faktor kod miniranja stijena su vlačna i tlačna čvrstoća stijene, gustoća stijene, brzina širenja seizmičkih valova te tvrdoća i struktura stijene. Stijene veće gustoće (veća brzina širenja seizmičkih valova) teže se miniraju od stijena manje gustoće (manja brzina širenja seizmičkih valova). Terenska ispitivanja su pokazala da čvršće i kompaktnije stijene koje imaju veće brzine širenja seizmičkih valova, bolje se drobe eksplozivima veće brzine detonacije s brzinama detonacije od 5000 do 6000 m/s, dok za miniranje stijene sa manjim brzinama širenja seizmičkih valova pogodni su eksplozivi sa manjim brzinama detonacije poput ANFO eksploziva.

Strukturne značajke stijenske mase koje najviše utječu na rezultate miniranja su orijentacija, razmak i postojanost diskontinuiteta, te veličina blokova (Jug, 2016).

4.1.1. Čvrstoća stijene

Čvrstoća stijene definirana je kao otpor kojeg vanjske sile moraju savladati da bi došlo do sloma stijene, a razlikujemo tlačnu i vlačnu čvrstoću. Kod većine stijena, tlačna čvrstoća je 8 do 10 puta veća od vlačne. Problem ispitivanja čvrstoće u laboratoriju je što se ispitivanje provodi na reprezentativnim uzorcima, ne uzimajući u obzir slojevitost stijenske mase iz koje je uzorak uzet. Jednoosna tlačna čvrstoća definirana je kao maksimalno naprezanje pri ispitivanju kod kojeg dolazi do sloma stijene uz dozvoljeno bočno širenje.

Ispitivanje čvrstoće u laboratoriju provodi se na obrađenim uzorcima, propisanih dimenzija, a izraz 5-1 za jednoosnu tlačnu čvrstoću glasi (Hrženjak, 2009):

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \left(\frac{N}{m^2}, Pa, MPa \right) \quad (5-1)$$

gdje je:

F - sila koja djeluje na uzorak stijene (N)

A - površina uzorka (m²)

4.1.2. Volumna gustoća

Volumna gustoća predstavlja ukupnu masu jedinice volumena stijene sa svim njenim porama i pukotinama, onakvu kakva se nalazi u prirodnom stanju odnosno u ležištu. Volumna gustoća utječe na fragmentaciju stijene tako što stijene veće volumne gustoće zahtijevaju više energije kako bi došlo do razaranja stijene. Izraz 5-2 za volumnu gustoću stijene glasi (Hrženjak, 2009):

$$\rho = \frac{m}{V} \left(\frac{kg}{m^3} \right) \quad (5-2)$$

gdje je:

m - masa uzorka (kg)

V – volumen uzorka stijene (m³)

4.1.3. Deformabilnost

Deformabilnost materijala se definira kao promjena oblika. Deformabilnost je rezultat djelovanja opterećenja ili naprezanja, ali može biti i posljedica promjene temperature ili vlažnosti stijene (bubrenje). Provodi se mjerenjem dužinskih i poprečnih deformacija pri jednoosnom ispitivanju, a služi za određivanje modula elastičnosti i Poissonovog koeficijenta. Relativna duljinska deformacija jednaka je omjeru razlike duljina i početne osne duljine, a dana je izrazom 2-3 (Hrženjak,2009):

$$\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (5-3)$$

gdje je:

Δl - razlika duljina uzorka prije i poslije deformacije (m)

l_0 – početna duljina uzorka (m)

Relativna poprečna deformacija jednaka je omjeru razlike širina i početne širine, a dana je izrazom 5-4:

$$\varepsilon_d = \frac{\Delta d}{d_o} \quad (5-4)$$

gdje je:

Δd – razlika širine uzorka prije i poslije deformacije (m)

d_o – početna širina uzorka (m)

Youngov modul elastičnosti (E) je definiran kao omjer razlike naprezanja i razlike relativne duljinske deformacije, a dan je izrazom 5-5:

$$E = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon_l} \text{ (Pa)} \quad (5-5)$$

gdje je:

$\Delta \sigma$ - razlika između naprezanja (Pa)

$\Delta \varepsilon_l$ - razlika između relativnih duljinskih deformacija (-)

Visok modul elastičnosti imaju krte stijene dok niski modul elastičnosti imaju meke stijene odnosno jako su deformabilne.

Poissonov koeficijent definiran je izrazom 5-6 kao omjer između relativne duljinske i relativne poprečne deformacije.

$$\nu = \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_l} \quad (5-6)$$

gdje su:

ε_d – relativna poprečna deformacija (-)

ε_l – relativna duljinska deformacija (-)

4.1.4. Diskontinuiteti

Orijentacija diskontinuiteta je prostorni položaj diskontinuiteta definiran azimutom, odnosno smjerom nagiba diskontinuiteta u odnosu na sjever ($0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$), te kutom pada diskontinuiteta β u odnosu na horizontalnu ravninu ($0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$).

Razmak diskontinuiteta definiran je kao okomita udaljenost između ploha diskontinuiteta koji pripadaju istoj familiji. Razmak diskontinuiteta u razlomljenoj stijenskoj masi uvjetuje veličinu fragmenata unutar odminirane stijenske mase. U stijenskoj masi sa malim razmacima pukotina potrebna je manja količina energije eksploziva za razaranje stijene.

Postojanost diskontinuiteta predstavlja prostiranje diskontinuiteta kao ravnine. Što je veća postojanost diskontinuiteta, to je on opasniji po pitanju stabilnosti. Prekidi diskontinuiteta u stijeni najčešće ukazuju na veću čvrstoću diskontinuiteta.

Veličina bloka je parametar određen brojem familija diskontinuiteta, postojanošću i razmakom diskontinuiteta. Oblik bloka je određen orijentacijom, razmakom i brojem familija diskontinuiteta (Hrženjak, 2009).

4.2. KONTROLABILNI PARAMETRI MINIRANJA

Uz već navedene nekontrolabilne parametre odnosno uvjete stijenske mase na fragmentaciju stijenske mase utjecat će kontrolabilni parametri odnosno parametri miniranja. Geometrija miniranja također ovisit će o nekontrolabilnim uvjetima stijenske mase, a može se svrstat na:

- Promjer i dubina minske bušotine
- Inklinacija (kut nagiba) i probušenje minske bušotine
- Visina i materijal čepa
- Visina kosine (etaže)
- Odnos između vrijednosti izbojnice i razmaka bušotina
- Veličina minskog polja, smjer i raspored
- Redoslijed i način aktiviranja
- Odbojne i slobodne površine
- Vrsta eksploziva, energija, metoda punjenja minske bušotine
- Odnos između ukupne količine eksploziva po bušotini i ukupnog volumena odminirane stijenske mase

4.2.1. Visina kosine (etaže)

Visina etaže ograničava veličinu promjera eksplozivnog naboja i veličinu izbojnice. Ako je etaža vrlo visoka, može doći do devijacije minskih bušotina, što neće samo utjecati na fragmentaciju odminirane stijene, nego i na povećanje rizika od nastajanja snažnih vibracija i razbacivanja kamenja.

4.2.2. Inklinacija (kut nagiba) minske bušotine

Minske bušotine bušene pod određenim nagibom imaju prednosti, a to su:

- Bolja fragmentacija
- Premještanje i povećanje odminirane mase
- Manje probušivanja i bolje korištenje energije eksploziva
- Manje razine vibracija i manji rizik od ostajanja „noge“ u dnu kosine

4.2.3. Čepljenje minske bušotine

Čep minske bušotine služi za osiguravanje potpune detonacije eksplozivnog punjenja, te sprječavanje odlaska plinova eksplozije u atmosferu. Optimalna duljina čepa povećava se

kako se kvaliteta stijene smanjuje. U slučaju nezadovoljavajućeg čepjenja minske bušotine doći će do neželjenog zračnog udarnog vala i razbacivanja materijala zbog naglog izlaska plinovitih produkata detonacije u atmosferu. U slučaju prevelike duljine čepa u odminiranom materijalu iz gornjeg dijela etaže imat ćemo veliku količinu vangabaritnih komada odminirane stijene, imat ćemo slabije rastresanje stijenske mase, a mogu se pojaviti i povećane razine vibracije.

4.2.4. Probušenje

Pri površinskom miniranju, uklještenost stijenske mase najveće je u donjem dijelu etaže, zbog čega se vrši probušenje. U slučaju prekratkog probušenja odminirana stijena neće se odvojiti u razine etažne ravnine. U slučaju pretjerane duljine probušenja moguće su sljedeće posljedice:

- Povećanje troškova bušenja i miniranja
- Povećanje razina vibracija
- Prekomjerno djelovanje na nižu etažu, odnosno drobljenje podloge, a može se utjecati i na stabilnost kosina u krajnjim zonama kopa.
- Rizik od pojave sloma u kosini i nastanka klizišta, pogotovo ako je orijentacija ploha diskontinuiteta i slojeva u stijenskoj masi nepovoljna (pad prema otkopnoj fronti ili u lice)

S ciljem smanjenja probušenja, za punjenje donjih dijelova minskih bušotina koriste se eksplozivi koji daju veću koncentraciju energije po jedinici dužine, a preporučuje se i bušenje bušotina pod nagibom.

4.2.5. Izbojnica i razmak između minskih bušotina

Izbojnica (linija najmanjeg otpora) je najmanja udaljenost od osi minske bušotine do slobodne površine, a razmak je udaljenost između minskih bušotina u istom redu.

Prevelika izbojnica pruža otpor prodiranju eksplozivnih plinova i tako onemogućava učinkovito slamanje i pomicanje stijenske mase, dok dio energije može prouzročiti povećanje seizmičkih vibracija eksplozije.

Premala izbojnica omogućuje bijeg plinovima i širenje prema slobodnom licu velikom brzinom, nekontrolirano guranje fragmentirane stijene i izazivanje porasta tlaka zraka, buku i razbacivanje kamenja.

Za proračun izbojnice, u praksi se najčešće koristi Langeforsov izraz 5-8, a on glasi:

$$B = \frac{d}{33} \sqrt{\frac{gE_g}{svm}} [m] \quad (5-8)$$

gdje je:

B- izbojnica (m)

d- promjer minske bušotine (mm)

g- gustoća eksplozivnog punjenja u minskoj bušotini (kg/dm³)

E_g- relativna snaga eksploziva za glavni eksplozivni naboj

s- pokazatelj minirljivosti stijene (kg/m³)

v- koeficijent uklještenosti stijene pri dnu minske bušotine

m- koeficijent gustoće minskih bušotina

4.2.6. Razmak minskih bušotina

Razmak minskih bušotina ima utjecaj na granulaciju materijala, stoga je bitno odrediti optimalni razmak kako bi granulacija bila povoljna, a razbacivanje materijala nezatno. Razmak minskih bušotina ovisi o izbojnici B i koeficijentu gustoće minskih bušotina m, a dan je izrazom 2-8:

$$S = m \cdot B [m] \quad (2-8)$$

4.2.7. Odstupanje (devijacija) minskih bušotina

U slučaju devijacije minskih bušotina može doći do krupnije granulacije materijala, kao i nekontroliranog razbacivanja stijene.

4.2.8. Promjer minske bušotine

Koncentraciju odnosno distribuciju eksplozivnog punjenja određuje promjer minske bušotine. Samim time promjer minske bušotine imat će utjecaj na fragmentaciju stijene. U slučaju korištenja patroniranih eksploziva, poželjna je što manja razlika između promjera minske bušotine i patrone eksplozivnog punjenja. Manja razlika promjera rezultirat će boljom fragmentacijom stijenske mase. Povećanjem promjera bušotina također se povećavaju duljine čepova što može rezultirat slabijim drobljenjem stijene u gornjim dijelovima minirane etaže.

5. TLAK I BRZINA DETONACIJE EKSPLOZIVA SMANJENE GUSTOĆE

Snaga eksploziva odnosno sposobnost eksploziva za obavljanje određenog rada može se definirati kao radna sposobnost eksploziva. Radna sposobnost eksploziva, procjenjuje se u odnosu na referentni (svojstvima poznat) eksploziv, pomoću prilagođenih laboratorijskih i in situ testova navedenih u poglavlju 2.3. Također radna sposobnost eksploziva je definirana slijedećim parametrima: količinom plinova formiranih reakcijom, oslobođenom toplinom te brzinom detonacije. Utjecaj pojedinog parametra na rad obavljen nad okolinom ovisi o uvjetima u kojima se proces eksplozije odvija (Sućeska, 1995).

Pri izvođenju minerskih radova važan je odabir odgovarajućeg eksploziva obzirom na uvijete u stijenskoj masi. Odabrani eksploziv trebao bi imati najveći učinak uz najmanju utrošenu masu. Iz učinkovitosti eksploziva proizlaze i specifični te ukupni troškovi miniranja. Brizantnost kao razorna snaga eksploziva i radna sposobnost kao mogućnost obavljanja rada eksploziva ističu se kao mjera efikasnosti i učinka eksploziva. Primjenom eksploziva smanjene gustoće, uz smanjenje brzine detonacije te intenziteta udarnog djelovanja nastoji se smanjiti seizmički utjecaj uz zadržavanje optimalnog stupnja drobljenja stijene (Škrlec, 2015).

Amonij-nitratno praškasti eksploziv komercijalnog naziva Permonex V19, teoretskih parametara prikazanih u tablici 5-1, smanjivana je gustoća dodavanjem različitih omjera ekspaniranog polistirena (EPS) u granulama veličine zrnaca od 1,5 mm do 3,5 mm i dodavanjem usitnjenog EPS-a različitih veličina zrnaca.

Tablica 5-1 Teoretski parametri eksploziva Permonex V19 (Škrlec, 2015)

Gustoća patroniranja	1,05 g/cm ³
Bilanca kisika	1,6 % O ₂
Specifična energija	4242 kJ/kg
Brzina detonacije (Ø 65 mm)	4400 m/s
Volumen plinova	905 l/kg

Dodavanjem ekspaniranog polistirena (EPS) amonij-nitratno praškastom eksplozivu komercijalnog naziva Permonex V19 u volumnom omjeru 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 i 5:95, pri čemu prvi broj predstavlja udio volumena eksploziva, a drugi broj postotak volumena EPS-a, dobivene su srednje vrijednosti gustoća eksploziva.

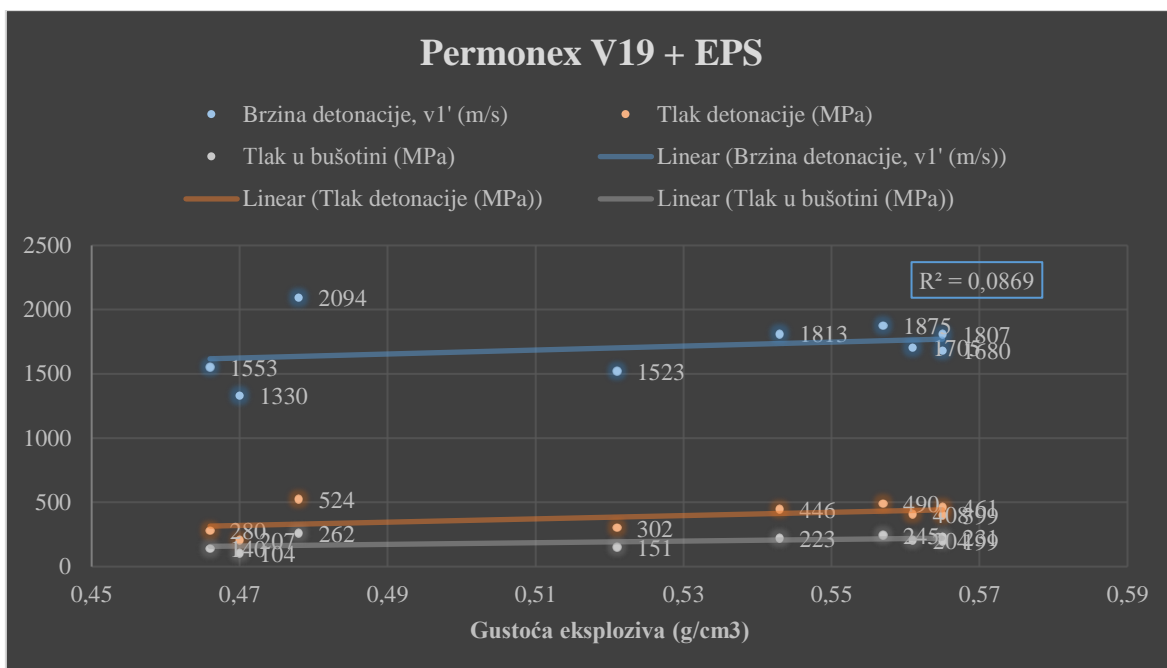
U tablici su prikazane gustoće eksploziva pri kojim se postiže detonabilnost pojedinih mješavina. Gustoće eksploziva prikazane su u tablici 5-2.

Tablica 5-2 Gustoće eksplozivnih smjesa sastavljenih od amonij-nitratno praškastih eksploziva s dodatkom EPS-a (Škrlec, 2015)

Vrsta eksploziva (veličina granula/zrnca EPS-a)	Omjer eksploziv : EPS	Gustoća, ρ (g/cm ³)	Brzina detonacije v_1 (m/s)	Tlak detonacije (MPa)	Tlak u bušotini (MPa)
Permonex V19	100:0	1,010	3217	2613	1306
GRANULIRANI EPS					
Permonex V19 / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	50:50	0,478	2094	524	262
MEHANIČKI USITNJENI EPS					
Permonex V19 / EPS (+ 0,5 mm)	50:50	0,557	1875	490	245
Permonex V19 / EPS (+ 0,5 mm)	40:60	0,466	1553	280	140
Permonex V19 / EPS (0,5 mm – 0,25 mm)	50:50	0,565	1807	461	231
Permonex V19 / EPS (0,25 mm – 0,18 mm)	50:50	0,561	1705	408	204
Permonex V19 / EPS (0,25 mm – 0,18 mm)	40:60	0,470	1330	207	104
Permonex V19 / EPS (0,18 mm – 0,1 mm)	50:50	0,565	1680	399	199
Permonex V19 / EPS (0,18 mm – 0,1 mm)	45:55	0,521	1523	302	151
Permonex V19 / EPS (– 0,1 mm)	50:50	0,543	1813	446	223

Iz tablice je vidljivo da amonij-nitratno praškasti eksploziv sa mehanički usitnjenim EPS-om u volumnom omjeru 40:60 postiže najmanju srednju gustoću od 0,470 g/cm³ te pri toj gustoći postiže brzinu detonacije od 1330 m/s. Ukoliko u izraz 2-1 i 2-3 uvrstimo vrijednosti gustoće eksploziva i brzine detonacije možemo proračunati tlak detonacije P_d , te tlak na stjenke bušotine P_b , za potpuno napunjene minske bušotine, koji iznosi polovinu tlaka detonacije. Vrijednosti proračunatih tlakova detonacije za amonij-nitratno praškastie eksplozive s dodatkom EPS-a prikazani su u tablici 5-2.

Na slici 5-1 prikazan je graf ovisnosti brzine detonacije, tlaka detonacije i tlaka u bušotini o gustoći eksploziva Permonex V19 sa dodatkom EPS-a. Iz grafa je vidljivo da na brzinu detonacije bitno utječe veličina usitnjenog EPS-a, sa vrijednosti koeficijenta korelacije $R^2=0,0869$.



Slika 5-1 Graf ovisnosti brzine detonacije, tlaka detonacije i tlaka u bušotini o gustoći eksploziva Permonex V19

Dodavanjem ekspandiranog polistirena (EPS) u granulama veličine zrnaca od 1,5 mm do 3,5 mm, te kao vezivo 10 % volumno emulzijske matrice ANFO-eksplozivu komercijalnog naziva AN14 u volumnom omjeru 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 i 5:95, pri čemu prvi broj predstavlja udio volumena eksploziva, a drugi broj postotak volumena EPS-a, dobivene su srednje vrijednosti gustoća eksploziva. U tablici su prikazane gustoće eksploziva pri kojim se postiže detonabilnost pojedinih mješavina. Gustoće eksploziva prikazane su u tablici 5-3.

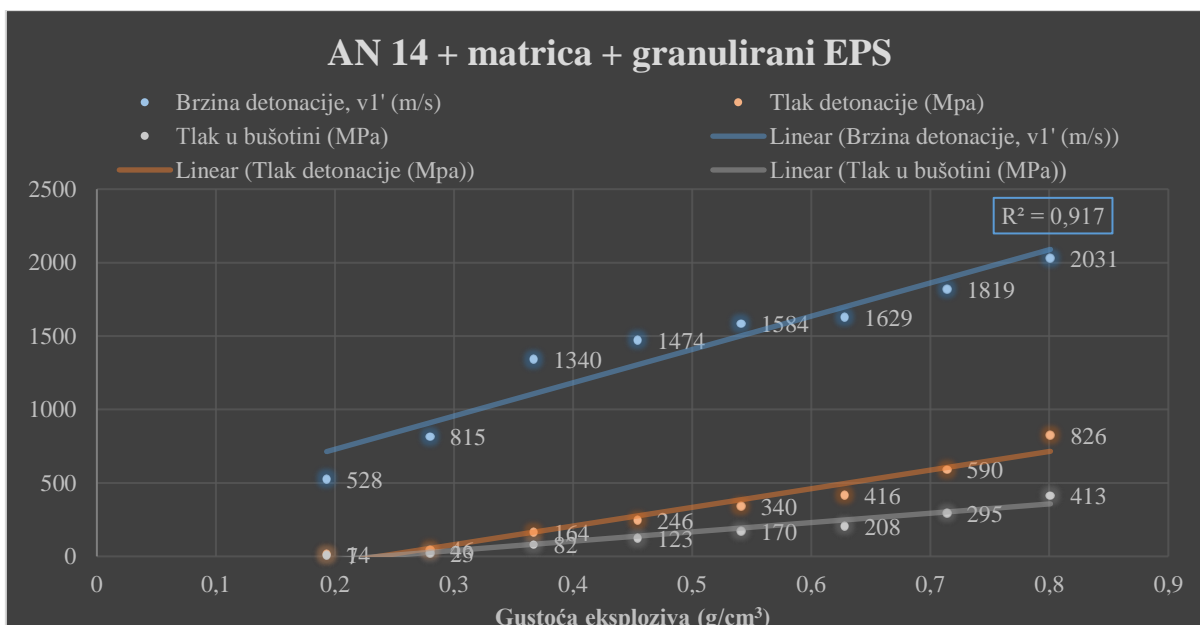
Tablica 5-3 Gustoće ANFO-eksploziva s dodatkom EPS-a (Škrlec, 2015)

Vrsta eksploziva (veličina granula EPS-a)	Omjer eksploziv : EPS	Gustoća, ρ (g/cm ³)	Brzina detonacije, v _{1'} (m/s)	Tlak detonacije (MPa)	Tlak u bušotini (MPa)
AN14	100:0	0,834	985	202	101
AN14 + Matrica	90:10	0,846	1572	553	262
(AN14 + Matrica) / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	90:10	0,801	2031	826	413
(AN14 + Matrica) / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	80:20	0,714	1819	590	295
(AN14 + Matrica) / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	70:30	0,628	1629	416	208

(AN14 + Matrica) / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	60:40	0,541	1584	340	170
(AN14 + Matrica) / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	50:50	0,454	1474	246	123
(AN14 + Matrica) / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	40:60	0,367	1340	164	82
(AN14 + Matrica) / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	30:70	0,280	815	46	23
(AN14 + Matrica) / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	20:80	0,193	528	14	7

Iz tablice je vidljivo da ANFO-eksploziv sa granuliranim EPS-om u volumnom omjeru 20:80 postiže najmanju srednju gustoću od 0,193 g/cm³ te pri toj gustoći postiže brzinu detonacije od 528 m/s. Ukoliko u izraz 2-1 i 2-3 uvrstimo vrijednosti gustoće eksploziva i brzine detonacije možemo proračunati tlak detonacije Pd, te tlak na stjenke bušotine Pb, za potpuno napunjene minske bušotine, koji iznosi polovinu tlaka detonacije. Vrijednosti proračunatih tlakova detonacije za ANFO-eksploziv sa dodatkom EPS-a prikazani su u tablici 5-3.

Na slici 5-2 prikazan je graf ovisnosti brzine detonacije, tlaka detonacije i tlaka u bušotini o gustoći ANFO-eksploziva sa dodatkom matrice te granuliranog EPS-a. Na grafu je vidljiva linearna ovisnost brzine detonacije o gustoći eksploziva sa koeficijentom korelacije $R^2=0,917$. Također vidljiva je linearna ovisnost Pb i Pd o gustoći eksploziva sa koeficijentom korelacije $R^2=0,9501$.



Slika 5-2 Graf ovisnosti brzine detonacije, tlaka detonacije i tlaka u bušotini o gustoći ANFO-eksploziva

Emulzijski eksploziv tipa voda u ulju komercijalnog naziva Lambrex 1, teoretskih parametara prikazanih u tablici 5-4, smanjivana je gustoća dodavanjem različitih omjera ekspaniranog polistirena (EPS) u granulama veličine zrnaca od 1,5 mm do 3,5 mm i dodavanjem usitnjenog EPS-a različitih veličina zrnaca.

Tablica 5-4 Teoretski parametri eksploziva Lambex 1 (Škrlec, 2015)

Gustoća patroniranja	1,20 g/cm ³
Bilanca kisika	2,3 % O ₂
Specifična energija	765 kJ/kg
Brzina detonacije (Ø 65 mm)	5500 m/s
Volumen plinova	910 l/kg

Dodavanjem ekspaniranog polistirena (EPS) emulzijskom eksplozivu Lambrex 1 u volumnom omjeru 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 i 5:95, pri čemu prvi broj predstavlja udio volumena eksploziva, a drugi broj postotak volumena EPS-a, dobivene su srednje vrijednosti gustoća eksploziva. U tablici su prikazane gustoće eksploziva pri kojim se postiže detonabilnost pojedinih mješavina. Gustoće eksploziva prikazane su u tablici 5-5.

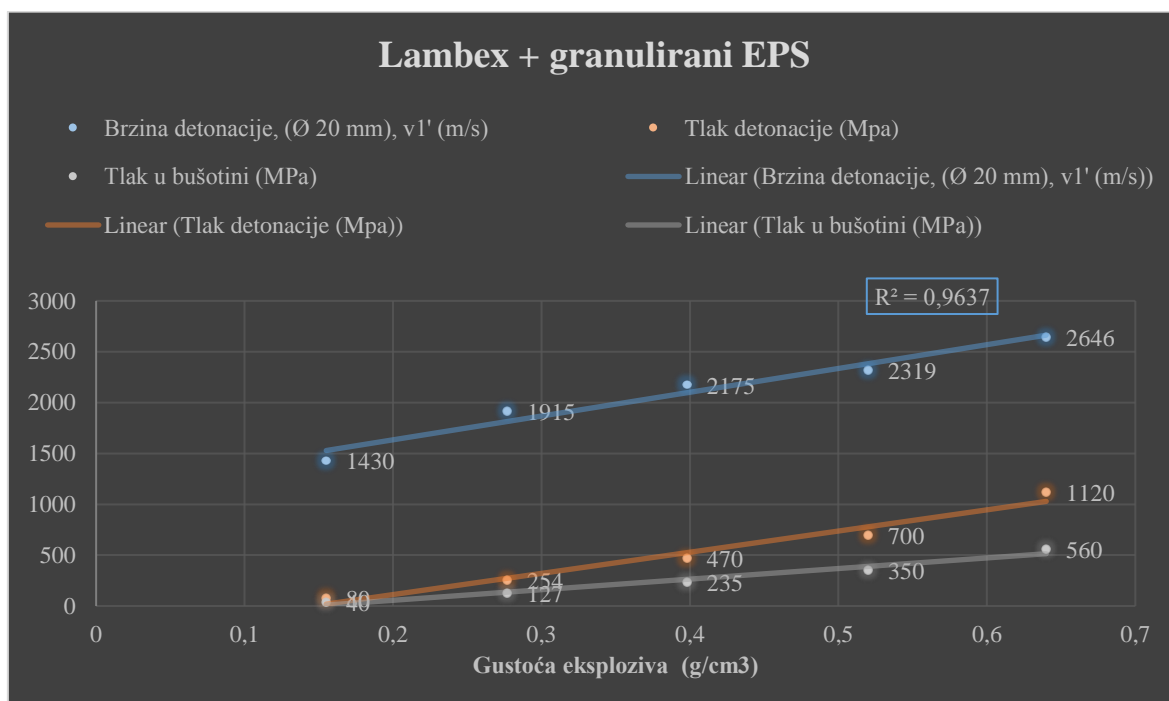
Tablica 5-5 Gustoće emulzijskih eksploziva s dodatkom EPS-a (Škrlec, 2015)

Vrsta eksploziva (veličina granula/zrnaca EPS-a)	Omjer eksploziv : EPS	Gustoća, ρ (g/cm ³)	Brzina detonacije, (\bar{O} 20 mm), v1' (m/s)	Tlak detonacije (MPa)	Tlak u bušotini (MPa)
Lambrex 1	100:0	1,250	3491	3808	1904
GRANULIRANI EPS					
Lambrex 1 / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	50:50	0,640	2646	1120	560
Lambrex 1 / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	40:60	0,520	2319	700	350
Lambrex 1 / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	30:70	0,398	2175	470	235
Lambrex 1 / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	20:80	0,277	1915	254	127
Lambrex 1 / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	10:90	0,155	1430	80	40
MEHANIČKI USITNjeni EPS					
Lambrex 1 / EPS (+ 0,5 mm)	60:40	0,916	2834	1840	920
Lambrex 1 / EPS (0,5 mm – 0,25 mm)	50:50	0,792	3049	1840	920
Lambrex 1 / EPS (0,5 mm – 0,25 mm)	40:60	0,701	2480	1078	539
Lambrex 1 / EPS (0,25 mm – 0,18 mm)	50:50	0,802	3142	1980	990
Lambrex 1 / EPS (0,25 mm – 0,18 mm)	40:60	0,713	-	-	-
Lambrex 1 / EPS (0,18 mm – 0,1 mm)	50:50	0,793	2892	1658	829
Lambrex 1 / EPS (0,18 mm – 0,1 mm)	40:60	0,701	2816	1390	695
Lambrex 1 / EPS (0,18 mm – 0,1 mm)	30:70	0,609	-	-	-
Lambrex 1 / EPS (- 0,1 mm)	50:50	0,771	3243	2027	1014
Lambrex 1 / EPS (- 0,1 mm)	40:60	0,675	2911	1430	715
Lambrex 1 / EPS (- 0,1 mm)	30:70	0,579	-	-	-

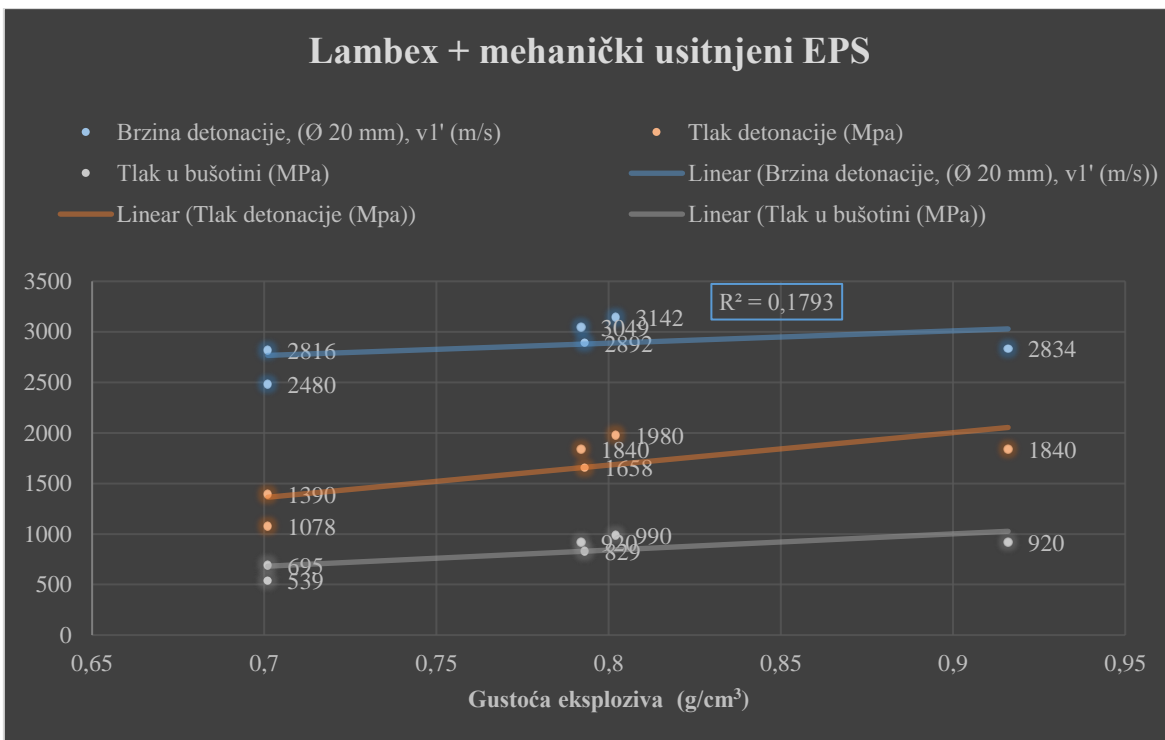
Iz tablice je vidljivo da emulzijski eksploziv sa granuliranim EPS-om u volumnom omjeru 10:90 postiže najmanju srednju gustoću od 0,155 g/cm³ te pri toj gustoći postiže brzinu detonacije od 1430 m/s. Ukoliko u izraz 2-1 i 2-3 uvrstimo vrijednosti gustoće eksploziva i brzine detonacije možemo proračunati tlak detonacije Pd, te tlak na stjenke bušotine Pb, za potpuno napunjene minske bušotine, koji iznosi polovinu tlaka detonacije. Vrijednosti proračunatih tlakova detonacije za emulzijske eksplozive sa dodatkom EPS-a prikazani su u tablici 5-5.

Na slici 5-3 prikazan je graf ovisnosti brzine detonacije, tlaka detonacije i tlaka u bušotini o gustoći eksploziva Lambex sa dodatkom granuliranog EPS-a. Na grafu je vidljiva linearna ovisnost brzine detonacije o gustoći eksploziva sa koeficijentom korelacije $R^2=0,9637$. Također vidljiva je linearna ovisnost Pb i Pd o gustoći eksploziva sa koeficijentom korelacije $R^2=0,9672$.

Na slici 5-4 prikazan je graf ovisnosti brzine detonacije, tlaka detonacije i tlaka u bušotini o gustoći eksploziva Lambex sa dodatkom mehanički usitnjenim EPS-om. Iz grafa je vidljivo da na brzinu detonacije bitno utječe veličina usitnjenog EPS-a, sa vrijednosti koeficijenta korelacije $R^2=0,1793$.



Slika 5-3 Graf ovisnosti brzine detonacije, tlaka detonacije i tlaka u bušotini o gustoći eksploziva Lambex sa dodatkom granuliranog EPS-a



Slika 5-4 Graf ovisnosti brzine detonacije, tlaka detonacije i tlaka u bušotini o gustoći eksploziva Lambex sa dodatkom mehanički usitnjenim EPS-om

Emulzijska matrica gustoće 1,376 g/cm³, kemijskog sastava 14,20 % vode, 5,73 % uljne faze i emulgatora te 80,07 % otopine anorganskih soli, senzibilizirana pomoću staklenih mikrokuglica, smanjivana je gustoća dodavanjem različitih omjera ekspaniranog polistirena (EPS) u granulama veličine zrnaca od 1,5 mm do 3,5 mm .

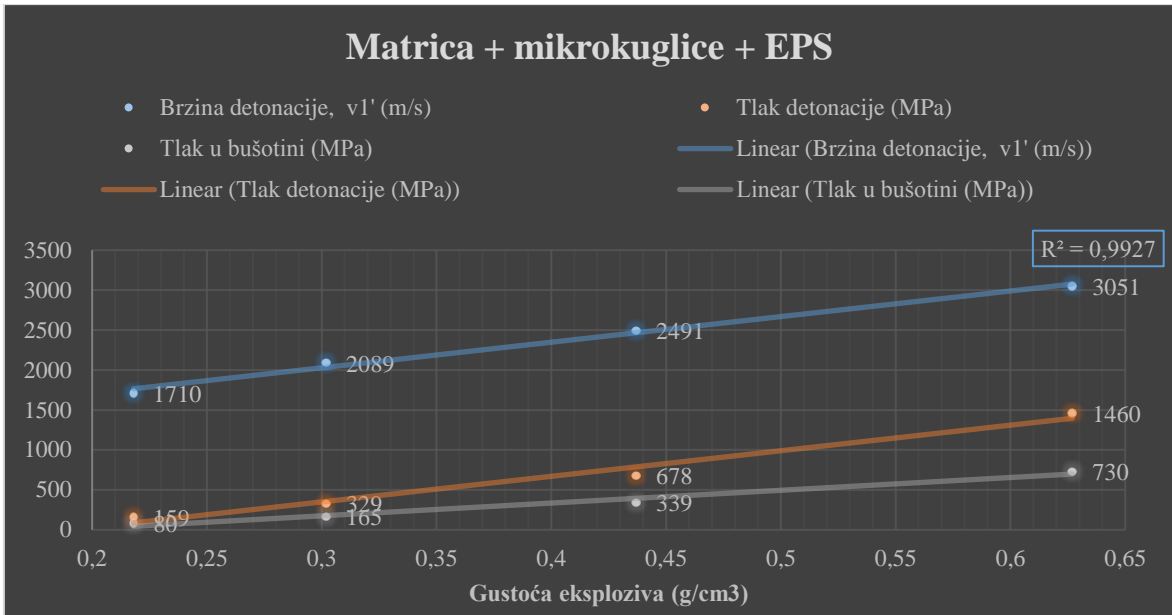
Dodavanjem ekspaniranog polistirena (EPS) emulzijskoj matrici u volumnom omjeru 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 i 5:95, pri čemu prvi broj predstavlja udio volumena eksploziva, a drugi broj postotak volumena EPS-a, dobivene su srednje vrijednosti gustoća eksploziva. U tablici su prikazane gustoće eksploziva pri kojim se postiže detonabilnost pojedinih mješavina. Gustoće eksploziva prikazane su u tablici 5-6.

Tablica 5-6 Gustoća emulzijske matrice s dodatkom EPS-a (Škrlec, 2015)

Vrsta eksploziva (veličina granula EPS-a)	Omjer eksploziv : EPS	Gustoća, ρ (g/cm ³)	Brzina detonacije, v_1' (m/s)	Tlak detonacije (MPa)	Tlak u bušotini (MPa)
Matrica / Mikrokuglice	100:0	1,175	5534	8998	4499
Matrica / EPS (1,5 mm - 3,5 mm)	50:50	0,627	3051	1460	730
Matrica / EPS (1,5 mm - 3,5 mm)	40:60	0,437	2491	678	339
Matrica / EPS (1,5 mm - 3,5 mm)	30:70	0,302	2089	329	165
Matrica / EPS (1,5 mm - 3,5 mm)	20:80	0,218	1710	159	80

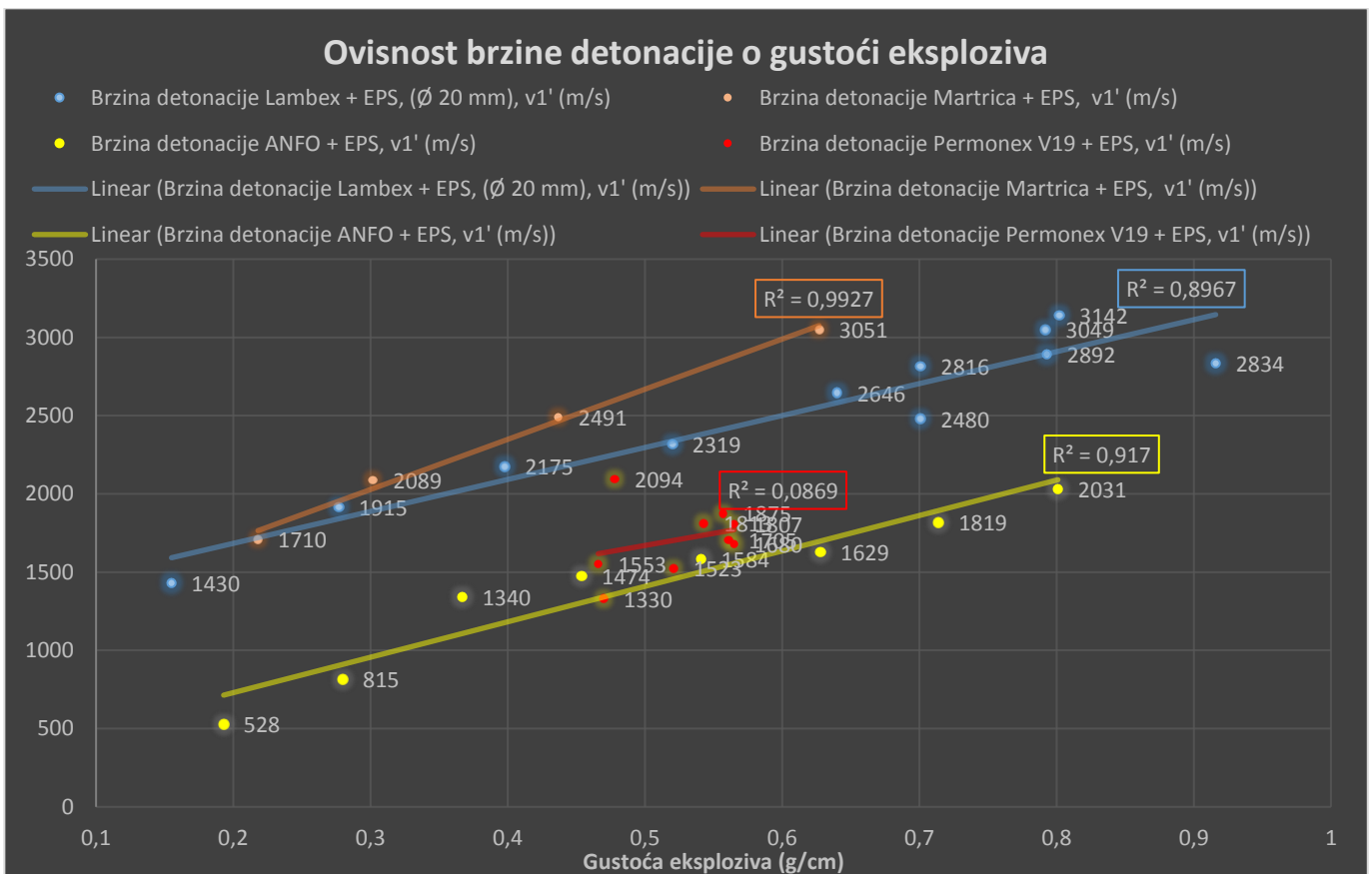
Iz tablice je vidljivo da emulzijski eksploziv sa granuliranim EPS-om u volumnom omjeru 20:90 postiže najmanju srednju gustoću od 0,218 g/cm³ te pri toj gustoći postiže brzinu detonacije od 1710 m/s. Ukoliko u izraz 2-1 i 2-3 uvrstimo vrijednosti gustoće eksploziva i brzine detonacije možemo proračunati tlak detonacije P_d , te tlak na stjenke bušotine P_b , za potpuno napunjene minske bušotine, koji iznosi polovinu tlaka detonacije. Vrijednosti proračunatih tlakova detonacije za emulzijsku matricu sa dodatkom EPS-a prikazani su u tablici 5-6.

Na slici 5-5 prikazan je graf ovisnosti brzine detonacije, tlaka detonacije i tlaka u bušotini o gustoći emulzijske matrice sa dodatkom EPS-a. Iz grafa je vidljiva linearna ovisnost brzine detonacije i gustoće eksploziva sa koeficijentom korelacije $R^2=0,9927$. Također vidljiva je linearna ovisnost P_b i P_d o gustoći eksploziva sa koeficijentom korelacije $R^2=0,9778$.



Slika 5-5 Graf ovisnosti brzine detonacije, tlaka detonacije i tlaka u bušotini o gustoći emulzijske matrice sa dodatkom EPS-a

Na slici 5-6 prikazan je graf ovisnosti brzina detonacija eksploziva o gustoći eksploziva za sva četiri eksploziva smanjene gustoće.



Slika 5-6 Graf ovisnosti brzina detonacije o gustoći eksploziva

6. ZAKLJUČAK

Uspješnost miniranja ovisiti će o uvjetima stijenske mase, svojstvima eksploziva i geometriji miniranja. Ukoliko se podešavanjem parametara minskog polja uz primjenu klasičnih gospodarskih eksploziva ne mogu dovoljno reducirati štetni učinci miniranja u obliku oštećenja iza minskog polja ili prevelikog usitnjavanja mineralne sirovine, mogu se primijeniti eksplozivi smanjene gustoće.

Smanjenjem gustoće eksploziva smanjuje se specifična masa punjenja, detonacijska brzina i tlak udarnog vala. Smanjenjem detonacijske brzine i tlaka postižu se manja štetna naprezanja na stijensku masu.

U ovom radu prikazano je smanjivanje gustoće eksploziva pomoću granuliranog i usitnjenog EPS-a. Iz rezultata je vidljivo da je brzina detonacije, a samim time i tlak detonacije linearno ovisan o gustoći eksploziva. Prilikom smanjivanja gustoće eksploziva granuliranim EPS-om vidljiva je linearna ovisnost detonacije eksploziva o gustoći eksploziva sa koeficijentom korelacije $R^2=0,9778$ za emulzijsku matricu, koeficijentom korelacije $R^2=0,9672$ za emulzijski eksploziv Lambrex 1, te koeficijentom korelacije $R^2=0,9501$ za ANFO-eksploziv AN 14 sa dodatkom matrice. Prilikom smanjivanja gustoće eksploziva mehanički usitnjenim EPS-om koeficijent korelacije brzine detonacije i gustoće eksploziva znatno se smanjuje te za eksploziv Permonex V19 iznosi $R^2=0,0869$, dok za emulzijski eksploziv Lambrex 1 vrijednost koeficijenta korelacije iznosi $R^2=0,1793$.

Također eksplozivi kojima je smanjivana gustoća mehanički usitnjenim EPS-om sa istim gustoćama ili približno istih gustoća, zbog različite veličina zrnaca postižu bitno različite vrijednosti brzina detonacija. To je posljedica oblika zrna, odnosno granula EPS-a te načina homogeniziranja eksploziva. Zbog okruglog oblika granula EPS-a omogućava se pravilnije raspoređivanje eksploziva oko samih zrnaca te bolja homogenizacija eksploziva. S obzirom na nepravilan oblik mehanički usitnjenih zrnaca te zbog toga lošije distribucije eksploziva između njih, dolazi do prekida kontakta i prekida detonacije.

7. LITERATURA

ARHITEKO d.o.o. 2018. *Granule celuloze* URL: <http://www.arhiteko.hr> (18.12.2018.)

ARHITEKO d.o.o. 2018. URL: <http://www.arhiteko.hr> (10.11.2018.)

EVERYCHINA. 2018. *Plastične mikrokuglice* URL: <http://www.everychina.com/m-hollow-plastic-microspheres> (18.12.2018)

GENERALIĆ, 2018. *Polistiren*, KEMIJSKI RJEČNIK. URL: <https://glossary.periodni.com> (10.11.2018.)

HRN EN 13631-10: 2004: *Eksplozivi za civilnu uporabu. Jaki eksplozivi. 10. dio: Metoda za potvrđivanje načina iniciranja* (EN 13631-10:2003)

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

HRN EN 13631-3:2007: *Eksplozivi za civilnu uporabu. Jaki eksplozivi. 14. dio: 3. dio: Određivanje osjetljivosti eksploziva na udar* (EN 13631-4:2004)

HRN EN 13631-3:2007: *Eksplozivi za civilnu uporabu. Jaki eksplozivi. 14. dio: 3. dio: Određivanje osjetljivosti eksploziva na trenje* (EN 13631-3:2004)

HRŽENJAK, P. 2009. *Mehanika stijena 1 – predavanja*. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

HRŽENJAK, P. 2009. *Mehanika stijena 2 – predavanja*. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

INDIAMART. 2018. *Ugljen u prahu* URL: <https://www.indiamart.com/proddetail/norit-activated-carbon-3855352533.html> (18.12.2018.)

JUG, J. 2016. *Mogućnost kontrole i predviđanja fragmentacije adminirane stijenske mase*. Seminarski rad. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

KISH COMPANY INC. 2014. *Microspheres* URL: <http://www.kishcompany.com> (2.12.2018)

KRSNIK, J. 1989. *Miniranje*. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

NATIONAL PARK SERVICES. 2017. URL: https://www.nps.gov/parkhistory/online_books/npsg/explosives/Chapter2.pdf (12.9.2018.)

- ORIOLIK d.d. 2015. *Poliuretanska pjena*. URL: <http://www.oriolik.hr/index.php?cid=3&page=catalog> (18.12.2018.)
- ORIOLIK d.d. 2015. *Poliuretanske pjene* URL: <http://www.oriolik.hr/> (2.12.2018.)
- OZM RESEARCH. 2018. *Uređaj za ispitivanje eksploziva na trenje*. URL: <http://www.ozm.cz/en/...tests/fskm-50-20k-bam-friction-sensitivity-test/> (18.12.2018.)
- OZM RESEARCH. 2018. *Uređaj za ispitivanje eksploziva na udar*. URL: <http://www.ozm.cz/en/sensitivity-tests/bam-fall-hammer-bfh-12a/> (18.12.2018.)
- POLISTIRENINIO PUTPLASČIO ASOCIACIJA. 2017. *Zrnca ekspaniranog polistirena*. URL: <http://epsa.lt/naujienos/pastatu-apsiltinimo-metas-ka-reikia-zinoti-taupantiems-siluma/attachment/granule> (18.12.2018.)
- PQ CORPORATION. 2018. *Glass Microspheres* URL: <http://www.potterseurope.org/> (20.11.2018.)
- PŠENO d.o.o. 2018. *Vermikulit* URL: <http://pseno.hr/> (20.11.2018.)
- RENOVA d.o.o. 2017. URL: <http://www.renova.com/> (15.11.2018.)
- SAVIĆ, M. 2000. *Miniranje na površinskim kopovima*. Institut za Bakar Bor
- SEEDSNPOTS. 2018. *Zrnca perlita*. URL: <https://seedsnpots.com/product/expanded-perlite-medium-size-250gms> (18.12.2018.)
- SUČESKA, M. 1995. *Test methods for explosives*. New York: Springer – Verlag.
- ŠKRLEC, V. 2015. *Analiza primjenjivosti eksploziva smanjene gustoće za gospodarska miniranja*. Disertacija. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
- UN, 1995. *Recommendations on the transport of dangerous goods manual of tests and criteria*. New York and Geneva: United Nations Publications.
- VELIKI REČNIK. 2016. *Zrnca vermikulita*. URL: <https://velikirecnik.com/2016/09/24/vermikulit/> (18.12.2018.)
- WALKER, R. 2016. *Density of materials* URL: <http://www.simetric.co.uk> (12.11.2018.)
- WIKIPEDIA COMMONS. 2013. *Otpaci iz prerade šećerne trske*. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sugarcane_bagasse.jpg (18.12.2018.)

WIKIPEDIA. 2009. *Staklene mikrokuglice*. URL: https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Glass_microspheres.jpg (18.12.2018.)

WIKIPEDIA. 2013. *Bagasa* URL: https://hr.wikipedia.org/wiki/Bagasa#Dobivanje_bagase (10.11.2018.)

WORLD ENCYCLOPEDIA KNOWLEDGE. 2018. *Ugljen*. URL: swewe.com/word_show.htm/?80015_1&Ugljen (15.11.2018.)

XSREALITY. 2018. *Drveno brašno*. URL: <http://xsreality.org/bs/drevesnaya-muka-uzhe-davno-otlichaetsya-dostatochno-vysokoj-populyarnostyu-blagodarya-svoim-osobym-svojstvam-ona-mozhet-ispolzovatsya-dlya-izgotovleniya-razlichnyh-kleevyih-sostavov-shpatlevki-i-zamaz/> (18.12.2018.)