

Analiza primjenjivosti eksploziva smanjene gustoće za gospodarska miniranja

Škrlec, Vinko

Doctoral thesis / Disertacija

2015

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:169:957446>

Rights / Prava: [Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 međunarodna](#)

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

Vinko Škrlec

**ANALIZA PRIMJENJIVOSTI
EKSPLOZIVA SMANJENE GUSTOĆE ZA
GOSPODARSKA MINIRANJA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2015.



Sveučilište u Zagrebu

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Vinko Škrlec

**ANALIZA PRIMJENJIVOSTI
EKSPLOZIVA SMANJENE GUSTOĆE ZA
GOSPODARSKA MINIRANJA**

DOKTORSKI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Mario Dobrilović

Zagreb, 2015.



Sveučilište u Zagrebu

FACULTY OF MINING, GEOLOGY
AND PETROLEUM ENGINEERING

Vinko Škrlec

ANALYSIS OF USE OF LOW DENSITY CIVIL EXPLOSIVES

DOCTORAL THESIS

Supervisor:

Associate Professor Mario Dobrilović, PhD

Zagreb, 2015.

Doktorski rad izrađen je na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

Mentor: izv. prof. dr. sc. Mario Dobrilović

U sklopu znanstvenog projekta:

„Emulzijski eksplozivi, inicijalna sredstva i djelovanje miniranja na okoliš“, uz potporu Ministarstva, znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske, projekt br. 195-1951825-1819, voditelj projekta: izv. prof. dr. sc. Mario Dobrilović

Doktorski rad sadrži: 205 stranica teksta, 121 sliku, 60 tablica i 7 priloga.

Posvećeno Mariji Škrlec, nepresušnom vrelu dobrote i ljubavi.

Zahvale

Najveće **HVALA** Idi na bezuvjetnoj ljubavi, pažnji, strpljenju, razumijevanju, podršci i pomoći.

Veliko hvala prof. dr. sc. Zvonimiru Esteru na ukazanom povjerenju pri izboru za znanstvenog novaka na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu. Najljepše mu se zahvaljujem na prenesenom iskustvu, znanju i podršci tijekom svih ovih godina.

Veliko hvala mentoru izv. prof. dr. sc. Mariu Dobriloviću na usmjeravanju, savjetima, pomoći i bezrezervnoj podršci te na nesebično odvojenom vremenu i trudu koje je uložio tijekom izrade ovog rada.

Posebno zahvaljujem prof. dr. sc. Muhamedu Sućeski na korisnim sugestijama i stručnim savjetima koji su poboljšali ovaj rad.

Također posebnu zahvalnost dugujem dr. sc. Sanji Matečić Mušanić na uloženom trudu pri čitanju rada i sugestijama koje su unaprijedile rad te na iskazanoj susretljivosti.

Hvala prof. dr. sc. Gordanu Bedekoviću na mogućnosti korištenja uređaja za usitnjavanje ekspaniranog polistirena i na mogućnosti korištenja sita za granulometrijsku analizu.

Hvala kolegi dr.sc. Vječislavu Bohaneku na pomoći i korisnim savjetima tijekom izrade disertacije.

Veliko hvala kolegi i prijatelju Draženu Pećini na bezrezervnoj pomoći pri izvođenju ispitivanja, a nadasve na podršci i nikad poljuljanoj vjeri u mene.

Hvala kolegi i prijatelju Veranu Matošinu na pomoći s usitnjavanjem ekspaniranog polistirena.

Hvala majstorima Ivici Jurajiću i Mirku Matkoviću na mogućnosti korištenja radionice i pomoći prilikom pripreme ispitnih cijevi.

Veliko hvala Željki Kurelec, prof. na pomoći s prijevodima.

Puno hvala kolegi iz poduzeća KAMING d.d. Tomislavu Nemčeviću, dipl. ing .rud. na prijemu i omogućavanju provedbe terenskih ispitivanja.

Za uzorke i ispitne materijale zahvaljujem kolegama iz poduzeća:

GRAMEH d.o.o. Ivici Plantaku, dipl. ing .rud.;

GEOBIM d.o.o. Tomislavu Ostroškom, dipl. ing .rud.;

EXPLO-PROMET d.o.o. Ivanu Brečku.

Hvala svim bivšim i sadašnjim studentima koji su kroz izradu diplomskih i završnih radova dali svoj doprinos ovom radu.

Patrick Wilding, hvala ti što si nepresušan izvor moralnih vrijednosti i što si u meni usadio duh nepokolebljivosti. Jerome Drake, ti vječni optimistu, hvala ti što si i mene učinio optimistom.

Gđici. Sanji Schneider, prof. hvala na lekturi cjelokupnog rada.

Franjo i Slobodane, hvala vam što ste pravi prijatelji. Tu ste, bili ste tu i bit ćete tu.

Gospođo Karlo, hvala Vam na svemu.

Neizmjernu zahvalnost dugujem roditeljima na velikoj potpori, pomoći i razumijevanju tijekom cijelog studiranja kao i za vrijeme izrade disertacije.

I na kraju, svi dragi prijatelji, hvala vam što ste tu!

SAŽETAK

Urbanizacijom i izgradnjom prometne infrastrukture javlja se potreba izvođenja opreznih miniranja, odnosno miniranja koja s jedne strane, moraju razlomiti stijenu, a s druge strane, što manje oštetiti stjensku masu te očuvati njena fizičko-mehanička svojstva izvan zone miniranja. Primjena opreznih miniranja osigurava i smanjenje potencijalno štetnih utjecaja miniranja na okolne objekte ili građevine.

Svojstva uobičajeno korištenih eksploziva u potpunosti ne zadovoljavaju tražene zahtjeve što posebno dolazi do izražaja u uvjetima potrebe izvođenja opreznih miniranja. Istraživani eksplozivi smanjene gustoće pretpostavljaju detonacijska svojstva i minersko-tehničke karakteristike primjerene za uvjete opreznih miniranja.

Istraživanja su usmjerena ka izvedbi eksploziva smanjene gustoće proizvedenog na bazi postojećih gospodarskih eksploziva, odnosno njihovih komponenata.

Provedena istraživanja odredila su sastav optimalne smjese eksploziva smanjene gustoće na bazi emulzijske matrice s dodatkom ekspandiranog polistirena te njezina detonacijska i minersko-tehnička svojstva.

Ključne riječi: eksplozivi smanjene gustoće, oprezna miniranja, ekspandirani polistiren, emulzijska matrica

EXTENDED ABSTRACT

Due to urbanization and building of traffic infrastructure it is necessary to apply cautious blasting, i.e. blasting which should fragment the rock mass, but on the other hand, it should also cause the least possible damage of the rock mass in order to preserve its physical and mechanical properties outside the blast area. Controlled blasting also reduces potentially damaging effect of blasting on surrounding objects and structures.

The properties of explosives that are normally used do not fulfil the aforementioned requirements, particularly when it is necessary to apply cautious blasting. Tested low density explosives possess detonation properties and blasting and technical characteristics appropriate for cautious blasting conditions. They are defined as explosives used for blasting operations in mining engineering in order to achieve minimum fragmentation of crushed material, i.e. larger fragment size, reduce blasting cost and obtain minimum damage outside the blast field.

Low-density explosives usually have densities below $0,80 \text{ g/cm}^3$, and the explosives with densities below $0,20 \text{ g/cm}^3$ are called very low-density explosives.

Density of an explosive is decreased by adding materials that have substantially lower density than explosive density. Materials that are added to explosives can be divided into two groups: inert materials (perlite, vermiculite, glass microspheres, etc.) and materials with combustion properties, i.e. materials that participate in oxidation reaction (polystyrene, expanded polystyrene, polyurethane foam, coal dust, sawdust, sugar cane waste, peanut shells, cereals, etc.).

The aim of this research is to obtain a low-density explosive manufactured by existing explosives for civil uses, i.e. their components and other substances. That explosive will be used for cautious blasting in order to reduce shock effect of energy released by detonation on a borehole wall, reduce damage zone and reduce potentially damaging impact on the environment.

The research includes laboratory and field tests. Laboratory tests include determining borderline density of individual explosives for obtaining detonability. The decrease of density, velocity of detonation and shock effect was done with blends of existing explosives for civil uses with the addition of expanded polystyrene (EPS). Expanded polystyrene (EPS) was added to explosives in different volume ratios, and different densities of new explosives that achieve

detonability were obtained. Field tests determine the effect of low-density explosive on the rock mass, and the effect of detonation process on the environment. In order to determine the effect of those explosives the following methods were used: crater test, determining methods for measuring the velocity of detonation in a borehole, measuring oscillation velocities, determining granulometric composition, etc.

Performed tests determined the composition of the optimal blend of a low-density explosive on the basis of emulsion matrix with the addition of expanded polystyrene, and its detonation properties and blasting and technical characteristics.

Keywords: low density explosives, controlled blasting, expanded polystyrene, emulsion matrix

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. EKSPLOZIVI I EKSPLOZIVNI PROCESI	5
2.1. Kratka povijest eksploziva.....	6
2.2. Eksplozivni procesi.....	8
2.3. Eksplozivne tvari	14
3. OPREZNA MINIRANJA	17
3.1. Korištenje razdjelnog punjenja minske bušotine.....	17
3.2. Korištenje patrona znatno manjeg promjera u odnosu na promjer minske bušotine.	18
3.3. Smanjenje brzine detonacije eksploziva.....	19
3.4. Smanjenje gustoće eksploziva	20
3.5. Oblici energije kod miniranja	20
3.6. Uloga tlaka u udarnom djelovanju eksploziva	32
3.6.1. Tlak detonacije	34
3.6.2. Tlak plinova.....	37
3.6.3. Tlak u minskoj bušotini.....	38
3.7. Uloga gustoće eksploziva u smanjenju udarnog djelovanja.....	39
3.8. Konturno miniranje.....	40
3.8.1. Prethodno konturno miniranje.....	42
3.8.2. Glatko miniranje.....	45
3.8.3. Bušenje u liniji	46
3.8.4. Ublaženo miniranje	48
3.8.5. Miniranje sa zračnim međučepom	49
4. EKSPLOZIVI SMANJENE GUSTOĆE	51
4.1. Materijali za smanjenje gustoće	52
4.1.1. Perlit	52

4.1.2.	Vermilkulit	53
4.1.3.	Staklene mikrokuglice.....	53
4.1.4.	Plastične mikrokuglice	54
4.1.5.	Polistiren.....	55
4.1.6.	Ekspandirani Polistiren (Stiropor).....	55
4.1.7.	Poliuretanska pjena	56
4.1.8.	Ugljen u prahu	57
4.1.9.	Piljevina i drveno brašno	57
4.1.10.	Otpaci iz prerade šećerne trske	58
4.1.11.	Ljuske žitarica i kikirikija.....	59
4.1.12.	Granule celuloze	59
4.2.	Eksplozivi jako smanjene gustoće	60
4.3.	Pregled dosadašnjih istraživanja.....	61
4.4.	Ekspandirani polistiren kao sredstvo za smanjenje gustoće	85
5.	TEORIJE MINIRANJA – MEHANIZMI LOMA STIJENE DJELOVANJEM EKSPLOZIVA	88
5.1.	Zone oštećenja stjenske mase miniranjem.....	89
5.2.	Teorije miniranja – modeli loma stijene energijom eksploziva	94
5.2.1.	Teorija refleksije (reflektirani valovi naprezanja).....	95
5.2.2.	Teorija ekspanzije plinova	96
5.2.3.	Teorija međudjelovanja širenja radijalnih pukotina i reflektiranog udarnog vala	97
5.2.4.	Teorija ekspanzije plinova – lom savijanjem.....	98
5.2.5.	Teorija valova naprezanja i ekspanzije plinova	99
5.2.6.	Kombinirana teorija koja uključuje ekspanziju plinova, valove naprezanja, pukotine i refleksije.....	100
5.2.7.	Teorija jezgre ili valova naprezanja i pukotina	103
5.2.8.	Teorija dinamičkih i statičkih tlakova.....	107

5.3. Diskusija	108
6. ISPITIVANJA I ANALIZA REZULTATA	111
6.1. Materijali korišteni za izradu eksploziva smanjene gustoće	112
6.1.1. Eksplozivi Permonex V19.....	112
6.1.2. Emulzijska matrica.....	114
6.1.3. Ekspandirani polistiren (EPS).....	115
6.2. Prva skupina ispitivanja.....	117
6.2.1. Određivanje gustoće eksploziva.....	117
6.2.1.1. Gustoća amonij-nitratno praškastih eksploziva s dodatkom EPS-a.....	117
6.2.1.2. Gustoća ANFO-eksploziva s dodatkom EPS-a i emulzijske matrice	119
6.2.1.3. Gustoća emulzijskih eksploziva s dodatkom EPS-a.....	121
6.2.1.4. Gustoća emulzijske matrice s dodatkom EPS-a.....	123
6.2.2. Određivanje brzine detonacije.....	124
6.2.2.1. Brzina detonacije amonij nitratno praškastih eksploziva s dodatkom EPS-a.	125
6.2.2.2. Brzina detonacije ANFO-eksploziva s dodatkom EPS-a.....	126
6.2.2.3. Brzina detonacije emulzijskih eksploziva s dodatkom EPS-a	127
6.2.2.4. Brzina detonacije emulzijske matrice s dodatkom EPS-a.....	127
6.2.2.5. Rezultati određivanja brzine detonacije.....	128
6.2.3. Određivanje radne sposobnosti i brizantnosti eksploziva	131
6.2.3.1. Određivanje brizantnosti metodom otiska na metalnoj pločici.....	133
6.2.3.2. Mjerenja	135
6.2.3.3. Ispitivanjima s dvostrukim cijevima.....	139
6.2.3.4. Određivanje radne sposobnosti eksploziva po Trauzlu	144
6.3. Analiza prve skupine ispitivanja.....	146
6.3.1. Analiza brzine detonacije u ovisnosti od gustoće eksploziva	146
6.3.1.1. Analiza brzine detonacije u ovisnosti od gustoće amonij-nitratno praškastih eksploziva s dodatkom EPS-a	146

6.3.1.2.	Analiza brzine detonacije u ovisnosti od gustoće ANFO-eksploziva s dodatkom matrice kao veziva i EPS-a.....	147
6.3.1.3.	Analiza brzine detonacije u ovisnosti od gustoće emulzijskih eksploziva s dodatkom EPS-a.....	149
6.3.1.4.	Analiza brzine detonacije u ovisnosti od gustoće emulzijske matrice s dodatkom EPS-a.....	153
6.3.2.	Analiza brizantnosti i radne sposobnosti eksploziva smanjene gustoće	157
6.3.2.1.	Analiza brizantnosti eksploziva smanjene gustoće dobivene metodom otiska na metalnoj pločici	157
6.3.2.2.	Analiza brizantnosti eksploziva smanjene gustoće dobivene ispitivanjima s dvostrukom cijevi.....	166
6.3.2.3.	Analiza radne sposobnosti eksploziva smanjene gustoće dobivene modificiranim Trauzlom	169
6.4.	Druga skupina ispitivanja	172
6.4.1.	Geološke značajke ležišta.....	173
6.4.2.	Određivanje brzine detonacije u bušotini.....	175
6.4.3.	Modificirana metoda ljevkastih pokusa – određivanje volumena odloma.....	177
6.4.3.1.	Mjerenja volumena odloma	177
6.4.4.	Granulometrijski sastav odminiranog materijala	180
6.4.5.	Mjerenje brzina oscilacija	181
6.4.5.1.	Seizmografi	182
6.4.5.2.	Mjerenja	184
6.5.	Analiza druge skupine ispitivanja.....	188
6.5.1.	Analiza brzine detonacije u bušotini u ovisnosti od gustoće	188
6.5.2.	Analiza ljevkastih pokusa.....	190
6.5.3.	Analiza granulometrijskog sastava odminiranog materijala	191
6.5.4.	Analiza seizmičkog utjecaja miniranja	194
6.6.	Treća skupina ispitivanja	196

6.6.1.	Brzina detonacije.....	197
6.6.2.	Gustoća.....	197
6.6.3.	Mogućnosti iniciranja.....	198
6.6.4.	Temperatura paljenja.....	198
6.6.5.	Osjetljivost na udar.....	199
6.6.6.	Osjetljivost na trenje.....	199
6.6.7.	Brizantnost	200
6.7.	Analiza treće skupine ispitivanja.....	201
7.	ZAKLJUČAK	202
	LITERATURA.....	206
	Popis tablica	215
	Popis slika	218
	Popis priloga.....	223
	Prilozi	224
	Popis korištenih oznaka i odgovarajućih jedinica	268
	Popis kratica	271
	Životopis.....	273
	Popis objavljenih radova	274

1. UVOD

Miniranje, tehnološki postupak primjene energije eksploziva, u rudarstvu i građevinarstvu u Hrvatskoj uglavnom se koristi za:

- drobljenje stijene ili rudnog tijela (masovna miniranja zbog pridobivanja korisne mineralne sirovine),
- izradu podzemnog prostora ili prostora na površini (podzemne prostorije, tuneli, usjeci i zasjeci, temeljenje i sl.) i
- rušenje objekata.

Kod miniranja sa svrhom pridobivanja mineralne sirovine nastoji se dobiti što veća količina odminiranog materijala uz što manji trošak po jedinici volumena ili mase te postizanje odgovarajućeg granulometrijskog sastava odminiranog materijala. Prilikom iskopa podzemnog prostora ili prostora na površini teži se minimalnom oštećenju stjenske mase u okolini iskopa kako bi početna fizičko – mehanička svojstva stjenske mase bila očuvana u svrhu osiguranja dugotrajne ili trajne stabilnosti. Kod uklanjanja objekata nastoji se optimalno iskoristiti potencijalna energija građevine uz što manji utrošak energije po volumenu odminiranog materijala.

U sva tri pristupa važno je razumijevanje načina frakturiranja i drobljenja stijene odnosno građevnog materijala energijom eksploziva. Jednako tako važan je i utjecaj miniranja na okolinu.

Rudarski (gospodarski, civilni, privredni) eksplozivi su energetske materijali koji eksplozivnom pretvorbom mijenjaju potencijalnu kemijsku energiju u kinetičku energiju udarnih valova i energiju ekspanzije plinovitih produkata kemijske reakcije.

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

Energija koja se oslobađa prilikom detonacije eksploziva pojavljuje se u dva osnovna oblika. Kao posljedica visokog tlaka na detonacijskoj fronti javlja se udarna energija. Udarni valni impuls napreduje kroz eksplozivno punjenje i prelazi kroz stjenku bušotine u stijenu, a njegov intenzitet ovisi o svojstvima korištenog eksploziva i svojstvima stijene. Udarna energija pridonosi primarnom lomu stijene kod miniranja. Udaljavanjem udarnog vala od središta

eksplozije njegova amplituda tlaka i energija se smanjuju te udarni val prelazi u elastični val. Drugi oblik energije koji se javlja je plinska ili potisna energija. To je energija ekspanzije plinova visokog tlaka i temperature koja se stvara nakon prolaza detonacijske fronte. Plinovi stvaraju tlačnu silu na stjenkama bušotine i omogućuju daljnje drobljenje i frakturiranje stijene te pokretanje i odbacivanje miniranog materijala na granici slobodne površine etaže ili čela radilišta. Kada plinovi visokog tlaka prodru do atmosfere, njihov se tlak naglo smanjuje ekspanzijom u okolni zrak.

Djelovanje eksplozivnog naboja na stjensku masu optimalno je u slučaju potpune iskorištenosti oslobođene energije za drobljenje stijene. U tom su slučaju, neželjeni gubici manifestirani u obliku seizmičkog djelovanja, u okolini minskog polja kao i razbacivanje materijala najmanji.

Izvođenje miniranja u izgrađenim područjima na malim udaljenostima od građevinskih ili drugih objekata postavlja dodatne zahtjeve na tehnologiju miniranja te svojstva gospodarskih eksploziva. Smanjenje udjela udarnoga djelovanja detoniranoga naboja na stijenu ima svrhu smanjenja oštećenja stjenske mase u neposrednoj blizini minskog polja, izvan ciljanog područja drobljenja te smanjenje potencijalno štetnog seizmičkog utjecaja miniranja.

Primjenom klasičnih gospodarskih eksploziva i uobičajenih metoda miniranja uz podešavanje parametara minskog polja, u neposrednoj okolini objekata često se ne postiže dovoljna redukcija potencijalno štetnih utjecaja miniranja uz zadovoljavajuće drobljenje stijene odnosno učinak miniranja.

Eksplozivi smanjene gustoće imaju povoljnije minersko-tehničke karakteristike koje osiguravaju mogućnost primjene za prije spomenuta oprezna miniranja.

Njih je moguće definirati kao eksplozive koji prvenstveno imaju sljedeću 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 eksplozivi jako smanjene gustoće.

Smanjenje naprezanja i oštećenja dijela stijene koja ostaje nakon miniranja, vrlo je važno kod iskopa tunela i podzemnih prostorija, kao i prilikom iskopa za izgradnju podzemnih odlagališta radioaktivnog otpada jer se osim neposrednih troškova miniranja smanjuju i transportni troškovi manjeg volumena odminiranog materijala, troškovi ugrađenog materijala za poboljšanje nosivosti stijene te troškovi materijala potrebnog za osiguravanje nepropusnosti stijene. Osim spomenutih područja primjene, eksplozivi smanjene gustoće imaju tehnološku primjenu, npr. kod zavarivanja metala eksplozivom, oblikovanja predmeta eksplozivom, oblikovanja umjetničkih predmeta energijom eksploziva i slično.

Osnovno načelo izvedbe eksploziva smanjene gustoće temelji se na smanjenju gustoće postojećih eksploziva dodavanjem materijala koji imaju značajno manju gustoću od gustoće 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 sagorijevanja, odnosno mogućnost sudjelovanja u kemijskoj reakciji oksidacije (polistiren, ekspanzirani polistiren, poliuretanska pjena, ugljen u prahu, piljevina i drveno brašno, otpaci od proizvodnje šećera, ljuske žitarica i kikirikija, granule celuloze i sl.).

S druge strane, smanjenjem gustoće eksploziva smanjuje se specifična masa punjenja iskazana po jedinici volumena minirane stijene. Smanjenjem gustoće eksploziva smanjuje se i detonacijska brzina i tlak udarnog vala. Na taj način smanjena je i količina oslobođene energije koja djeluje na jedinični volumen stijene čime su manja i izazvana naprezanja.

Pregledom dostupne literature ustanovljeno je da ne postoje sustavna istraživanja koja definiraju minersko-tehnička obilježja eksploziva smanjene gustoće i koja određuju ovisnost djelovanja detonacije eksploziva smanjene gustoće sa strane učinkovitosti, smanjenja zone oštećenja i smanjenja potencijalno štetnih utjecaja o detonacijskim parametrima eksploziva smanjene gustoće. Nakon pregleda, sistematizacije i analize literature, definiran je cilj istraživanja iz kojeg su proizašle i hipoteze istraživanja.

Cilj istraživanja:

Cilj istraživanja usmjeren je pronalasku optimalne eksplozivne smjese na bazi gospodarskih eksploziva i dodataka u svrhu smanjenja udarnog djelovanja detonacijom

oslobođene energije eksploziva na stijenu bušotine, smanjenja zone oštećenja i smanjenje potencijalno štetnih utjecaja na okolinu.

Ciljem istraživanja definirane su i hipoteze istraživanja:

- moguće je odrediti proces djelovanja udarnog vala i ekspanzije plinovitih produkata detonacije eksploziva smanjene gustoće na stijenu,
- moguće je izraziti funkcijsku ovisnost učinkovitosti, smanjenja zone oštećenja i smanjenja potencijalno štetnih utjecaja o detonacijskim parametrima eksploziva smanjene gustoće,
- moguće je definirati pojedina svojstva eksploziva smanjene gustoće,
- moguće je razviti metodu miniranja eksplozivima smanjene gustoće s optimalnim djelovanjem oslobođene energije eksploziva,
- moguće je izraditi model djelovanja eksploziva smanjene gustoće na stijenu.

2. EKSPLOZIVI I EKSPLOZIVNI PROCESI

Eksplozivi su stabilni kemijski spojevi ili smjese koje imaju sposobnost da pod utjecajem vanjskog energetskeg impulsa detoniraju, odnosno kemijski se razlažu u vrlo kratkom vremenskom periodu oslobađajući znatnu količinu plinova i topline (Krsnik 1989).

Rudarski (gospodarski, civilni, privredni) eksplozivi su energetske materijali koji eksplozivnom pretvorbom mijenjaju potencijalnu kemijsku energiju u kinetičku energiju udarnih valova i energiju ekspanzije plinovitih produkata kemijske reakcije. Djelovanjem udarnih valova i ekspandirajućih plinova one se u obliku mehaničkog rada troše na drobljenje, pomicanje i odlamanje stjenske mase.

Prema Zakonu o eksplozivnim tvarima (NN 178/04, NN 109/07, NN 67/08, NN 144/10) eksplozivnim tvarima se smatraju:

- gospodarski eksplozivi,
- sredstva za iniciranje eksplozivnih tvari,
- pirotehnička sredstva,
- streljivo,
- baruti,
- proizvodi punjeni eksplozivnim tvarima i
- sirovine eksplozivnih svojstava koje služe za proizvodnju eksplozivnih tvari.

Isti zakon gospodarske eksplozive definira kao eksplozivne tvari koje se koriste za lomljenje, rastresanje i usitnjavanje mineralnih sirovina i drugih materijala, rušenje građevinskih i drugih objekata te oblikovanje predmeta i materijala energijom oslobođenom pri detonaciji eksplozivnih punjenja.

Pod pojmom eksploziv podrazumijeva se materijal koji pod utjecajem egzotermne kemijske reakcije prelazi u produkte raspadanja koji imaju znatno veći volumen od početnoga. Energija oslobođena kemijskom reakcijom pojavljuje se kao toplinska i kao potencijalna energija produkata raspadanja (Ester, 2005).

Količina energije za većinu komercijalnih eksploziva iznosi otprilike 4 MJ/kg. Ova energija je dovoljna za zagrijavanje 10 kg vode od 4 °C do 100 °C (Ester, 2005).

Temperatura eksplozije je reda veličina od 2000 K do 5000 K, a tlak detonacije reda veličina od 1 GPa do 20 GPa (10 kbar – 200 kbar) (Ester, 2005).

Proces je kratkotrajan; npr. patrona eksploziva duljine 10 cm i promjera 28 mm kompletno detonira za 15 μs (15×10^{-6} s), pojačnik (engl. *booster*) PD-80 kompletno detonira za 5 μs (5×10^{-6} s), dakle u ekstremno kratkom vremenu (Ester, 2005).

Općenito gledajući, privredni eksplozivi su u većini slučajeva smjese sastavljene od:

Gorivo + Oksidans + Senzibilizator = Eksploziv

- Goriva:
 - Kemijski spojevi koji su nositelji ugljika i vodika: razna mineralna ulja, organska brašna i voskovi.
- Oksidansi:
 - Nositelji su kisika. Najčešće se to nitrati: amonijev nitrat, natrijev nitrat, kalijev nitrat i sl.
- Senzibilizatori,
 - Monomolekularni eksplozivi, najčešće nitroderivati služe za poticanje i održavanje stabilne detonacije.

2.1. Kratka povijest eksploziva

Današnji tehnološki i tehnički status svijeta značajno je uobličen upotrebom eksploziva.

Od najranije pojave eksplozivnih tvari, grčke vatre i baruta, eksplozivi su prošli razvojni put koji ih danas svrstava u nezaobilazne i nezamjenjive izvore energije s različitom primjenom.

Prvi korišteni eksploziv u ljudskoj povijesti bio je crni barut. Smatra se da su ga otkrili Kinezi u razdoblju od 160.g. do 122.g. prije Krista, a prvenstveno su ga koristili za zabavu i to za vatromete.

U 7. stoljeću za obranu Bizantskog carstva od arapskih osvajača koristila se je „grčka vatra“, mješavina sumpora, smole, vapna i sirove nafte. Otkriće „grčke vatre“ pripisuje se bizantinacu Kalinikosu.

Krajem 8. stoljeća Arapi donose iz Kine recepturu i postupak za spravljanje crnog barut na područje Male Azije.

Prvi pisani podaci o nekoj eksplozivnoj tvari potječu od arapskog pisca Abd Allaha koji 1200.g. spominje salitru (kalij nitrat, KNO_3) kao osnovni sastojak crnog baruta.

Roger Bacon 1242.g. u svojoj knjizi „*De Mirabili Potestate Artis et Nature*“ objavljuje sastav crnog baruta (74% kalijevog nitrata, 11% sumpora i 15% drvenog ugljena) te opisuje njegovu razornu snagu.

Berthold Schwarts 1380.g. spravlja puščani prah iz crnog baruta te započinje njegova upotreba za punjenje vatrenog oružja.

Početak 17. stoljeća eksploziv se prvi put primjenjuje u rudarstvu. Martin Weigel je 1617.g. predložio upotrebu crnog baruta za miniranja u rudarstvu, dok 1623.g. Casper Windt tvrdi da je koristio crni barut za miniranje stjenske mase u blizini njemačkog grada Schemitza.

Njemački rudari su 1670.g. primijenili puščani prah za miniranje stijena u Cornwallu u Engleskoj.

1675.g. osnovana je prva tvornica za izradu crnog baruta u današnjem Miltonu u SAD-u.

Prvo korištenje crnog baruta za miniranje stijena prilikom proširenja ceste zabilježeno je 1696.g. u Švicarskoj.

Doktor Watson je 1745.g. primijenio električnu iskru za iniciranje crnog baruta.

Benjamin Franklin je 1750.g. napravio prvu patronu eksploziva na način da je komprimirao crni barut u cilindričnu čahuru, a za iniciranje je koristio električnu iskru.

1773.g. crni barut je prvi put primijenjen za pridobivanje bakra u rudniku u blizini Connecticuta u SAD-u.

Robert Hare je 1822.g. napravio prvi detonator s vrućom žicom.

Moses Show je 1830.g. u New Yorku patentirao uređaj za električno iniciranje crnog baruta.

William Bickford je 1831.g. u Cornwallu, Engleska, izumio sporogoreći štapin.

Robert Hare je 1832.g. napravio prvi električni detonator.

Ascanio Sobrero je 1846.g. sintetizirao nitroglicerin.

Joseph Wilbrand je 1863.g. sintetizirao trinitrotoulen, TNT.

Alfred Nobel je 1863.g. patentirao detonator s tekućim nitroglicerinom, a 1865.g. detonator koji koristi živin fulminat.

Alfred Nobel je 1866.g. izumio dinamit miješajući nitroglicerin s dijamantskom zemljom.

U San Francisku je 1870.g. otvorena prva tvornica za proizvodnju dinamita.

Alfred Nobel je 1875.g. patentirao novi eksploziv, razornu želatinu.

H. Julius Smith je 1878.g. napravio prvu napravu za električno iniciranje detonatora.

1884.g. počinje široka upotreba amonij nitrata (AN) za proizvodnju eksploziva. Prvenstveno se je dodavao dinamitu čime je povećana sigurnost rukovanja, a zadržana su dobra eksplozivna svojstva.

1902.g. je zabilježena prva upotreba detonirajućeg štapina u Europi.

1956.g. prvi put su upotrijebljeni ANFO eksplozivi i vodoplastični („slurry“) eksplozivi.

1967.g. je u Švedskoj predstavljen neelektrični sustav za iniciranje.

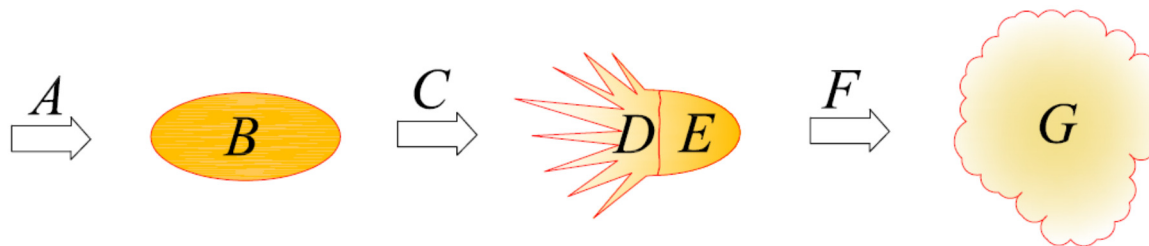
1969.g. su prvi put upotrijebljeni emulzijski eksplozivi (Gokhale 2011).

2.2. Eksplozivni procesi

Pojam eksplozija dolazi od latinske riječi *explodere* što znači raspasti se.

Definiciju pojma eksplozija ponudilo je više autora. Prema Baumu i suradnicima eksplozija se u općem smislu definira kao proces vrlo brze fizičke ili kemijske pretvorbe sustava uz prijelaz njegove potencijalne energije u mehanički rad. Prema Derminu eksplozija se definira kao proces brzog oslobađanja velike količine energije u ograničenom volumenu. Prema Johanssonu i Perssonu eksplozija se definira kao nagla ekspanzija tvari do volumena mnogo većeg od njena početnog volumena. Može se reći da je eksplozija egzotermna, vrlo brza pretvorba početne tvari ili sustava uz ekspanziju nastalih plinovitih produkata (Sućeska 2001).

Eksplozivna pretvorba obavlja se u vremenu 10^{-5} s, a shematski prikaz eksplozije dan je na slici 2-1.



Kazalo:

A – inicijalni impuls (udar, plamen, toplina, trenje),

B – neporemećena eksplozivna tvar ($T \approx 20$ °C, $\nu \approx 0,2-1,5$ kg/dm³, $p \approx 1$ bar),

C – kemijski proces pretvorbe,

D – plinoviti produkti,

E – neporemećena eksplozivna tvar,

F – ekspanzija plinovitih produkata,

G – plinoviti produkti u ekspanziji ($T \approx 2000-5000$ °K, $\nu \approx 1000$ kg/dm³, $p \approx 10^5$ bar,

$Q \approx 3,5-7,5$ kJ/g).

Slika 2-1. Eksplozija (Sućeska 2001; Dobrilović 2008).

Poštujući te definicije, eksplozije se prema karakteru procesa pretvorbe mogu podijeliti na fizikalne, nuklearne i kemijske. U prirodi na Zemlji i u svemiru dolazi do eksplozija kao što su eksplozije električnog pražnjenja munje, vulkanske i eksplozije elastičnog sabijanja zemljinih ploča kod potresa (gorski udari) i provale plina u rudnicima, zatim eksplozije pri udaru (npr. meteora), eksplozije u svemiru itd. (Sućeska 2001).

Fizikalne eksplozije u mehanizmu pretvorbe početne tvari uključuju fizikalne procese kod kojih, nakon povećanja tlaka sredine, dolazi do nagle ekspanzije uz eksplozivne pojave. Takve su eksplozije parnog kotla, ili ekspanzije jako stlačenog plina u spremniku. Nuklearne eksplozije uključuju reakcije fuzije i fisije uz oslobađanje velikih količina energije. Te se reakcije u svemiru, odnosno zvijezdama, dešavaju spontano, a na Zemlji su posljedica ljudskog djelovanja (Sućeska 2001). Prema Plešeu kemijske eksplozije su procesi koji se dešavaju u eksplozivnim tvarima i čija se energija koristi za dobivanje energije odnosno mehaničkog rada (Dobrilović 2008).

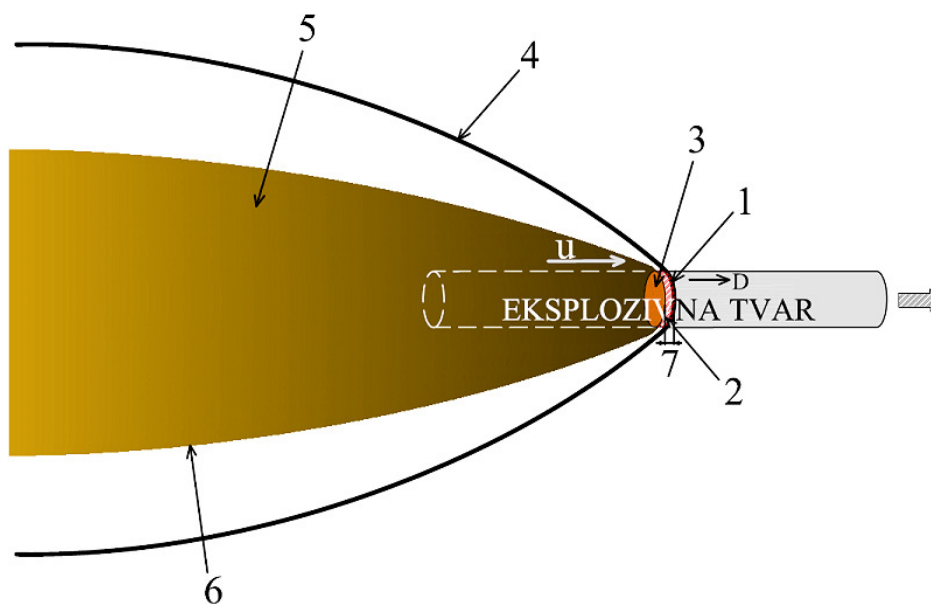
Tvari koje pod određenim uvjetima mogu eksplodirati nazivaju se eksplozivi. Eksplozija se može odvijati na dva načina: kao sagorijevanje i kao detonacija. Ovisno o željenoj namjeni i karakteristikama korištenih tvari, obje reakcije se koriste za dobivanje korisnog rada.

Iniciranje detonacije u praksi primjene eksplozivnih tvari može nastati na sljedeće načine:

- dovođenjem topline eksplozivnom materijalu,
- prelaskom sagorijevanja u detonaciju - inicijalni eksplozivi i
- djelovanjem udarnoga impulsa i toplim točkama - sekundarni eksplozivi.

Prema karakteristikama eksplozivne tvari i potrebnoj inicijalnoj energiji, pojedine eksplozivne tvari ne mogu iz sagorijevanja razviti detonaciju ni u kojim uvjetima. Za razvijanje stabilne detonacije potrebno im je dovesti energiju u obliku inicijalnog impulsa odgovarajućeg iznosa. Detonacija ima nekoliko karakteristika koji je razlikuju od sagorijevanja eksplozivne tvari i ostalih eksplozija. Detonacija je redovito nadzvučni proces u odnosu na brzinu zvuka u eksplozivnoj tvari. Širi se mehanizmom toplih točaka, defekata ili uključaka u eksplozivnoj tvari koji postaju centri za daljnje širenje reakcije. Zbog visokih tlakova reda nekoliko stotina kilobara materijal ne reagira kao cjelina, već u malim segmentima. Ispred fronte kemijskih reakcija nalazi se fronta udarnog vala, zona visokostlačenog eksplozivnog materijala pripremljenog za reakciju. Cijela reakcija obavi se u redu veličine vremena ns do μ s. Izreagirani produkti detonacije odnosno plinovi nalaze se u volumenu koji je gotovo identičan polaznom volumenu tvari, a toplina je već oslobođena pa su produkti zagrijani na visoke temperature i nalaze se pod visokim tlakom. Budući da su pod visokim tlakom, prilikom ekspanzije oslobađaju energiju i prate frontu udarnog vala koji se širi i kroz eksplozivnu tvar i kroz okolinu, zrak ili stijenu, ovisno o tome u kojem se mediju detonacija zbiva. Produkti detonacije slijede Taylorovu distribuciju gustoća i brzina a fronta im je omeđena Taylorovim valom (Sućeska 2001; Dobrilović 2008).

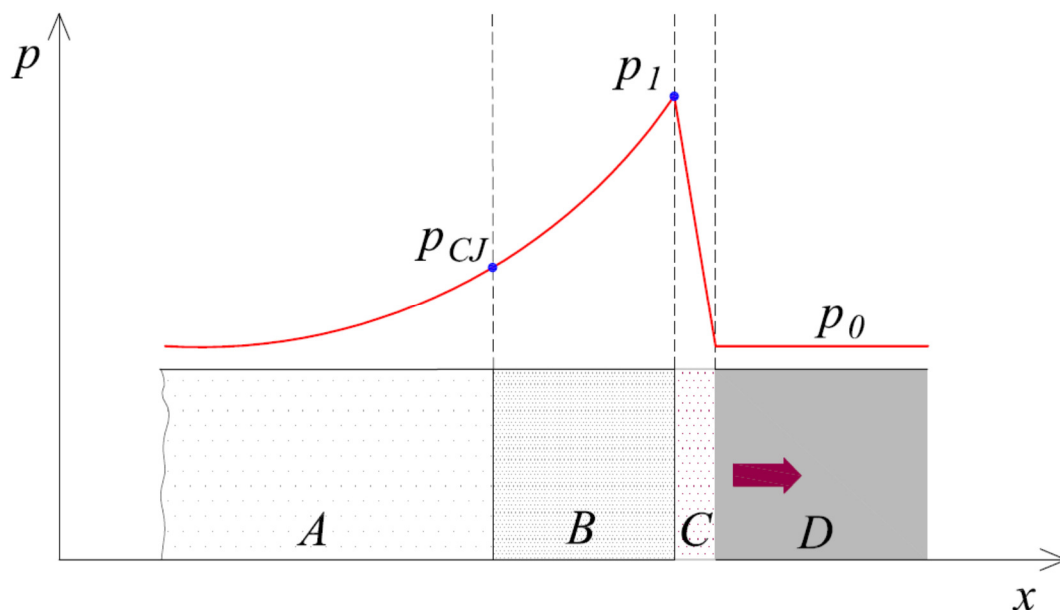
Slika 2-2 prikazuje detonacijski proces u patroni eksploziva. Slika 2-3 prikazuje raspored tlakova prilikom detonacije u eksplozivu. Na slici 2-4 prikazan je detonacijski proces u p-v dijagramu.



Kazalo:

- 1 – fronta udarnog vala,
 - 2 – zona kemijskih reakcija,
 - 3 – Chapman-Jouguetova ravnina,
 - 4 – udarni val u okolnom mediju,
 - 5 – ekspandirajući plinoviti produkti,
 - 6 – Taylorov val produkata,
 - 7 – detonacijski val
- D – brzina detonacije (m/s),
 u – brzina produkata (m/s)

Slika 2-2. Detonacijski proces u patroni eksploziva (Ester 2005; Dobrilović 2008).



Kazalo:

A – produkti detonacije,

B – zona kemijskih reakcija,

C – fronta udarnog vala

D – neporemećeni eksploziv,

p – tlak (bar, Pa),

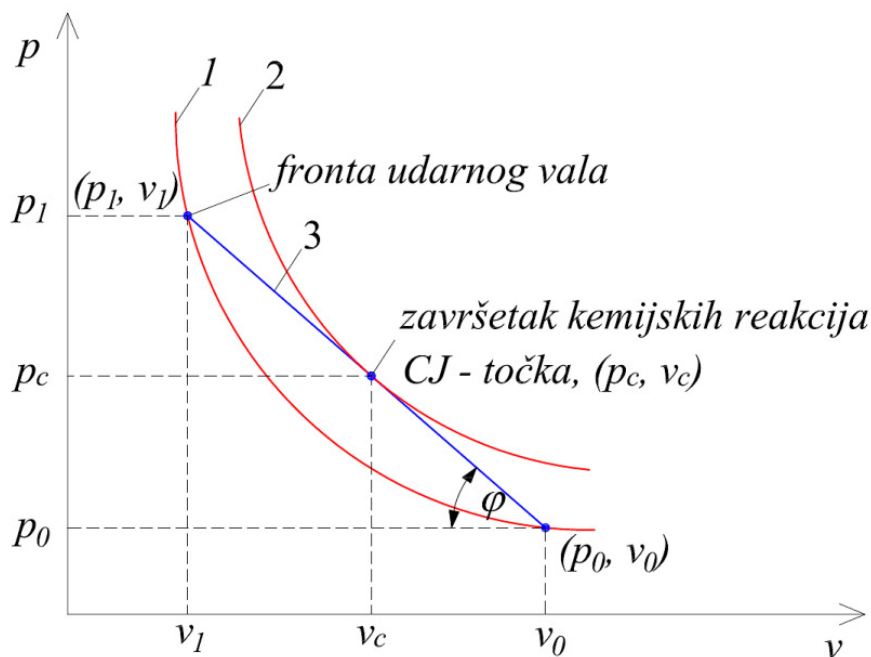
x – duljina,

p_{CJ} – tlak u CJ točki,

p_1 – vršni tlak udarne adijabate (von Neumanov vrh),

p_0 – tlak okoline (bar, Pa).

Slika 2-3. Raspored tlakova prilikom detonacije u eksplozivu (Sućeska 2001; Dobrilović 2008).



Kazalo:

φ – kut nagiba Rayleighova pravca ($^{\circ}$),

p_c – tlak u CJ točki (bar, Pa),

v_c – volumen, specifični volumen u CJ točki (m^3 , m^3/kg),

1 – udarna adijabata,

2 – adijabata produkata,

3 – Rayleighov pravac

Slika 2-4. Detonacijski proces u p-v dijagramu (Sućeska 2001; Dobrilović 2008).

Razumijevanjem detonacijskog procesa, uz poznavanje kemijskog sastava eksplozivne tvari i kemijskih reakcija koje se događaju tijekom procesa, moguće je predvidjeti ponašanje eksplozivne tvari u danim okolnostima i te procese opisati mehaničkim, termodinamičkim i kemijskim zakonima. Eksperimentalnim određivanjem pojedinih parametara detonacije i teoretskih opisa, poznavanje procesa i njihovo kvantificiranje daje informacije o svojstvima pojedinih eksplozivnih tvari i njihovim karakteristikama koje ih određuju u primjeni i dobivanju energije (Dobrilović 2008).

U svrhu razumijevanja detonacijskog procesa, tijekom 19. i 20. stoljeća razvijale su se teorije koje opisuju detonacijske procese. Takozvana *CJ* (Chapman & Jouguet) jednodimenzionalna teorija detonacijskog procesa pretpostavlja hidrodinamičku prirodu stabilne detonacije i odnose veličina tlaka, volumena i temperature prilikom odvijanja procesa koji se dešava u zoni tlačnog udarnog vala između izreagirano i neporemećenog eksploziva.

Ta teorija pretpostavlja odvijanje kemijskih reakcija u zoni udarnog vala. Prema njoj se sva energija trenutno oslobađa u toj zoni (Dobrilović 2008).

ZND teorija (Zeldovich, Von Neuman & Döring) nadopunjuje *CJ teoriju* na način da zona tlačnog vala nije zona reakcija već se ta zona nalazi iza zone tlačnog udarnog vala i te dvije zone čine detonacijski val. Prema tome, stanje tvari u toj zoni u pojedinim se vremenskim intervalima može opisati nizom paralelnih Hugoinotovih krivulja koje opisuju stanje tvari u danom trenutku. Poboljšanja modela detonacijskih procesa uključuju promatranje prostornih detonacijskih valova odnosno njihove zakrivljenosti, modele sekvencijalnog reagiranja eksplozivne tvari pod djelovanjem tlačenja i određivanja veličine politropskog (adijabatskog) eksponenta za realne tvari u području izuzetno visokih tlakova i temperatura (Dobrilović 2008).

2.3. Eksplozivne tvari

Eksplozivne tvari ili eksplozivi su kemijski spojevi ili smjese koje pod utjecajem vanjskog impulsa u obliku udara, trenja, topline, električne iskre i sl., podliježu brzom kemijskoj pretvorbi (razgradnji i/ili samooksidaciji) uz trenutno oslobađanje velike količine energije u obliku topline i vrućih plinovitih produkata. Produkti eksplozije ne moraju biti samo smjesa plinova, mogu biti smjesa plinova i krutina ili samo krutine (Krsnik, 1989; Agrawal, 2010).

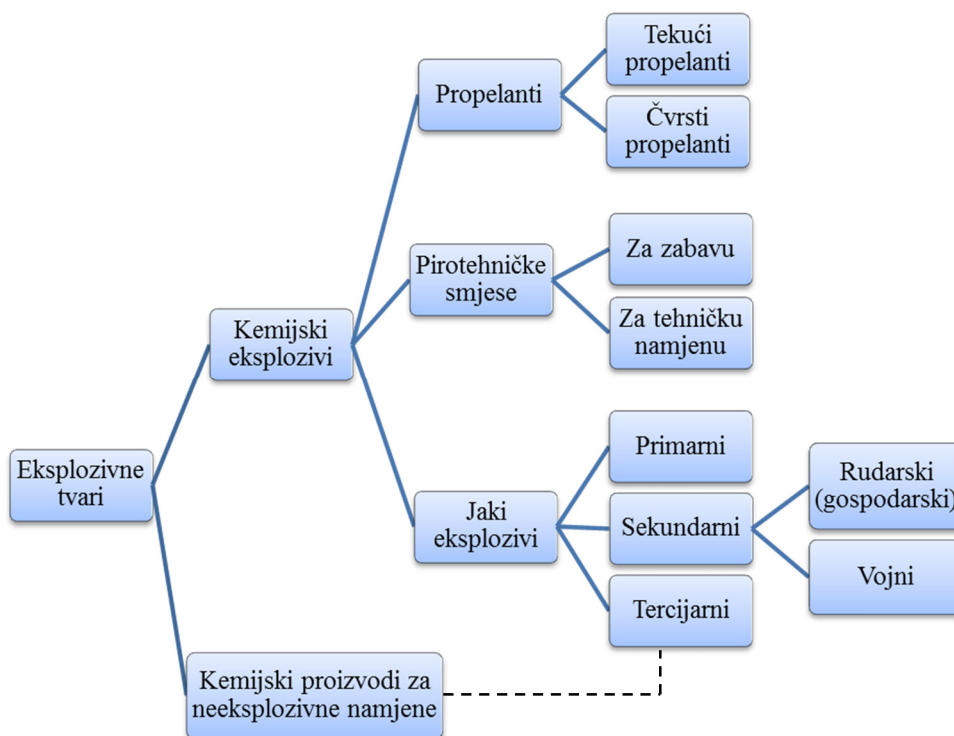
Osnovne značajke eksplozivnih tvari su sljedeće (Agrawal, 2010):

- potencijalna energija koja se temelji na kemijskoj strukturi eksplozivni tvari,
- brzo razlaganje prikladnim iniciranjem i
- stvaranje plinovitih produkata s istovremenim oslobađanjem energije.

Trenutno je poznat veliki broj eksploziva koji se razlikuju po sastavu, fizičko-kemijskim i eksplozivnim svojstvima stoga se nameće potreba za racionalnom klasifikacijom eksploziva.

S obzirom na veliki broj karakteristika prema kojima se eksplozivne tvari razlikuju postoji više različitih podjela eksplozivnih tvari predloženih od različitih autora.

Na slici 2-5. prikazana je opća podjela eksplozivnih tvari.



Slika 2-5. Opća podjela eksplozivnih tvari (Bohanek, 2013).

Pod jakim eksplozivima podrazumijevaju se sve vrste eksploziva koji u normalnoj upotrebi detoniraju. Svoju namjenu ostvaruju oslobođenom energijom detonacije i njezinom pretvorbom u mehanički ili razorni rad. Pri tome su u tu grupu uključeni svi eksplozivi takvih svojstava bez obzira na namjenu i kemijski sastav.

U grupu slabih eksploziva spadaju baruti i propelanti. To su eksplozivi kojima je pri normalnoj upotrebi prvenstveni mehanizam kemijske promjene eksplozivno sagorijevanje. Obavljanje korisnog rada se ostvaruje većinom kroz potisno djelovanje stlačenih produkata raspada.

U grupu pirotehničkih smjesa svrstavaju se svi eksplozivni materijali koji ne ulaze u gornje dvije grupe a proces njihove pretvorbe je eksplozivno sagorijevanje ili sagorijevanje s prisutnošću kisika iz okoline. Njihova primjena je različita od korištenja toplinske energije i plamena sagorijevanja, određene brzine sagorijevanja, razvijanja intenzivne svjetlosti ili dimnih plinova. Pirotehničke smjese se prema namjeni mogu podijeliti na:

- Pirotehničke smjese za tehničku namjenu,
Pirotehničke smjese za zabavu.

Primarni ili inicirajući eksplozivi, kako se još nazivaju, koriste se za iniciranje detonacije drugih eksploziva i na prvom su mjestu u lancu iniciranja.

Karakteristična svojstva inicijalnih eksploziva su:

- iznimno su osjetljivi na vanjske impulse u obliku topline, udara, trenja itd.
- maksimalna brzina detonacije se razvija u vrlo kratkom vremenu, gotovo trenutno.

Primarni eksplozivi se koriste pri proizvodnji različitih vrsta detonatora. Premda su vrlo osjetljivi na vanjski impuls kada, ih se spreša u metalno kućište postaju sigurni za rukovanje. Primarni ili inicirajući eksplozivi koji se najviše koriste u praksi su: živin fulminat, olovni azid, srebro azid, olovni stifnat, tetracen, diazodinitrofenol.

Sekundarni ili brizantni eksplozivi, u usporedbi s inicirajućim eksplozivima, trebaju veću energiju za iniciranje pa su sa stajališta rukovanja eksplozivnih tvari sigurniji za rukovanje. U praksi se uvijek iniciraju pomoću inicijalnih sredstava koje sadrže primarne eksplozive. S obzirom na područje u kojemu se sekundarni eksplozivi koriste mogu se podijeliti na:

- rudarske ili gospodarske eksplozive (engl. *Explosives for civile uses*) i
- vojne eksplozive.

S obzirom na kemijski sastav eksplozivi se mogu podijeliti na:

- monomolekularni eksplozivi i
- eksplozivne smjese

Monomolekularni eksplozivi su kemijske tvari sastavljene od jedne vrste molekula, odnosno jednog kemijskog spoja. Takvi spojevi imaju eksplozivna svojstva u čistom stanju i koriste se samostalno ili se kombiniraju s drugim spojevima zbog poboljšanja eksplozivnih svojstava.

Smjese mogu biti: mješavine ili samo eksplozivnih komponenti, ili eksplozivnih i neeksplozivnih komponenti, ili smjese neeksplozivnih komponenti koje su zajedno eksplozivne. Pritom se u smjesama nalaze i monomolekularni eksplozivi i eksplozivne smjese kao komponente cjelokupnog eksploziva.

Sekundarni rudarski (gospodarski) eksplozivi:

- monomolekularni: oktogen, heksogen, pentrit, TNT, nitroglicerina, nitroglikol,
- smjese: ANFO, emulzije, vodoplastične smjese, praškaste smjese, želatinozne smjese, pentolit (pentrit:trotil=50:50).

3. OPREZNA MINIRANJA

Pojam oprezna miniranja (engl. *controlled blasting*) odnosi se na one metode miniranja čija je osnovna svrha očuvanje stabilnosti i svojstava stjenske mase iza zadnjeg reda minskih bušotina odnosno što manje oštećenje stjenske mase izvan granica iskopa. Metode opreznih miniranja često se u literaturi nazivaju metoda miniranja u svrhu očuvanja konturne površine (engl. *wall control blasting techniques*).

Izvođenjem opreznih miniranja nastoji se smanjiti koncentracija energije oslobođene detonacijom eksplozivnog punjenja na stjenku minske bušotine, odnosno nastoji se smanjiti uloga udarnih valova kao glavnog mehanizma loma stijene eksplozivom, a povećati uloga ostalih mehanizama loma. To se može postići na nekoliko načina:

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

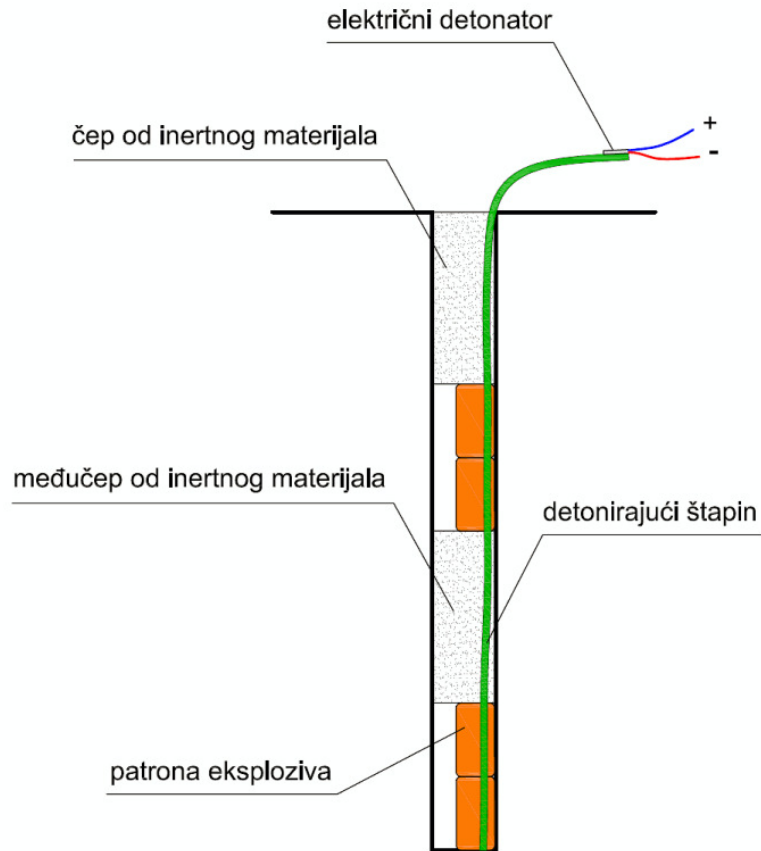
Za smanjenje oštećenja stjenske mase može se koristiti kombinacija ili samo jedan od navedenih načina kontrole oštećenja. Kod sva četiri navedena načina kontrole oštećenja do smanjenja oštećenja dolazi zbog smanjenja tlaka u minskoj bušotini. Kod prva dva načina koristi se kontrola punjenja minske bušotine, a kod druga dva načina kontrola svojstava korištenih eksploziva.

U oprezna miniranja se mogu svrstati konturna miniranja, miniranja prilikom skidanja otkrivke kod ležišta arhitektonskog kamena, miniranja kanala, miniranja u blizini građevina, miniranja u blizini arheoloških spomenika i sl.

3.1. Korištenje razdjelnog punjenja minske bušotine

Razdjeljivanje dva ili više punjenja minske bušotine međučepom od inertnog materijala ili zrakom. Punjenja su povezana i inicirana detonirajućim štapinom ili se svako pojedino punjenje inicira detonatorom. Razdjeljivanjem punjenja minske bušotine smanjuje se maksimalna masa eksplozivnog punjenja koje detonira istovremeno čime se smanjuje i seizmički utjecaj miniranja.

Razdjelno punjenje minske bušotine je prikazano na slici 3-1.

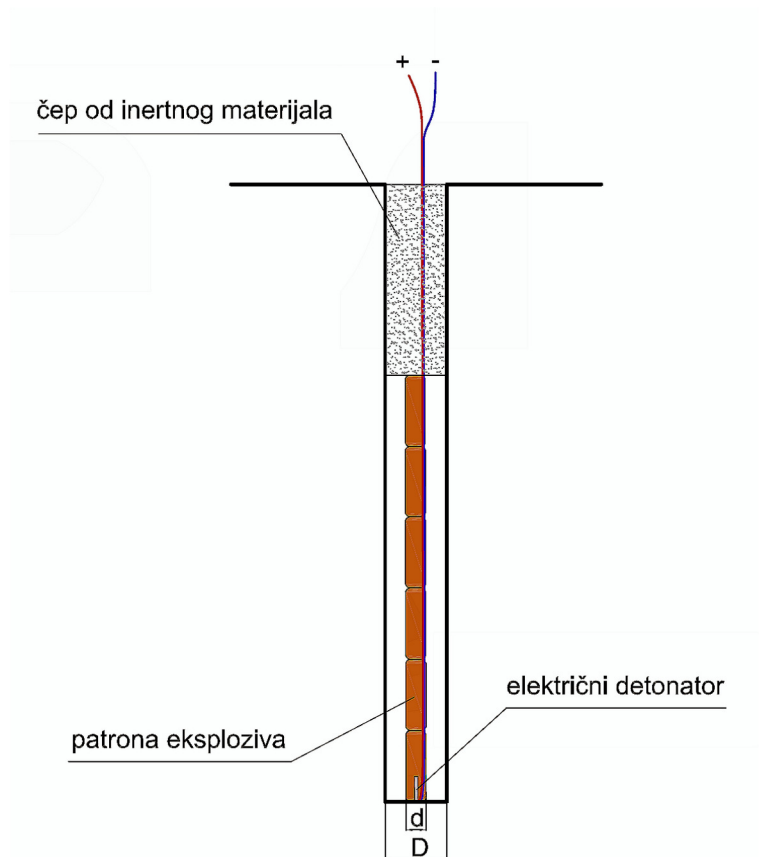


Slika 3-1. Razdjelno punjenje minske bušotine.

3.2. Korištenje patrona znatno manjeg promjera u odnosu na promjer minske bušotine

Korištenje patrona znatno manjeg promjera u odnosu na promjer minske bušotine smanjuje udarno djelovanje eksploziva jer tlačni udarni val oslobođen detonacijom eksplozivnog punjenja minske bušotine ne prelazi direktno na stijenu već se prigušuje u zraku između eksplozivnog punjenja i stijenke bušotine. Prazan prostor između patrona eksploziva i stijenke minske bušotine se ispunjava plinovitim produktima detonacije. Na taj način se smanjuje uloga udarnih valova kao glavnog mehanizma loma stijene eksplozivom, a povećava uloga plinovitih produkata.

Korištenje patrona znatno manjeg promjera u odnosu na promjer minske bušotine prikazano je na slici 3-2.



Kazalo:

D – promjer bušotine (mm) i

d – promjer patrona eksploziva (mm).

Slika 3-2. Korištenje patrona znatno manjeg promjera u odnosu na promjer minske bušotine.

3.3. Smanjenje brzine detonacije eksploziva

Brzina detonacije je brzina napredovanja detonacijskog udarnog vala od mjesta iniciranja kroz eksplozivni naboj. Red veličina brzina detonacije za gospodarske eksplozive kreće se od 2000 m/s do 8000 m/s. Na veličinu brzine detonacije utječu gustoća i promjer patrona eksploziva, te način iniciranja eksploziva. Brzina detonacijskog vala (brzina detonacije) za danu eksplozivnu tvar uobičajeno ne ovisi o vanjskim čimbenicima (tlak, temperatura, itd.).

Brzina detonacije eksploziva ovisi o:

- gustoći punjenja,
- promjeru eksplozivnog punjenja,
- snazi i brzini inicijalnog impulsa dovedenog eksplozivnoj tvari (Dobrilović 2008).

Brzinu detonacije eksploziva moguće je smanjiti:

- smanjenjem gustoće,
- upotrebom patroniranog eksplozivnog punjenja manjeg promjera ili
- upotrebom inicijalnog impulsa manje snage ili brzine.

Smanjenjem brzine detonacije smanjuje se i tlak detonacijskog udarnog vala, a s time i udarno djelovanje detoniranog eksplozivnog punjenja u minskoj bušotini.

3.4. Smanjenje gustoće eksploziva

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. Gustoća komercijalnih eksploziva se kreće u granicama od $0,80 \text{ g/cm}^3$ do $1,60 \text{ g/cm}^3$ (Krsnik 1989).

3.5. Oblici energije kod miniranja

Ukupna učinkovitost i primjena eksploziva u određenoj sredini ovisi o tome kolika se energija oslobađa prilikom detonacije eksplozivnog punjenja i koliki mehanički rad ta energija i produkti reakcije ostvaruju na okolni materijal.

Energija oslobođena detonacijom eksploziva u minskoj bušotini pojavljuje se u dva osnovna oblika. Kao posljedica visokog tlaka na detonacijskoj fronti javlja se udarna energija. Udarna energija se vrlo brzo širi kroz eksplozivno punjenje i istodobno udara o stjenku bušotine, a ovisi o gustoći eksplozivnog punjenja, brzini detonacije i svojstvima korištenog eksploziva. Ona pridonosi primarnom lomu stijene pri miniranju. Kako se udarni val udaljava od središta eksplozije njegova amplituda tlaka i energija se smanjuju te udarni val prelazi u elastični val. Drugi oblik energije koji se javlja je plinska ili potisna energija. To je energija

ekspanzije plinova visokog tlaka i temperature koja se stvara nakon prolaza detonacijske fronte. Plinovi stvaraju tlačnu silu na stjenkama bušotine i omogućuju pokretanje i razbacivanje materijala miniranog materijala.

Udarne je energija zaslužna za lom (frakturiranje) stijene, a potisna energija plinova za proširenje pukotina, drobljenje te potiskivanje i odbacivanje materijala.

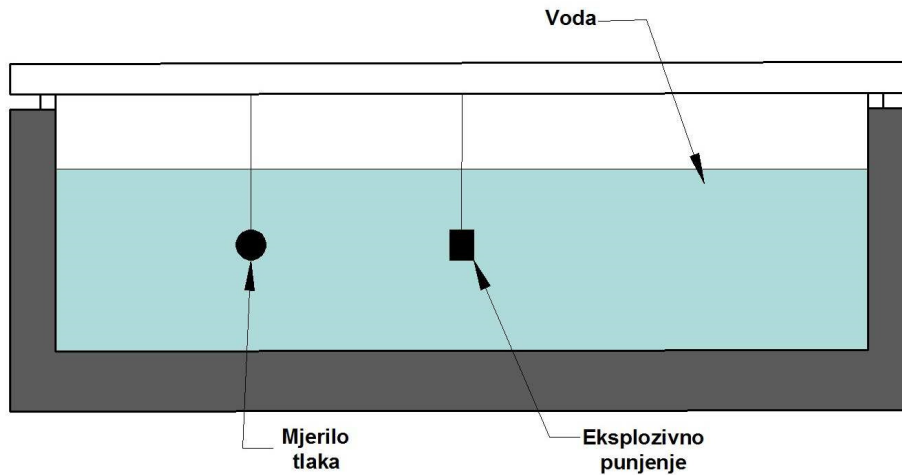
Djelovanje eksplozivnog naboja na stjensku masu optimalno je u slučaju potpune iskorištenosti oslobođene energije za drobljenje stijene. U tom slučaju, neželjeni gubici manifestirani u obliku seizmičkog djelovanja, udarnih valova u okolini minske bušotine u vodi ili zraku te razbacivanje materijala, su najmanji.

Udio pojedinih energija u procesu loma stijene moguće je odrediti na dva načina, laboratorijskim i „*in situ*“ metodama. Svaka od navedenih metoda ima svojih prednosti i nedostataka. Laboratorijske metode su jednostavnije za izvođenje i omogućuju preciznije mjerenje, ali ne mogu stvoriti identične uvjete na terenu. „*In situ*“ metode se izvode u stvarnim uvjetima na terenu, često su kompliciranije za izvođenje u odnosu na laboratorijske metode te pružaju manju preciznost prilikom mjerenja.

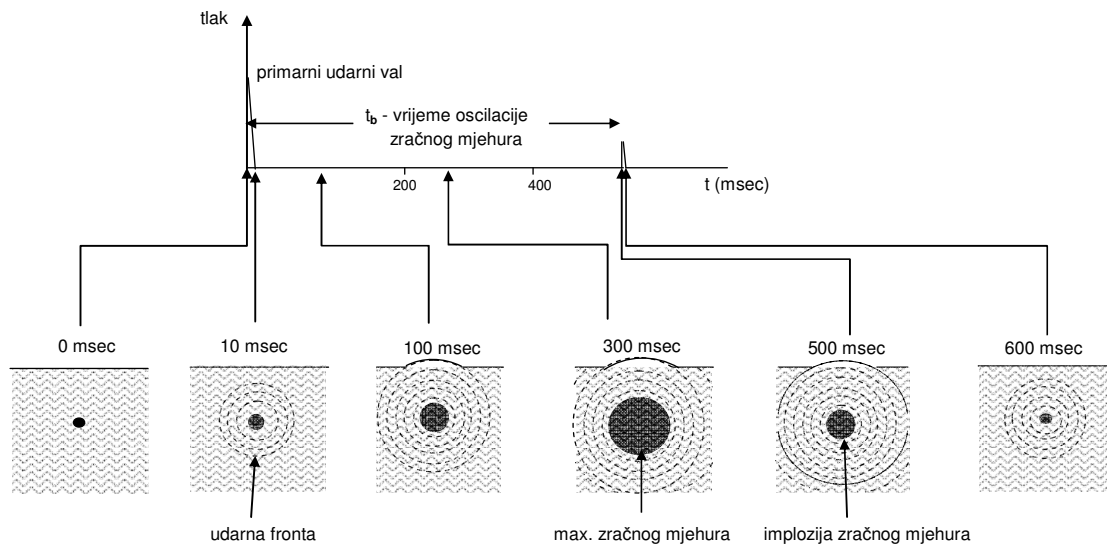
Bjarnholt (1978), Persson (1978, 1980), Satyavratana i Vedam (1980), Wollert-Johansen (1980), Barnes i suradnici (1988) i Persson i suradnici (1994) su određivali pojedinačni udio pojedinih energija za različite eksplozive detonacijskim pokusima u vodi. Ispitivanje se zasniva na principu detonacije eksplozivnog punjenja ispod vode koja daje kuglasti udarni val i određeni volumen plinova detonacije, u obliku mjehura koji ekspandira i kontrahira šireći se u vodi. Tlak udarnog vala i mjehuri plina imaju matematički definiranu zavisnost s oslobođenom energijom detonacije. Mjerenjem tlaka udarnog vala u vodi i vremenskog intervala između vršnog tlaka udarnog vala i prvog kolapsa mjehura plinova može se proračunati oslobođena energija udarnog vala i energija plinova (Persson et al. 1994, Sućeska 1995).

U spremniku s vodom detonira se određena količina eksploziva ispod površine vode na poznatoj dubini. Na istu dubinu se postavi osjetilo tlaka (piezoelektrično ili sl.) koje je, preko pojačala, spojeno s osciloskopom. Takvim sustavom izmjeri se tlak udarnog vala i vremenski interval između vršne vrijednosti tlaka i prvog kolapsa mjehura plinova (Persson et al. 1994).

Shematski prikaz detonacijskog pokusa u vodi prikazan je na slici 3-3, a vremenski histogram na slici 3-4 prikazan je.



Slika 3-3. Shematski prikaz detonacijskog pokusa u vodi (Ester 2005).



Slika 3-4. Vremenski histogram detonacijskog pokusa u vodi (Persson et al. 1994).

Nakon iniciranja eksplozivnog punjenja osjetilo za tlak prvo registrira udarni val, a nakon toga plinske produkte koji počinju ekspanzirati u okolnoj vodi. Nakon 300 ms plinski mjehur ekspanzira do svog maksimuma dolazi do početka implozije mjehura zbog hidrostatskog tlaka vode koji je veći od tlaka plinova unutar mjehura. Nakon 600 ms završava prva implozija te se njezino djelovanje registrira na osjetilu tlaka kao udarni val. Skupljanje ne završava kad se tlak vode izjednači s tlakom plinova u mjehuru, već se zbog inercije tekućine mjehur produžuje što rezultira većim tlakom u mjehuru od tlaka u vodi. Tada ponovno dolazi do ekspanzije mjehura. Te oscilacije nastavljaju se sve dok plinski mjehur ne dođe do površine i plinoviti produkti ne iziđu u atmosferu a tlak se izjednači s atmosferskim (Persson et al 1994).

Ovom metodom mjerenja tlaka i vremena mogu se razdvojiti i pojedinačno izračunati vrijednosti energije udarnog vala (e_s) i energije plinova (e_b) koristeći slijedeće jednadžbe (Persson et al 1994):

$$e_s = k_0 \int \frac{p^2}{W} dt \quad (3-1)$$

$$e_b = k_1 \frac{t_b^3}{W} \quad (3-2)$$

gdje su:

e_s – energija udarnog vala (J/kg),

e_b – energija plinova (J/kg),

k_0 – konstanta pojačala,

k_1 – konstanta pojačala,

p – tlak udarnog vala u vodi, (Pa),

t_b – vrijeme prvog kolapsa mjehura plinova detonacije, (s),

W – masa eksplozivnog punjenja, (kg).

U tablici 3-1. su navedeni podaci za vrijednosti udarne energije i energije plinova za nekoliko vrsta eksploziva (Persson et al 1994). Sanchidrián (1998) je proveo numeričko modeliranje udjela pojedinih energija u ukupnoj oslobođenoj energiji prilikom detonacije eksploziva te je rezultate usporedio s eksperimentalnim podacima (tablica 3-2). Harries i Gribble (1993) su proveli detonacijski pokus u vodi za ANFO eksploziv i eksploziv smanjene gustoće na bazi ANFO eksploziva i gume (tablica 3-3).

Tablica 3-1. Rezultati detonacijskog pokusa u vodi (Persson et al 1994).

Vrsta eksploziva	Masa punjenja (kg)	Udarna energija (MJ/kg)	Energija plinova (MJ/kg)
EDGN	0,392	1,50	2,77
ANFO	0,360	0,92	2,01
ANFO	2,300	0,92	2,08
ANFO	10,050	1,12	2,43
TNT	4,990	0,97	2,11
ANFO/A1 90/10	0,356	1,13	2,80

Tablica 3-2. Usporedba rezultati detonacijskog pokusa u vodi s proračunatim vrijednostima energija (Sanchidrián 1998).

Vrsta eksploziva	Udarne energija (MJ/kg)		Energija plinova (MJ/kg)		Ukupna energija (MJ/kg)		Udio energija - udar/plinovi (%)	
	Proračun	Mjerenje	Proračun	Mjerenje	Proračun	Mjerenje	Proračun	Mjerenje
TNT	1,88	2,08	2,04	2,06	3,92	4,14	48/52	50/50
PETN $\rho = 1,0 \text{ g/cm}^3$	2,31	2,43	3,09	3,00	5,40	5,43	43/57	45/55
HMX $\rho = 1,19 \text{ g/cm}^3$	2,21	2,66	2,32	2,33	4,53	4,99	49/51	53/47
Dynamite	1,76	1,80	1,64	1,90	3,40	3,70	52/48	49/51
ANFO	1,61	1,15	1,98	2,01	3,59	3,16	45/55	36/64
ANFO/ 10 % Al	2,19	1,59	3,43	2,93	5,62	4,52	39/61	35/65
Emulzija	1,03	0,99	0,98	1,41	2,01	2,40	41/59	43/57

Tablica 3-3. Rezultati detonacijskog pokusa u vodi za eksploziv smanjene gustoće (Harries i Gribble 1993).

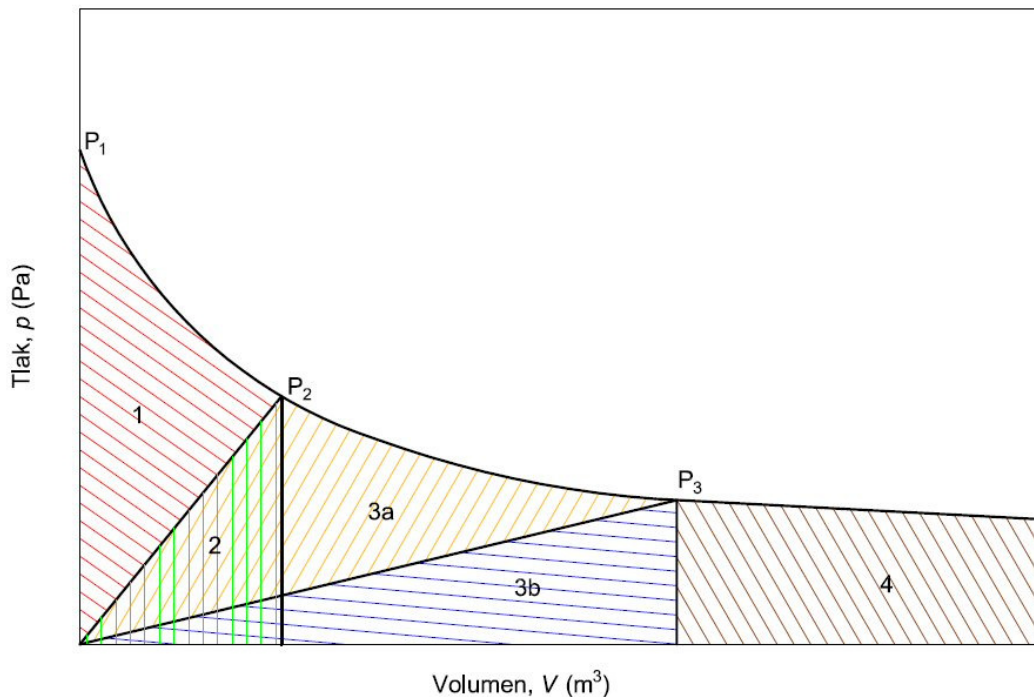
Vrsta eksploziva	Oscilacija	Udarne energija (J/g)	Teoretska maksimalna temperatura plinova (K)	Energija plinova (J/g)	
		Mjerenje		Proračun	Mjerenje
ANFO 94/6	1	700	1406	2240	2237
	2			1036	1054
	3			515	576
ANRUB	1	491	1129	-	1690
	2			848	711
	3			450	440

Prema podacima u tablicama od 3-1. do 3-3. vidljivo je da je udio plinske energije nešto veći od udarne energije. Može se reći da je zbog načina djelovanja, udarna energija zaslužna za lom stijene, a potisna energija plinova za širenje pukotina, potiskivanje i razbacivanje miniranog materijala.

Prednost ovog ispitivanja je u tome što eksplozivno punjenje može biti relativno velike mase te što se dobiju odvojeni podaci za udarnu energiju i energiju plinova, a nedostatak je taj što se pokus provodi u vodi koja nema čvrstoću stijene.

Jednu od teorija raspodjele energija pri miniranju stjenke prikazao je Lownds, (1986), a koja je prikazana u $p-v$ dijagramu ekspanzije plinova od tlaka detonacije na

atmosferski tlak na slici 3-5. Na slici 3-6 je, ovisno o tlaku i volumenu plinova kroz faze procesa miniranja prikazana raspodjela energije različitim zonama.



Kazalo:

P_1 –detonacijski tlak (Pa),

P_2 – tlak na kraju udarne faze (Pa),

P_3 – tlak pri kojemu se više ne obavlja rad u stijeni (atmosferski tlak) (Pa),

1 – zona potencijalne udarne energije,

2 – zona energije utrošene za deformaciju stjenke oko bušotine,

3a – zona djelovanja brizantne energije,

3b – zona energije utrošene za fragmentaciju i odbacivanje,

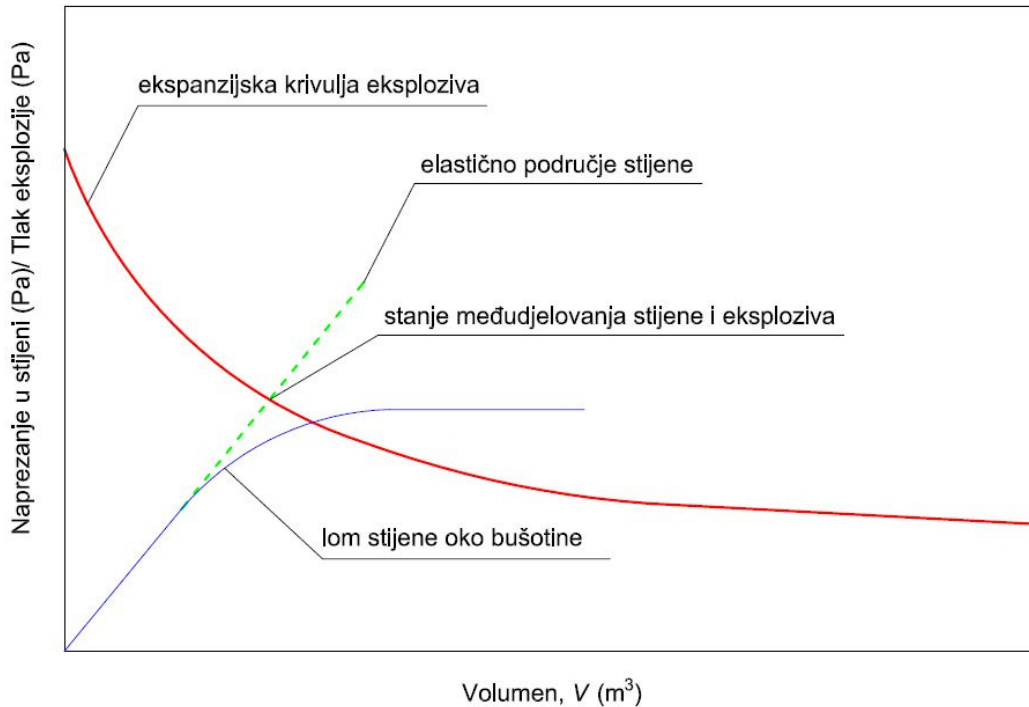
4 – zona izgubljene (neutrošene) energije.

Slika 3-5. Raspodjele energija u p - v dijagramu (Antičević, 2011).

Lownds (1986) je predložio jednostavan idealistički model tzv. model statičkog oslobađanja energije, u kojemu su zone podijeljene u uobičajeno poznate komponente – udar, odbacivanje i gubici. Kao što je prikazano na slici 3-5, tlak koji nastaje nakon detonacije značajno opada s ekspanzijom eksploziva. U ranim fazama procesa, dio energije se iskoristi na drobljenje i frakturiranje područja neposredno oko bušotine, dok se dio oslobođene energije također koristi za stvaranje i širenje sistema dominantnih radijalnih pukotina na većoj udaljenosti od same bušotine. Energija se tada, u obliku rada, troši na otvaranje već postojećih

pukotina u stjenskoj masi i na daljnje širenje pukotina koje su nastale prethodnim visokim tlakom prije pomaka ili odbacivanja, što je rezultat djelovanja kinetičke energije oslobođene detonacijom (Antičević, 2011; Ester 2005).

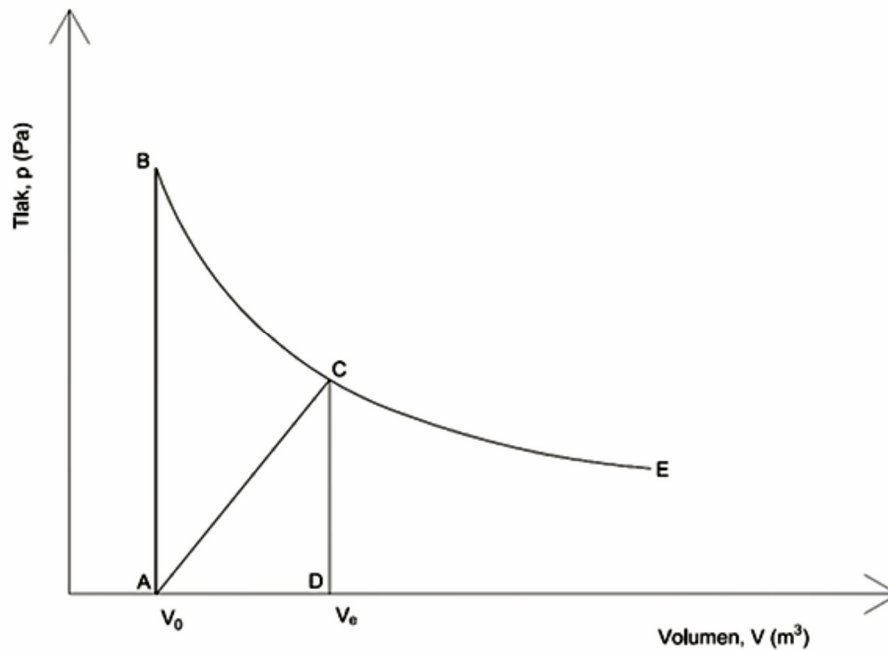
Na slici 3-6 prikazana je adijabata ekspanzije plinova detonacije te zavisnost deformacije stijene od naprezanja. Preklapanjem adijabate i dijagrama može se identificirati kritična vrijednost tlaka koji uzrokuje plastično naprezanje i lom stijene u okolini minske bušotine. S obzirom na početni tlak djelovanja produkata detonacije na stjenku i okolinu bušotine, može se zamijetiti veća vrijednost tlaka udarne faze, od potrebne za plastičnu deformaciju stijene. Padom tlaka plinova detonacije odnosno njihovom ekspanzijom dolazi do smanjenja naprezanja u stijenama i ono djeluje na deformacije i pukotine uzrokovane inicijalnom kompresijom i drobljenjem oko bušotine, te slijedi formiranje i povećanje sustava pukotina i na kraju pomicanje stjenske mase. Budući da do frakturiranja i loma stijene dolazi s vrijednostima naprezanja nižim od maksimalnih uzrokovanih tlakom plinova u bušotini dolazi do prekomjernog drobljenja stijene prije oslobađanja, pomicanja i iznašanja stijene na slobodnu površinu. Stvarno sjecište je dalje na krivulji u odnosu na slučaj kad bi postojala samo elastična reakcija stjenske mase. Kada se ta točka sjecišta dosegne, nastupa faza odbacivanja te dolazi do daljnje fragmentacije i loma pomicanjem stjenske mase. S obzirom da eksplozivi niske gustoće imaju manju brzinu detonacije, što generalno opisuje obrazac 32, ekspanzijska krivulja eksploziva ima i manji tlak detonacije odnosno početni tlak kojim produkti djeluju na stjenku bušotine.



Slika 3-6. Dijagram tlaka plinova i naprezanja u stijeni u odnosu na volumen (Antičević, 2011).

Od same ekspanzije volumena važniji je način na koji se energija eksploziva prenosi na stijenu jer to ne samo da kontrolira naprezanje i deformacije u stijeni već i količinu deformacije koja utječe na iniciranje pukotina i konačno frakturiranje. Veće deformacije općenito dovode do većeg frakturiranja i manje fragmentacije, usprkos činjenici da eksplozivi s manjom gustoćom imaju manje detonacijske tlakove.

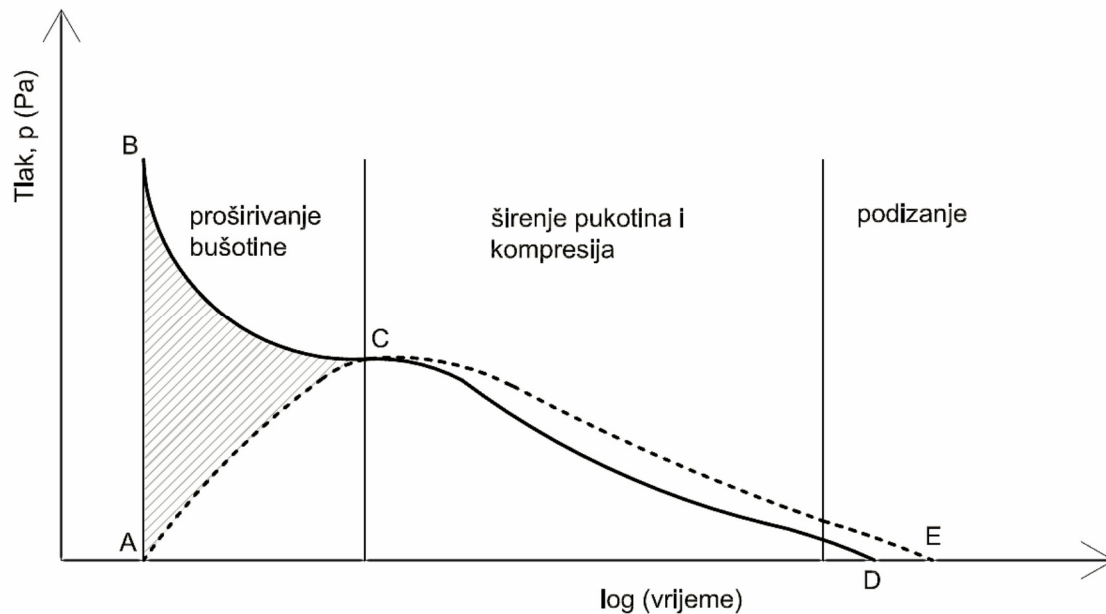
Prema Lownds-ovoj teoriji raspodjele energija pri miniranju stjenske mase Harries i Gribble (1993) su dali pojednostavljeni prikaz putanja tlaka od početka detonacije do izjednačenja s atmosferskim tlakom u $p-v$ dijagramu. Na slici 3-7 prikazane su putanje djelovanja tlaka na stjenku bušotine.



Slika 3-7. Putanje djelovanja tlaka na stjenku bušotine (Harries & Gribble 1993).

Na slici 3-7 AB predstavlja liniju djelovanja tlaka oslobođenog detonacijom eksploziva na stjenku bušotine, linija BCE izentropu širenja plinovitih produkata, V_0 početni volumen bušotine, a V_e volumne bušotine u stanju ravnoteže. Vrijeme djelovanja tlaka do postizanja maksimalne vrijednosti je toliko kratko da ne stigne doći do pokretanja stjenke bušotine. Nakon što tlak dosegne maksimalnu vrijednost dolazi do pomicanja stjenki bušotine i do povećanja volumena odnosno smanjenja tlaka čime se omogućuje širenje plinovitih produkata po izentropi od B do C, sve do uspostavljanja ravnoteže s okolinom u točki C. Ako je stjenka bušotine izložena sporijem prirastu tlaka, ravnotežno stanje u točki C je ostvareno po liniji AC. Rad plinovitih produkata je ukupna površina ispod p - V krivulje. Rad ostvaren naglim prirastom tlaka je površina lika ABCD, a rad ostvaren sporim prirastom tlaka je površina lika ACD. Površina lika ABCD je najmanje dvostruko veća od površine lika ACD što implicira da je rad ostvaren detonacijom eksploziva s brzim prirastom tlaka najmanje dvostruko veći od rada sa sporim prirastom tlaka. Taj dodatni rad ispod lika ABCD stvara udarne valove odnosno kompresijske valove sa strmom frontom vala. U idealnim uvjetima spori prirast tlaka po liniji AC eliminira stvaranje tih valova. U realnim uvjetima prirast tlak nikad ne ide po liniji AC jer bi njegov prirast bio beskonačno spor te nije moguće u potpunosti eliminirati udarne valove. Eksplozivi male udarne energije s količinom ukupne energije koja je približno ista ukupnoj energiji ANFO eksploziva za posljedicu imaju povećanje potisne energije (Harries & Gribble 1993).

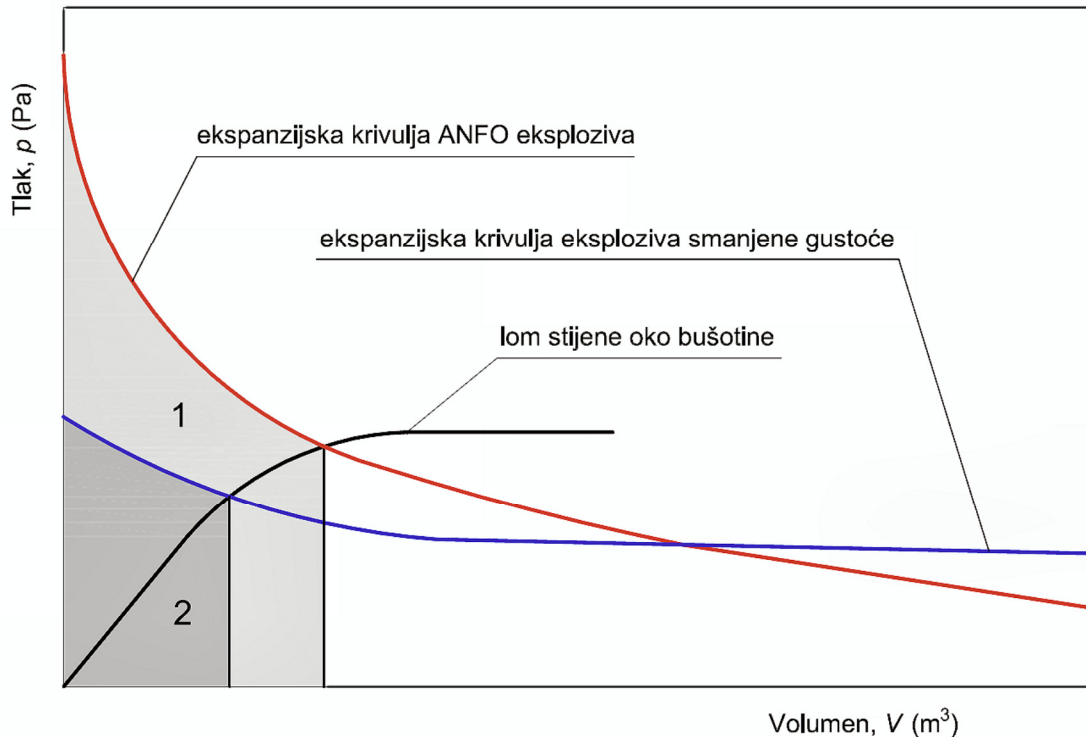
Na slici 3-8 prikazane su promjene tlaka u bušotini u jedinici vremena.



Slika 3-8. Promjene tlaka u bušotini u jedinici vremena (Harries & Gribble 1993).

Kao što je prikazano na slici 3-8, promjena tlaka u jedinici vremena umjesto po liniji ABCD, za eksplozive male udarne energije, se može odvijati po liniji ACE. Ako se promjena tlaka odvija po liniji ACE, izgubljena udarna energija (zatamnjeno područje na slici 3-8) je iskorištena za povećanje tlaka u postojećim pukotinama te za potisnu energiju eksploziva. Eksploziv koji ima veću potisnu energiju, a snagu koja odgovara snazi ANFO eksploziva bit će efikasniji od ANFO eksploziva te je potrebna manja količina takvog eksploziva za miniranje. Ako se uspori kemijska reakcija u eksplozivu, djelovanje tlaka će biti postupno sa značajnim smanjenjem udarne energije što za posljedicu ima povećanje potisne energije. Što je veća brzina detonacije, veća je i udarna energija odnosno što je niža brzina detonacije, manja je i udarna energija. Ta niža brzina detonacije i početni tlak dovode do povećanog postotka energije koja se koristi tijekom procesa odbacivanja. Eksplozivi s malom gustoćom ipak će još uvijek koristiti dio svoje dostupne energije tijekom početnog procesa ekspanzije (Harries & Gribble 1993).

Prema Lownds-ovoj teoriji raspodjele energija pri miniranju stjenske mase Rock (2004) je dao prikaz adijabate ekspanzije plinova detonacije te zavisnost deformacije stijene od naprezanja za ANFO eksploziv i za eksploziv smanjene gustoće (slika 3-9).



Slika 3-9. Dijagram tlaka plinova u odnosu na volumen za ANFO eksploziv i eksploziv smanjene gustoće (Rock 2004).

ANFO eksploziv s većim udjelom udarne energije troši tu energiju na drobljenje stijene oko bušotine (zona 1 na slici 3-9), dok eksploziv smanjene gustoće ima manji udio udarne energije u ukupnoj oslobođenoj energiji prilikom detonacije, ali ima veći udio u potisnoj energiji plinovitih produkata (zona 2 na slici 3-9).

Uobičajeno razmišljanje je da visoke brzine detonacija daju bolje rezultate miniranja u stijenama dobre kvalitete, međutim definicija dobrih stijena odnosi se isključivo na masivne stijene koje imaju minimalni broj pukotinskih sklopova kao što je granit.

Pri širenju udarnog vala u sredini oko minske bušotine njegova se amplituda i energija smanjuje sa udaljenošću od minske bušotine. Za vrlo visoke udarne tlakove, deformacija materijala u jednodimenzionalnoj udarnoj kompresiji je plastična. Ako se udar širi radijalno izvan minske bušotine, amplituda opada vrlo brzo i doseže se granica plastičnosti u jednodimenzionalnoj kompresiji. Od te točke pa nadalje deformacija je elastična. Ti elastični valovi, zvani tlačni valovi, šire se brzinom zvuka. Putuje li tlačni val u novu sredinu s drukčijom impedancijom dio energije će se reflektirati, a dio će biti prenesen u novi medij (Ester, 2005).

Akustična impedancija sredine računa se prema obrascu 3-3:

$$Z = \rho \cdot c, \quad (3-3)$$

gdje su:

Z – akustična impedancija medija, ($\text{kg/m}^2\text{s}$),

ρ – gustoća medija, (kg/m^3),

c – brzina zvuka u mediju, (m/s).

Naprezanje inducirano u beskonačnoj elastičnoj sredini računa se prema obrascu 3-4:

$$\sigma_1 = \rho_1 \cdot c_1 \cdot v_1, \quad (3-4)$$

gdje su:

σ_1 – inducirano naprezanje u beskonačnoj elastičnoj sredini, (Pa),

ρ_1 – gustoća beskonačno elastične sredine, (kg/m^3),

c_1 – brzina zvuka u beskonačno elastičnoj sredini, (m/s),

v_1 – brzina oscilacija čestica u beskonačno elastičnoj sredini, (m/s).

Dode li ravninski tlačni val do granice koja nije usporediva s frontom vala, generiraju se četiri vrste valova. Dva od njih su reflektirani valovi, smični i tlačni valovi, koji se gibaju natrag u sredinu iz koje su pristigli, a druga dva vala su također smični i tlačni, preneseni u novu sredinu (Ester 2005).

Kad udarni val upada normalno u granicu, tlačni val, biva reflektiran. Dobiva se:

$$v_1 = \frac{-\sigma_1}{\rho_1 c_1}, \quad (3-5)$$

$$v_R = \frac{-\sigma_R}{\rho_1 c_1}, \quad (3-6)$$

$$v_T = \frac{\sigma_T}{\rho_2 c_2}, \quad (3-7)$$

gdje su:

σ_R – inducirano naprezanje tlačnim valom, (Pa),

σ_T – inducirano naprezanje refleksijom tlačnog vala, (Pa),

ρ_2 – gustoća sredine u kojoj se širi reflektirani val, (kg/m^3),

c_1 – brzina zvuka u beskonačno elastičnoj sredini, (m/s),

c_2 – brzina širenja udarnog vala, (m/s),

v_R – brzina oscilacija čestica od prolaska tlačnog vala, (m/s).

v_T – brzina oscilacija čestica od refleksije tlačnog vala, (m/s).

Kad su dva materijala u kontaktu za vrijeme prolaza vala, moraju biti ispunjeni ovi uvjeti:

$$\sigma_1 + \sigma_R = \sigma_T, \quad (3-8)$$

$$v_1 + v_R = v_T, \quad (3-9)$$

Kombinacijom obrazaca dobivaju se izrazi za veličinu napreznja odbijenog i prenesenog vala:

$$\frac{\sigma_R}{\sigma_1} = \frac{(1 - \mu)}{(1 + \mu)}, \quad (3-10)$$

$$\frac{\sigma_T}{\sigma_1} = \frac{2}{(1 + \mu)}, \quad (3-11)$$

gdje je:

μ – odnos između dviju impedancija.

$$\mu = \frac{\rho_1 \cdot c_1}{\rho_2 \cdot c_2} \quad (3-12)$$

Prelazi li tlačni val u sredinu s jednakom impedancijom ($\mu = 1$), neće doći do refleksije vala:

$$\frac{\sigma_R}{\sigma_1} = 0 \quad (3-13)$$

Prelazi li tlačni val iz stijene u zrak ($\rho_1 c_1 \gg \rho_2 c_2$), tj. odnos između dviju impedancija, μ , je velik i do refleksije neće doći. Ako je ($\rho_1 c_1 > \rho_2 c_2$) $\mu > 1$, tada je odbijeni val vlačni val.

Ako je $\mu < 1$, tada je odbijeni val tlačni val (Ester 2005).

3.6. Uloga tlaka u udarnom djelovanju eksploziva

Prema Pleše (1987) tlak detonacije je jednak tlaku plinovitih produkata u trenutku kad je ostvarena kemijska i termodinamička ravnoteža. Veliki tlak detonacije je posljedica velike brzine detonacije i velike količine plinovitih produkata te takav tlak ima veliko udarno

djelovanje na okolnu sredinu. Stanje u kojemu se plinoviti produkti detonacije nalaze ne može se opisati jednadžbom stanja za idealne uvjete. Zato postoje razne modificirane i djelomično empirijske jednadžbe stanja za plinovite produkte. U takvim jednadžbama se tlak plinovitih produkata, p_{pp} , poistovjećuje s početnim tlakom udarnog vala formiranog u okolnoj sredini, p_{uv} . Taj tlak ovisi o (Pleše 1987):

- parametrima detonacijskog vala i
- svojstvima sredine na koju plinoviti produkti djeluju.

S obzirom na gustoću sredine na koju plinoviti produkti detonacije djeluju, razlikuju se dva načina djelovanja (Pleše 1987):

- djelovanje na sredinu s malom gustoćom (zrak, plinovi, ...) i
- djelovanje na sredinu s velikom gustoćom (metal, stijena, ...).

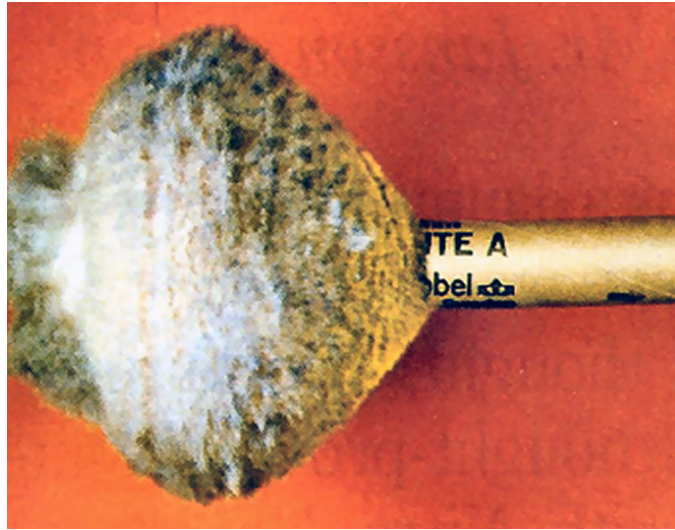
U sredini s malom gustoćom granica eksplozivnog punjenja i sredine se kreće brže od produkata detonacije i tlak naglo pada od početka detonacije. Kroz sredinu s malom gustoćom se prostire udarni val, a po produktima detonacije, prema centru detonacije, prostire se val razrjeđenja (Pleše 1987).

U sredini s velikom gustoćom, granica eksplozivnog punjenja i sredine se kreće sporo od centra detonacije, plinoviti produkti nalijeću na nju, komprimiraju je i tlak na granici raste, a po produktima detonacije se prostire reflektirani udarni val prema centru detonacije. Kada reflektirani udarni val dođe do centra detonacije, izazvati će val razrjeđenja što u konačnici rezultira padom tlaka u plinovitim produktima. Tlak u reflektiranom udarnom valu ovisi i o čvrstoći sredine od koje se je reflektirao. Za apsolutno čvrstu sredinu tlak u reflektiranom udarnom valu raste približno 2,5 puta, a za metale do 1,4 puta (Pleše 1987).

Detonacijom eksplozivnog punjenja minske bušotine dolazi do, pri visokom tlaku, gotovo trenutnog oslobođenja energije i produkata reakcije te nastaju tlačni valovi u eksplozivu i okolnom stjenjskom materijalu. Ti valovi se nazivaju detonacijski ili udarni valovi, ovisno o tome da li napreduju u eksplozivu ili materijalu sredine.

Udarni i detonacijski valovi se uglavnom tretiraju zajedno jer je detonacijski val stvarno udarni val podržan eksplozivnom reakcijom koju inicira udarni val i širi je prolaskom kroz eksploziv. U mehanički efekt detonacije eksploziva u minskoj bušotini se prenosi i djeluje na okolinu širenjem udarnog vala.

Na slici 3-10 prikazana je fotografija detonacije patrone eksploziva i ekspanzija plinovitih produkata snimljena brzom kamerom.



Slika 3-10. Patrona eksploziva pri detonaciji (Kovač, 2010).

Prilikom izvođenja miniranja sa svrhom očuvanja konturne površine jedan od najvažnijih čimbenika je udarni tlak nastao detonacijom eksplozivnog punjenja minske bušotine. Obzirom na sredstvo nastanka odnosno djelovanja mogu se razlikovati slijedeći tlakovi:

- tlak detonacije,
- tlak eksplozije i
- tlak u minskoj bušotini.

3.6.1. Tlak detonacije

Tlakom detonacije smatra se onaj tlak koji se nalazi odmah iza fronte udarnog vala i prethodi tlaku nastalom ekspanzijom plinovitih produkata detonacije. Tlak detonacije je prikazan objašnjen detonacijskim procesom u p - v dijagramu na slici 2-4.

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 pojedinim sredinama izazvanih detonacijskim valom, pokusima u vodi itd.

Prema hidrodinamičkoj teoriji detonacije, tlak detonacije može se izračunati prema obrascu:

$$P_d = P_1 + \rho v_d u \quad (3-14)$$

gdje su:

P_d – tlak detonacije (Pa),

P_1 – početni tlak neporemećenog eksploziva (Pa),

ρ – gustoća eksplozivne tvari (kg/m^3),

v_d – brzina detonacije (m/s),

u – brzina tvari iza fronte udarnog vala (m/s).

S obzirom da je iznos početnog tlaka jako zanemarivo mali u odnosu na iznose tlakova detonacije obrazac 3-14 može napisati u slijedećem obliku (Silva 2007):

$$P_d = \rho v_d u \quad (3-15)$$

Brzina tvari iza fronte udarnog vala, u , može se napisati kao:

$$u = \frac{v_d}{(1+\gamma_{CJ})} \quad (3-16)$$

gdje je:

γ_{CJ} – koeficijent adijabatske ekspanzije plinovitih produkata detonacije u CJ ravnini.

Iz toga slijedi:

$$P_d = \frac{\rho v_d^2}{(1+\gamma_{CJ})} \quad (3-17)$$

Koeficijent adijabatske ekspanzije plinovitih produkata detonacije u CJ ravnini, γ_{CJ} , je koeficijent koji pokazuje omjer molnog toplinskog kapaciteta pri stalnom tlaku i molnog toplinskog kapaciteta pri stalnom volumenu.

$$\gamma_{CJ} = \frac{c_p}{c_v} \quad (3-18)$$

gdje su:

c_p – molni toplinski kapacitet pri stalnom tlaku (J/K) i

c_v – molni toplinski kapacitet pri stalnom volumenu (J/K).

Za većinu eksploziva u čvrstom stanju, gustoće od $1,00 \text{ g/cm}^3$ do $1,80 \text{ g/cm}^3$, γ_{CJ} iznosi približno 3. Prema tome, kada se vrijednost $\gamma_{\text{CJ}} = 3$ uvrsti u obrazac 3-17. te se obrazac 3-17. može napisati kao (Persson et al, 1994):

$$P_d = \frac{\rho v_d^2}{4} \quad (3-19)$$

Pojedini autori su, većinom iskustveno, pokušali procijeniti vrijednost koeficijenta adijabatske ekspanzije plinovitih produkata detonacije u CJ ravnini u ovisnosti o gustoći neizreagiranog eksploziva.

Kalmet i Huwritz (1968) su predložili slijedeći obrazac za izračun koeficijenta adijabatske ekspanzije plinovitih produkata detonacije u CJ ravnini i to za eksplozive raspona gustoća od $0,20 \text{ g/cm}^3$ do $2,00 \text{ g/cm}^3$ (Silva 2007):

$$\gamma_{\text{CJ}} = A + \frac{B}{\rho} + C\rho \quad (3-20)$$

gdje su:

A , B i C – eksperimentalno određene konstante za pojedinu eksplozivnu tvar,

ρ – gustoća eksploziva (g/cm^3).

Kalmet i Jacobs (1968) su predložili obrazac za izračun koeficijenta adijabatske ekspanzije u CJ točki, sa slijedećim konstantama (Silva 2007):

$$\gamma_{\text{CJ}} = \frac{0,655}{\rho} + 0,702 + 1,107\rho \quad (3-21)$$

Defourneaux (1973) je predložio slijedeći obrazac (Silva 2007):

$$\gamma_{\text{CJ}} = 1,9 + 0,6\rho \quad (3-22)$$

Hobbs i Baer (1993) su predložili slijedeći obrazac (Silva 2007):

$$\gamma_{\text{CJ}} = 1,1819 - \frac{0,196}{\rho} + 0,712\rho \quad (3-23)$$

Cooper (1997) je predložio slijedeći obrazac (Silva 2007):

$$\gamma_{\text{CJ}} = \frac{1}{(1,386\rho^{-0,04})} - 1 \quad (3-24)$$

3.6.2. Tlak plinova

Tlak plinova se naziva još i tlakom eksplozije.

Tlak plinova odnosno tlak eksplozije se može definirati kao tlak do kojeg dolazi zbog ekspanzije plinovitih produkata detonacije i to kada bi plinovi zauzimali volumen eksplozivnog punjenja prije detonacije.

Pri detonaciji eksploziva razvijaju se plinovi čija količina i sastav ovise o vrsti eksploziva. Volumen plinova koji nastaje pri detonaciji 1 kg eksploziva izražava se u dm³, a mjeri se kod temperature od 0 °C i tlaka od 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.

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.

Općenito gledajući, smatra se da tlak eksplozije, P_e , ima vrijednost polovice vrijednosti tlaka detonacije gdje djeluje taj tlak na stjenku bušotine te se može prikazati slijedećim obrascem (Persson et al 1994; Silva 2007):

$$P_e = \frac{1}{2} P_d \quad (3-25)$$

Odnosno:

$$P_e = \frac{\rho v_d^2}{8} \quad (3-26)$$

Različiti autori su razvili više različitih obrazaca za procjenu tlaka eksplozije na osnovu vlastitih iskustava. Gherig (1982) je predložio slijedeći obrazac (Silva 2007):

$$P_e = 0,1125 \rho v_d^2 \quad (3-27)$$

Sanchidrian (1996) je predložio slijedeći obrazac (Silva 2007):

$$P_e = \frac{228 \rho v_d^2}{(1+0,8\rho)} \quad (3-28)$$

Outcherlony (1997) je predložio slijedeći obrazac (Outcherlony 1997):

$$P_e = n_{\gamma_{CJ}} \rho v_d^2 \quad (3-29)$$

gdje je:

$$n_{\gamma_{CJ}} = \frac{\gamma_{CJ}^{\gamma_{CJ}}}{(\gamma_{CJ}+1)^{(\gamma_{CJ}+1)}} \quad (3-30)$$

gdje je:

$$\gamma_{CJ} = \sqrt{1 + \frac{v_d^2}{2Q}} \quad (3-31)$$

gdje je:

Q – teoretska toplina oslobođena detonacijom (J).

3.6.3. Tlak u minskoj bušotini

Tlak u minskoj bušotini odnosi se na tlak plinova oslobođenih detonacijom eksplozivnog punjenja u minskoj bušotini koji prelazi na stjenku minske bušotine.

Za potpuno napunjene minske bušotine pokazalo se da je tlak koji djeluje na stjenku bušotine jednak tlaku eksplozije odnosno iznosi polovicu tlaka detonacije (Persson et al. 1994, Silva 2007):

$$P_b = \frac{\rho \cdot v_d^2}{8} \quad (3-32)$$

gdje je:

P_b – tlak koji djeluje na stjenku bušotine (Pa).

Ukoliko minske bušotine nisu potpuno napunjene odnosno ukoliko se koristi eksplozivno punjenje znatno manjeg promjera u odnosu na promjer minske bušotine tada se tlak u minskoj bušotini razlikuje od tlaka eksplozije. Za procjenu tlaka u minskoj bušotini, Outcherlony (1997) je predložio slijedeći obrazac (Outcherlony 1997):

$$P_b = P_e f^{2\gamma} \quad (3-33)$$

gdje je:

f – omjer promjera eksplozivnog punjenja i promjera minske bušotine.

Omjer promjera eksplozivnog punjenja i promjera minske bušotine, f , se računa prema (Outcherlony 1997):

$$f = \frac{\varnothing_e}{\varnothing_b} \quad (3-34)$$

gdje su:

\varnothing_e – promjer eksplozivnog punjenja (mm) i

\varnothing_b – promjer minske bušotine (mm).

Nie (1999) je predložio slijedeći obrazac (Silva 2007):

$$P_b = P_e \left(\frac{D_e}{D_b} \sqrt{\frac{L_e}{L_b}} \right)^{2\gamma} \quad (3-35)$$

gdje su:

L_e – duljina eksplozivnog punjenja (mm) i

L_b – duljina minske bušotine (mm).

Iz obrasca 3-21 je vidljivo da tlak koji djeluje na stjenku bušotine, kod potpuno napunjenih minskih bušotina, te izazvana naprezanja u stijeni prvenstveno ovise o brzini detonacije eksploziva i o njegovoj gustoći.

3.7. Uloga gustoće eksploziva u smanjenju udarnog djelovanja

Ovisnost brzine detonacije o gustoći eksploziva može se izraziti eksperimentalno dokazanom vezom prema slijedećem obrascu (Silva, 2007).

$$v_d = x + y \cdot \rho \quad (3-36)$$

gdje su:

x, y – eksperimentalno određene konstante za pojedinu eksplozivnu tvar.

Uvrstivši brzinu detonacije eksploziva, v_d , iz obrasca 3-36 u obrazac 3-32 dobije se slijedeći obrazac:

$$P_b = \frac{(y^2 \rho^3 + 2y \rho^2 + x^2 \rho)}{8} \quad (3-37)$$

S obzirom da je u obrascu 3-37 gustoća eksploziva povezana s tlakom kubnom potencijom vidljiv je veliki utjecaj gustoće na tlak koji djeluje na stjenku bušotine odnosno na udarno djelovanje detonacijom oslobođene energije eksploziva. Moguće je smanjenjem gustoće smanjiti tlak koji djeluje na stjenku minske bušotine odnosno udarno djelovanje eksploziva.

3.8. Konturno miniranje

Konturno miniranje služi za dobivanje glatkih i neraspucalih površina završnih kontura podzemnih i površinskih objekata. To se postiže stvaranjem konturne pukotine između konturnih minskih bušotina raspoređenih po projektiranoj liniji iskopa. Na slici 3-11 je prikazana završna kosina izvedena konturnim miniranjem.

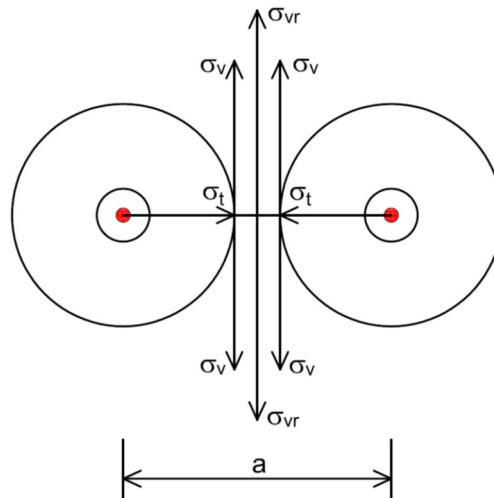


Slika 3-11. Završna kosina izvedena konturnim miniranjem (Dobrilović, 2008).

Trenutnim otpucavanjem te djelovanjem susjednih eksplozivnih naboja nastaje konturna pukotina kao rezultat djelovanja vlačnih naprezanja.

Pri srazu tlačnih udarnih valova, između bušotina, tlačna naprezanja se međusobno poništavaju zbog suprotnih pravaca djelovanja i ne dolazi do drobljenja stijene. Vlačna naprezanja djeluju u istom smjeru, u smjeru slobodne površine, međusobno se zbrajaju te su rezultatna vlačna naprezanja veća od vlačne čvrstoće stijene uslijed čega nastaje konturna pukotina (Krsnik, 1989).

Proces nastanka konturne pukotine shematski je prikazan na slici 3-12.



Kazalo:

σ_v – vlačno naprezanje u stijeni (N/m^2),

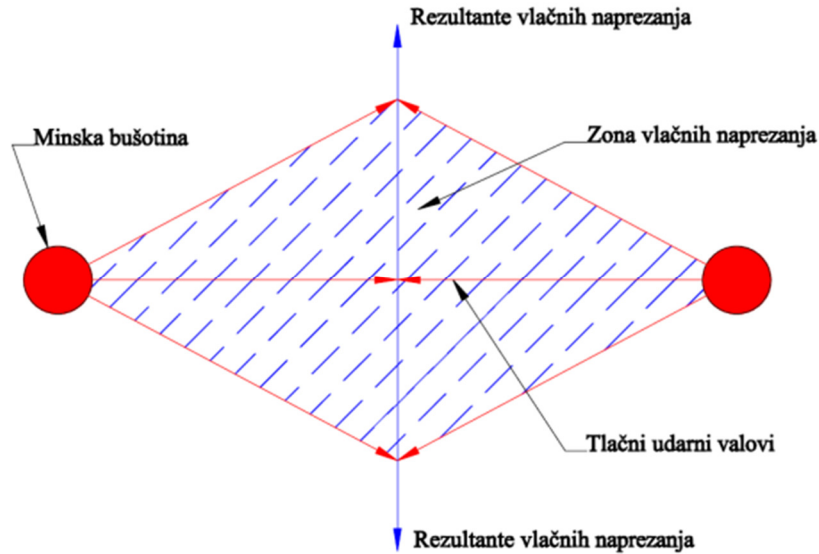
σ_t – tlačno naprezanje u stijeni (N/m^2),

σ_{vr} – rezultanta vlačnih naprezanja u stijeni (N/m^2),

a – razmak između eksplozivnih naboja (m).

Slika 3-12. Shematski prikaz stvaranja konturne pukotine (Krsnik, 1989).

Isto načelo s prikazanim poljem naprezanja prikazano je na slici 3-13.



Slika 3-13. Nastanak konturne pukotine djelovanjem vlačnih napreznja (Pisk 2011).

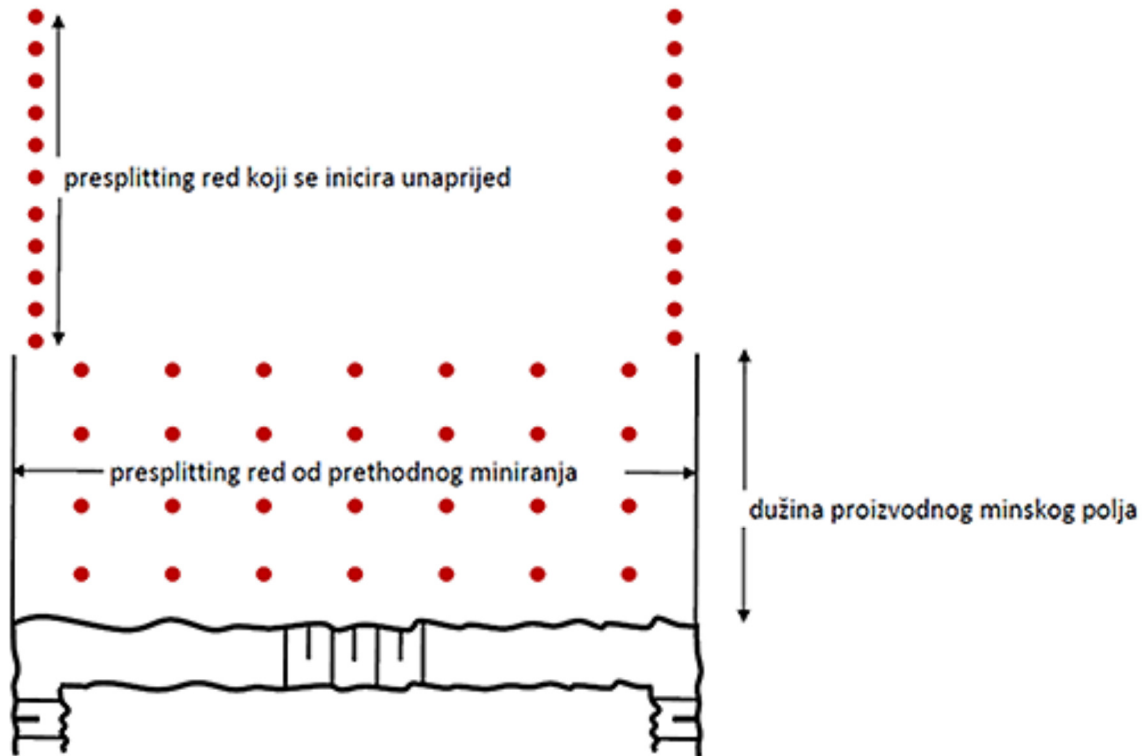
Metode konturnih miniranja mogu se podijeliti na slijedeći način:

- prethodno konturno miniranje (engl. *presplitting* ili *preshearing*),
- glatko miniranje (engl. *smooth blasting*),
- bušenje u pravcu (engl. *line drilling*),
- ublaženo miniranje (engl. *cushion, slab, slash or trim blasting*) i
- miniranje sa zračnim međučepom (engl. *air-deck blasting*).

3.8.1. Prethodno konturno miniranje

Prethodno miniranje je prva, najstarija metoda konturnog miniranja, čiji se sami princip stvaranja pukotina i lomljenja kamena koristila i prije otkrića eksploziva. Kod prethodnog konturnog miniranja, konturne bušotine nalaze se na rubovima proizvodnog minskog polja, na malom razmaku i slabije su punjene u odnosu na proizvodne minske bušotine. Bušotine su izbušene na malom razmaku i iniciraju se prije proizvodnog minskog polja. Prethodnim konturnim miniranjem nastaje konturna površina koja prigušuje seizmičke valove van kontura projektiranog iskopa. Smatra se zaštitnom mjerom očuvanja završne kosine od oštećenja do kojeg može doći uslijed proizvodnog miniranja.

Shematski prikaz izvedbe prethodnog konturnog miniranja prikazan je na slici 3-14.



Slika 3-14. Izvedba prethodnog konturnog miniranja (Pisk 2011).

Minske konturne bušotine iniciraju prije proizvodnih kako bi novonastala glatka površina prigušila seizmičke valove nastale detonacijom proizvodnih bušotina te na taj način zaštitila stijenu iza konture sprječavanjem razvijanja radijalnih pukotina nastalih otpucavanjem proizvodnih minskih bušotina. Iniciranje konturnih bušotina odvija se trenutno ili sa što manjim vremenom kašnjenja između pojedinih konturnih minskih bušotina. Eksplozivna sredstva koja se primjenjuju za ovu metodu konturnih miniranja su:

- detonirajući štapin (80 g/m' – 100 g/m'),
- plastični, emulzijski i vodoplastični eksplozivi promjera patrona Ø 22 mm – Ø 60 mm,
- specijalni eksplozivi namijenjeni posebno za konturna miniranja opremljeni detonirajućim štapinom.

Prazne minske bušotine izvode se u mekim i slabim formacijama u svrhu stvaranja pukotine, tj. pomoć pri određivanju smjera stvaranja pukotine pa se takve prazne minske bušotine nazivaju vodeće minske bušotine. Dokonturni red nije potrebno puniti potpunom linearnom koncentracijom kao i proizvodne bušotine, zbog prethodnog otpucavanja konturnih bušotina stoga je dokonturno područje oslabljeno. Metoda je primjenjiva kod potrebe za strmim kosinama jer je sačuvana stabilnost i nakon proizvodnog miniranja (Pisk 2011).

Na uspješnost izvedbe prethodnog konturnog miniranja utječe:

- preciznost bušenja,
- uspješnost prilagodbe parametara miniranja geološkoj strukturi,
- razmaku između bušotina,
- značajkama i kvaliteti punjenja bušotina,
- udaljenosti konturne bušotine do nožice iskopa,
- okomitosti izbojnice na ravninu kosine,
- odnos visine berme (ravnog dijela etaže) i širine berme (< 2),
- istovremenosti otpucavanja i
- ukupna količina utrošene energije eksploziva.

Prednosti prethodnog ili glatkog konturnog miniranja očituju se u dugotrajnoj stabilnosti pokosa i na malim troškovima održavanja, dok je nedostatak cijena same izvedbe metode.

Parametri miniranja za prethodno konturno miniranje određeni su empirijski te se proračunavaju prema niže navedenim obrascima.

Linearna koncentracija punjenja se računa prema obrascu:

$$q_{ep} = D_b^2 \cdot 8,23 \cdot 10^{-5} \text{ (kg/m}^2\text{)} \quad (3-38)$$

gdje je:

q_{ep} – linearna koncentracija eksplozivnog punjenja po površini konture (kg/m^2),

D_b – promjer bušotine (mm).

U karbonatnim stijenama koriste se linearne koncentracije eksplozivnih punjenja manjih vrijednosti uz zadovoljavajuće rezultate izvedene konturne površine ($q_{ep} = 0,18 \text{ kg/m}^2 - 0,24 \text{ kg/m}^2$).

Razmak između bušotina se računa prema obrascu:

$$a = 10 \cdot D_b \text{ (m)} \quad (3-39)$$

gdje je:

a – razmak između bušotina (m) (Konya 1991).

Prema obrascu 3-39 razmak između bušotina se dobiva računski, međutim optimalni razmak najbolje je odrediti probnim minskim poljem te prema potrebi korigirati parametre.

Gustafsson (1973) je predložio vrijednosti parametara miniranja za prethodno konturno miniranje (tablica 3-4).

Tablica 3-4. Preporučene vrijednosti parametara miniranja za prethodno konturno miniranje (Gustafsson 1973).

Promjer bušotine (mm)	Koncentracija punjenja (kg/m)	Razmak između bušotina (m)
25 – 32	0,08	0,30– 0,60
25 – 32	0,30	0,35 – 0,60
40	0,03	0,35 – 0,50
51	0,60	0,40– 0,50
64	0,46	0,60– 0,80

3.8.2. Glatko miniranje

Kod glatkog miniranja kontura na završnom pokosu nastaje otpucavanjem konturnog reda minskih bušotina nakon otpucavanja proizvodnih bušotina. Kasnije otpucavanje konturnih minskih bušotina rezultira manjom uklještenošću između konturnog i dokonturnog reda što omogućuje veće razmake između konturnih bušotina (Pisk 2011).

Glatko miniranje za razliku od prethodnog konturnog karakterizirano je veličinom izbojnice koja je prisutna nakon miniranja proizvodnog minskog polja. Najbolji rezultati postižu se istovremenim, trenutnim iniciranjem konturnih bušotina. Moguće je postići zadovoljavajući kvalitetu konturne površine uz veće razmake između bušotina u odnosu na prethodno konturno miniranje zbog manjeg uklještenja stijene između konturnog i dokonturnog reda minskih bušotina (Konya 1991).

Parametri glatkog konturnog miniranja računaju se prema niže navedenim obrascima.

Razmak između bušotina se računa prema obrascu (Konya 1991):

$$a = 16 D_b \text{ (m)} \quad (3-40)$$

Izbojnica se računa prema obrascu:

$$w > 1,3 a \text{ (m)} \quad (3-41)$$

gdje je:

w – izbojnica (m).

Razmak bušotina kod prethodnog konturnog miniranja je u pravilu 50 % – 75 % manji od razmaka kod glatkog miniranja. Ukupno veći broj bušotina i veća ukupna duljina bušenja značajno poskupljuju prethodno konturno miniranje u odnosu na glatko miniranje (Persson 1984).

Minimalna tražena koncentracija punjenja kod glatkog miniranja se računa prema obrascu (Persson 1984):

$$q_c = 90 D_b^2 \text{ (kg/m)} \quad (3-42)$$

gdje je:

q_c – koncentracija eksplozivnog punjenja (kg/m),

D_b – promjer bušotine (mm).

Gustafsson (1973) je predložio vrijednosti parametara za glatko konturno miniranje ovisno o promjeru konturnih bušotina (tablica 3-5).

Tablica 3-5. Preporučene vrijednosti parametara miniranja za glatko konturno miniranje ovisno o promjeru konturnih bušotina (Gustafsson 1973).

Promjer bušotine (mm)	Koncentracija punjenja (kg/m)	Izbojnica (m)	Razmak između bušotina (m)
25 – 32	0,08	0,30 – 0,45	0,25 – 0,35
25 – 43	0,18	0,70 – 0,80	0,50 – 0,60
43 – 48	0,18	0,80 – 0,90	0,60 – 0,70
51	0,38	1,00	0,80
64	0,52	1,00 – 1,10	0,80 – 0,90

3.8.3. Bušenje u liniji

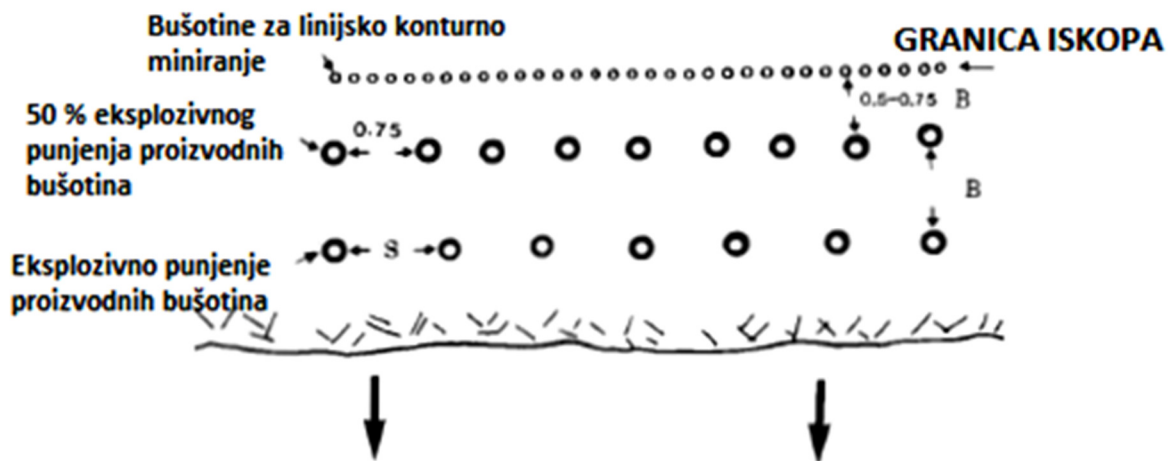
Bušenje u liniji nije prava metoda miniranja jer je ovdje riječ o jednom redu bušotina izbušenih na malim udaljenostima duž linije iskopa koje se ne pune eksplozivom. Druge spomenute metode podrazumijevaju bušotine napunjene sa relativno malom masom povoljno raspoređenog eksplozivnog punjenja (Pisk 2011).

Bušenjem u liniji stvara se ravnina oslabljenja. Udarni valovi uzrokuju naprezanja između bušotina i stijena se lomi po ravnini oslabljenja. Udarni tlačni valovi reflektiraju se od

praznih bušotina ali dio energije prolazi između bušotina kroz stijenu do nastanka konturne pukotine. Na taj način nastaje naprezanje u stjenskoj masi iza završne kosine. Zbog toga bušotine u liniji pružaju manju zaštitu završne kosine od ostalih metoda konturnog miniranja.

Bušenje u liniji često se koristi u kombinaciji s prethodnim konturnim miniranjem ili s ublaženim konturnim miniranjem, gdje imaju svrhu vodećih bušotina.

Shematski prikaz bušenja u liniji dan je na slici 3-15.



Slika 3-15. Bušenje u liniji (Bhandari 1997).

Parametri miniranja kod bušenja u liniji računaju se prema niže navedenim obrascima.

Udaljenost između bušotina se računa prema obrascu (Konya 1991):

$$a = (2 - 4) \cdot D_b \text{ (m)} \quad (3-43)$$

Promjer bušenja iznosi od $\varnothing 38$ mm do $\varnothing 76$ mm. Bušotine promjera iznad $\varnothing 76$ mm rijetko se koriste zbog visokih troškova bušenja.

Udaljenost između dokonturnih bušotina kod bušenja u liniji se računa prema obrascu (Konya 1991):

$$a_d = (0,5 - 0,75) \cdot w \quad (3-44)$$

gdje je:

a_d – razmak između dokonturnih bušotina (m).

Koncentracija punjenja dokonturnog reda se računa prema obrascu (Konya 1991):

$$q_d = 0,5 q_p \text{ (kg/m)} \quad (3-45)$$

gdje je:

q_d – linearna koncentracija punjenja dokonturnog reda (kg/m),

q_p – linearna koncentracija punjenja proizvodni bušotina (kg/m).

Metoda je primjenjiva za homogenu stjensku masu s malo diskontinuiteta te u slučaju kada i minimalne količine eksplozivnog punjenja konturnih bušotina u ostalim metodama mogu uzrokovati oštećenja okolne stijene iza zadnjeg reda minskih bušotina. Prirodne zone diskontinuiteta potiču smicanje duž linije pukotina te zbog toga tanko uslojene, sedimentne i metamorfne formacije nisu podobne za ovu metodu osim ako se bušenje izvodi okomito na položaj diskontinuiteta.

Nedostatak ove metode je visoka cijena koja je posljedica bušenja velikog broja bušotina sa malim udaljenostima između njih.

3.8.4. Ublaženo miniranje

Metoda ublaženog miniranja prvi puta je primijenjena u Kanadi. Kao i kod glatkog miniranja, jedan red bušotina buši se duž granice iskopa, puni se maseno manjim, adekvatno raspoređenim punjenjem. Konturni red bušotina inicira se nakon uklanjanja materijala proizvodnog miniranja. Za razliku od glatkog miniranja, prostor u bušotini oko eksplozivnog punjenja puni se drobljenim kamenom duž cijele bušotine. Takvo punjenje ublažuje udarno djelovanje eksploziva na površinu završne kosine, odnosno konturnu plohu i time se smanjuju naprezanja u stjenskoj masi odnosno ne dolazi do daljnjeg razvoja već postojećih pukotina i do nastanka novih pukotina u stjenskoj masi iza konturne površine.

Ova metoda se koristi rijetko jer se slični rezultati mogu postići primjenom metode miniranja sa zračnim međučepom, a ugradnja drobljenog kamena znatno povećava vrijeme pripreme miniranja. Primjenjuje se jedino u slučaju punjenja konturnih bušotina detonirajućim štapinom i patroniranim eksplozivom na određenim razmacima (Pisk 2011).

Bušotine za ublažavanje utjecaja proizvodnog punjenja iniciraju se s minimalnim usporanjima između pojedinih bušotina. Na taj način dolazi do smicanja stjenskog prostora između bušotina čime se proizvodi glatki pokos s minimalnim prekopom. Bušotine za ublažavanje mogu biti bušene prije ili nakon proizvodnih bušotina. Veličina razmaka između

bušotina i izbojnice ovisne su o promjeru bušotina i karakteristikama stjenske mase u kojoj se provodi miniranje. U pravilu, razmak između bušotina mora biti manji od izbojnice s ciljem dobivanja maksimalnog smicanja između pojedinih bušotina.

Parametri miniranja za metodu ublaženog miniranja računaju se prema niže navedenim obrascima.

Udaljenost između bušotina se računa prema obrascu:

$$a = 16 \cdot D_b \text{ (m)} \quad (3-46)$$

Izbojnica se računa prema obrascu:

$$w \geq 1,3 a \text{ (m)} \quad (3-47)$$

Prednosti ove metode su u glatkom pokosu koji nastaje zbog velikog smicanja između bušotina s minimalnim dodatnim prekopom te minimalnim oštećenjem stjenske mase iza konturne plohe.

Nedostatak ove metode je visoka cijena izvođenja ublaženog miniranja. Bušenje velikog broja minskih bušotina na malim razmacima znatno povećava cijenu izvođenja, a ponekad su potrebne i dodatne vodeće bušotine. Zapunjavanje bušotina drobljenim kamenom dodatno produžuje vrijeme izrade, a s time se povećavaju troškovi izvođenja ove metode.

3.8.5. Miniranje sa zračnim međučepom

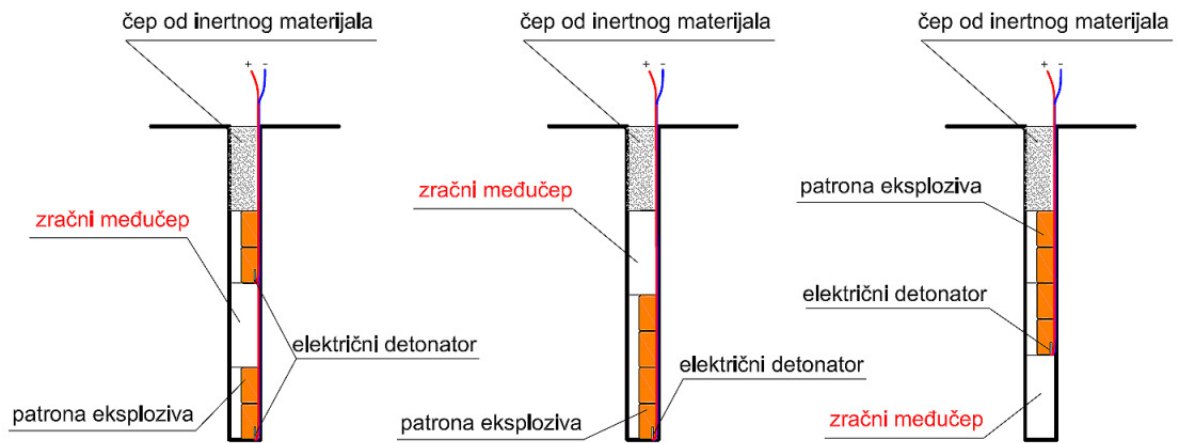
Miniranje s ostavljanjem zračnog međučepa najčešće se koristi kod:

- proizvodnog miniranja,
- konturnih miniranja s bušotinama svih promjera,
- za dobivanje blokova arhitektonsko – građevnog kamena i
- za odvajanje primarnih i sekundarnih blokova.

Kod konturnih miniranja vršni tlak detonacije se smanjuje zbog ekspanzije plinova u prazan prostor, ali je dovoljan za stvaranje konturne pukotine. Smanjuje se mogućnost drobljenja stjenske mase i stvaranja radijalnih pukotina iza konturne plohe. Time se smanjuju oštećenja. Pri proizvodnom miniranju metodom se može kontrolirati odbačaj stjenske mase i veličina nastalih čestica. Kod dobivanja i odvajanja primarnih i sekundarnih blokova

arhitektonsko – građevnog kamena važno je da se prilikom eksploatacije dodatno ne ošteti blok. Zato je metoda sa zračnim međučepom prikladnija od klasične, s kontinuiranim punjenjem.

Princip miniranja s zračnim međučepom prikazan je na slici 3-16.



Slika 3-16. Miniranje sa zračnim međučepom.

Prednosti ove metode su u smanjenom zračnom udaru i u tome da omogućuje jednostavniju identifikaciju pukotina nastalih miniranjem. Nedostatak se očituje u duljem vremenu potrebnom za punjenje bušotina.

4. EKSPLOZIVI SMANJENE GUSTOĆE

Primjenom klasičnih gospodarskih eksploziva i uobičajenih metoda miniranja uz podešavanje parametara minskog polja, u neposrednoj okolini objekata često se ne postiže se dovoljna redukcija 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 prije spomenuta 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 (engl. *Ultralow Density Explosives, ULDE*) (Baranov et al, 1996).

Smanjenje naprezanja te oštećenja dijela stijene koja ostaje nakon miniranja, vrlo je važno kod iskopa tunela i podzemnih prostorija, prilikom iskopa za izgradnju podzemnih odlagališta radioaktivnog otpada jer se osim neposrednih troškova miniranja smanjuju i transportni troškovi manjeg volumena odminiranog materijala, troškovi ugrađenog materijala za poboljšanje nosivosti stijene te materijala potrebnog za osiguravanje nepropusnosti stijene. Osim spomenutih područja primjene, eksplozivi smanjene gustoće imaju tehnološku primjenu, npr. kod zavarivanja metala eksplozivom, oblikovanja predmeta eksplozivom, oblikovanja umjetničkih predmeta energijom eksploziva i slično.

Osnovno načelo izvedbe eksploziva smanjene gustoće bazira se na smanjenju gustoće postojećih eksploziva na način da se eksplozivu doda materijal 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 sagorijevanja, 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.).

4.1. Materijali za smanjenje gustoće

4.1.1. Perlit

Perlit je eruptivni aluminijsko-silikatni mineral pjenaste građe, koji se mehanički usitnjava i kratko zagrijava na temperature iznad 870 °C. Pri tome voda sadržana u mineralu prelazi u vodenu paru i napuhuje materijal te povećava njegov volumen za 15 do 20 puta. Nastali proizvod je bijeli granulat veličine zrna i 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. Ukupni porozitet perlita je 50 % – 75 % volumena (Akbari Mousavi et al, 2005, <http://www.milosminingmuseum.gr/>).

Zrnca perlita su prikazana na slici 4-1.



Slika 4-1. Zrnca perlita (<http://www.renova.com.mk/en/perlit.html>).

4.1.2. Vermikulit

Vermikulit je geološki naziv za skupinu minerala Mg, Fe i Al silikata sa zeolitskom vodom koja je zatvorena između ljuskastih kristala. Kod naglog zagrijavanja na visokoj temperaturi voda prelazi u paru koja razbije ljuskaste kristale u oblik pahulje, odnosno ekspandiraju i u unutrašnjosti pahulje sadržavaju puno slojeva zraka. 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 $0,13 \text{ g/cm}^3$. Ukupni porozitet vermikulita je 70 % – 80 % volumena (<https://themajka.com/vermikulit-i-gdje-ga-nabaviti-t49.html>).

Zrnca vermikulita su prikazana na slici 4-2.



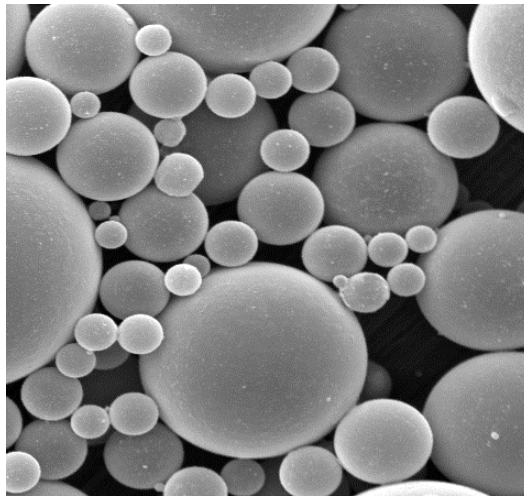
Slika 4-2. Zrnca vermikulita (<http://www.bilgisiburada.com/vermikulit-nerelerde-kullanilir>).

4.1.3. Staklene mikrokuglice

Staklene mikrokuglice se uobičajeno koriste kao senzibilizatori emulzijskih eksploziva, vodenih gelova i *heavy*-ANFO eksploziva. 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 $0,37 \text{ g/cm}^3$. (<http://www.potterseurope.org/default.asp?MIS=49>)

S obzirom na malu gustoću mikrokuglica moguće ih je koristiti kao sredstvo za smanjenje gustoće eksploziva.

Staklene mikrokuglice su prikazane na slici 4-3.



Slika 4-3. Staklene mikrokuglice (<http://www.techapps.com/>).

4.1.4. 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 μm , a gustoća u rasutom stanju 0,03 g/cm^3 (Silva 2007).

Plastične mikrokuglice su prikazane na slici 4-4.



Slika 4-4. Plastične mikrokuglice

(http://www.akzonobel.com/expancel/knowledge_center/downloads/).

4.1.5. Polistiren

Polistiren je aromatski plastomer izrađen od monomera stirena. Polistiren je proziran, amorfan i staklu sličan materijal. Gustoća polistirena je od $0,02 \text{ g/cm}^3$ do $0,003 \text{ g/cm}^3$ (Vidović 2011).

Zrnca polistirena prikazana su na slici 4-5.



Slika 4-5. Zrnca polistirena (Vidović 2011).

4.1.6. Ekspandirani Polistiren (Stiropor)

Zrnca ekspandiranog polistirena se proizvode u reaktorima tehnologijom suspenzijske polimerizacije dodavanjem vode, stirena, pentana i ostalih dodataka pri temperaturi od približno $90 \text{ }^\circ\text{C}$. Kapljice stirena suspendirane u vodenoj fazi na kraju polimerizacije prelaze u zrnca ekspandirajućeg polistirena raznih granulacija. 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 $0,03 \text{ g/m}^3$.

Zrnca idu na sušenje te se nakon toga prebacuju u velike otvorene prozračne silose u kojima se stabiliziraju 12 h do 24 h. Vakuum se u zrcima mora izjednačiti s atmosferskim tlakom, a kondenzirana voda i zaostali pentan difundiraju iz zrnaca (Vidović 2011).

Zrnca ekspandiranog polistirena prikazana su na slici 4-6.



Slika 4-6. Zrnca ekspaniranog polistirena (Vidović 2011).

4.1.7. Poliuretanska pjena

Poliuretanska pjena je materijal koji se prvenstveno koristi za termoizolaciju. Dobiva se ekspaniranjem 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 (1,3 % u 28 dana). Gustoća poliuretanske pjene je od $0,019 \text{ g/cm}^3$ do $0,040 \text{ g/cm}^3$ (<http://www.oriolik.hr/index.php?cid=3&page=catalog>).

Poliuretanska pjena je prikazana na slici 4-7.



Slika 4-7. Poliuretanska pjena (<http://www.oriolik.hr/index.php?cid=3&page=catalog>).

4.1.8. Ugljen u prahu

Nastaje prilikom manipulacije ugljenom, prvenstveno rudarenjem. Veličine čestica ugljenog praha iznose od 0,1 μm do 1 mm, iako prevladavaju veličine od 20 μm do 50 μm . Gustoća ugljenog praha je od 0,27 g/cm^3 do 0,50 g/cm^3 , ovisno o veličini čestica i vrsti ugljena (http://hr.swewe.com/word_show.htm/?80015_1&Ugljen).

Ugljen u prahu je prikazan na slici 4-8.



Slika 4-8. Ugljen u prahu (http://hr.wikipedia.org/wiki/Datoteka:Activated_Carbon.jpg).

4.1.9. Piljevina i drveno brašno

Nastaje prilikom obrade raznih drvenih materijala. Gustoća piljevine koja se koristi za smanjenje gustoće eksploziva iznosi od 0,10 g/cm^3 do 0,35 g/cm^3 (Rock et al, 2005).

Drveno brašno je prikazano na slici 4-9.



Slika 4-9. Drveno brašno (<http://cqwmf.en.ecplaza.net/trade-leads/fir-wood-powder--239164-6807599.html>).

4.1.10. Otpaci iz prerade šećerne trske

Otpaci iz prerade šećerne trske (engl. *Bagasse*) nastaju prilikom proizvodnje šećera. Preradom 10 t šećerne trske dobije se približno 3 t otpadaka. Gustoća otpadaka iznosi od 0,12 g/cm³ do 0,18 g/cm³ (<http://www.sugartech.co.za/>).

Otpaci iz prerade šećerne trske su prikazani na slici 4-10.



Slika 4-10. Otpaci iz prerade šećerne trske (<http://www.afp.com.vn/vi/san-pham/38/than-trang.html>).

4.1.11. 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 – $\rho = 0,40 \text{ g/cm}^3$ i
- ljuske pšenice – $\rho = 0,50 \text{ g/cm}^3$ (http://www.simetric.co.uk/si_materials.htm).

4.1.12. Granule celuloze

Granule celuloze su čvrsti produkti nastali recikliranjem celuloze. Lagane su i imaju veliku sposobnost upijanja, čak 500 % više od glinenih materijala. Nasipna gustoća granula celuloze se nalazi u rasponu od $0,16 \text{ g/cm}^3$ do $0,29 \text{ g/cm}^3$ (Silva 2007).

Granule celuloze su prikazane na slici 4-11.



Slika 4-11. Granule celuloze (<http://www.ecosorb.com/>).

4.2. Eksplozivi jako smanjene gustoće

Eksplozivi jako smanjene gustoće (engl. *Ultralow Density Explosives, ULDE*) su oni eksplozivi kojima je gustoća smanjena na vrijednosti jednake ili manje od $0,20 \text{ g/cm}^3$. Osnovno načelo izvedbe eksploziva jako smanjene gustoće bazira se na smanjenju gustoće postojećih eksploziva na način da se eksplozivu doda prvenstveno EPS, gustoće manje od $0,08 \text{ g/cm}^3$ ili neka druga tvar jako male gustoće.

Takvi eksplozivi imaju slijedeća obilježja:

- mala gustoća u rasutom stanju ($0,02 \text{ g/cm}^3 - 0,20 \text{ g/cm}^3$),
- mali udio eksploziva/eksplozivnih tvari u smjesi (2 % – 10 % volumno),
- mala brzina eksplozije (700 m/s – 1500 m/s),
- niska temperatura produkata detonacije ($1500 \text{ °C} - 2000 \text{ °C}$),
- tlak detonacije, eksplozije koji djeluje na stjenku bušotine je niži od tlačne čvrstoće materijala koji se minira (10 MPa – 90 MPa) i
- pulsirajuća detonacija (Baranov et al, 1996).

Smjesa ANFO-eksploziva, komercijalnog imena Ammonite 6ZhV, i EPS-a uspješno je primijenjena u miniranjima za eksploataciju primarnih blokova ($\rho = 0,05 \text{ g/cm}^3 - 0,10 \text{ g/cm}^3$) u kamenolomu arhitektonsko-građevnog kamena, za odvajanje pojedinih blokova ($\rho = 0,05 \text{ g/cm}^3 - 0,06 \text{ g/cm}^3$) i za odvajanje komercijalnih blokova ($\rho = 0,02 \text{ g/cm}^3 - 0,03 \text{ g/cm}^3$) (Baranov et al, 1996). Bušotine su punjene ručno jer je kod mehaničkog punjenja dolazilo do elektrostatičkog nabijanja zrnaca EPS-a te njihova izdvajanja iz smjese. Problem su riješili na način da su, za potrebe daljnjih miniranja, zrcima EPS-a dodali sol.

Upotreba eksploziva jako smanjene gustoće poboljšava tehničko-ekonomske čimbenike miniranja i to na način da:

- zamjenjuje upotrebu skupih jakih eksploziva,
- povećava prinos sirovine,
- upotrebljava produktivniju metodu loma materijala eksplozivom i
- upotrebljava bušotine malog promjera kod konturnih miniranja i za lom primarnog bloka (Baranov et al, 1996).

4.3. Pregled dosadašnjih istraživanja

Izvođenje miniranja u izgrađenim područjima na malim udaljenostima od građevinskih ili drugih objekata postavlja dodatne zahtjeve na tehnologiju miniranja te svojstva gospodarskih eksploziva. Smanjenje udjela udarnoga djelovanja detoniranoga naboja na stijenu ima svrhu smanjenja oštećenja stjenske mase u neposrednoj blizini minskog polja, van ciljanog područja drobljenja te smanjenje potencijalno štetnog seizmičkog utjecaja miniranja (Dobrilović et al 2013).

Primjena opreznih miniranja dovela je do razvoja prvih eksploziva smanjene gustoće iz postojećih gospodarskih eksploziva.

Prva istraživanja na razvoju eksploziva smanjene gustoće počela su 60-ih godina prošlog stoljeća. Temeljena su na smanjenju gustoće ANFO-eksploziva, koji je smatran idealnim za smanjenje gustoće jer ima najmanju gustoću od postojećih civilnih eksploziva, dodavanjem raznih materijala manje gustoće. Istraživanja su bila usmjerena na razvoj eksploziva koji bi se mogao jednostavno pripremiti na mjestu upotrebe i koji bi bio komercijalno isplativ (Baranov et al, 1996, Rock et al, 2005).

Na površinskom kopu A/S Sydvaranger (danas Sydvaranger Gruve AS) u Norveškoj je početkom 60-ih godina prošlog stoljeća prvi put zabilježena upotreba eksploziva smanjene gustoće. Upotrijebljena je mješavina ANFO-eksploziva i piljevine u volumnom omjeru 50:50 za izvođenje miniranja s bušotinama promjera \varnothing 150 mm – \varnothing 210 mm i dubine 28 m (Nielsen i Heltzen, 1987).

Du Pont (1969) spominje upotrebu eksploziva smanjene gustoće Nilite ND (ND – engl. *No Deck*) s rasponom gustoća od $0,45 \text{ g/cm}^3$ do $0,55 \text{ g/cm}^3$. Navodi da je miniranje s takvim eksplozivom uspješno primijenjeno u vertikalnim bušotinama te da miniranje s Nilite ND može uspješno zamijeniti miniranja s međučepom (Rock et al, 2005, Singh et al, 2013).

Austing i Tulis (1970) su ispitivali mogućnost detoniranja eksploziva smanjene gustoće, gustoća jednakih ili manjih od $0,25 \text{ g/cm}^3$, na bazi PETN-a, nitroceluloze i nitroglicerina. Zaključili su da takve smjese postižu stabilnu brzinu detonacije (Anderson et al, 1989, Katsabanis et al, 1992).

Baranov i suradnici (1976) su prvi u tadašnjem Sovjetskom Savezu koristili ekspanzirani polistiren (EPS) za razvoj eksploziva smanjene gustoće. EPS su miješali s gospodarskim eksplozivima u različitim omjerima i to u bušotinama. Cilj im je bio što bolja kontrola oslobođene energije detoniranog eksplozivnog punjenja minske bušotine u svrhu očuvanja stabilnosti konturne površine (Baranov et al 1996).

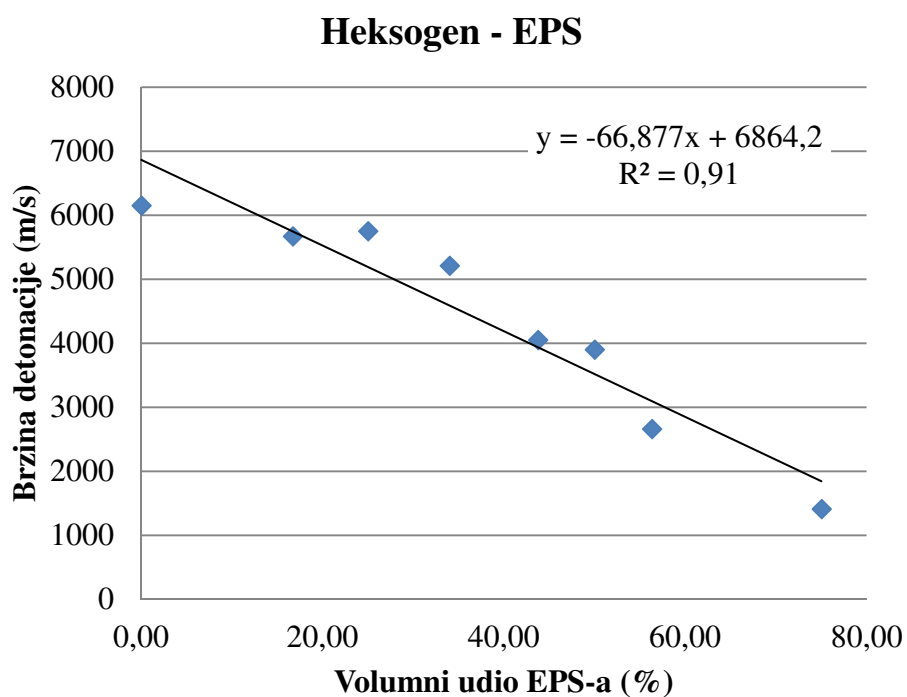
Početakom 70-ih godina prošlog stoljeća počela su u Norveškoj istraživanja eksploziva smanjene gustoće na bazi ANFO-eksploziva i EPS-a. Ta istraživanja su dovela do prvog komercijalnog eksploziva smanjene gustoće. Korporacija IRECO (danas Dyno Nobel) je u Australiji 1975. godine stavila na tržište *Isanol* (Heltzen i Kure, 1979, Nielsen i Heltzen, 1987, Rock et al, 2004).

Kuznetov i Matveenkov (1977) su provodili istraživanja eksploziva smanjene gustoće sastavljenih od smjese heksogena i ekspanziranog polistirena (EPS) i od smjese Amonita (smjesa trotila i kuglica amonij-nitrata u omjeru 79:21) i EPS-a (Kuznetov i Matveenkov, 1977).

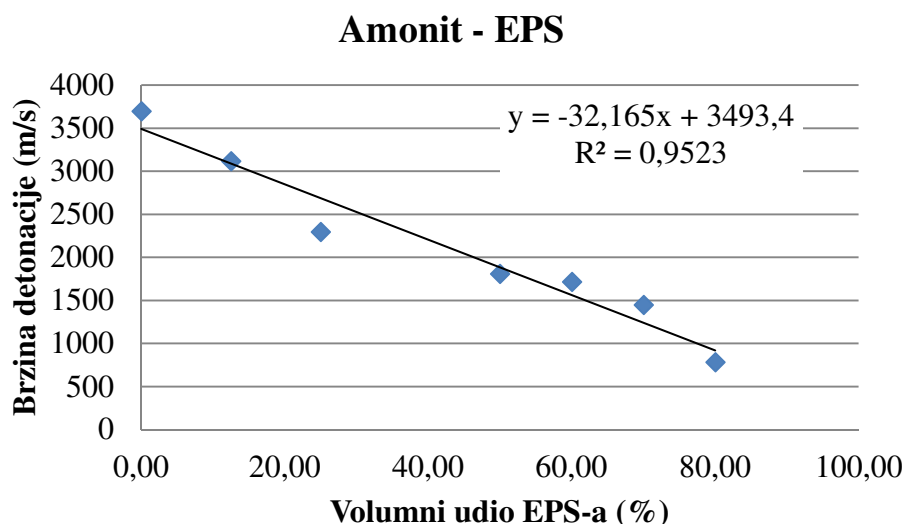
Rezultati njihovih mjerenja brzine detonacije s pripadajućim volumnim omjerima eksploziva i EPS-a prikazani su u tablici 4-1, a ovisnosti brzine detonacije takvih smjesa o volumnom udjelu EPS-a prikazane su na slikama 4-12 i 4-13. Na osnovu rezultata mjerenja zaključili su da postoji mogućnost velikog raspona smanjenja gustoće eksploziva dodajući im EPS te postizanja stabilne brzine detonacije takvih smjesa.

Tablica 4-1. Rezultati mjerenja brzine detonacije eksploziva smanjene gustoće (Kuznetov & Matveenkov, 1977).

Volumni udio heksogena (%)	Volumni udio EPS-a (%)	Izmjerena brzina detoancije (m/s)	Volumni udio Amonita (%)	Volumni udio EPS-a (%)	Izmjerena brzina detoancije (m/s)
25,00	75,00	1410	20,00	80,00	785
43,70	56,30	2660	30,00	70,00	1450
50,00	50,00	3900	40,00	60,00	1720
56,25	43,75	4050	50,00	50,00	1810
66,00	34,00	5210	75,00	25,00	2300
75,00	25,00	5750	87,50	12,50	3120
83,30	16,70	5670	100,00	0,00	3700
100,00	0,00	6150	-	-	-



Slika 4-12. Ovisnost brzine detonacije o volumnom udjelu EPS-a za mješavinu heksogen-EPS (Kuznetov & Matveenkov, 1977).



Slika 4-13. Ovisnost brzine detonacije o volumnom udjelu EPS-a za mješavinu amonit-EPS (Kuznetov & Matveenkov, 1977).

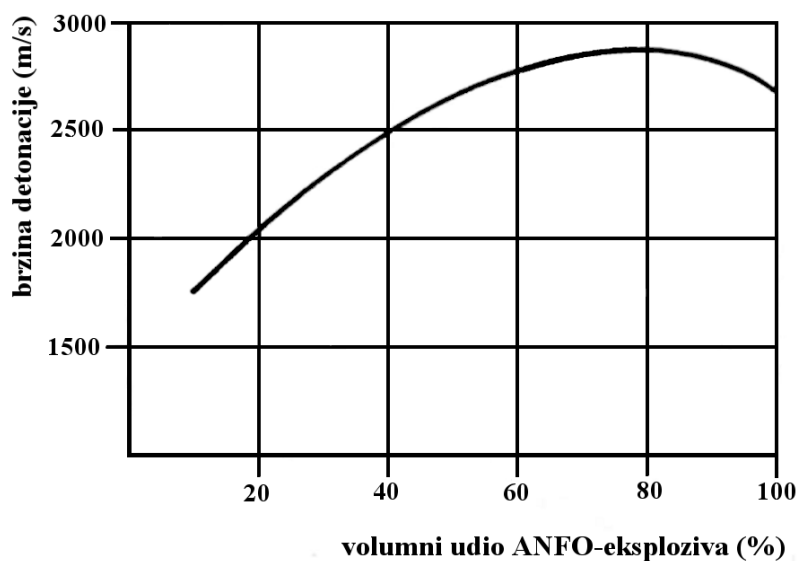
Greeff (1977) je zamijenio ANFO-eksploziv sa smjesom ANFO/polistiren u volumnom omjeru 50/50 pri miniranjima u suhim uvjetima za poboljšanje fragmentacije mekših stijena (Hagan, 1979).

Hagan (1979) je za smanjenje prekoprofilnog iskopa koristio smjese ANFO eksploziva i neekspandiranog polistirena u volumnim omjerima 20:80, 25:75 i 50:50. Preporučio je korištenje takvih smjesa u kombinaciji sa zračnim međučepom. Za bušotine promjera Ø 50 mm preporučio je miješanje 75 % – 80 % polistirena s 25 % – 20 % ANFO eksploziva, a za bušotine promjera Ø 155 mm i većeg, miješanje 90 % polistirena s 10 % ANFO eksploziva (Hagan, 1979, Baranov et al 1996).

Heltzen i Kure (1979.) su provodili daljnja istraživanja s *Isanolom* te su dokazali mogućnost detonacije smjese ANFO-eksploziva i ekspaniranog polistirena (EPS) u volumnom omjeru 5:95 %, gustoće 0,18 g/cm³, pri čemu je izmjerena brzina detonacije od 1600 m/s. Ispitivanja su provedena u čeličnim cijevima promjera Ø 35 mm, a eksploziv je iniciran detonatorom. Veličina granula EPS-a je bila od 0,5 mm do 3 mm. Za konturna miniranja su koristili smjesu ANFO-eksploziva i granula EPS-a u volumnom omjeru 10:90 sa stabilnom brzinom detonacije oko 1750 m/s. *Isanol* je uspješno primijenjen za konturna miniranja pri čemu je dokazana mogućnost efikasne upotrebe eksploziva smanjene gustoće, a kao glavni nedostatak ističe se dodatni trošak prilikom manipulacije proizvodom ograničene upotrebe.

Isanol, gustoće $0,18 \text{ g/cm}^3$, ubraja se u eksplozive jako smanjene gustoće. (Heltzen i Kure, 1979, Nielsen i Heltzen, 1987, Silva, 2007.)

Ovisnost brzine detonacije *Isanola* o volumnom udjelu ANFO-eksploziva je prikazana dijagramom na slici 4-14. Na dijagramu je vidljiv porast brzine detonacije s porastom udjela ANFO-eksploziva sve do 80 % udjela, odnosno smanjenjem udjela EPS-a. Nakon 80 % udjela ANFO-eksploziva slijedi pad brzine detonacije s daljnjim porastom udjela sve do 100 %. To se može objasniti činjenicom da EPS kemijski sudjeluje u detonaciji.



Slika 4-14. Ovisnost brzine detonacije *Isanola* o volumnom udjelu ANFO-eksploziva (Heltzen i Kure, 1979, Nielsen i Heltzen, 1987).

Tulis i suradnici (1982) su ispitivali mogućnost detoniranja eksploziva smanjene gustoće na osnovi PETN-a i staklene vune/etilne celuloze. Udio PETN-a je iznosio 50 % – 60 % volumno, a gustoća takvih smjesa približno $0,10 \text{ g/cm}^3$ – $0,90 \text{ g/cm}^3$. Nije zabilježena stabilna detonacija (Anderson et al, 1989).

Shvedov (1985) je analizirao mogućnost primjene eksploziva smanjene gustoće za održanje stabilne detonacije pri velikim promjerima punjenja. Korištena je smjesa granula amonij nitrata (AN) i zrnaca EPS-a, presvučenih tankim slojem soli. Takva smjesa je imala gustoću $0,20 \text{ g/cm}^3$. Eksploziv je ispitivan u zatvorenim uvjetima, u čeličnim cijevima promjera $\varnothing 34 \text{ mm}$ i $\varnothing 42 \text{ mm}$, duljina 3 m i 5 m. Izmjerene su male brzine detonacije, a cijevi su po cijeloj dužini bile periodično ili izbočene ili razrezane. Ta područja na cijevima se poklapaju s izmjerenima brzinama detonacije, 300 m/s – 700 m/s na izbočenim područjima odnosno 1500 m/s – 1900 m/s na razrezanim područjima. Shvedov zaključuje da se taj proces pulsiranja sastoji

od režima male brzine detonacije kojega slijedi proces nestabilnog sagorijevanja još niže brzine i cijeli proces se ponavlja sve dok kompletan eksploziv u potpunosti kemijski ne izreagira (Baranov et al 1996, Silva 2007).

Xeuguo (1986) je ispitivao mogućnost detoniranja eksploziva smanjene gustoće na bazi PETN-a i poliuretanske pjene. Udio PETN-a je iznosio 40 % – 50 % maseno, a gustoće su bile u rasponu od 0,30 g/cm³ do 0,90 g/cm³. Minimalna gustoća kod koje je ostvarena stabilna detonacija iznosila je 0,27 g/cm³. Ispitivani uzorci su imali promjer Ø 60 mm (2,4") (Anderson et al, 1989, Katsabanis et al, 1992).

Solov'ev i suradnici (1986) su ispitivali mogućnost detoniranja eksploziva smanjene gustoće izvedenog od heksogena i mikroporozne gume koja se sastoji od smole premazane urea – formaldehidom. Uspješno su detonirali smjese gustoća od 0,20 g/cm³ do 0,80 g/cm³ (Solov'ev et al 1986).

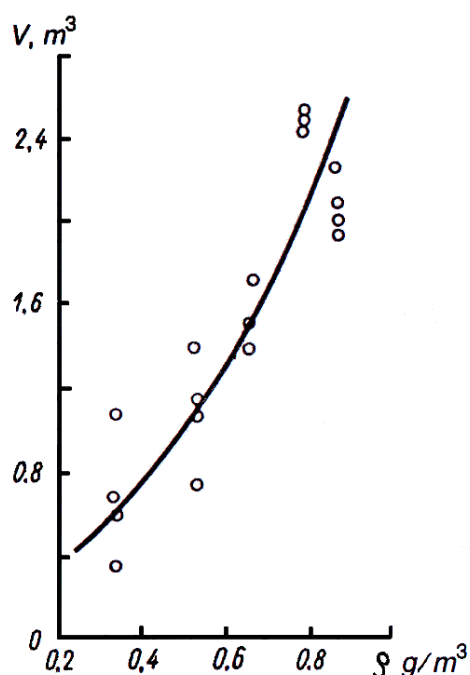
Baranov i suradnici (1988) su određivali radnu sposobnost eksploziva smanjene gustoće prema Trauzlu. Koristili su smjesu Gramonita 79/21 (smjesa trotila i amonijevog nitrata u omjeru 79:21) i EPS-a u različitim volumnim omjerima (od 20 % do 80 % EPS-a) s rasponom gustoća od 0,23 g/cm³ do 0,78 g/cm³. Kao referentni eksploziv korišten je Gramonit 79/21 (Baranov et al 1996). Rezultati ispitivanja su prikazani u tablici 4-2.

Tablica 4-2. Rezultati ispitivanja radne sposobnosti (Baranov et al 1996).

Volumni omjer (%)		Gustoća eksploziva (g/cm ³)	Relativna snaga
Gramonite 79/21	EPS		
100	0	0,87	1,00
80	20	0,78	1,14
70	30	0,62	0,98
50	50	0,52	0,96
30	70	0,32	0,86
20	80	0,23	0,80

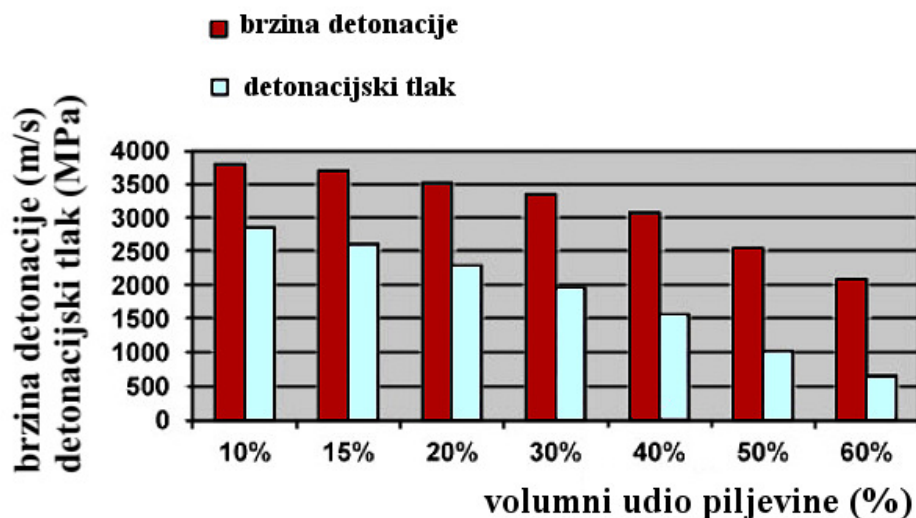
Baranov i suradnici (1988) su nastavili ispitivanja s eksplozivima smanjene gustoće baziranih na Gramonitu 79/21 i EPS-u na terenu. Određivali su učinak eksploziva smanjene gustoće na način da su određivali volumen kratera u stjenjskoj masi nastalog detonacijom eksploziva smanjene gustoće u minskim bušotinama (Baranov et al 1996).

Rezultati njihovih mjerenja su prikazani na dijagramu na slici 4-15. iz kojeg je vidljivo da smanjenjem gustoće eksploziva dolazi i do smanjenja volumena odminiranog materijala.



Slika 4-15. Odnos volumena kratera i gustoće eksploziva (Baranov et al 1996).

Wilson i Moxon (1989) su smanjivali gustoću ANFO-eksploziva polistirenom, otpacima iz proizvodnje šećera i piljevinom (engl. *sawdust*). Cilj ispitivanja bio je razvoj eksploziva smanjene gustoće na bazi ANFO-eksploziva koji bi se mogao koristiti za miniranja stijena slabije čvrstoće uz smanjenje prekoprofilnog iskopa. Došli su do spoznaje da je moguće smanjiti gustoću ANFO-eksplozivu različitim sredstvima za smanjenje gustoće uz ravnomjerno i homogeno miješanje sastojaka takvog eksploziva te da je moguće smanjenjem gustoće regulirati odnosno smanjiti detonacijski tlak. Rezultati mjerenja brzine detonacije i izračunatog detonacijskog tlaka za smjesu ANFO-eksploziva i piljevine u ovisnosti o volumnom udjelu piljevine prikazani su dijagramom na slici 4-16. Kao glavni zaključak navode da takav eksploziv može dovesti do značajnih ušteda troškova bez većeg utjecaja na fragmentaciju (Rock et al, 2005, Pal Roy et al, 2012).



Slika 4-16. Ovisnost brzine detonacije i detonacijskog tlaka o volumnom udjelu piljevine (Pal Roy et al, 2012).

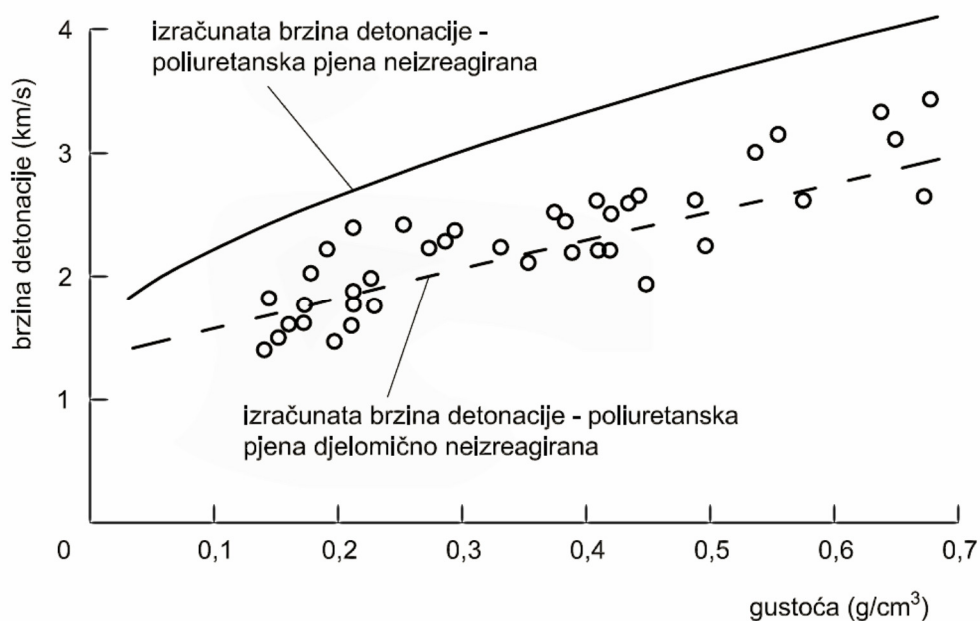
Van Niekerk (1989) je koristio ANFOPS, smjesu ANFO-eksploziva i EPS-a u različitim volumnim omjerima, za miniranja na površinskim kopovima Južnoafričke republike u svrhu poboljšanja produktivnosti. Smjesu je pripremao na način da je pomiješao granule amonij nitrata sa zncima EPS-a u različitim volumnim omjerima te je na takvu smjesu dodavao 6 % maseno biljnog ulja. Zrnca EPS-a su bila veličine 1 mm – 3 mm. Poboljšanja produktivnosti koja je ostvario miniranjima s takvim eksplozivom su:

- manji troškovi miniranja u odnosu na miniranje s ANFO-eksplozivom,
- smanjenje oštećenja stjenske mase miniranjem,
- povećana stabilnost radne kosine,
- ujednačenija fragmentacija u odnosu na fragmentaciju dobivenu miniranjem s ANFO-eksplozivom i
- mogućnost miniranja s ANFOPS tamo gdje stanje stjenske mase može prouzročiti probleme prilikom miniranja (Van Niekerk, 1989).

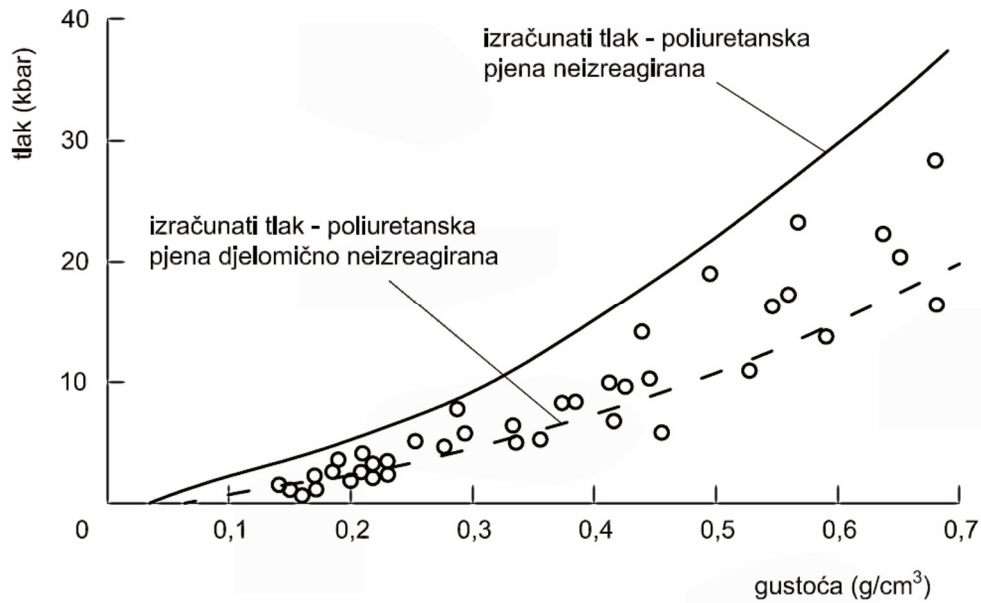
Anderson i suradnici (1989) su ispitivali mogućnost detoniranja poliuretanske pjene miješajući je PETN i mogućnost detoniranja nitrometanske pjene dobivene iz tekućeg nitrometana. PETN je dispergirani u matricu poliuretanske pjene različitih gustoća ($0,10 \text{ g/cm}^3$ – $0,70 \text{ g/cm}^3$) u masenom omjeru 60:40, a gustoće smjese PETN/poliuretanska pjene su bile u rasponu od $0,15 \text{ g/cm}^3$ do $0,70 \text{ g/cm}^3$. Gustoće nitrometanske pjene bile su u rasponu od $0,07 \text{ g/cm}^3$ do $0,70 \text{ g/cm}^3$. Brzinu i tlak detonacije su izmjerili i izračunali su koristeći programski paket TIGER i modificiranu BKW jednadžbu stanja za obje smjese te su usporedili

dobivene podatke. Izmjereni podaci su se slagali s izračunatima. Brzina detonacije smjese PETN/poliuretanska pjena mjerena je s otpornim sondama, a tlak je izmjeren podvodnim testom. Izmjerene brzine detonacije su bile u rasponu od 1500 m/s do 3000 m/s, a izmjereni tlakovi od 20 bara do 20 kbara. Brzina detonacije nitrometanske pjene mjerena je ionizacijskim sondama, tlak je izmjeren podvodnim testom. Izmjerene brzine detonacije bile su u rasponu od 1800 m/s do 4400 m/s, a izmjereni tlakovi od 20 bara do 30 kbara (Anderson et al, 1989).

Dijagram odnosa brzine detonacije i gustoće za mješavinu PETN/poliuretanska pjena prikazan je na slici 4-17, a dijagram odnosa tlaka detonacije i gustoće za mješavinu PETN/poliuretanska pjena na slici 4-18. Na oba dijagrama je vidljivo dobro slaganje izmjerenih vrijednosti s proračunatima ukoliko je u proračun uključena poliuretanska pjena kao djelomično izreagirana.

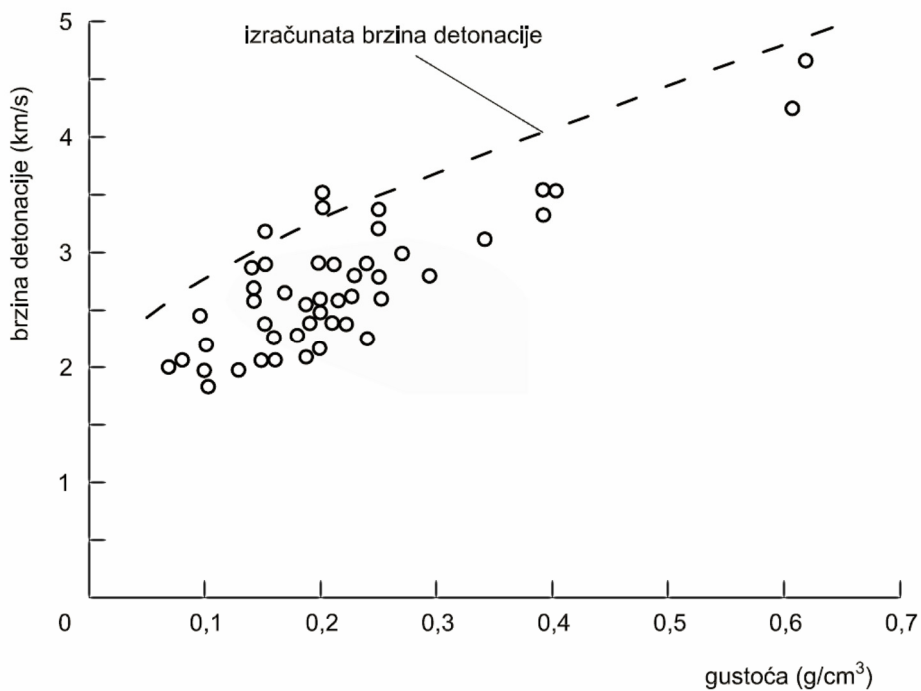


Slika 4-17. Odnos brzine detonacije i gustoće za PETN/poliuretanska pjena (Anderson et al, 1989).

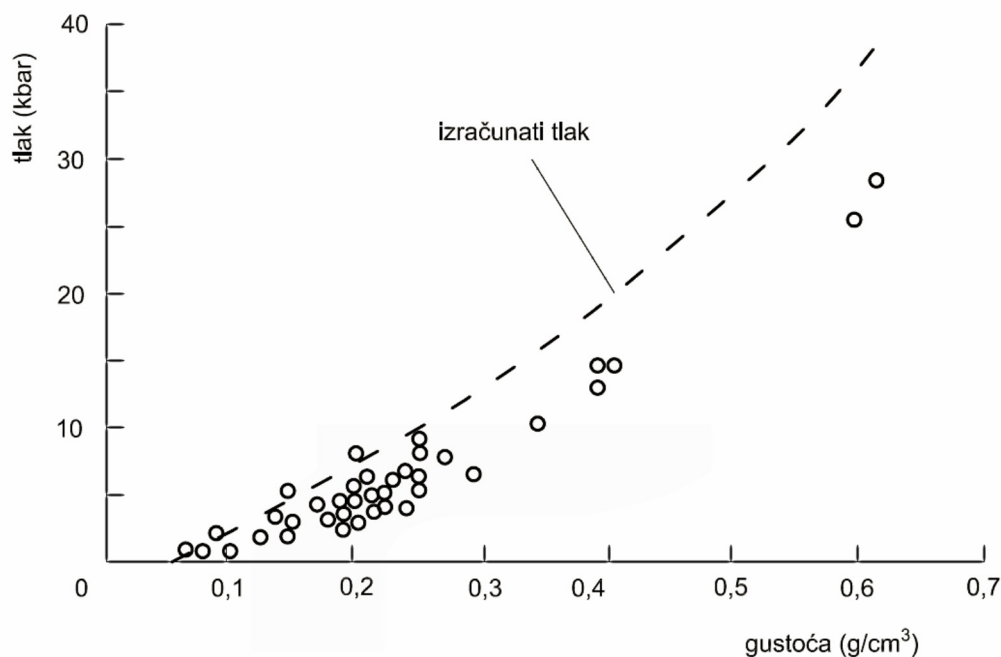


Slika 4-18. Odnos tlaka detonacije i gustoće za PETN/poliuretanska pjena (Anderson et al, 1989).

Odnos brzine detonacije i gustoće za nitrometansku pjenu prikazan je dijagramom na slici 4-19, a odnos tlaka detonacije i gustoće dijagramom na slici 4-20. Na oba dijagrama je vidljivo dobro slaganje izmjerenih vrijednosti s proračunatima.



Slika 4-19. Odnos brzine detonacije i gustoće za nitrometansku pjenu (Anderson et al, 1989).



Slika 4-20. Odnos tlaka detonacije i gustoće za nitrometansku pjenu (Anderson et al, 1989).

Armstrong i Moxon (1990) su smanjili gustoću emulzijskih eksploziva miješajući tri vrste matrice emulzijskoga eksploziva, uz dodatak 1,5 % masenog udjela staklenih mikrokuglica, s neekspandiranim polistirenom, perlitom ili piljevinom. Za mješavine emulzijskog eksploziva i polistirena, gustoće $0,80 \text{ g/cm}^3$, izmjerene su brzine detonacije od 3300 m/s do 3900 m/s . Za mješavine emulzijskog eksploziva i perlita, gustoće $0,80 \text{ g/cm}^3$, izmjerene su brzine detonacije od 3000 m/s do 3300 m/s . Za mješavine emulzijskog eksploziva s piljevinom, gustoće $1,05 \text{ g/cm}^3$, izmjerena je brzina detonacije 5100 m/s . Za mješavine emulzijskog eksploziva s piljevinom, gustoće $0,80 \text{ g/cm}^3$ nije zabilježena detonacija. Brzina detonacije je mjerena na uzorcima promjera $\varnothing 50 \text{ mm}$, $\varnothing 75 \text{ mm}$ i $\varnothing 100 \text{ mm}$. Cilj istraživanja je bio razvoj voodootpornog eksploziva smanjene gustoće koji bi imao primjenu za poboljšanje fragmentacije uz smanjenje troškova miniranja. Odustalo se je od smjese s dodatkom piljevine jer takve smjese su pokazale slabu voodootpornost i imale su velika rasipanja u izmjerenim brzinama detonacije što objašnjavaju nestabilnom detonacijom. Daljnji rad je nastavljen smjesama emulzijskog eksploziva s polistirenom odnosno s perlitom kod kojih su se pojavili problemi prilikom punjenja bušotina zbog povećanja viskoznosti takvih smjese (Armstrong i Moxon, 1990).

Katsabanis et al (1992) su se nadovezali na rad Anderson et al (1989) mjereći brzinu detonacije i tlak detonacije smjese PETN/poliuretanska pjena gustoće od $0,55 \text{ g/cm}^3$ do

0,60 g/cm³ te su usporedili podatke s proračunatima. Brzinu detonacije su odredili optičkom metodom upotrebom kamere s rotirajućim zrcalima, a tlak detonacije podvodnom testom. Za proračun su koristili programski paket TIGER i BKW jednadžbu stanja. Odredili su i kritični promjer takve smjese (19 mm), a najveću brzinu detonacije u iznosu od 3600 m/s su dobili za promjer od 51 mm. Izmjereni tlakovi su iznosili od 23 kbar do 25 kbar za promjere eksploziva smanjene gustoće 19 mm, 44 mm i 70 mm. Pretpostavili su da poliuretanska pjena ne sudjeluje u detonaciji te su dobili neslaganje rezultata proračuna s izmjerenim vrijednostima. Proračun su korigirali uvrštavajući podatke za poliuretansku pjenu u jednadžbu. Rezultati tog proračuna, koji su imali najbolje slaganje s izmjerenim podacima, pokazali su da poliuretanska pjena sudjeluje u reakciji detonacije i to na način da 25 % mase poliuretanske smjese sudjeluje u detonacijskom valu, 50 % mase iza detonacijskog vala, a 25 % mase ostaje neizreagirano (Katsabanis et al, 1992).

Tapia (1992) je smanjio gustoću ANFO eksploziva na 0,45 g/cm³ dodajući mu kuglice perlita (Silva 2007).

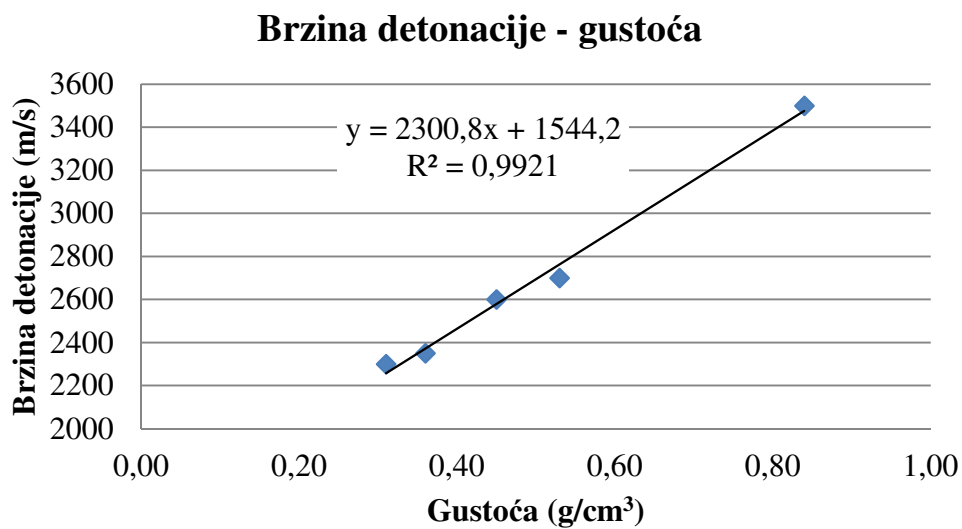
Nifad'ev i Kalinina (1992) su dokazali mogućnost sagorijevanja ekspaniranog polistirena, odnosno mogućnost sudjelovanja u kemijskoj reakciji oksidacije, uz dodatak eksplozivima za smanjenje gustoće (Nifad'ev i Kalinina, 1992 a, b).

Hunter et al (1993) su smanjili gustoću ANFO-eksploziva polistirenom te su ga pri miniranjima u svrhu očuvanja stabilnosti konturne površine kao zamjenu za standardna konturna miniranja. Zaključili su da miniranje eksplozivom smanjene gustoće rezultira smanjenim seizmičkim utjecajem na stijenu iza konturne površine u odnosu na standardna konturna miniranja. Takvi eksplozivi su imali raspon gustoća od 0,31 g/cm³ do 0,53 g/cm³ i izmjerena im je brzina detonacije u rasponu od 2300 m/s do 2700 m/s te su im izračunati tlakovi u rasponu od 0,41 GPa do 0,97 GPa (Hunter et al, 1993).

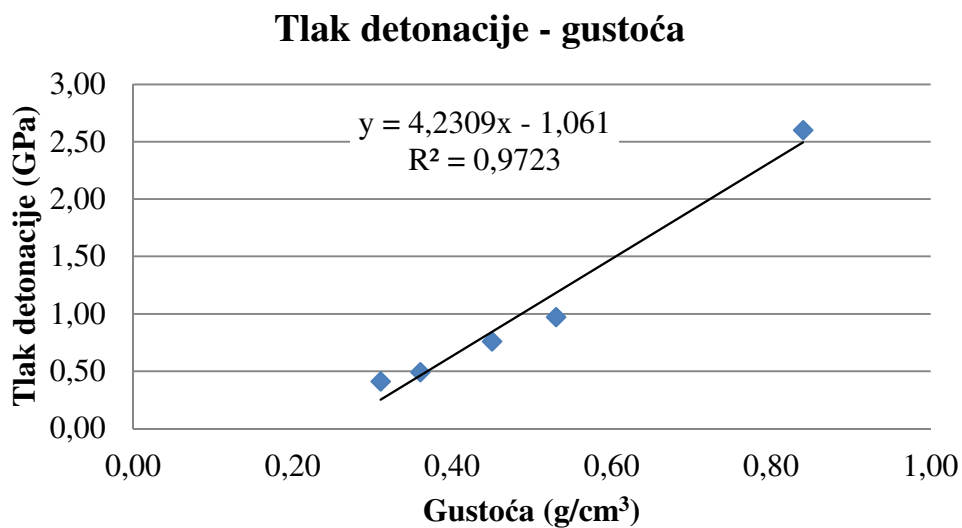
Rezultati mjerenja brzine detonacije eksploziva smanjene gustoće s pripadajućim izračunatim tlakovima detonacije prikazani su u tablici 4-3., a odnos brzine detonacije i gustoće prikazan je dijagramom na slici 4-21., dok je odnos izračunatog tlaka detonacije i gustoće prikazan dijagramom na slici 4-22.

Tablica 4-3. Rezultati mjerenja brzine detonacije eksploziva smanjene gustoće s pripadajućim izračunatim tlakovima detonacije (Hunter et al, 1993).

Eksploziv	Gustoća (g/cm ³)	Brzina detonacije (m/s)	Tlak detonacije (GPa)
ANFO	0,84	3500	2,60
LOMEX II	0,53	2700	0,97
BL353	0,45	2600	0,76
BL360	0,36	2350	0,49
BL355	0,31	2300	0,41



Slika 4-21. Odnos brzine detonacije i gustoće (Hunter et al, 1993).



Slika 4-22. Odnos tlaka detonacije i gustoće (Hunter et al, 1993).

Iz tablice 4-3. i iz dijagrama na slikama 4-21. i 4-22. vidljivo je značajno sniženje brzine detonacije odnosno tlaka detonacije sa sniženjem gustoće eksploziva.

Harries i Gribble (1993) su smanjivali gustoću ANFO-eksploziva dodajući mu gumu u granulama različitih veličina s ciljem smanjenja udarne energije. Takav eksploziv su nazvali *Anrub*. Gumu su dodavali ANFO-eksplozivu u slijedećim volumnim omjerima: 3,25 %, 6,5 %, 9,75 % i 13 %. Nisu naveli niti gustoću gume niti gustoće mješavina ANFO-eksploziva s gumom. Kao rezultat miniranja s *Anrubom* navode smanjene brzine detonacije, smanjenje seizmičkog utjecaja i smanjenje razbacivanja odminiranog materijala u odnosu na miniranja s ANFO-eksplozivom (Harries i Gribble, 1993).

Jackson (1993) je smanjio gustoću vodenih gelova (vodena otopina nitrata senzibilizirana nitroderivatima) granulama amonij-nitrata i kuglicama EPS-a s ciljem razvoja novog eksploziva smanjene gustoće u svrhu očuvanja stabilnosti konturne površine. Eksploziv smanjene gustoće nazvao je *vodeni gel male snage* (engl. *Low Strength Watter Gel Explosive*). Ispitivanja brzine detonacije je provodio u PVC cijevima promjera \varnothing 100 mm i \varnothing 200 mm, te je dobio brzine detonacije u rasponu od 2400 m/s do 3000 m/s za gustoće od 0,40 g/cm³ do 0,70 g/cm³ (Jackson, 1993).

Grouhel i Hunsaker (1995) su koristili novi eksploziv *Dynolite*, smjesa ANFO-eksploziva i vodene otopine anorganskih soli uz dodatak sredstva za zgušnjavanje i diesel goriva, za korištenje u suhim bušotinama pri površinskim miniranjima. Gustoća *Dynolite*-a je u rasponu od 0,40 g/cm³ do 0,70 g/cm³. Grouhel i Hunsaker su koristili *Dynolite* gustoće 0,50 g/cm³. Mjerali su brzinu detonacije u PVC cijevima promjera \varnothing 127 mm (2500 m/s) i u bušotinama \varnothing 251 mm (3500 m/s) te su zaključili da *Dynolite* ima približno 1000 m/s manju brzinu detonacije u istim uvjetima od ANFO-eksploziva. Za iniciranje su koristili pojačnik mase 150 g za promjere manje od 150 mm, a za veće promjere pojačnik mase 400 g (Grouhel i Hunsaker, 1995).

Stachura i Cumerlato (1995) su uspješno smanjili gustoću vodoplastičnom eksplozivu na 0,50 g/cm³ i koristili su ga za konturna miniranja u bušotinama \varnothing 270 mm. Ne navode koje su sredstvo koristili za smanjenje gustoće. Rezultate miniranja takvim eksplozivom su usporedili s rezultatima miniranja s *Havey-ANFO* i s ANFO-eksplozivom koristeći kao mjeru „faktor otiska polovice bušotine“ (engl. *half cast factor* ili *half barrel factor*). Dobili su manje oštećenje stjenske mase i viši „faktor otiska polovice bušotine“ kao rezultat miniranja s

eksplozivom smanjene gustoće u odnosu na miniranja s konvencionalnim eksplozivima (Brent i Armstrong, 1998).

Curtis (1997) je smanjivao gustoću ANFO-eksploziva s ciljem smanjenja brzine detonacije dodajući mu ugljen, kukuruz i pepeo u omjerima 10:90 i 20:80 (materijal:ANFO). Brzina detonacije i podvodni test su ispitivani na uzorcima u čeličnim cijevima promjera 6" u laboratoriju. Na terenu je mjerena brzina detonacije u bušotinama. Korišteni materijali za smanjenje gustoće imali su slijedeće prednosti i nedostatke:

- ugljen – najjeftiniji i najdostupniji, problem s veličinom zrnaca i sadržajem vlage,
- kukuruz – ujednačena veličina zrnaca, najskuplji u odnosu na ostala dva,
- pepeo – lako dobavljiv, ujednačena veličina čestica i mala vlažnost i
- razmatrani su i drugi materijali: gumene pločice, drveni peleti i drvena piljevina ali su odbačeni zbog nepovoljnih ekonomskih i fizikalnih karakteristika (Curtis, 1997).

Najveće sniženje brzine detonacije ostvareno je sa smjesom pepela i ANFO-eksploziva uz napomenu da je takva smjesa imala nešto niže vrijednosti energija dobivenih podvodnim testom. Niže vrijednosti energija su pripisane inertnosti pepela, dok ostali materijali imaju djelomično i ulogu goriva (Curtis, 1997).

Johnson (1996) je miješao ANFO-eksploziv s drvenom piljevinom i primijenio je takav eksploziv za miniranja u mekšim stijenama. Cilj mu je bio smanjenje troškova miniranja u odnosu na miniranja s ANFO-eksplozivom te navodi da je ostvario značajne uštede (Rock et al, 2005, Singh et al, 2013).

Forsyth suradnici (1997) su miješali kuglice perlita s ANFO-eksplozivom te su takav eksploziv smanjene gustoće uspješno primijenili za podzemna miniranja umjesto ANFO-eksploziva (Silva 2007).

Brent i Armstrong (1998) su ispitivali mogućnost primjene eksploziva smanjene gustoće za konturna miniranja. Koristili su eksploziv jako smanjene gustoće, 0,20 g/cm³ s izmjerenom prosječnom brzinom detonacije 2200 m/s, u bušotinama promjera Ø 311 mm i dubine 45 m. Ne navode kojem su eksplozivu smanjili gustoću i koje su sredstvo za smanjenje gustoće koristili. Rezultate pokusnih miniranja takvim eksplozivom su usporedili s rezultatima miniranja emulzijskim eksplozivom koristeći kao mjeru „faktor otiska polovice bušotine“ koji je iznosio 32 % za emulzijski eksploziv odnosno 62 % za eksploziv jako smanjene gustoće (Brent i Armstrong, 1998, Rock et al, 2005, Singh et al, 2013).

Sheahan i suradnici (1998) su koristili mješavinu ANFO-eksploziva i polistirena, gustoće $0,28 \text{ g/cm}^3$, za miniranja u granitima. Bušotine su bile raznih promjera, od $\varnothing 65 \text{ mm}$ do $\varnothing 102 \text{ mm}$, a visina etaže 5 m (Silva, 2007).

Sudweeks (2000) je miješao EPS i ANFO-eksploziv u omjeru 50:50, gustoće $0,50 \text{ g/cm}^3$ i u omjeru 70:30, gustoće $0,44 \text{ g/cm}^3$. Ispitivanja je provodio u čeličnim cijevima promjera $\varnothing 75 \text{ mm}$, $\varnothing 100 \text{ mm}$, $\varnothing 125 \text{ mm}$ i $\varnothing 150 \text{ mm}$ mjereći brzinu detonacije (Silva 2007).

Rowe i suradnici (2001) su proizveli *Novalite*, eksploziv smanjene gustoće, kao zamjenu za ANFO-eksploziv i *Heavy-ANFO-eksploziv*, za miniranja u mekšim stijenama, za očuvanje stabilnosti konturne površine u rudnicima ugljena i za smanjenje seizmičkog utjecaja miniranja. Izmjerali su brzine detonacije u rasponu od 2000 m/s do 4500 m/s za gustoće od $0,30 \text{ g/cm}^3$ do $1,10 \text{ g/cm}^3$ (Beach et al, 2004; Rock et al, 2005; Singh 2013).

Golubev i Medvedkin (2001) su primijenili eksploziv smanjene gustoće za rastavljanje bojeve municije. Koristili su trakice poliuretanske pjene, debljine 10 mm , koje su ispunili pentritom ili heksogenom. Eksplozive su nazvali NIL-1 (punjenje pentritom) i NIL-2 (punjenje heksogenom), a gustoća im je bila u rasponu od $0,10 \text{ g/cm}^3$ do $0,30 \text{ g/cm}^3$ (Golubev i Medvedkin, 2000, Golubev i Medvedkin, 2001).

Maranada i Cudzilo (2001) su istraživali mogućnost zavarivanja eksplozivom smanjene gustoće. Ispitali su smjese amonijevog nitrata s aluminijem i s kuglicama smole premazane urea-formaldehidom (kemijski aktivan – dodatna energija za detonaciju) te smjese amonijevog nitrata s aluminijem i sa silicijevim dioksid (kemijski inertan). Kombinirajući različite volumne udjele pojedinih komponenti u smjesi dobili su eksplozive različitih gustoća kojima su izmjerili brzinu detonacije te odredili kritični promjer (Maranada i Cudzilo 2001).

Rezultati mjerenja detonacijskih svojstava eksploziva smanjene gustoće s kuglicama smole kao sredstvom za smanjenje gustoće su prikazani u tablici 4-4, a Rezultati mjerenja detonacijskih svojstava eksploziva smanjene gustoće sa silicijevim dioksidom kao sredstvom za smanjenje gustoće u tablici 4-5.

Tablica 4-4. Rezultati mjerenja detonacijskih svojstava eksploziva smanjene gustoće s kuglicama smole kao sredstvom za smanjenje gustoće (Maranada i Cudzilo 2001).

Sastav (%)									
Al prah	3	3	3	6	6	6	10	10	10
Amonij nitrat	92	87	82	89	84	79	85	80	75
Kuglice smole	5	10	15	5	10	15	5	10	15
Detonacijska svojstva									
Gustoća (g/cm³)	0,84	0,68	0,54	0,83	0,67	0,58	0,62	0,54	0,45
Kritični promjer (mm)	8	10	16	8	12	18	8	12	16
Brzina detonacije na uzorcima promjera 25 mm (m/s)	2230	1880	1570	2450	2120	1810	2430	2290	1990
Brzina detonacije na uzorcima promjera 18 mm (m/s)	1930	1610	-	2300	1930	-	2160	1900	-

Tablica 4-5. Rezultati mjerenja detonacijskih svojstava eksploziva smanjene gustoće sa silicijevim dioksidom kao sredstvom za smanjenje gustoće (Maranada i Cudzilo 2001).

Sastav (%)				
Al prah	3	3	6	6
Amonij nitrat	92	89,5	89	86,5
Silicijev dioksid	5	7,5	5	7,5
Detonacijska svojstva				
Gustoća (g/cm³)	0,46	0,40	0,46	0,37
Kritični promjer (mm)	12	17	12	15
Brzina detonacije na uzorcima promjera 25 mm (m/s)	1700	990	2230	1450

Pal Roy i Mohatny (2002) su smanjili gustoću ANFO-eksplozivu dodajući mu piljevinu u masenom omjeru od 10 % (volumno 32 %) te su dobili eksploziv smanjene gustoće s početnih 0,85 g/cm³ na 0,645 g/cm³ (Pal Roy et al, 2012).

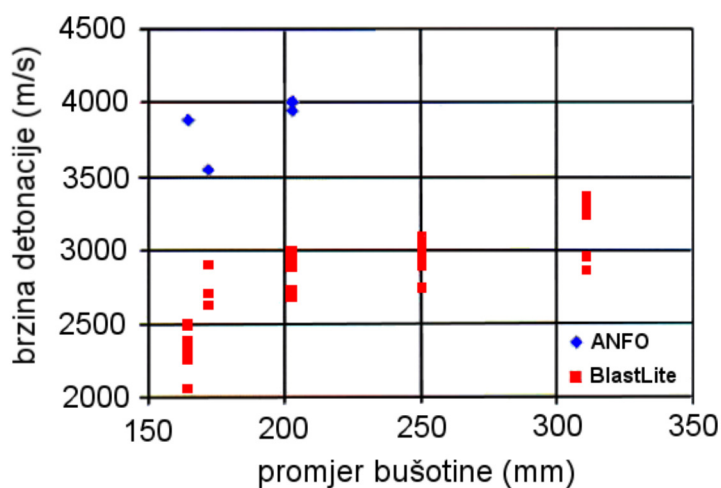
Akbari Mousavi i suradnici (2004) su smanjili gustoću ANFO-eksploziva dodajući im perlit u masenom omjeru 60:40, izmjerenim brzinama detonacije oko 2300 m/s, s uspješnom primjenom eksploziva smanjene gustoće za zavarivanje eksplozivom (Akbari Mousavi et al, 2004).

Beach i suradnici (2004) su smanjili gustoću ANFO-eksploziva s ljuskama pšenice te su mješavinu koristili za uspješno miniranje stijena manje čvrstoće. Eksploziv smanjene

gustoće su nazvali *BlastLite*. *BlastLite* je prikazan na slici 4-23. *BlastLite* ima gustoću 0,48 g/cm³ do 0,57 g/cm³. Mjerali su brzinu detonacije u bušotinama različitih promjera, od Ø 168 mm do Ø 310 mm, a vrijednosti brzine detonacije su bile u rasponu od 2000 m/s do 3500 m/s. Dobiveni rezultati su uspoređeni s rezultatima ispitivanja ANFO-eksploziva u istim uvjetima (slika 4-24). Zaključili su da *BlastLite* ima približno 1000 m/s nižu brzinu detonacije u odnosu na ANFO-eksploziv. Eksploziv su inicirali s pojačnikom mase 400 g (Beach et al, 2004).



Slika 4-23. *BlastLite* – mješavina ANFO-eksploziva i ljusaka pšenice (Beach et al, 2004).



Slika 4-24. Brzina detonacije u ovisnosti o promjeru bušotine za *BlastLite* i ANFO-eksploziv (Beach et al, 2004).

Rock (2004) je proizveo i patentirao eksploziv smanjene gustoće na osnovi *Heavy-ANFO*-eksploziva miješajući ga s ljuskama riže. Eksploziv, s rasponom gustoća od 0,45 g/cm³ do 1,25 g/cm³, dostupan je na tržištu pod nazivom *SoftLOAD* (Rock, 2004).

Akbari Mousavi i suradnici (2005) su smanjili gustoću ANFO-eksploziva dodajući im perlit u masenom omjeru 77:23, izmjerenih brzina detonacije u rasponu od 1800 m/s do 2600 m/s, s uspješnom primjenom eksploziva smanjene gustoće za zavarivanje eksplozivom (Akbari Mousavi et al, 2005).

Silva (2007) je kao sredstvo za smanjenje gustoće eksploziva koristio kuglice EPS-a obložene tankim slojem amonijevog nitrata. Nazvao ih je LDRA (engl. *Low Density Reactive Agent*) i pod tim ih nazivom patentirao. Gustoća LDRA iznosi od 0,15 g/cm³ do 0,20 g/cm³. Osim kao sredstvo za smanjenje gustoće eksploziva LDRA-u je moguće koristiti i kao eksploziv. LDRA gustoće 0,20 g/cm³ ima brzinu detonacije 2400 m/s. Kuglice LDRA-e je miješao s ANFO-eksplozivom i s perlitom u različitim volumnim omjerima i takve eksplozive je koristio u opreznim miniranjima za smanjenje oštećenja konturne površine. Mjerio je brzinu detonacije LDRA, smjese LDRA i ANFO eksploziva u volumnim omjerima 50:50 % i 70:30 %, smjese LDRA i perlita u volumnim omjerima 50:50 % i 60:40 % u bušotinama promjera Ø 311 mm te je dobio slijedeće rezultate koji su prikazani u tablici 4-6 (Silva, 2007).

Mjereći seizmički utjecaj miniranja takvim eksplozivom i pregledavajući završnu kosinu nakon miniranja, došao je do zaključka da dolazi do smanjenog oštećenja u podnožju kosine u odnosu na konturna miniranja konvencionalnim gospodarskim eksplozivima (Silva, 2007).

Tablica 4-6. Rezultati mjerenja brzine detonacije eksplozivnih smjesa s dodatkom LDRA-e (Silva 2007).

Vrsta eksplozivne tvari	Brzina detonacije (m/s)	Gustoća (g/cm ³)
LDRA	2400	0,20
LDRA : ANFO 50:50	3500	0,49
LDRA : ANFO 70:30	3200	0,37
LDRA : perlit 50:50	1580	0,13
LDRA : perlit 40:60	1215	0,11

Sil'vestrov i suradnici (2010) su smanjili gustoću emulzijskih eksploziva s ciljem korištenja eksploziva smanjene gustoće za eksplozivno zavarivanje. Gustoću su smanjivali na način da su povećali maseni udio staklenih mikrokuglica. Smiješali su eksploziv gustoće 0,50

g/cm^3 , s brzinama detonacije od 1800 m/s do 2100 m/s, koji su uspješno primijenili za eksplozivno zavarivanje (Sil'vestrov et al, 2010).

Cordova i suradnici (2012) su patentirali emulzijski eksploziv smanjene gustoće izveden od emulzijske matrice senzibilizirane mjehurićima dušika s rasponom gustoća od $0,50 \text{ g/cm}^3$ do $0,90 \text{ g/cm}^3$ (Cordova et al, 2012).

Pal Roy i suradnici (2012) su proizveli eksploziv smanjene gustoće na način da su pomiješali amonijev nitrat i piljevinu te su takvoj smjesi dodali mineralno ulje i korišteno ulje (motorno ulje, hidrauličko ulje, ulje iz mjenjača). Miješali su 800 kg AN-a, 20 kg piljevine, 32 l mineralnog ulja i 24 l korištenog ulja. Eksploziv smanjene gustoće su patronirali u patrone promjera $\varnothing 75 \text{ mm}$, duljine 1 m, mase 1 kg i gustoće $0,23 \text{ g/cm}^3$ te ih stavljali u bušotine koje su na dnu imale drveni odstojnik visine 1 m (Pal Roy et al, 2012).

Silva i Orlandi (2013) su proizveli novi eksploziv smanjene gustoće koji su nazvali *PANFO*. Eksploziv se sastoji od ekspandiranog perlita obloženog tankim slojem amonijeva nitrata uz dodatak goriva. Gustoća takvog eksploziva je od $0,40 \text{ g/cm}^3$ do $0,45 \text{ g/cm}^3$, s brzinama detonacije od 1800 m/s do 2000 m/s (Silva i Orlandi, 2013).

Singh i suradnici (2013) su tražili zamjenu za ANFO-eksploziv za miniranja vapnenca i ugljena ali i za miniranja kod kojih se eksploziv nalazi u bušotinama ispunjenim vodom. Zamjenu su našli u eksplozivu smanjene gustoće na bazi emulzijskog eksploziva. Gustoću emulzijskog eksploziva su smanjili s inicijalnih $1,10 \text{ g/cm}^3$ na $0,65 \text{ g/cm}^3$ s dodavanjem sredstva za smanjenje gustoće, ne navodeći koje sredstvo su koristili. Izmjerali su slijedeće stabilne brzine detonacije za pojedine gustoće:

- $\rho = 1,10 \text{ g/cm}^3 \rightarrow v = 4350 \text{ m/s} - 4450 \text{ m/s}$,
- $\rho = 1,05 \text{ g/cm}^3 \rightarrow v = 4150 \text{ m/s} - 4250 \text{ m/s}$,
- $\rho = 1,00 \text{ g/cm}^3 \rightarrow v = 4000 \text{ m/s} - 4125 \text{ m/s}$,
- $\rho = 0,90 \text{ g/cm}^3 \rightarrow v = 3600 \text{ m/s} - 3700 \text{ m/s}$,
- $\rho = 0,85 \text{ g/cm}^3 \rightarrow v = 3500 \text{ m/s} - 3600 \text{ m/s}$,
- $\rho = 0,75 \text{ g/cm}^3 \rightarrow v = 3100 \text{ m/s} - 3200 \text{ m/s}$,
- $\rho = 0,70 \text{ g/cm}^3 \rightarrow v = 3050 \text{ m/s} - 3100 \text{ m/s}$,
- $\rho = 0,65 \text{ g/cm}^3 \rightarrow v = 3000 \text{ m/s} - 3050 \text{ m/s}$ i
- $\rho = 0,55 \text{ g/cm}^3 \rightarrow$ izostanak detonacije.

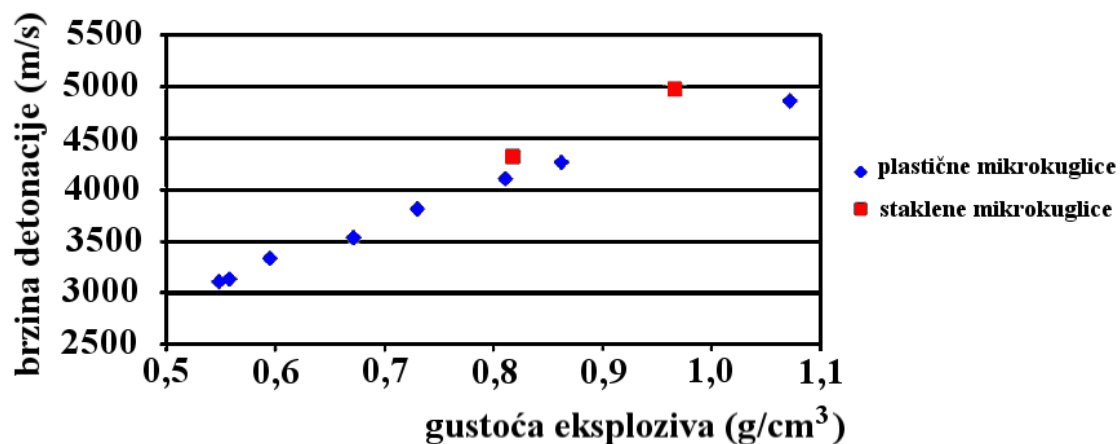
Brzinu detonacije su mjerili na promjeru \varnothing 110 mm, a eksploziv smanjene gustoće je iniciran pojačnikom. Takav eksploziv su primijenili za miniranja vapnenca i ugljena, a rezultate miniranja su usporedili s rezultatima miniranja ANFO-eksplozivom u istim uvjetima. Zaključili su da su rezultati miniranja eksplozivom smanjene gustoće jednako dobri kao i rezultati miniranja ANFO-eksplozivom te da je eksploziv smanjene gustoće pogodan za miniranja stijena slabije čvrstoće i za miniranja razlomljenih i djelomično razlomljenih stijena (Singh et al, 2013).

Maranda i suradnici (2014) su smanjivali gustoću emulzijskih eksploziva na način da su emulzijskoj matrici dodavali različite masene udjele plastičnih mikrokuglica. Mjerili su brzinu detonacije i tlak zračnog udarnog vala. Rezultati mjerenja brzine detonacije su prikazani u tablici 4-7, a ovisnost brzine detonacije o gustoći dijagramom na slici 4-25. Tlak zračnog udarnog vala su mjerili na udaljenostima od 2 m i 2,5 m te su zaključili da sniženje gustoće značajnije ne utječe na tlak zračnog udarnog vala. Rezultate mjerenja brzine detonacije eksploziva smanjene gustoće su usporedili s rezultatima mjerenja brzine detonacije emulzijskih eksploziva s različitim masenim udjelom staklenih mikrokuglica (Maranda et al, 2014).

Iz tablice 4-7 i iz dijagrama na slici 4-25 vidljivo je značajno sniženje gustoće s povećanjem masenog udjela plastičnih mikrokuglica do 3 %, a povećanjem masenog udjela iznad 3% nema značajnog sniženja gustoće, a s time ni brzine detonacije.

Tablica 4-7. Rezultati mjerenja brzine detonacije eksploziva smanjene gustoće (Maranda et al, 2014).

Maseni udio plastičnih mikrokuglica (%)	Gustoća (g/cm ³)	Brzina detonacije (m/s)
0,6	1,07	4870
1,0	0,86	4270
1,4	0,81	4110
1,8	0,73	3820
2,2	0,67	3540
2,6	0,60	3340
3,0	0,56	3140
3,4	0,55	3110



Slika 4-25. Brzina detonacije u ovisnosti o gustoći eksploziva(Maranda et al, 2014).

Podaci o prethodnim istraživanjima na području eksploziva smanjene gustoće su sistematizirani i prikazani u tablici 4-8.

Tablica 4-8. Prethodna istraživanja na području eksploziva smanjene gustoće.

Godina	Autor	Eksploziv	Sredstvo za smanjenje gustoće	Gustoća (g/cm ³)	Upotreba
60-te	-	ANFO	piljevina	-	miniranja na površinskom kopu A/S Sydvaranger
1969	Du Pont	-	-	0,45 - 0,55	-
1970	Austing i Tulis	PETN, nitroceluloza i nitroglicerini	-	≤ 0,25	-
1975	-	ANFO	EPS	0,18	-
1976	Barnov et al	razni eksplozivi	EPS	-	očuvanje stabilnosti konturne površine
1977	Kuznetsov i Matveenkov	Heksogen / Amonite	EPS	-	-
1977	Greeff	ANFO	polistiren	-	-
1979	Heltzen i Kure	ANFO	EPS	0,18	konturna miniranja
1979	Hagan	ANFO	polistiren	-	smanjenje prekopprofilnog iskopa
1982	Tulis et al	PETN	staklena vuna / etilna celuloza	0,10	-
1985	Shvedov	AN	zrnca EPS presvučena tankim slojem soli	0,20	-
1986	Xeuguo	PETN	Poliuretanska pjena	0,30 - 0,90	-
1986	Solov'ev et al	heksogen	smola premazna urea-formaldehidom	0,20 - 0,80	mogućnost detoniranja eksploziva smanjene gustoće
1988	Barnov et al	Gramonite 79/21	EPS	0,23 - 0,78	određivanje relativne snage eksploziva smanjene gustoće
1989	Wilson i Moxon	ANFO	polistiren / otpaci iz proizvodnje šećera / piljevina	0,38 - 0,72	smanjenje prekopprofilnog iskopa
1989	Van Niekerk	ANFO	EPS	-	poboljšanje produktivnosti
1989	Anderson et al	PETN	Poliuretanska pjena	0,15 - 0,70	-
1989	Anderson et al	Tekući nitrometan	Nitrometanska pjena	0,07 - 0,70	-
1990	Armstrong i Moxon	emulzijski eksploziv	polistiren / perlit / piljevina	0,80	poboljšanje fragmentacije uz smanjenje troškova miniranja
1992	Katsabanis et al	PETN	Poliuretanska pjena	0,55	-
1992	Tapia	ANFO	perlit	0,45	-
1992	Nifod'ev et al	AN	EPS	0,05 - 0,15	-
1993	Hunter et al.	ANFO	Polistiren	0,31 - 0,53	očuvanje stabilnosti konturne površine
1993	Harries i Gribble	ANFO	guma	-	smanjenje udarne energije
1993	Jackson	vodeni gel	EPS	0,40 - 0,70	očuvanje stabilnosti konturne površine
1995	Grouhel & Hunsaker	ANFO	-	0,50	za korištenje u suhim bušotinama pri površinskim miniranjima
1995	Stachura i Cumerlato	vodoplastični eksploziv	-	0,50	konturna miniranja
1997	Curtis	ANFO	ugljen / kukuruz / pepeo	-	zamjena za ANFO u mekšim stijenama
1996	Johnson	ANFO	piljevina	-	-
1997	Forsyth et al	ANFO	perlit	-	-
1998	Brent i Armstrong	-	-	0,20	konturna miniranja
1998	Sheahan et al	ANFO	polistiren	0,28	-
2000	Sudweeks	ANFO	EPS	0,44 - 0,50	-
2000	Golubev i Medvedkin	pentrit	poliuretanska pjena	0,10 - 0,30	rastavljanje bojeve municije
2000	Golubev i Medvedkin	heksogen	poliuretanska pjena	0,10 - 0,30	rastavljanje bojeve municije
2001	Rowe	ANFO	-	0,20 - 1,20	-
2001	Maranada i Cudzilo	AN+Al	kuglice smole	0,45 - 0,84	-
2001	Maranada i Cudzilo	AN+Al	silicijev dioksid	0,37 - 0,46	-
2002	Pal Roy i Mohatny	ANFO	piljevina	0,645	-
2004	Akbari Mousavi et al	ANFO	perlit	-	zavarivanje eksplozivom
2004	Beach et al	ANFO	ljuske pšenice	0,48 - 0,57	miniranja stijena manje čvrstoće
2004	Rock	Heavy-ANFO	ljuske riže	-	-
2005	Akbari Mousavi et al	ANFO	perlit	-	zavarivanje eksplozivom
2007	Silva	AN	EPS	-	smanjenje oštećenja konturne površine
2010	Sil'vestrov et al	emulzijski eksploziv	staklene mikrokuglice	0,5	zavarivanje eksplozivom
2012	Cordova et al	emulzijski eksploziv	mjhurići ispunjeni dušikom	0,50 - 0,90	patent
2012	Pal Roy et al	ANFO	piljevina	0,23	-
2013	Silva i Orlandi	ANFO	perlit	0,40 - 0,45	smanjenje oštećenja konturne površine
2013	Singh et al	emulzijski eksploziv	-	0,65	zamjena za ANFO u mekšim stijenama
2014	Maranada et al	emulzijski eksploziv	plastične mikrokuglice	0,55	-

S obzirom da je na tržištu dostupan određeni broj eksploziva smanjene gustoće, u tablici 4-9 su prikazani općeniti podaci komercijalnih eksploziva smanjene gustoće izvađeni iz tehničkih specifikacija za pojedine eksplozive.

Tablica 4-9. Komercijalni eksplozivi smanjene gustoće.

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	

Da bi eksplozivi smanjene gustoće, kako je opisano u prethodnim radovima, bili izvedivi i s ekonomskog i tehnološkog stajališta, trebaju biti zadovoljeni određeni uvjeti:

- dostupnost sredstva za razrjeđenje na tržištu,
- jednostavnost rukovanja sredstvom za razrjeđenje,
- sredstvo za razrjeđenje mora imati malu gustoću, optimalno manju od 0,15 g/cm³,
- 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.

Na osnovu pregleda dosadašnjih istraživanja na području eksploziva smanjene gustoće, takvi eksplozivi imaju široku primjenu za:

- 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,
- zavarivanje metala eksplozivom i
- rastavljanje bojeve municije.

Pregledom dostupne literature ustanovljeno je da je moguća izvedba eksploziva smanjene gustoće iz postojećih gospodarskih eksploziva, odnosno njihovih komponenata i drugih tvari.

Smanjenje gustoće i brzine detonacije te udjela udarnog djelovanja izvoditi će se smjesama sastava baziranog na postojećim gospodarskim eksplozivima uz dodatak ekspanziranog polistirena (EPS).

4.4. Ekspanzirani polistiren kao sredstvo za smanjenje gustoće

Proizvodnja ekspanziranih zrnaca polistirena počela je 1954. godine u koncernu BASF pod zaštićenim imenom styropor. Ekspanzirani polistiren (engl. *Expanded Polystyrene*) se često označava samo kraticom EPS. Proizvodi se pod raznim komercijalnim imenima, a koristi se uglavnom kao materijal za toplinsku i zvučnu izolaciju u građevinarstvu (Poparić 2008).

Slijed tehnoloških operacija proizvodnje polistirena je: *nafta*→*heksan*→*cikloheksan*→*benzen*→*etil-benzen*→*stiren*→*polistiren* (Vidović 2011).

Zrnca se proizvode u reaktorima tehnologijom suspenzijske polimerizacije dodavanjem vode, stirena, pentana i ostalih dodataka pri temperaturi približno 90 °C. Kapljice stirena suspendirane u vodenoj fazi na kraju polimerizacije prelaze u zrnca ekspanzirajućeg polistirena raznih granulacija. Zrnca se u odjeljivaču suše, odjeljuju se po granulaciji i prenose u

spremnike. Nakon sušenja pakiraju se u osmerokutne kartonske kontejnere i otpremaju proizvođačima ekspaniranog polistirena (Vidović 2011).

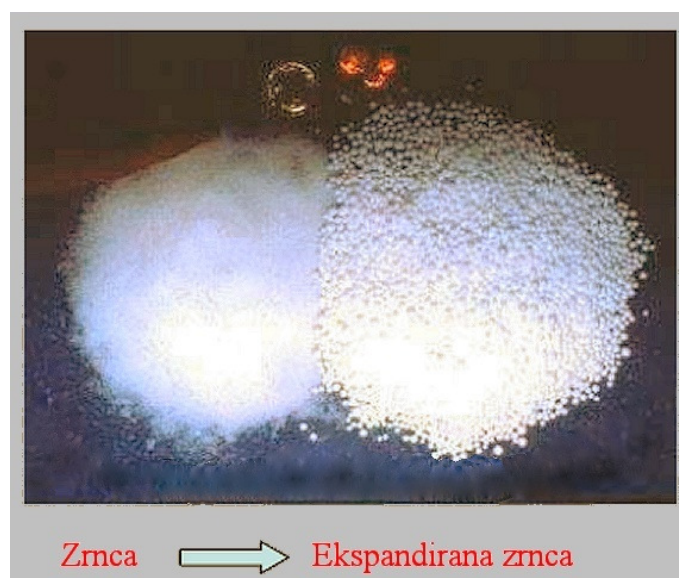
Postupak proizvodnje ekspaniranog polistirena provodi se u tri stupnja.

Prvi stupanj – u predekspanzijskoj se posudi grijanjem s vodenom parom predekspaniraju zrnca polistirena promjera od 0,5 mm do 1,4 mm. Stjenke polistirena omekšaju, a lako hlapljivi pentan u zrnima prelazi u plinovito stanje. Zrnca ekspaniraju povećavajući svoj volumen za 30 do 50 puta, a gustoća im se smanji za 20 do 60 puta, odnosno s oko 0,60 g/m³ na 0,01 g/m³ do 0,03 g/m³. Tlakovi se u posudi izjednače, a zrnca se prebacuju u sušionike gdje kondenzirana vodena para ispari s površine zrnaca (Poparić 2008).

Drugi stupanj – zrnca se nakon sušenja prebacuju u velike otvorene prozračne silose u kojima se stabiliziraju od 12 h do 24 h. Vakuum se u zrnima mora izjednačiti s atmosferskim tlakom, a kondenzirana voda i zaostali pentan difundiraju iz zrnaca (Poparić 2008).

Treći stupanj – zrnca se doziraju u zatvorene metalne kalupe te djelovanjem vodene pare ponovno omekšavaju i ekspaniraju. U zatvorenom kalupu daljnje povećanje volumena nije moguće. Suvremenim vakuum postupkom izvlači se voda i zaostali pentan što znatno skraćuje vrijeme njihove stabilizacije (Poparić 2008).

Zrnca polistirena i ekspaniranog polistirena prikazana su na slici 4-26.



Slika 4-26. Zrnca i ekspanirana zrnca polistirena (Poparić 2008).

Ekspandirani polistiren (EPS) koji je poznatiji kao stiropor je termo-izolacijski materijal karakterističnih fizikalno-kemijskih svojstava koji se proizvodi od polistirena kojeg je 1939.g. izumio ljekarnik Eduard Simon (Poparić 2008).

Koncern BASF je u SR Njemačkoj 1954. godine proizveo ekspandirani polistiren pod zaštićenim imenom "Styropor".

Slijed tehnoloških operacija proizvodnje polistirena je: *nafta*→*heksan*→*cikloheksan*→*benzen*→*etil-benzen*→*stiren*→*polistiren* (Vidović 2011).

EPS je materijal izvanrednih toplinsko-izolacijskih i mehaničkih svojstava, niske cijene te gustoće. Proizvodnja ekspandiranoga polistirena (EPS) provodi se u dva stupnja.

U prvom se stupnju granule polistirena izlažu vodenoj pari u tzv. predekspanderu; struktura granule omekša, a lakohlapljivi ugljikovodik pentan prelazi u plinovito stanje. Uslijed toga granule ekspandiraju povećavajući svoj volumen 20 do 30 puta uz istovremeno smanjenje gustoće s oko 0,600 g/cm³ na 0,015 g/cm³ do 0,030 g/cm³.

Predekspandirane granule transportiraju se pneumatskim transportom u paropropusne silose gdje dozrijevaju 8 h do 24 h. Ovo odležavanje predstavlja drugi stupanj, u kojemu se odvija difuzija viška pentana iz predekspandiranih granula (Kumal 2013).

Ekspandirani polistiren (EPS) je kemijski nestabilan u prisustvu organskih otapala koja razaraju strukturu, odnosno otapaju polistiren (PS). Zrnca granuliranog EPS-a prikazana su na slici 4-27.

Za smanjenje gustoće eksploziva koristiti će se granule EPS-a su veličine od 1,5 mm do 3,5 mm gustoće 0,019 g/cm³.



Slika 4-27. EPS – ekspandirani polistiren (Iskrplast 2013).

5. TEORIJE MINIRANJA – MEHANIZMI LOMA STIJENE DJELOVANJEM EKSPLOZIVA

Promatranje i predviđanje prirode i veličine zona oštećenja u okolnoj stjenjskoj masi kao i razumijevanje mehanizama frakturiranja i drobljenja stjenjske mase jedan je od najvažnijih parametara potrebnih pri projektiranju miniranja radi dobivanja željene granulacije odminirane stjenjske mase i smanjenja štetnih utjecaja miniranja na okoliš.

Na osnovi dosadašnjih spoznaja o eksplozivnim tvarima i količini ostvarive energije pri detonaciji eksplozivnog punjenja u bušotini, te na osnovi znanja o širenju ostvarene energije kroz okolinu minske bušotine postavljeno je više teorija kojima se opisuje proces miniranja odnosno proces lomljenja stijene energijom eksploziva.

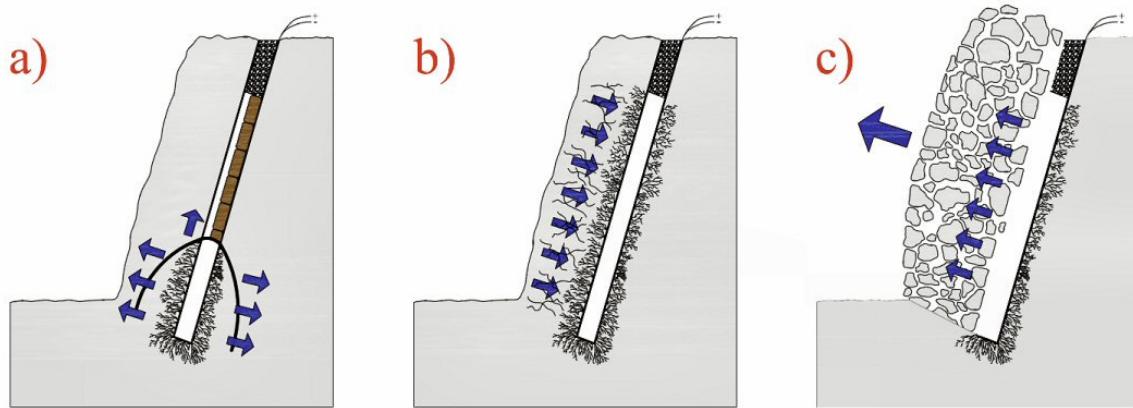
Teorije miniranja objašnjavaju način djelovanja oslobođene energije detonacijom eksplozivnog punjenja u minskoj bušotini na prostor koji se minira. Najzastupljenije su:

- teorija refleksije valova naprezanja,
- teorija ekspanzije plinova,
- teorija međudjelovanja širenja radijalnih pukotina i reflektiranog udarnog vala,
- teorija loma savijanjem,
- teorija valova naprezanja i ekspanzije plinova,
- kombinirana teorija koja uključuje valove naprezanja, ekspanziju plinova, pukotine i refleksiju,
- teorija jezgre ili valova naprezanja i pukotina i
- teorija dinamičkih i statičkih tlakova.

Sve teorije miniranja pretpostavljaju dinamičko djelovanje miniranja, unutar četiri međusobno uvjetovana razdoblja miniranja (slika 5-1):

- detonacija eksploziva u minskoj bušotini,
- djelovanje tlačnog i vlačnog udarnog vala,
- tlak plinovitih produkata i
- pokretanje izlomljene mase.

Unutar te četiri vremenske faze stijena se nalazi u stanju velikih naprezanja koja dovode do oštećenja stijene, a oštećenost stjenske mase se mijenja kako se povećava udaljenost od minske bušotine koja je detonirala. Razlikuje se nekoliko zona u kojima je istaknuto stanje oštećenja i loma stijene.



Kazalo:

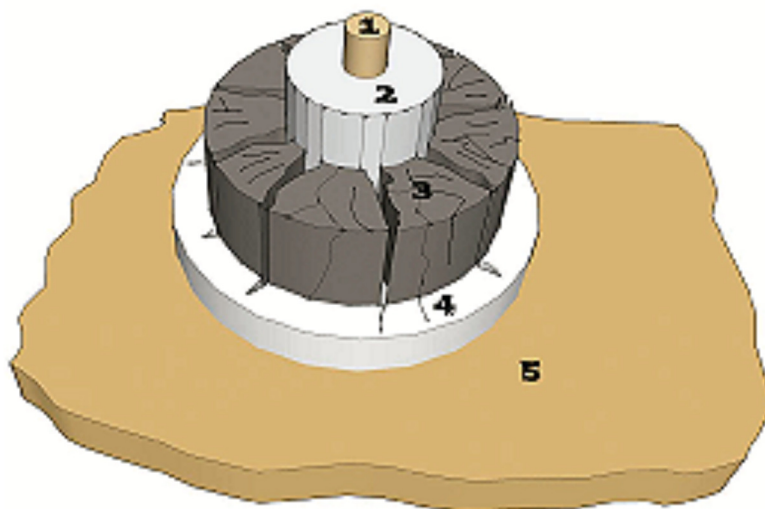
- djelovanje tlačnog udarnog vala, u smjeru strelica, na okolinu minske bušotine nakon detonacije eksplozivnog punjenja u bušotini,
- djelovanje vlačnog udarnog vala, u smjeru strelica, na okolinu minske bušotine nastalih refleksijom tlačnih udarnih valova od slobodne površine i
- djelovanje tlaka plinovitih produkata, u smjeru malih strelica, na stjensku masu i pokretanje izlomljene stjenske mase u smjeru velike strelice.

Slika 5-1. Djelovanje detoniranog eksplozivnog punjenja u bušotini.

5.1. Zone oštećenja stjenske mase miniranjem

Prilikom detonacije eksplozivno punjenje u minskoj bušotini prelazi iz čvrstog u plinovito stanje, pri čemu se oslobađa toplinska energija. Takva reakcija u zatvorenom i ograničenom prostoru, preko stlačenih plinova detonacije, izazvati će naprezanja koji prelaze dinamičku tlačnu čvrstoću stijene. Posljedica toga je drobljenje i sitnjenje stijene u bližoj okolini minske bušotine te nastajanje frakturirane i oštećene zone u stijeni. Takvi visoki tlakovi koji djeluju na stjenku bušotine zdrobit će i usitniti okolnu stjensku masu te izazvati intenzivna oštećenja oko minske bušotine i formirati će se radijus oštećene zone u stijeni. Taj proces je toliko složen da je skoro nemoguće dati točan matematički opis (Hustrulid 1999).

Stupanj izdrobljenosti, oštećenja i frakturiranja oko minske bušotine može se podijeliti u pet područja po fazama odvijanja procesa. Područja djelovanja eksplozivnoga naboja u stjenjnoj masi su prikazane na slici 5-2.



Kazalo:

1. minska bušotina,
2. područje drobljenja,
3. frakturirano područje,
4. malo frakturirano područje i
5. neporemećena stijena.

Slika 5-2. Područja djelovanja eksplozivnog punjenja minske bušotine (Dobrilović i Bohanek 2013).

U području drobljenja (područje 2), tlakovi djeluju na stjenku bušotine, intenzivno drobe i usitnjavaju stijenu neposredno oko minske bušotine. Pored zdrobljenog područja je značajno frakturirano područje 3. U tom području plastično deformiranje se javlja u obliku drobljenja, preko djelomičnog frakturiranja i odvajanja segmenata do radijalnih pukotina. Daljnje proširenje pukotina i njihovo napredovanje stijenom, u smjeru suprotnom minskoj bušotini, nastavlja se na pukotinama formiranim djelovanjem udarnoga vala i pospješuje se prodiranjem i ekspanzijom plinova detonacije. U sljedećem području (područje 4) vlačni lomovi i proširenje pukotina su manji jer se amplituda naprezanja značajno prigušila. Budući da je vlačna čvrstoća stijene približno desetina tlačne čvrstoće stijene, prisutna naprezanja dovoljnog su iznosa da uzrokuju stvaranje manjih radijalnih pukotina i nastavljanje prije nastalih pukotina. Ulaskom valnoga poremećaja u peto područje, pojedinačne čestice medija, odnosno stijene osciliraju oko svog ravnotežnog položaja unutar elastične granice stijene, i u njoj ne nastaju trajna oštećenja.

To je područje u kojoj seizmički valovi prelaze značajne udaljenosti i uzrokuju oscilacije tla te mogu pobuditi na osciliranje objekte, posebice u blizini minskoga polja (Dobrilović i Bohanek 2013).

Pojedini autori su pokušali opisati veličine zona oštećenja te su dali radijuse udaljenosti pojedinih zona od minske bušotine.

Autori Prasad i Ozkahraman iznose veličine zona oštećenja samo za zonu drobljenja i zonu loma. Prema njima zona drobljenja ne prelazi područje izvan 4 radijusa minske bušotine. Dalje se nalazi područje loma koje se nalazi na 5 do 10 radijusa minske bušotine. Zonu pukotina definiraju kao seizmičku zonu ali je ne definiraju veličinom (Prasad 1994; Ozkahraman 2008).

Bhandari navodi da tlak detonacije slabi s udaljenošću od minske bušotine pa je veličina zone drobljenja ograničena na 2 do 4 radijusa minske bušotine, a područje zone loma se nalazi na 20 do 50 radijusa minske bušotine (Bhandari 1997).

Hustrild je dao veličine zone drobljenja i granica loma za različite materijale (tablica 5-1). Veličine pojedinih zona izražene su u odnosu prema radijusu punjenja minske bušotine (Hustrild 1999).

Tablica 5-1. Veličine zona drobljenja i granica loma (Hustrild 1999).

Materijal	Veličina zone drobljenja	Veličina granice loma
beton	10 – 12,8	51,6
granit	11 – 14	53,5 – 68,5
vapnenac	8 – 12	26,8 – 48,4

Djordjevic (1999) je predložio slijedeći izraz za izračun zone drobljenja:

$$r_c = \frac{r_b}{\sqrt{24\sigma_t/P_b}} \quad (5-1)$$

gdje je:

r_c – radijus zone drobljenja (m),

r_b – radijus minske bušotine (m),

σ_t – vlačna čvrstoća stijene (Pa) i

P_b – tlak koji djeluje na stjenku bušotine (Pa).

Općenito gledajući, smatra se da tlak koji djeluje na stjenku bušotine, p_b , ima vrijednost polovice vrijednosti tlaka detonacije te se može prikazati slijedećim obrascem (Persson et al 1994):

$$p_b = \frac{1}{2} p_d \quad (5-2)$$

gdje je:

p_d – tlak detonacije (Pa).

Odnosno:

$$p_b = \frac{\rho v_d^2}{8} \quad (5-3)$$

gdje je:

ρ – gustoća eksplozivne tvari (kg/m^3) i

v_d – brzina detonacije (m/s).

Kanchibotla et al su 1999. godine predložili slijedeći izraz za izračun zone drobljenja i to u funkciji radijusa minske bušotine, tlaka detonacije i tlačne čvrstoće stijene (Esen et al 2003):

$$r_c = r_0 \sqrt{\frac{P_d}{\sigma_c}} \quad (5-4)$$

Zagreba smatra da se veličina zone drobljenja kreće od 3 do 5 radijusa minske bušotine. Veličina zone loma je definirana kao zona izvan područja detonacijom nastalih radijalnih pukotina unutar kojih nastaje vrlo komplicirana struktura pukotina pa je eksperimentalno vrlo teško odrediti veličinu zone loma, a granica zone loma se nalazi na udaljenosti od 40 do 50 radijusa minske bušotine od središta detonacije (Zagreba 2003).

Esen et al su predstavili novi model za predviđanje zone drobljenja i to na osnovu ispitivanja u betonskim blokovima. Zaključili su da je omjer radijusa zone drobljenja i radijusa minske bušotine (r_c/r_0) u funkciji vrste eksploziva, svojstava stijene i radijusa minske bušotine (Esen et al 2003).

Dessureault na osnovu detoniranja ANFO-eksploziva u minskoj bušotini navodi veličine pojedinih zona oštećenja, a koje su prikazane u tablici 5-2 (Dessureault 2004).

Tablica 5-2. Veličine zona oštećenja (Dessureault 2004).

Zona oštećenja	Veličina zone oštećenja
zona drobljenja	4 – 6 radijusa minske bušotine
zona loma	12 – 15 radijusa minske bušotine
zona pukotina	50 – 60 radijusa minske bušotine

Li Chun-ruí daje 2009. godine izraze po kojima se mogu izračunati veličine pojedinih zona oštećenja (Li Chun-ruí 2009).

Li Chun-ruí za radijus I. zone (zona drobljenja) smatra da je nekoliko puta manji od radijusa eksplozivnog punjenja minske bušotine, a izrazi za izračun veličine zone drobljenja su (Li Chun-ruí 2009):

$$r_c = \left(0,2 \rho_s \frac{c_p^2}{\sigma_c}\right) R_b \quad (5-5)$$

$$R_b = \sqrt[4]{\frac{p_b}{\sigma_0 r_b}} \quad (5-6)$$

$$\sigma_0 = \sigma_c \sqrt[4]{\rho_s \frac{c_p}{\sigma_c}} \quad (5-7)$$

gdje je:

ρ_s – gustoća stijene (kg/m^3),

c_p – brzina zvučnog vala u stijeni (m/s),

R_b – radijus pukotina nastalih detonacijom eksplozivnog punjenja u minskoj bušotini (m),

σ_c – jednoosna tlačna čvrstoća stijene (Pa) i

σ_0 – troosna čvrstoća stijene (Pa).

Prema njemu, radijus II. zone (zona loma) moguće je izračunati primjenom teorije elastičnosti i kriterija za procjenu čvrstoće stjenke uz pretpostavku da je kvazi-statički tlak koji djeluje na stjenke bušotine posljedica tlaka ekspanzije plinova (Li Chun-ruí 2009).

Izrazi za izračun veličine zone loma su u tom slučaju:

$$R_p = \sqrt{\frac{p_j}{\sigma_t}} r_b \quad (5-8)$$

$$p_j = \frac{1}{8} \rho_s v_d^2 \left(\frac{r_c}{r_b} \right)^6 \quad (5-9)$$

gdje je:

R_p – radijus zone loma (m),

P_j – kvazi-statički tlak (tlak nastao uslijed ekspanzije plinova) koji djeluje na stjenke bušotine (Pa),

σ_t – vlačna čvrstoća stijene (Pa),

r_b – radijus minske bušotine (m) i

r_c – radijus eksplozivnog punjenja minske bušotine(m).

III. zona je područje nezahvaćeno pukotinama jer s udaljenošću tlakovi udarnog vala i ekspandirajućih plinova previše oslabe da bi mogli prouzročiti bilo kakvo oštećenje stjenke mase nego samo uzrokuju vibracije (Li Chun-rui 2009).

Izraz za izračun veličine III. zone glasi (Li Chun-rui 2009):

$$R_s = (1,5 \sim 2,0) \cdot \sqrt[3]{q} \quad (5-10)$$

gdje je:

R_s – radijus zone vibracija (m) i

q – specifična potrošnja eksploziva (kg/m^3).

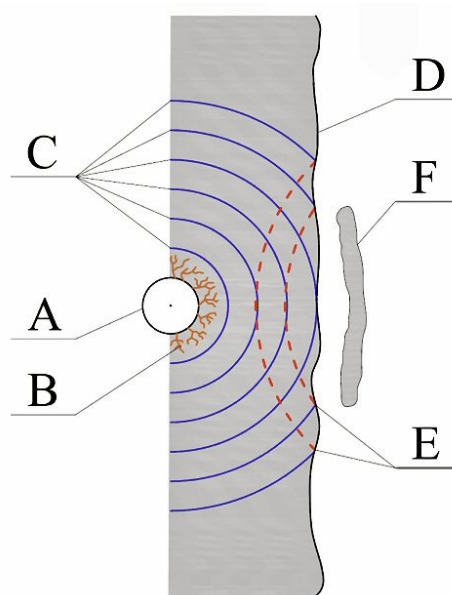
5.2. Teorije miniranja – modeli loma stijene energijom eksploziva

Teorije miniranja prezentirane su zajedno s faktorima koji utječu na lom, frakturiranje, fragmentaciju i općenite kriterije projektiranja miniranja. Teorije miniranja formulirane su na iskustveno ustanovljenim pretpostavkama i na laboratorijskim ispitivanjima, istraživanjima na terenu i matematičkim i fizikalnim modelima koji su prilagođeni iz ostalih disciplina znanosti.

5.2.1. Teorija refleksije (reflektirani valovi naprezanja)

Stariji autori Obert i Duvall, Hino i Duvall i Atchison su 50-ih godina prošlog stoljeća analitički pokušali objasniti mehanizam loma stijene prilikom detonacije eksplozivnog punjenja u minskoj bušotini blizu slobodne površine. S obzirom da je stijena manje otporna na vlačna naprezanja odnosno vlačna čvrstoća je manja od tlačne čvrstoće stijene, isticali su dominantnu ulogu vlačnih valova nastalih refleksijom od slobodne površine tlačnih udarnih valova u procesu miniranja. Prema njima ekspanzijski rad plinova s visokom temperaturom i pod visokim tlakom neznatno utječe na rezultate miniranja. Tlak plinova djeluje na stjenku minske bušotine i stvara tlačni udarni val s visokom amplitudom tlaka koji drobi stijenu u neposrednoj okolini bušotine. S obzirom da takav tlačni udarni val izaziva naprezanja i deformacije u stjenkoj masi naziva se još i tlačni deformacijski val odnosno val naprezanja. Veličina zone drobljenja stijene oko bušotine je relativno mala. Val napreduje radijalno u svim smjerovima brzinama koje su veće od brzine zvuka u mediju kojim val prolazi. Refleksijom tlačnog udarnog vala od slobodne površine nastaje vlačni udarni val koji se vraća nazad prema mjestu detonacije. S obzirom da je vlačna čvrstoća stijene mala u odnosu na tlačnu čvrstoću, kombiniranim djelovanjem vlačnih i tlačnih valova dolazi do odlamanja segmenata stijene na površini slobodne površine (Antičević 2011; Ester 1996; Hino 1956).

Osnovni koncept loma refleksijom prikazan je na slici 5-3.



Kazalo:

- A – minska bušotina – detonacija eksplozivnog punjenja,
- B – zona drobljenja zidova bušotine,
- C – širenje tlačnog deformacijskog vala u svim smjerovima od minske bušotine,
- D – slobodna površina,
- E – dio tlačnog deformacijskog vala putuje prema van, a dio se reflektira od slobodne površine kao vlačni val, dolazak drugog tlačnog vala do slobodne površine (ponavlja se postupak odvaljivanja segmenata slobodne površine) i
- F – odlom segmenata slobodne površine (ljuskanje stijene).

Slika 5-3. Osnovni koncept teorije refleksije (Antičević 2011; Ester 1996).

5.2.2. Teorija ekspanzije plinova

Ovu teoriju zastupaju Persson et al. i Johansson i Persson, koji tvrde da se radijalne pukotine formirane udarnim valom, šire i produljuju zajedničkim radom reflektiranog vlačnog vala i plinovima pod visokim tlakom koji ekspandiraju u novonastalim pukotinama (Ester 1996; Perrson et al 1970).

Ustanovili su da se na udaljenosti od približno 2 radijusa od stjenke minske bušotine formiraju radijalne pukotine koje se nastavljaju širiti kroz stijenu prema slobodnoj površini i natrag prema bušotini. Najveći broj radijalnih pukotina formira se odmah do stjenke bušotine,

a u manjem broju nastaju i dalje od bušotine. Do odlamanja stijene doći će tek kad te pukotine stignu do slobodne površine (Ester 1996).

Porter i Fairhaust te Langefors i Kihlstrom tvrde da je tlak plinova dovoljno visok za proširenje radijalnih pukotina dok Kutter i Fairhurst tvrde da ovaj tlak ima utjecaj samo na izdizanje stjenskog materijala. Snimke miniranja snimljene brzim kamerama pokazuju da dolazi do dodatne fragmentacije tijekom ekspanzije plinova koji dižu stjensku masu i odbacuju je s etaže (Antičević 2011; Ester 1996).

Coursen, Britton et al i Brinkman navode tlak ekspandirajućih plinova kao glavni mehanizam loma stijene eksplozivom. Za ostale mehanizme loma tvrde da ne pridonose u značajnijoj mjeri lomu stijene (Coursen 1980; Britton et al 1984; Brinkman 1987).

Osnovne karakteristike teorije ekspanzije plinova su:

- radijalne pukotine ne nastaju neposredno uz bušotinu nego na udaljenosti od približno dva radijusa bušotine i protežu se od bušotine prema slobodnoj površini i
- pomak stijene ne događa se sve dok radijalne pukotine pod tlakom ekspandirajućih plinova ne dođu do slobodne površine (Antičević 2011).

5.2.3. Teorija međudjelovanja širenja radijalnih pukotina i reflektiranog udarnog vala

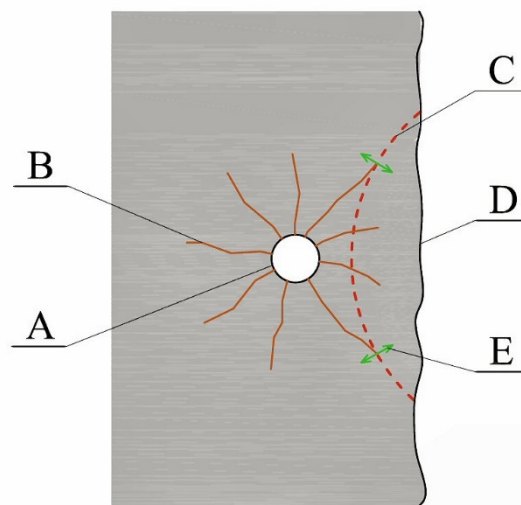
Slično teoriji ekspanzije plinova, autori Field i Ladeguaard-Pedersen su istraživali međusobni odnos između radijalnih pukotina i reflektiranog udarnog tlačnog vala. Istraživanja su provedena u laboratoriju na modelima od pleksistakla. Pleksistaklo ili akrilno staklo, kao produkt poliakrilnih smola, vrlo je tvrd, teško lomljiv i otporan materijal te kao takav pogodan je za istraživanja učinka eksploziva u laboratorijskim uvjetima. Istraživanja su pokazala važnost interakcije širenja radijalnih pukotina i tlačnog vala koji nastaje na slobodnoj površini uslijed refleksije početnog udarnog ili tlačnog vala (Antičević 2011; Ester 1996).

Detonacijom eksplozivnog punjenja u minskoj bušotini tlačni udarni val putuje sferično u svim smjerovima od mjesta pobude, te na svom putu stvara radijalne pukotine. Dolaskom do slobodne površine tlačni val se reflektira i vraća u obliku tlačnog vala. Interakcija između reflektiranog vala i radijalnih pukotina dovodi do povećanja brzine širenja pukotina koje su skoro paralelne s frontom reflektiranog tlačnog vala (Antičević 2011; Ester 1996).

Vlačni valovi povećavaju vlačna naprezanja na vrhu tih pukotina koje su paralelne zakrivljenoj fronti vlačnog vala. Uslijed toga se pukotine razvijaju u smjeru pod kutom od 45° – 80° od okomice na slobodnu površinu. Takve pukotine će se širiti većom brzinom od ostalih pukotina, a relaksacijom okolnog materijala njihova brzina svesti će se na brzinu ostalih pukotina (Antičević 2011; Ester 1996).

Ova teorija potvrdila je ranije rezultate istraživanja od strane istraživača Persson, Ladegaard-Pedersen i Kihlström.

Interakcija između radijalnih pukotina i reflektiranog vlačnog vala prikazana je na slici 5-4.



Kazalo:

- A – minska bušotina – detonacija eksplozivnog punjenja,
- B – radijalne pukotine,
- C – vlačni val reflektiran od slobodne površine,
- D – slobodna površina i
- E – vlačna naprezanja.

Slika 5-4. Interakcija između radijalnih pukotina i reflektiranog vlačnog vala (Ester 1996).

5.2.4. Teorija ekspanzije plinova – lom savijanjem

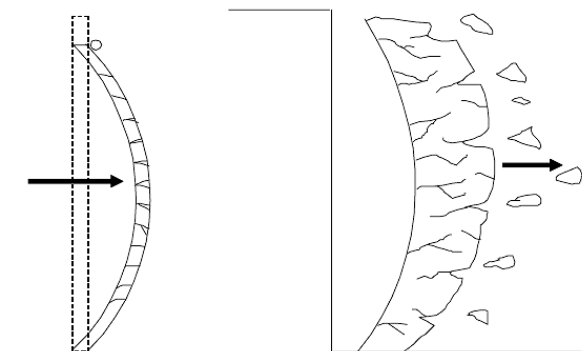
U ovoj teoriji, kao i u prethodne dvije, tlak plinova se smatra glavnim uzrokom loma stijene. Autor Ash smatra da tlak plinova uzrokuje lom stijene i to u iznosu od 90 % energije

potrebne za lom stijene savijanjem, dok tlak detonacije sudjeluje sa samo 10 % energije (Ash 1973).

Tlak detonacije djeluje trenutno prema bilo kojem dijelu stjenke minske bušotine, dok se tlak plinova duže zadržava, sve dok se ne formira proširena šupljina (Ash 1973).

Formiranje radijalnih pukotina je samo na ravninama paralelnim s osi bušotine, ali pod uvjetom direktnog kontakta s eksplozivnim punjenjem, odnosno u neposrednoj blizini stjenke bušotine, gdje se stvaraju tangencijalna naprezanja. Lom refleksijom tlačnog vala od slobodne površine je zanemariv. Tlak plinova uzrokuje radijalne pukotine koje napreduju izbojnicom do slobodne površine i dovodi do pomaka stijene pomoću savijanja u smjeru najmanjeg otpora (Haghighi et al 1985).

Lom stijene savijanjem je analogan savijanju i lomu grede kao što je prikazano na slici 5-5.



Slika 5-5. Model savijanja i loma grede poslije detonacije (Antičević 2011; Atlas Powder Company 1987).

5.2.5. Teorija valova naprezanja i ekspanzije plinova

Na osnovu rezultata laboratorijskih ispitivanja na homogenom materijalu od pleksistakla i na modelima stijena postavljen je koncept teorije loma stijene valovima naprezanja i ekspanzije plinova. Teorija, koje su iznijeli autori Kutter i Fairhurst, kao glavne mehanizme loma stijene navodi valove naprezanja i tlak nastao ekspanzijom plinova (Antičević 2011).

Udio energije udarnog vala je manji dio ukupno oslobođene energije eksplozivnog naboja, međutim dovoljnog je iznosa da uzrokuje ekstenzivan lom u blizini bušotine. Mjerenja u granitu su pokazala da taj udio iznosi 10 % – 18 %, dok je u soli samo 2 % – 4 %. Ostatak energije otpada na tlak plinova (Ester 1996).

Zona radijalnih pukotina je prvi sistem pukotina koji se razvija oko proširene bušotine, te odmah do nje nastaje prsten radijalnih pukotina koje su međusobno na većem razmaku. Po ovoj teoriji širina zone radijalnih pukotina ovisi o:

- vlačnoj čvrstoći stijene,
- brzini prostiranja valova u stijeni,
- tlaku ostvarenom detonacijom eksplozivnog punjenja,
- svojstvima korištenog eksploziva i
- količini apsorpcije energije od strane stjenke mase (Dowding i Aimone 1992).

Autori su istraživanjem zaključili da promjer frakturirane zone za koncentrirana punjenja ili naboje iznosi približno 6 promjera bušotine i 9 promjera za izdužene naboje (Antičević 2011; Ester 1996).

Kao glavni zaključak ove teorije navodi se da valovi naprezanja i plinovi pod visokim tlakom nisu zasebno nego isključivo zajednički odgovorni za lom i frakturiranje stijene (Dowding i Aimone 1992).

5.2.6. Kombinirana teorija koja uključuje ekspanziju plinova, valove naprezanja, pukotine i refleksije

Ovu teoriju su razvili Lang i Favreau, a proširili su je Hagan, Persson i Oriard. Mehanizam loma stijene je podijeljen u tri faze.

U prvoj fazi, detonacijom eksplozivnog naboja, u nekoliko milisekundi stvara se visoka temperatura i plinovi pod visokim tlakom. Kada detonacijski val, koji putuje brzinom od 2000 m/s do 6000 m/s, uđe u stijenu, udarni tlačni val drobi stjenku masu oko bušotine na udaljenosti od 1 do 2 promjera eksploziva (Ester 1996).

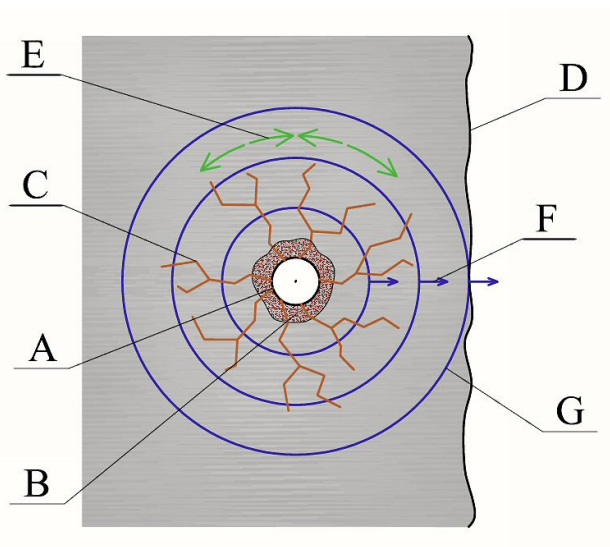
Fronta tlačnog vala se širi, razina naprezanja brzo opada ispod vrijednosti dinamičke tlačne čvrstoće stijene, zdrobljena zona dolazi pod utjecaj intenzivne radijalne kompresije, koja

uzrokuje tangencijalna vlačna naprezanja. Kada ta naprezanja prijeđu dinamičku vlačnu čvrstoću stijene stvaraju se radijalne pukotine (Dowding i Aimone 1992).

Dubina prodiranja radijalnih pukotina ovisi o energiji eksploziva i parametrima čvrstoće stijene, i može iznositi 40 do 50 puta više od promjera bušotine.

Prilikom prolaska tlačnog vala kroz stijenu, koncentrične pukotine radijalno ekspandiraju, što rezultira rasterećenjem naprezanja u pukotinama u neposrednoj blizini bušotine. Te koncentrične pukotine nastaju iza cilindričnih površina i postupno se formiraju sve bliže slobodnoj površini (Ester 1996).

Prva faza mehanizma loma stijene prikazana je na slici 5-6.



Kazalo:

- A – minska bušotina,
- B – zdrobljena zona,
- C – radijalne pukotine,
- D – slobodna površina,
- E – tangencijalna naprezanja,
- F – fronte tlačnih valova i
- G – tlačni udarni valovi.

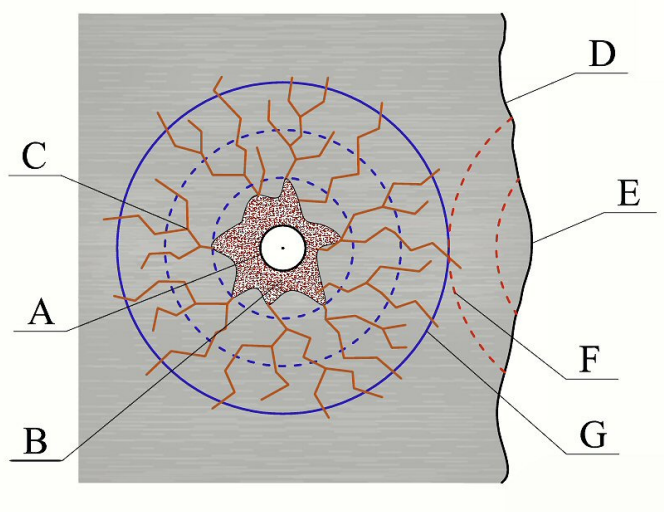
Slika 5-6. Prva faza mehanizma loma stijene prema kombiniranoj teoriji (Antičević 2011; Ester 1996).

U drugoj fazi, kada udarni val dođe do slobodne površine, reflektira se na način da tlak naglo padne na negativnu vrijednost te se formira vlačni val. Vlačni val vraća se nazad u stijenu, a s obzirom da materijal pruža manji otpor na vlak nego na tlak, nastaju primarne pukotine

sloma zbog premašivanja vlačne čvrstoće stijene. Ako su ta vlačna naprežanja dovoljno velika, ona mogu uzrokovati ljuštenje (odlamanje) slobodne površine. U lomu stijene, čini se da je efekt ljuštenja od sekundarnog značenja. Autori ove teorije navode da naprežanja u stjenjnoj masi, nastala djelovanjem eksploziva, moraju biti reda veličine 8 puta veća od normalnih naprežanja da bi uzrokovala slom stjenjske mase djelovanjem isključivo (samo) reflektiranog udarnog vala (Antičević 2011; Hartman 1992).

U prvoj i drugoj fazi djelovanje energije udarnog vala priprema stijenu na način da inducira brojne male pukotine. Mišljenje autora je da energija udarnog vala u većini slučajeva iznosi samo 5 % do 15% ukupne energije eksploziva. To ukazuje da udarni val nije direktno jedino odgovoran za lom stjenjske mase, ali priprema uvjete za daljnje faze procesa loma (Antičević 2011; Dowding i Aimore 1992).

Druga faza mehanizma loma stijene prikazana je na slici 5-7.



Kazalo:

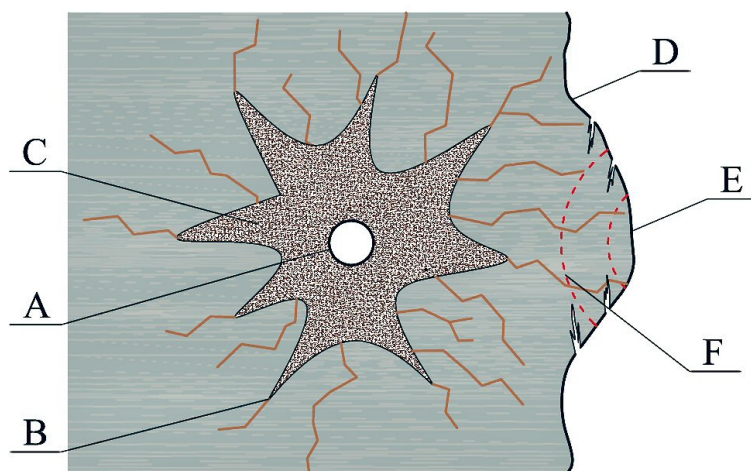
- A – minska bušotina,
- B – proširenje zdrobljene zone,
- C – proširenje radijalnih pukotina,
- D – slobodna površina,
- E – početak ljuštenja,
- F – reflektirani vlačni valovi i
- G – tlačni udarni valovi.

Slika 5-7. Druga faza mehanizma loma stijene prema kombiniranoj teoriji (Antičević 2011; Ester 1996).

U trećoj fazi dolazi do rasterećenja stijene uslijed radijalne ekspanzije i refleksije tlačnog vala te je plinovima omogućena ekspanzija i time otvaranje pukotina nastalih udarnim valom i početak izbacivanja stijene u smjeru slobodne površine (Hartman 1992).

Tu fazu karakterizira stvaranje „kupole“ oko bušotine. Kako se taj proces odvija uslijed efekta ekspandirajućih plinova, tako nastaje značajan broj novih pukotina zbog posmičnog loma stjenke mase prilikom ljuštenja (lučenja) stijene u smjeru slobodne površine (Antičević 2011).

Treća faza mehanizma loma stijene prikazana je na slici 5-8.



Kazalo:

- A – minska bušotina,
- B – nastavak proširenja radijalnih pukotina,
- C – ekspanzija plinova pod visokim tlakom,
- D – slobodna površina,
- E – odbacivanje materijala i
- F – reflektirani vlačni valovi.

Slika 5-8. Treća faza mehanizma loma stijene prema kombiniranoj teoriji (Antičević 2011; Ester 1996).

5.2.7. Teorija jezgre ili valova naprezanja i pukotina

Na sveučilištu Maryland 70-ih godina 20. st. razvijena je i definirana tada nova teorija, pri čemu su laboratorijska ispitivanja provedena na modelima od homelita-100 i to najprije u

homogenim modelima, a kasnije dodavanjem pukotina koje su simulirale geološke diskontinuitete sa svrhom približavanja modela stvarnim uvjetima na terenu. Istraživanju i razvijanju ove teorije pridonijeli su brojni autori Fournery, Dally, Rossmanith i Forney, Fournery i Barker (Antičević 2011; Ester 1996; Perrson et al 1993).

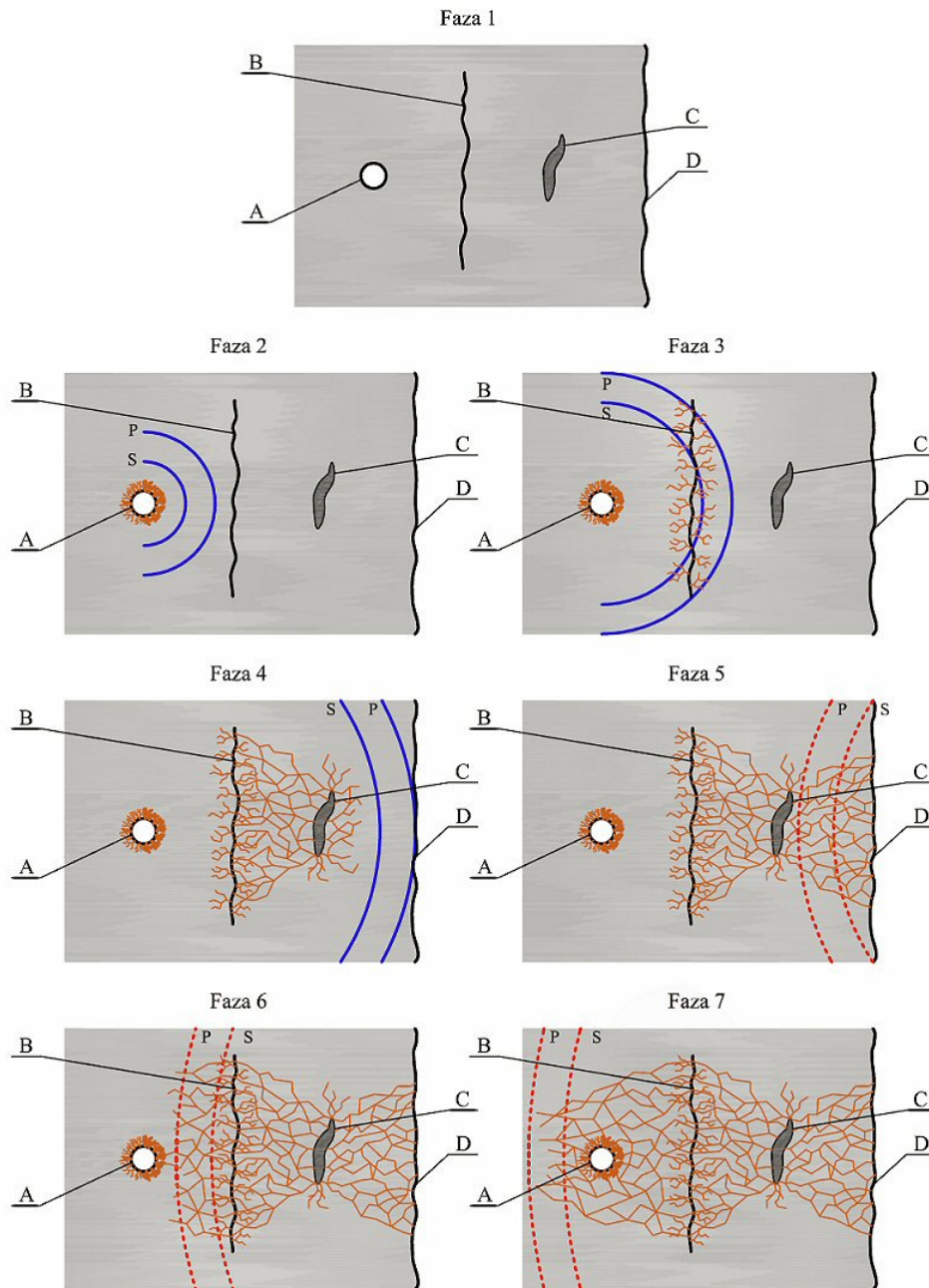
U ovoj teoriji, za razliku od do sada navedenih, autori su pokazali da su valovi naprezanja dominantni i vrlo značajni u procesu fragmentacije i da uzrokuju značajnu količinu pukotina u zonama koje su udaljenije od bušotine. Takve zone su definirane različitim diskontinuitetima i pukotinskim sklopovima koji djeluju kao jezgra ili epicentar za daljnje formiranje, razvoj i ekstenziju pukotina (Scoble 1997; Rossmanith et al 1987).

Prema ovoj teoriji, stvarni mehanizam propagiranja udarnih valova i njihove interakcije u oštećenom mediju vrlo je kompleksan, te uključuje slijedeće faze (Rossmanith 2002):

- detonacija eksplozivnog punjenja u bušotini,
- proširenje pukotina oko bušotine,
- ekstenzija zdrobljene zone,
- dinamička stabilnost pukotina,
- početak nastanka oštećenja,
- brzo propagiranje valova i deformacija stjenske mase,
- grananje pukotina,
- interakcija pukotina i reflektiranih valova,
- nestabilnost u smjeru pukotine i
- slučajni progresivni lom.

U neoštećenom materijalu samo 8 do 12 dominantnih pukotina uspije prijeći usku zonu oko bušotine i doseći značajne udaljenosti. Te pukotine ne utječu na fragmentaciju materijala. U materijalu koji sadrži pukotine fragmentacija je drugačija (Ester 1996; Ghosh et al 1995).

Na slici 5-9. prikazana je simulacija geološkog sklopa stjenske mase, pri čemu su između minske bušotine i slobodne površine smještena dva diskontinuiteta različitih oblika, vlačna pukotina i malo oštećenje. Osim navedenog, ostale površine u mediju su homogene i nemaju oštećenja.



Kazalo:

- A – miska bušotina,
- B – diskontinuitet – vlačna pukotina,
- C – diskontinuitet – oštećenje,
- D – slobodna površina,
- P – elastični longitudinalni val (primarni) i
- S – elastični transverzalni val (sekundarni).

Slika 5-9. Shematski prikaz teorije jezgre ili valova naprezanja i pukotina (Antičević 2011; Ester 1996).

Faza 1 na slici 5-9 predstavlja izgled geološkog sklopa neposredno prije detonacije eksplozivnog punjenja minske bušotine. Detonacijom eksplozivnog punjenja minske bušotine tlačni valovi, P i S, prelaze na stijensku masu i šire se radijalno u svim smjerovima (slika 5-9, faza 2). Prolaskom P i S valova dolazi do iniciranja i aktivacije frakturiranja na mjestima oštećenja u mediju bez obzira na blizinu i prisutnost slobodne površine (slika 5-9, faza i 3). Kada P val dođe do slobodne površine, (slika 5-9, faze 4 i 5), reflektira se i putuje natrag kroz medij kao vlačni val. Na povratku susreće se sa S valom i stvara interferencije koje omogućavaju stvaranje novih pukotina ili širenje već postojećih pukotina. Novonastali sistem valova (PP, PS, SP, SS, PP i S, PS, i S) nastaje refleksijom od slobodne površine ili od oštećenja u mediju i pridonosi daljnjem proširenju pukotina (slika 5-9, faze 6 i 7). Važno je primijetiti da pukotine nastaju na većim udaljenostima od bušotine tako da kombinirano djeluju P i S valovi, s time da kod tog kombiniranog djelovanja od P vala djeluje kraj vala, kod S vala fronta vala (Antičević 2011, Ester 1996).

Ova teorija koja uključuje interakciju valova naprezanja i oštećenja u materijalu kao izvor i centar stvaranja i proširenja pukotina postaje sve popularnija, pa se koristi i u računalnim modeliranjima. Postoje razni pristupi ovom modeliranju, ali osnove su iste i to da su udarni i/ili valovi naprezanja odgovorni za frakturiranje i fragmentaciju materijala, a tlak plinova zajedno s impulsom koji nastaje detonacijom djeluju u smislu pomicanja razlomljenog materijala i ne pridonose značajno fragmentaciji (Antičević 2011; Forney et al 1974).

Za daljnji razvoj teorije zaslužni su Winzer i Ritter i to na osnovi pokusa koje su izveli u mjerilu 1:1 u stijeni. Njihovi rezultati govore o utjecaju valova naprezanja na stvaranje pukotina i diskontinuiteta koji je znatno veći nego što je utvrđeno prethodnim radovima (Winzer i Ritter 1983).

Najvažnija zapažanja Winzera i Rittera su:

- primijećeno je formiranje novih pukotina na čelu slobodne površine, za koje je potrebno otprilike dvostruko više vremena u odnosu na vrijeme koje je potrebno P valu da prođe udaljenost do izbojnice,
- stare pukotine su oslabljenja i lokacija za formiranje novih pukotina pri čemu one nastavljaju biti aktivne u vremenu od nekoliko desetina ms nakon detonacije eksploziva
- fragmentacija se nastavlja u blokovima stijene, nakon čega slijedi odvajanje od glavne stijenske mase djelovanjem valova naprezanja koji su „zarobljeni“ unutar tih blokova,
- na slobodnoj površini, pukotinski sklop formira se prije dolaska radijalnih pukotina od bušotine,

- ventiliranje plinova događa se relativno kasno u samom procesu i to kroz već otvorene pukotine, što ukazuje da većina pukotina koje su primijećene na slobodnom čelu iskopa nisu pod tlakom plinova,
- u masivnoj stijeni, valovi naprezanja propagiraju se većom brzinom uz malo prigušenje, ali ne stvara se puno pukotina jer nema središta za njihovo formiranje,
- veliki fragmenti formirat će se vrlo rano, i kako se pukotine otvaraju, veliki segmenti stijenske mase biti će efektivno izolirani od daljnjeg djelovanja
- u jako raspucalnoj stijeni brzina valova naprezanja biti će mala, a prigušenje će biti veće, ali će više pukotina poslužiti kao središta formiranja novih pukotina i
- pukotine se otvaraju sporije, i manje mase stijene su izolirane ranije, tako da valovi naprezanja koji pristižu kasnije mogu nastaviti povećanje i širenje pukotina (Antičević 2011; Ester 1996; Winzer i Ritter 1983).

5.2.8. Teorija dinamičkih i statičkih tlakova

Teorija se temelji na dva različita djelovanja tlaka nastalog detonacijom eksplozivnog punjenja minske bušotine na stjenku masu:

- djelovanje dinamičkog tlaka nastalih udarnim valovima i
- djelovanje statičkog tlaka ekspanzirajućih plinova.

Prilikom detonacije eksplozivnog punjenja u minskim bušotinama, oko bušotine se formira područje djelovanja tlačnih naprezanja. Ta tlačna naprezanja uzrok su radijalnih pomaka u stjenkoj masi. Mehanizam radijalnog loma iznio je Coates. Autor smatra da će oko bušotine, zbog radijalnih pomaka i zbog utjecaja udarnog tlaka detonacije, nastati vlačna sila koja djeluje tangencijalno na bušotinu, te će doći do deformacija i radijalnog loma u trenutku kada vlačna naprezanja premaše vlačnu čvrstoću stijene. (Rathore 2006; Li Chun-rui 2009).

U početku se mislilo da radijalni lom nastaje na stjenkama bušotina sve do pojave tehnologije superbrzih fotografija. Tada je primijećeno da postojeća oštećenja u stjenkoj masi predstavljaju mjesta na kojima počinje lom, a zatim postupno prolazi kroz stijenu radijalno od bušotine (Rathore, 2006; Li Chun-rui 2009). Autori ovaj mehanizam loma nazivaju mehanizmom djelovanja dinamičkog tlaka od udarnih valova.

Nakon udara uzrokovanih visokim dinamičkim tlakovima plinova pri detonaciji na stjenku bušotine, energija detonacije ne prestaje djelovati u potpunosti, plinovi svojom

ekspanzijom i dalje djeluju tlačno na već frakturiranu stijenu i imaju glavnu ulogu u lomu stijene. Stijena se drobi djelovanjem dinamičkog tlaka u kojem lom nije u potpunosti dovršen. Veliki tlak prilikom ekspanzije plinova može utjecati na radijalne i sve vrste pukotina intenzivirajući naprezanja i proširujući pukotine sve dok se u konačnici pukotine ne spoje te se time dovrši lom (Rathore 2006; Li Chun-rui 2009). Autori ovaj mehanizam loma nazivaju mehanizmom djelovanja statičkog tlaka od ekspandirajućih plinova.

Kutter i Fairhurst su objasnili ulogu statičkog tlaka stlačenih plinova nastalih detonacijom eksplozivnog punjenja u bušotini uz dinamički tlak. Naglasili su da stlačeni plinovi također mogu formirati „kvazi hidrostatsko polje naprezanja“. Hagan ovaj efekt naziva „efekt plinskog klina“ zbog toga što se plinovi nastavljaju širiti u nastale pukotine te ih, poput klina, produljivati sve dok se ne spoje i isprepletu što dovodi do fragmentacije stjenke mase (Li Chun-rui 2009).

5.3. Diskusija

Brojni autori su pokušali dati pojednostavljeno objašnjenje procesa lomljenja stijene eksplozivom te su pritom razvijene brojne teorije loma stijene koje su izvedene na temelju iskustva na terenu i brojnih eksperimenata u različitim materijalima, pleksistaklu, granitu, homogenoj stijeni i mnogim drugim materijalima.

Sve teorije imaju zajedničko da u procesu loma stijene eksplozivom djeluju dva mehanizma, mehanizam udarnih valova i mehanizam ekspandirajućih plinova.

Ono što razlikuje pojedine teorije je važnost pojedinih mehanizama loma. Važnost pojedinih mehanizama loma u pojedinim teorijama dana je na osnovu mogućnosti istraživanja i promatranja postojećim tehnologijama u vremenu nastajanja teorija. Razvojem znanosti razvijala se i tehnologija, a samim time i pojedine teorije loma koje su postajale sve kompleksnije.

U tablici 5-3 kronološki su prikazana razmišljanja raznih istraživanja o konceptu teorija miniranja, odnosno utjecaju i važnosti pojedinih pojava u mehanizmu loma te je prema tome vidljiv smjer razvoja promišljanja počevši od jednostavne teorije refleksije pa sve do kompleksnih teorija poput teorije jezgre ili teorije dinamičkih i statičkih tlakova. Utjecaj i važnost mehanizama loma definiran od strane pojedinih istraživača u tablici 3 je prikazan

brojevima od 1 do 4 pri čemu broj 1 predstavlja najvažniji, a broj 4 najmanje važan mehanizam loma.

Tablica 5-3. Prikaz teorija miniranja i mehanizama loma (Antičević 2011; Atlas Powder Company 1987).

Godina	Istraživači	Mehanizmi loma					
		Refleksija valova naprezanja	Tlačni valovi naprezanja	Ekspanzija plinova	Lom savijanjem	Jezgra – valovi naprezanja i pukotine	Dinamički i statički tlakovi
1949	Obert i Duvall	1					
1956	Hino	1					
1957	Duvall i Atchison	1					
1958	Rinehart	1					
1963	Langfors i Kihistrom		2	1			
1966	Starfield	1					
1970	Porter i Fairhurst		2	1			
1970	Persson et al		1				
1971	Kutter i Fairhurst		1	1			
1971	Field i Ladegarrd-Pederson		1	1			
1972	Johansson i Persson	2		1			
1972	Lang i Favreau	4	2	1		3	
1973	Ash			1	1		
1974	Hagen i Just		1				
1974	Forney					1	
1975	Dally					1	
1978	Barker et al					1	
1981	Rossmann i Forney					1	
1983	Winzer et al					1	
1983	Margolin i Adams					1	
1983	Mc Hugh					1	
1984	Britton et al			1			
1985	Coursen			1			
1985	Haghighi et al			1	1		
1987	Brinkmann			1			
1992	Hagan					1	
1993	Persson					1	
1995	Ghosh et al					1	
2002	Oriard					1	
2006	Rathore et al			2			1
2008	Ozkahraman	1	1				
2009	Li Chun-ru						1

Nijedna teorija u potpunosti ne daje odgovor i objašnjenje što se događa u procesu razaranja stijene energijom eksploziva u svim uvjetima miniranja i u svim vrstama i kategorijama stjenkog materijala.

Teorije miniranja prezentirane su zajedno s faktorima koji utječu na lom, frakturiranje, zone oštećenja, fragmentaciju i općenite kriterije projektiranja miniranja.

Način na koji se energija eksploziva prenosi u stijenu od izuzetnog je značaja jer utječe na naprezanja i način nastanka deformacija u stijeni te definira iniciranje pukotina i konačno frakturiranje.

Kao primarni mehanizmi loma na kojima se temelje teorije miniranja mogu se izdvojiti:

- tlačne i vlačne deformacijske (udarne) energije valova,
- refleksije udarnog vala na slobodnu površinu,
- ekspanzija plinova kroz stjensku masu,
- lom savijanjem,
- posmični valovi,
- rasterećenja stjenske mase i
- stvaranje i razvoj pukotina na diskontinuitetima.

S obzirom na činjenicu da postoji više različitih mehanizama loma s različitim udjelima djelovanja u samom lomu, moguće je utjecati na udjele pojedinih mehanizama i to na slijedeće načine:

- mijenjanjem parametara punjenja minske bušotine (korištenje razdjelnog punjenja, korištenje patrona znatno manjeg promjera u odnosu na promjer minske bušotine i sl.) i
- mijenjanjem svojstava eksploziva (smanjenje ili povećanje brzine detonacije odnosno gustoće eksploziva, a samim time i detonacijskog tlaka).

Pregledom dostupne literature ustanovljeno je da je moguća izvedba eksploziva smanjene gustoće iz postojećih gospodarskih eksploziva, odnosno njihovih komponenata i drugih tvari, odnosno, moguća je izvedba eksploziva s velikim rasponom gustoća, a samim time moguće je i utjecati na pojedine mehanizme loma.

6. ISPITIVANJA I ANALIZA REZULTATA

Ispitivanja su grupirana u tri skupine.

U prvu skupinu ispitivanja spadaju laboratorijska ispitivanja kojima su određeni granična gustoća pojedinih eksplozivnih smjesa pri kojima se postiže stabilna brzina detonacije, radne sposobnosti i brizantnost. Smanjenje gustoće i brzine detonacije te udjela udarnog djelovanja izvodilo se smjesama sastava baziranog na postojećim gospodarskim eksploziva uz dodatak ekspanziranog polistirena (EPS). Ekspanzirani polistiren (EPS) dodavan je eksplozivima u različitim volumnim omjerima. Ispitivane su sljedeće smjese:

- amonij-nitratno praškasti eksploziv s dodatkom EPS-a,
- ANFO-eksploziv s dodatkom EPS-a,
- emulzijski eksploziv s dodatkom EPS-a,
- emulzijska matrica s dodatkom EPS-a,
- emulzijska matrica s dodatkom AN-a i s dodatkom EPS-a,
- granulirani amonijev nitrat (AN) s dodatkom EPS-a i
- mljeveni AN s dodatkom EPS-a.

U drugu skupinu spadaju terenska i laboratorijska ispitivanja koja uključuju određivanje učinaka eksploziva smanjene gustoće u stjenjnoj masi te djelovanje na okolinu. Za određivanje učinka primijenjene su: metoda ljevkastih pokusa, metode mjerenja brzine detonacije u bušotini, mjerenje seizmičkog utjecaja miniranja, metode određivanja granulometrijskog sastava i dr.

U treću skupinu spadaju laboratorijska ispitivanja u svrhu određivanja detonacijskih svojstava i minersko-tehničkih obilježja eksploziva smanjene gustoće s optimalnim omjerom eksploziva i EPS-a.

Sva ispitivanja su provedena u sklopu Laboratorija za ispitivanje eksplozivnih tvari Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta akreditiranom prema zahtjevima norme *HRN EN ISO/IEC 17025:2007. Opći zahtjevi za osposobljenost ispitnih i umjernih laboratorija.*

Rezultati mjerenja su sistematizirani, analizirani i obrađeni računskim i grafičkim metodama.

6.1. Materijali korišteni za izradu eksploziva smanjene gustoće

Za ispitivanja su korišteni amonij-nitratno praškasti eksploziv komercijalnog naziva Permonex V19, ANFO-eksploziv komercijalnog naziva AN14, emulzijski eksploziv tipa voda u ulju komercijalnog naziva Lambrex 1 i emulzijska matrica. Gustoća eksploziva je smanjena dodavanjem ekspaniranog polistirena (EPS) u granulama veličine zrnaca od 1,5 mm do 3,5 mm i dodavanjem usitnjenog EPS-a različitih veličina zrnaca. EPS je dodavan u različitim volumnim omjerima.

6.1.1. Eksplozivi Permonex V19

Korišteni su slijedeći eksplozivi:

- Permonex V19,
- ANFO-eksploziv AN14 i
- Lambrex 1.

Permonex V19 je amonij-nitratno praškasti eksploziv proizvođača Explosia a.s., iz Republike Češke. Pakira se u patronama promjera Ø 28 mm, Ø 36 mm, Ø 40 mm, Ø 50 mm, Ø 60 mm, Ø 65 mm, Ø 75 mm i Ø 90 mm. Osjetljiv je na inicijalni impuls rudarske kapice br. 8. AN14 je ANFO-eksploziv pakiran u PVC-vreće proizvođača GEOBIM. Lambrex 1 je emulzijski eksploziv tipa voda u ulju proizvođača Austin Powder GmbH iz Republike Austrije. Pakira se u patronama promjera Ø 35 mm, Ø 55 mm i Ø 65 mm. Osjetljiv je na inicijalni impuls rudarske kapice br. 8. Teoretske značajke Permonexa V19 i Lambrexa 1 prema specifikaciji proizvođača prikazane su u tablici 6-1.

Tablica 6-1. Teoretske značajke korištenih eksploziva prema specifikaciji proizvođača.

	Permonex V19		Lambrex 1	
gustoća patroniranja	1,05	g/cm ³	1,20	g/cm ³
bilanca kisika	1,6	% O ₂	2,3	% O ₂
specifična energija	4242	kJ/kg	765	kJ/kg
brzina detonacije (Ø 65 mm)	4400	m/s	5500	m/s
volumen plinova	905	l/kg	910	l/kg

Laboratorij za ispitivanje eksplozivnih tvari Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta obavio je ispitivanje brzine detonacije korištenih eksploziva prema normi *HRN EN 13631-14:2004: Eksplozivi za civilnu uporabu-Jaki eksplozivi-14. dio: Određivanje brzine detonacije (EN 13631-14:2004)*. Postupak određivanja brzine detonacije i karakteristike korištenog uređaja su opisani u poglavlju 6.2.2. Za Permonex V19 određivanje brzine detonacije je obavljeno s uzorcima promjera patrone \varnothing 60 mm, duljine 660 mm i mase 2000 g. Za ANFO-eksploziv AN14 određivanje brzine detonacije je obavljeno s uzorcima eksploziva u čeličnim cijevima unutarnjeg promjera \varnothing 69 mm, duljine 500 mm i mase 1560 g. Za Lambrex 1 određivanje brzine detonacije je obavljeno s uzorcima promjera patrone \varnothing 55 mm, duljine 700 mm i mase 2083 g. Rezultati određivanja brzine detonacije korištenih eksploziva su prikazani u tablici 6-2.

Tablica 6-2. Rezultati određivanja brzine detonacije korištenih eksploziva.

		Permonex V19		ANFO-eksploziv AN14		Lambrex 1	
1. mjerenje	v_1	4273	m/s	3058	m/s	3656	m/s
2. mjerenje	v_2	4245	m/s	3239	m/s	3782	m/s
3. mjerenje	v_3	4339	m/s	3116	m/s	3744	m/s
srednja vrijednost	v_{sr}	4285	m/s	3138	m/s	3727	m/s
mjerna nesigurnost	U	$v \pm 75$					

Procjena mjerne nesigurnosti za metodu određivanja brzine detonacije eksploziva prema normi HRN EN 13631-14: 2004 je dana u pilogu 1A.

Gustoća korištenih eksploziva je određena eksperimentalno prema zahtjevima norme *HRN EN 13631-13:2003: Eksplozivi za civilnu uporabu-Jaki eksplozivi-13. dio: Određivanje gustoće (EN 13631-13:2003)* i iznosi:

- Permonex V19 – $\rho = 1,01 \text{ g/cm}^3$,
- ANFO-eksploziv AN14 – $\rho = 0,834 \text{ g/cm}^3$ i
- Lambrex 1 – $\rho = 1,25 \text{ g/cm}^3$.

Postupak određivanja gustoće eksploziva je opisan u poglavlju 6.2.1.

Za ANFO-eksploziv AN14 određen je i udio uljne faze ANFO testom na tri uzorka i srednja vrijednost iz tri mjerenja iznosi 5,6 %.

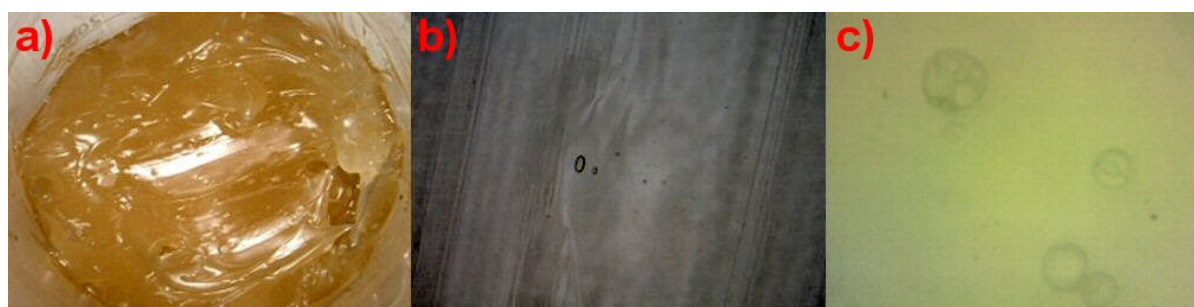
6.1.2. Emulzijska matrica

Emulzijska matrica je koloidna mješavina nitrata otopljenih u vodi, disperzirana u uljnoj fazi. Sama emulzijska matrica nema eksplozivnih svojstava nego tek kroz senzibiliziranje pomoću zrnaca koje sadrže zrak, plinsku fazu, u obliku staklenih mikrokuglica, granuliranog amonijevog nitrata ili glinenim mikrokuglicama – perlitima, postaje eksplozivna. Materijali za senzibilizaciju predstavljaju tzv. žarišne točke koje se koriste za postizanje stabilne brzine detonacije, nakon početnog, dovoljno jakog impulsa. Kemijski sastav korištene emulzijske matrice prikazan je u tablici 6-3.

Tablica 6-3. Rezultati kemijske analize emulzijske matrice.

Sastav	Jedinica	Maseni udio
Voda	%	14,20
Uljna faza i emulgator	%	5,73
Otopina anorganskih soli	%	80,07

Na slici 6-1. prikazana je emulzijska matrica bez uvećanja, s uvećanjem 50 puta i s uvećanjem 1000 puta. Mjehurići na slici s uvećanjem 1000 puta predstavljaju disperziranu fazu odnosno nitrata otopljene u vodi.



Kazalo:

- a) bez uvećanja,
- b) uvećanje 50× (mikroskop Dino-Lite Pro) i
- c) uvećanje 1000× (mikroskop BIM 313T).

Slika 6-1. Emulzijska matrica.

Gustoća rabljene emulzijske matrice određena je eksperimentalno u Laboratoriju za ispitivanje eksplozivnih tvari Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta u skladu s normom HRN

EN 13631-13:2003: *Eksplozivi za civilnu uporabu. Jaki eksplozivi. Dio 14: Određivanje gustoće (EN 13631-13:2003)* i ona iznosi $1,376 \text{ g/cm}^3$. Postupak određivanja gustoće eksploziva je opisan u poglavlju 6.2.1.

6.1.3. Ekspandirani polistiren (EPS)

Za smanjenje gustoće prethodno navedenih eksploziva korišten je ekspandirani polistiren (EPS), u granulama i EPS usitnjen mehanički. Polazni EPS proizveden je tehnologijom suspenzijske polimerizacije od strane firme DIOKI. Veličina zrnaca EPS-a u granulama je 1,5 mm do 3,5 mm, a gustoća mu je $0,019 \text{ g/cm}^3$. EPS je mehanički usitnjen mlinom za rezanje RETSCH SM200 te je prosijan na sitima 0,5 mm, 0,25 mm, 0,18 mm i 0,1 mm, a gustoća EPS-a je eksperimentalno određena na isti način kao i gustoća eksploziva. Gustoće za pojedinu veličinu zrnaca mehanički usitnjenog EPS-a su prikazane u tablici 6-4.

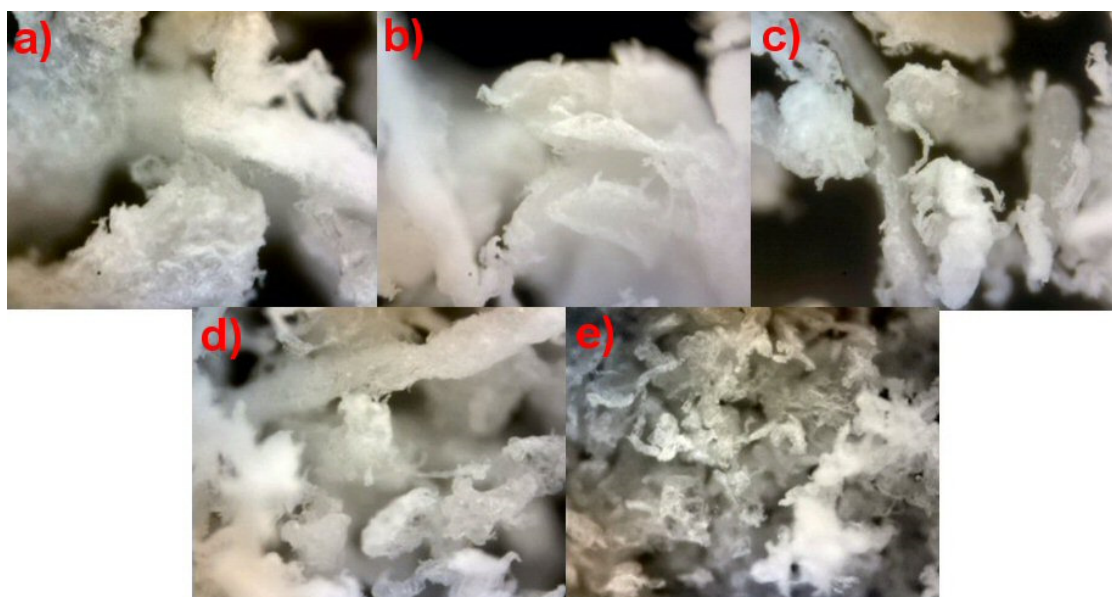
Tablica 6-4. Gustoće mehanički usitnjenog EPS-a.

Veličina zrnaca (mm)	Gustoća EPS-a (g/cm^3)
0,5	0,103
0,5-0,25	0,109
0,25-0,18	0,110
0,18-0,1	0,120
-0,1	0,151

Zrnca granuliranog EPS-a, snimljena mikroskopom Dino-Lite Pro s uvećanjem od $50\times$, prikazana su na slici 6-2, a zrnca mehanički usitnjenog EPS-a različitih veličina (+ 0,5 mm, 0,5 mm – 0,25 mm, 0,25 mm – 0,18 mm, 0,18 mm – 0,1 mm i – 0,1 mm), snimljena mikroskopom Dino-Lite Pro s uvećanjem od $500\times$, prikazana su na slici 6-3.



Slika 6-2. Zrnca granuliranog EPS-a (1,5 mm – 3,5 mm, uvećanje 50×, mikroskop Dino-Lite Pro).



Kazalo:

- a) veličina zrnaca +0,5 mm,
- b) veličina zrnaca 0,5 mm – 0,25 mm,
- c) veličina zrnaca 0,25 mm – 0,18 mm,
- d) veličina zrnaca 0,18 mm – 0,1 mm i
- e) veličina zrnaca – 0,1 mm.

Slika 6-3. Zrnca mehanički usitnjenog EPS-a različitih veličina (uvećanje 500×, mikroskop Dino-Lite Pro).

6.2.Prva skupina ispitivanja

U prvu skupinu ispitivanja spadaju laboratorijska ispitivanja kojima je određena granična gustoća pojedinih eksplozivnih smjesa pri kojima se postiže detonabilnost pojedinih mješavina te određivanje radne sposobnosti i brizantnosti eksploziva.

6.2.1. Određivanje gustoće eksploziva

Gustoća će se odrediti eksperimentalno prema zahtjevima norme *HRN EN 13631-13:2003: Eksplozivi za civilnu uporabu. Jaki eksplozivi. 13. dio: Određivanje gustoće (EN 13631-13:2003)*. Za određivanje gustoće eksploziva smanjene gustoće primijenjen je postupak određivanja gustoće tečnih eksploziva. Tečnim eksplozivima se smatraju oni eksplozivi koji se nalaze u obliku čvrstih zrnaca, u tekućem ili u obliku paste, odnosno u obliku koji omogućuje pretakanje homogene neprekinute mase između posuda bez prisile.

6.2.1.1. *Gustoća amonij-nitratno praškastih eksploziva s dodatkom EPS-a*

Gustoća eksploziva je smanjena dodavanjem EPS-a, granuliranog i mehanički usitnjenog, u različitim volumnim omjerima. Volumni omjeri su 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. Gustoća je određena na 5 uzoraka za svaki omjer eksploziv : EPS. U tablici 6-5 su prikazane srednje vrijednosti gustoća. Najmanje gustoće prikazane u tablici 6-5 predstavljaju graničnu gustoću pri kojoj se postiže detonabilnost pojedinih mješavina.

Tablica 6-5. Gustoće eksplozivnih smjesa sastavljenih od amonij-nitratno praškastih eksploziva s dodatkom EPS-a.

Vrsta eksploziva (veličina granula/zrnaca EPS-a)	Omjer eksploziv : EPS	Gustoća, ρ (g/cm ³)
Permonex V19	100:0	1,010
Permonex V19 / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	50:50	0,478
Permonex V19 / EPS (+ 0,5 mm)	50:50	0,557
Permonex V19 / EPS (+ 0,5 mm)	40:60	0,466
Permonex V19 / EPS (0,5 mm – 0,25 mm)	50:50	0,565
Permonex V19 / EPS (0,25 mm – 0,18 mm)	50:50	0,561
Permonex V19 / EPS (0,25 mm – 0,18 mm)	40:60	0,470
Permonex V19 / EPS (0,18 mm – 0,1 mm)	50:50	0,565
Permonex V19 / EPS (0,18 mm – 0,1 mm)	45:55	0,521
Permonex V19 / EPS (– 0,1 mm)	50:50	0,543

Na slici 6-4 je prikazan izgled dviju mješavina amonij-nitratno praškastih eksploziva i EPS-a neposredno prije miješanja i nakon miješanja. Iz slike 6-4 može se primijetiti da se usitnjeni EPS homogenije izmiješao s amonij nitratno praškastim eksplozivom u odnosu na granulirani EPS. Homogenije miješanje je postignuto zbog male veličine granula usitnjenog EPS-a u odnosu na veličinu granula neusitnjenog EPS-a.



Kazalo:

- a) Permonex V19 / EPS (1,5 mm – 3,5 mm) 50:50 prije miješanja,
- b) Permonex V19 / EPS (1,5 mm – 3,5 mm) 50:50 nakon miješanja,
- c) Permonex V19 / EPS (– 0,1 mm) 50:50 prije miješanja i
- d) Permonex V19 / EPS (– 0,1 mm) 50:50 nakon miješanja.

Slika 6-4. Izgled pojedinih mješavina amonij-nitratnih eksploziva i EPS-a.

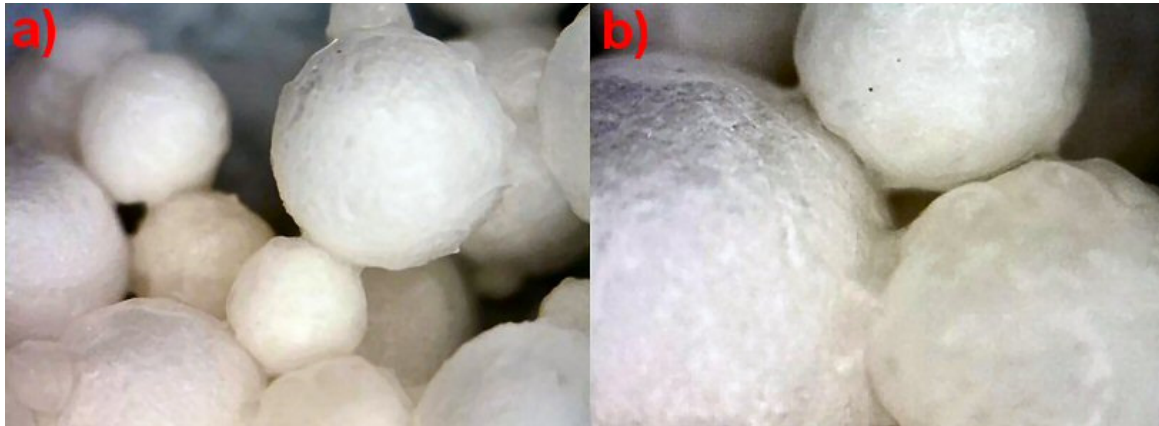
Struktura smjese amonij-nitratno praškastog eksploziva Permonex V19 i EPS-a (– 0,1 mm) u volumnom omjeru 50:50, snimljena mikroskopom Dino-Lite Pro s uvećanjem od 200×, prikazana je na slici 6-5.



Slika 6-5. Struktura smjese Permonexa V19 i EPS-a (– 0,1 mm) u omjeru 50:50 (uvećanje 200×, mikroskop Dino-Lite Pro).

6.2.1.2. Gustoća ANFO-eksploziva s dodatkom EPS-a i emulzijske matrice

Gustoća eksploziva je smanjena dodavanjem granuliranog EPS-a u različitim volumnim omjerima. Volumni omjeri su 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 i 5:95, pri čemu prvi broj predstavlja postotak volumena eksploziva, a drugi broj postotak volumena EPS-a. Uzimajući u obzir veliku razliku u gustoćama i veličini granula između ANFO-eksploziva i EPS-a, postojala je mogućnost razdvajanja granula ANFO-eksploziva od granula EPS-a. Iz tog razloga je ANFO-eksplozivu kao vezivo dodavana emulzijska matrica. Matrica je dodavana 10 % volumno jer se ta količina pokazala dostatnom za povezivanje, a bez većeg utjecaja na smanjenje gustoće. Tako pripremljenoj smjesi dodavan je EPS u različitim volumnim omjerima. Na slici 6-6. prikazana je smjesa ANFO-a, emulzijske matrice i EPS-a snimljena mikroskopom Dino-Lite Pro s uvećanjem od 50 puta i od 200 puta. Na obje slike je vidljivo da emulzijska matrica povezuje granule ANFO- eksploziva i ekspaniranog polistirena poput ljepila.



Kazalo:

a) uvećanje 50× (mikroskop Dino-Lite Pro) i

b) uvećanje 200× (mikroskop Dino-Lite Pro).

Slika 6-6. (ANFO + Matrica) / EPS 30:70.

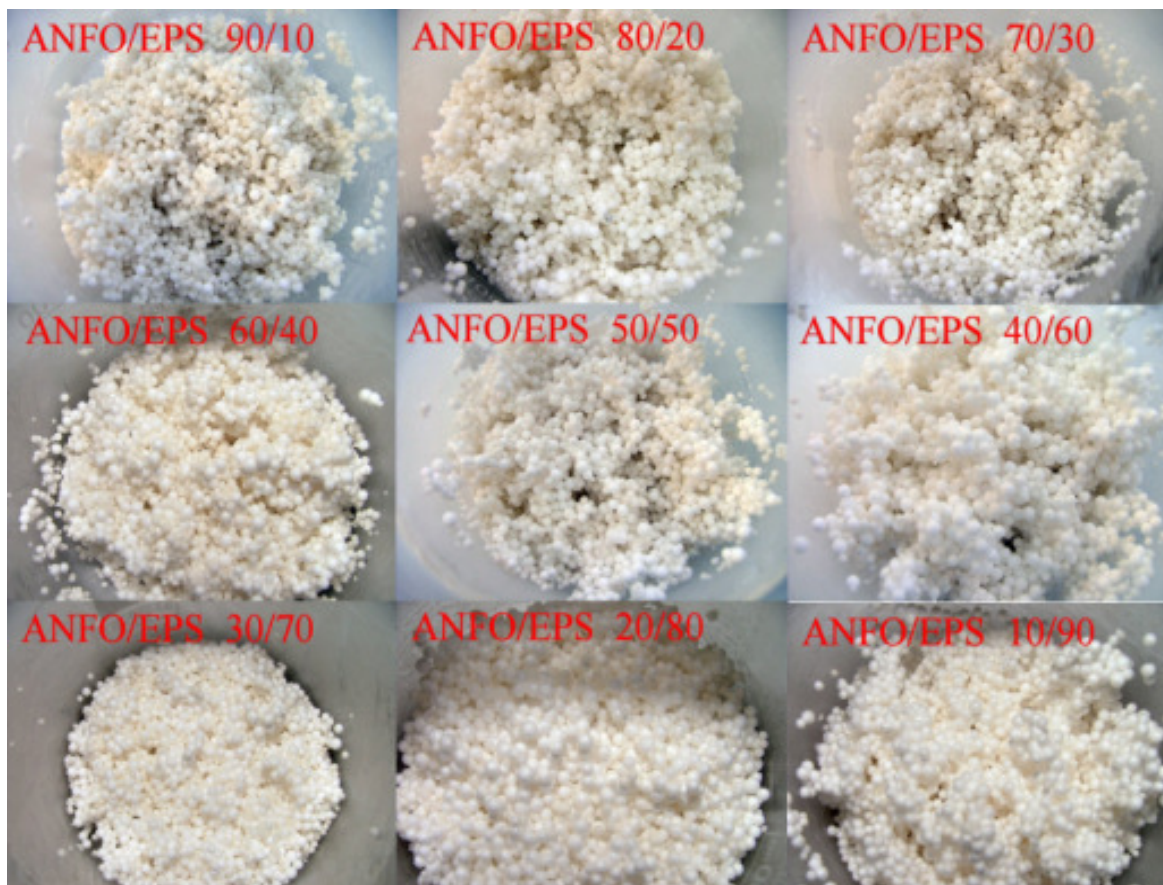
Gustoća je određena na 5 uzoraka za svaki omjer eksploziv : EPS. U tablici 6-6 su prikazane srednje vrijednosti gustoća. Najmanje gustoće prikazane u tablici 6-6 predstavljaju graničnu gustoću pri kojoj se postiže detonabilnost pojedinih mješavina.

Tablica 6-6. Gustoće ANFO-eksploziva s dodatkom EPS-a.

Vrsta eksploziva (veličina zrnaca EPS-a)	Omjer eksploziv : EPS	Gustoća, ρ (g/cm ³)
AN14	100:0	0,834
AN14 + Matrica	90:10	0,846
(AN14 + Matrica) / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	90:10	0,801
(AN14 + Matrica) / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	80:20	0,714
(AN14 + Matrica) / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	70:30	0,628
(AN14 + Matrica) / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	60:40	0,541
(AN14 + Matrica) / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	50:50	0,454
(AN14 + Matrica) / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	40:60	0,367
(AN14 + Matrica) / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	30:70	0,280
(AN14 + Matrica) / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	20:80	0,193
(AN14 + Matrica) / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	10:90	0,106

Mjerna nesigurnost prilikom određivanja gustoće je iznosila $U = \rho \pm 0,007$ (g/cm³).

Na slici 6-7 je prikazan izgled svih pojedinačnih mješavina ANFO-eksploziva i EPS-a uz dodatak matrice kao veziva.



Slika 6-7. Izgled pojedinih mješavina ANFO-eksploziva i EPS-a.

6.2.1.3. Gustoća emulzijskih eksploziva s dodatkom EPS-a

Gustoća eksploziva je smanjena dodavanjem EPS-a, granuliranog i mehanički usitnjenog, u različitim volumnim omjerima. Volumni omjeri su 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 i 5:95, pri čemu prvi broj predstavlja postotak volumena eksploziva, a drugi broj postotak volumena EPS-a. Iznimno je dodan i volumni omjer 60:40 za mješavinu eksploziva i mehanički usitnjenog EPS-a veličine čestica + 0,5 mm iz razloga što se kod mješavina s manjim volumnim udjelom eksploziva ne postiže detonabilnost. Gustoća je određena na 5 uzoraka za svaki omjer eksploziv : EPS. U tablici 6-7 su prikazane srednje vrijednosti gustoća. Najmanje gustoće prikazane u tablici 6-7 predstavljaju graničnu gustoću pri kojoj se postiže detonabilnost pojedinih mješavina.

Tablica 6-7. Gustoće emulzijskih eksploziva s dodatkom EPS-a.

Vrsta eksploziva (veličina granula/zrnaca EPS-a)	Omjer eksploziv : EPS	Gustoća, ρ (g/cm ³)
Lambrex 1	100:0	1,250
Lambrex 1 / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	50:50	0,640
Lambrex 1 / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	40:60	0,520
Lambrex 1 / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	30:70	0,398
Lambrex 1 / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	20:80	0,277
Lambrex 1 / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	10:90	0,155
Lambrex 1 / EPS (+ 0,5 mm)	60:40	0,916
Lambrex 1 / EPS (0,5 mm – 0,25 mm)	50:50	0,792
Lambrex 1 / EPS (0,5 mm – 0,25 mm)	40:60	0,701
Lambrex 1 / EPS (0,25 mm – 0,18 mm)	50:50	0,802
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
Lambrex 1 / EPS (0,18 mm – 0,1 mm)	40:60	0,701
Lambrex 1 / EPS (0,18 mm – 0,1 mm)	30:70	0,609
Lambrex 1 / EPS (– 0,1 mm)	50:50	0,771
Lambrex 1 / EPS (– 0,1 mm)	40:60	0,675
Lambrex 1 / EPS (– 0,1 mm)	30:70	0,579

Na slici 6-8. prikazana je mješavina Lambrexa 1 i EPS-a, veličine granula od 1,5 mm do 3,5 mm u volumnom omjeru 40:60, snimljena mikroskopom Dino-Lite Pro s uvećanjem od 50 puta, a na slici 6-9 mješavina Lambrexa 1 i mehanički usitnjenog EPS-a, veličine granula od 0,18 mm do 0,25 mm u volumnom omjeru 40:60, snimljena mikroskopom Dino-Lite Pro s uvećanjem od 500 puta.



Slika 6-8. Struktura mješavine Lambrexa 1 i EPS-a (1,5 mm – 3,5 mm) u omjeru 40:60 (uvećanje 50 \times , mikroskop Dino-Lite Pro).



Slika 6-9. Struktura mješavine Lambrexa 1 i EPS-a (0,18 mm – 0,25 mm) u omjeru 40:60 (uvećanje 500 \times , mikroskop Dino-Lite Pro).

Na slici 6-8. je vidljiva ravnomjerno raspoređivanje eksploziva oko granula EPS-a, dok je na slici 6-9. vidljivo neravnomjerno raspoređivanje zrnaca EPS-a. Za razliku od EPS-a u granulama, čija zrnaca imaju pravilan oblik kugle, zrnca mehanički usitnjenoga EPS-a su nepravilnih oblika. Kuglasti oblik zrnaca omogućava pravilnije raspoređivanje eksploziva oko samih zrnaca, a time i bolju homogenizaciju smjese. Eksploziv je, u tom slučaju, pravilno raspoređen unutar volumena uzorka čime je omogućeno veće sniženje gustoće eksploziva pri kojoj se postiže detonabilnost takve smjese.

6.2.1.4. Gustoća emulzijske matrice s dodatkom EPS-a

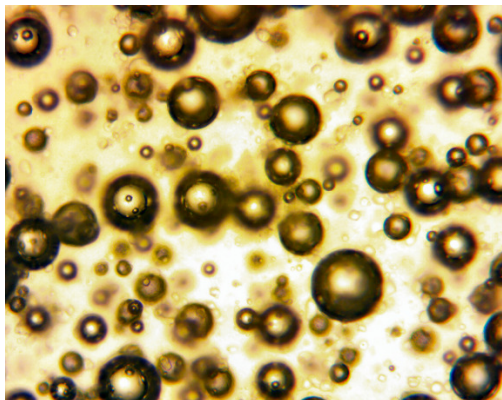
Gustoća eksploziva je smanjena na način da se emulzijskoj matrici dodavao EPS, granulirani i mehanički usitnjen, u različitim volumnim omjerima. Volumni omjeri su 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 i 5:95, pri čemu prvi broj predstavlja postotak volumena eksploziva, a drugi broj postotak volumena EPS-a. Gustoća je određena na 5 uzoraka za svaki omjer eksploziv : EPS. U tablici 6-8 su prikazane srednje vrijednosti gustoća. Najmanje gustoće prikazane u tablici 6-8 predstavljaju graničnu gustoću pri kojoj se postiže detonabilnost pojedinih mješavina.

Tablica 6-8. Gustoće emulzijske matrice s dodatkom EPS-a.

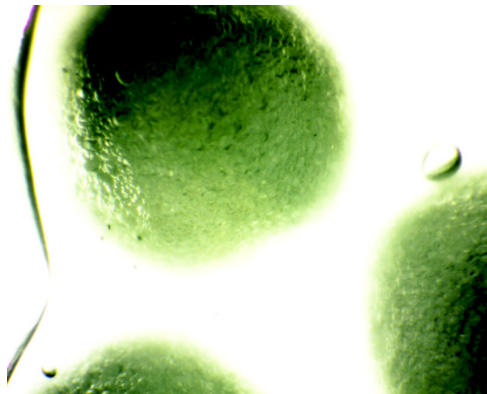
Vrsta eksploziva (veličina granula EPS-a)	Omjer eksploziv : EPS	Gustoća, ρ (g/cm ³)
Matrica / Mikrokuglice	100:0	1,175
Matrica / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	50:50	0,627
Matrica / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	40:60	0,437
Matrica / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	30:70	0,302
Matrica / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	20:80	0,218
Matrica / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	10:90	0,085

S obzirom da sama emulzijska matrica nema dovoljnu osjetljivost na udarni val dodavana joj je plinska faza, u obliku staklenih mikrokuglica i u obliku granuliranog EPS-a. Staklene mikrokuglice i granulirani EPS predstavljaju tzv. žarišne točke koje se koriste za postizanje stabilne brzine detonacije, nakon početnog, dovoljno jakog impulsa. Na slici 6-10. prikazana je emulzijska matrica senzibilizirana mikrokuglicama snimljena mikroskopom BIM 313T s uvećanjem od 200 puta, a na slici 6-11. mješavina emulzijske matrice i EPS-a u

volumnom omjeru 50:50 snimljena mikroskopom BIM 313T s uvećanjem od 40 puta. Na slikama 6-10 i 6-11 je vidljiva razlika u veličini između staklenih mikrokuglica i granula EPS-a. Emulzijska matrica senzibilizirana mikrokuglicama se koristi kao referentni, emulzijski eksploziv.



Slika 6-10. Emulzijska matrica senzibilizirana mikrokuglicama (uvećanje 200×, mikroskop BIM 313T).



Slika 6-11. Mješavina emulzijske matrice i EPS-a u volumnom omjeru 50:50 (uvećanje 40×, mikroskop BIM 313T).

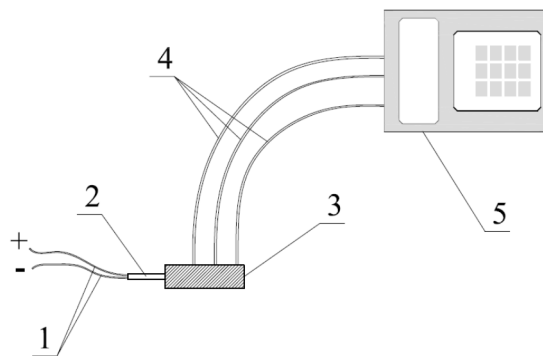
6.2.2. Određivanje brzine detonacije

Brzina detonacije je jedna od važnijih karakteristika eksploziva, a prema njenom iznosu može se ocijeniti adekvatnost eksploziva za pojedinu upotrebu. O brzini detonacije ovisi i razorna snaga, odnosno brizantnost eksploziva. Brzina detonacije izmjerena je prema zahtjevima norme *HRN EN 13631-14:2004: Eksplozivi za civilnu uporabu. Jaki eksplozivi. 14. dio: Određivanje brzine detonacije (EN 13631-14:2004)*. Brzine detonacije eksplozivnog punjenja mjerene su elektrooptičkom metodom elektroničkim satom "Explomet – Fo". Uređaj bilježi trenutak pojave svjetlosnog signala koji se svjetlovodima dovodi kronometru. Svjetlovodi se postavljaju na poznatoj međusobnoj udaljenosti iz koje se proračunava brzina detonacije eksploziva za izmjereni vremenski interval. Najveća brzina koju uređaj može mjeriti je 10000 m/s, vremenski interval između 0,1 μ s do 10 s, s točnosti od $\pm 0,1 \mu$ s. Fotografija Explometa – Fo je prikazana na slici 6-12.



Slika 6-12. Elektronički sat Explomet – Fo 2000 (Dobrilović 2008).

Shematski prikaz određivanja brzine detonacije prikazan je na slici 6-13.



Kazalo:

- 1 – električni vodiči,
- 2 – električni detonator,
- 3 – cijev s eksplozivnom tvari,
- 4 – osjetila (svjetlovodi) i
- 5 – elektronički sat.

Slika 6-13. Shematski prikaz određivanja brzine detonacije.

6.2.2.1. Brzina detonacije amonij nitratno praškastih eksploziva s dodatkom EPS-a

Izmjerena je brzina detonacije uzorcima u PVC cijevima unutarnjeg promjera \varnothing 20 mm i duljine 110 mm. Brzina detonacije eksplozivnog punjenja u PVC cijevima mjerena je na 1 segmentu s 2 osjetila međusobne udaljenosti od 50 mm. Svi uzorci su bili inicirani na jednaki

način, električnim detonatorom. Izmjerena je brzina detonacije na 10 uzoraka eksploziva i na 5 uzoraka za svaki omjer eksploziv : EPS. Na slici 6-14. prikazana je fotografija mjernog postava određivanja brzine detonacije u PVC cijevima unutarnjeg promjera \varnothing 20 mm.



Slika 6-14. Fotografija mjernog postava u PVC cijevi unutarnjeg promjera \varnothing 20 mm.

6.2.2.2. Brzina detonacije ANFO-eksploziva s dodatkom EPS-a

Izmjerena je brzina detonacije na uzorcima u čeličnim cijevima unutarnjeg promjera \varnothing 20 mm i duljine 150 mm. Brzina detonacije eksplozivnog punjenja u čeličnim cijevima mjerena je na 2 segmenta s 3 osjetila međusobnih udaljenosti od 20 mm. Svi uzorci su bili inicirani su, električnim detonatorom jednake energije iniciranja. Izmjerena je brzina detonacije na 5 uzoraka eksploziva i na 4 uzorka za svaki omjer eksploziv : EPS za oba promjera.

Na slici 6-15. prikazana je fotografija mjernog postava određivanja brzine detonacije u čeličnim cijevima unutarnjeg promjera \varnothing 20 mm.



Slika 6-15. Fotografija mjernog postava u čeličnoj cijevi unutarnjeg promjera \varnothing 20 mm.

6.2.2.3. Brzina detonacije emulzijskih eksploziva s dodatkom EPS-a

Izmjerena je brzina detonacije na uzorcima u čeličnim cijevima unutarnjeg promjera \varnothing 16 mm i duljine 100 mm i na uzorcima u čeličnim cijevima unutarnjeg promjera \varnothing 20 mm i duljine 100 mm. Brzina detonacije eksplozivnog punjenja u čeličnim cijevima mjerena je na 2 segmenta s 3 osjetila međusobnih udaljenosti od 30 mm. Svi uzorci su bili inicirani na jednak način, električnim detonatorom. Izmjerena je brzina detonacije na 10 uzoraka eksploziva za oba promjera i na 5 uzoraka za svaki omjer eksploziv : EPS za oba promjera. Na slici 6-16. prikazana je fotografija mjernog postava određivanja brzine detonacije u čeličnim cijevima unutarnjeg promjera \varnothing 16 mm, a na slici 6-17. fotografija mjernog postava određivanja brzine detonacije u čeličnim cijevima unutarnjeg promjera \varnothing 20 mm.



Slika 6-16. Fotografija mjernog postava u čeličnoj cijevi unutarnjeg promjera \varnothing 16 mm.



Slika 6-17. Fotografija mjernog postava u čeličnoj cijevi unutarnjeg promjera \varnothing 20 mm.

6.2.2.4. Brzina detonacije emulzijske matrice s dodatkom EPS-a

Izmjerena je brzina detonacije na uzorcima u čeličnim cijevima unutarnjeg promjera \varnothing 23,5 mm i duljine 150 mm. Brzina detonacije eksplozivnog punjenja u čeličnim cijevima mjerena je na 1 segmentu s 2 osjetila međusobnih udaljenosti od 40 mm. Svi uzorci su bili inicirani na jednak način, električnim detonatorom. Izmjerena je brzina detonacije na 8 uzoraka eksploziva i na 13 uzorka za svaki omjer eksploziv : EPS za oba promjera. Na slici 6-18 prikazana je fotografija mjernog postava određivanja brzine detonacije u čeličnim cijevima unutarnjeg promjera \varnothing 20 mm.



Slika 6-18. Fotografija mjernog postava u čeličnoj cijevi unutarnjeg promjera \varnothing 20 mm.

6.2.2.5. Rezultati određivanja brzine detonacije

S obzirom na rasipanje rezultata mjerenja na prvom segmentu, a što se može pripisati utjecaju inicijalnoga sredstva, rezultati nisu dani u tablicama i nisu prikazani dijagramima. Rezultati mjerenja brzine detonacije na drugom segmentu su ujednačeni i mogu se smatrati relevantnima za iskazivanje ovisnosti brzine detonacije o gustoći eksplozivnoga punjenja.

Srednje vrijednosti mjerenja brzina detonacije eksploziva i smjese volumnih omjera u PVC cijevima unutarnjeg promjera \varnothing 20 mm dane su u tablici 6-9. Vrijednosti pojedinačnih izmjerenih brzina detonacije amonij-nitratno praškastih eksploziva s dodatkom EPS-a dane su u prilogu broj 1.

Srednje vrijednosti mjerenja brzina detonacije eksploziva i smjese volumnih omjera u čeličnim cijevima unutarnjeg promjera \varnothing 20 mm dane su u tablici 6-10. Vrijednosti pojedinačnih izmjerenih brzina detonacije ANFO-eksploziva s dodatkom EPS-a dane su u prilogu broj 2.

Srednje vrijednosti mjerenja brzina detonacije eksploziva i smjese volumnih omjera u čeličnim cijevima unutarnjih promjera \varnothing 16 mm i \varnothing 20 mm dane su u tablici 6-11. Vrijednosti pojedinačnih izmjerenih brzina detonacije emulzijskih eksploziva s dodatkom EPS-a dane su u prilogu broj 3.

Srednje vrijednosti mjerenja brzina detonacije eksploziva i smjese volumnih omjera u čeličnim cijevima unutarnjeg promjera \varnothing 20 mm dane su u tablici 6-12. Vrijednosti pojedinačnih izmjerenih brzina detonacije emulzijske matrice s dodatkom EPS-a dane su u prilogu broj 4. Mjerna nesigurnost prilikom određivanja brzine detonacije je iznosila $U = v \pm$

75 (m/s). Procjena mjerne nesigurnosti za metodu određivanja brzine detonacije eksploziva prema normi HRN EN 13631-14: 2004 je dana u pilogu 1A.

Tablica 6-9. Brzina detonacije amonij-nitratno praškastih eksploziva s dodatkom EPS-a.

Vrsta eksploziva (veličina granula/zrnaca)	Omjer eksploziv: EPS	Gustoća, ρ (g/cm ³)	Brzina detonacije, v_1' (m/s)	Standardna devijacija, σ (m/s)
Permonex V19	100:0	1,010	3217	92
Permonex V19 / EPS (1,5 mm - 3,5 mm)	50:50	0,478	2094	66
Permonex V19 / EPS (+ 0,5 mm)	50:50	0,557	1875	237
Permonex V19 / EPS (+ 0,5 mm)	40:60	0,466	1553	92
Permonex V19 / EPS (0,5 mm - 0,25 mm)	50:50	0,565	1807	97
Permonex V19 / EPS (0,25 mm - 0,18 mm)	50:50	0,561	1705	112
Permonex V19 / EPS (0,25 mm - 0,18 mm)	40:60	0,470	1330	101
Permonex V19 / EPS (0,18 mm - 0,1 mm)	50:50	0,565	1680	96
Permonex V19 / EPS (0,18 mm - 0,1 mm)	45:55	0,521	1523	128
Permonex V19 / EPS (- 0,1 mm)	50:50	0,543	1813	31

Tablica 6-10. Brzina detonacije ANFO-eksploziva s dodatkom EPS-a.

Vrsta eksploziva (veličina granula)	Omjer eksploziv: EPS	Gustoća, ρ (g/cm ³)	Brzina detonacije, v_1' (m/s)	Standardna devijacija, σ (m/s)
AN14	100:0	0,834	985	94
AN14 + Matrica	90:10	0,846	1572	65
(AN14 + Matrica) / EPS (1,5 mm - 3,5 mm)	90:10	0,801	2031	68
(AN14 + Matrica) / EPS (1,5 mm - 3,5 mm)	80:20	0,714	1819	77
(AN14 + Matrica) / EPS (1,5 mm - 3,5 mm)	70:30	0,628	1629	45
(AN14 + Matrica) / EPS (1,5 mm - 3,5 mm)	60:40	0,541	1584	143
(AN14 + Matrica) / EPS (1,5 mm - 3,5 mm)	50:50	0,454	1474	116
(AN14 + Matrica) / EPS (1,5 mm - 3,5 mm)	40:60	0,367	1340	125
(AN14 + Matrica) / EPS (1,5 mm - 3,5 mm)	30:70	0,280	815	90
(AN14 + Matrica) / EPS (1,5 mm - 3,5 mm)	20:80	0,193	528	43
(AN14 + Matrica) / EPS (1,5 mm - 3,5 mm)	10:90	0,106	-	-

Tablica 6-11. Brzina detonacije emulzijskih eksploziva s dodatkom EPS-a.

Vrsta eksploziva (veličina granula/zrnaca)	Omjer eksploziv: EPS	Gustoća, ρ (g/cm ³)	Brzina detonacije (\varnothing 16 mm), v_1' (m/s)	Standardna devijacija, σ (m/s)	Brzina detonacije (\varnothing 20 mm), v_1' (m/s)	Standardna devijacija, σ (m/s)
Lambrex 1	100:0	1,250	3366	183	3491	118
Lambrex 1 / EPS (1,5 mm - 3,5 mm)	50:50	0,640	2275	132	2646	93
Lambrex 1 / EPS (1,5 mm - 3,5 mm)	40:60	0,520	2155	105	2319	88
Lambrex 1 / EPS (1,5 mm - 3,5 mm)	30:70	0,398	2022	184	2175	105
Lambrex 1 / EPS (1,5 mm - 3,5 mm)	20:80	0,277	1878	72	1915	88
Lambrex 1 / EPS (1,5 mm - 3,5 mm)	10:90	0,155	1398	33	1430	48
Lambrex 1 / EPS (+ 0,5 mm)	60:40	0,916	-	-	2834	100
Lambrex 1 / EPS (0,5 mm - 0,25 mm)	50:50	0,792	2925	55	3049	154
Lambrex 1 / EPS (0,5 mm - 0,25 mm)	40:60	0,701	2519	74	2480	125
Lambrex 1 / EPS (0,25 mm - 0,18 mm)	50:50	0,802	3023	125	3142	141
Lambrex 1 / EPS (0,25 mm - 0,18 mm)	40:60	0,713	2750	81	-	-
Lambrex 1 / EPS (0,18 mm - 0,1 mm)	50:50	0,793	3086	105	2892	67
Lambrex 1 / EPS (0,18 mm - 0,1 mm)	40:60	0,701	2616	80	2816	78
Lambrex 1 / EPS (0,18 mm - 0,1 mm)	30:70	0,609	2202	45	-	-
Lambrex 1 / EPS (- 0,1 mm)	50:50	0,771	3258	103	3243	117
Lambrex 1 / EPS (- 0,1 mm)	40:60	0,675	2906	139	2911	110
Lambrex 1 / EPS (- 0,1 mm)	30:70	0,579	2270	90	-	-

Tablica 6-12. Brzina detonacije emulzijske matrice s dodatkom EPS-a.

Vrsta eksploziva (veličina granula)	Omjer eksploziv : EPS	Gustoća, ρ (g/cm ³)	Brzina detonacije, v (m/s)	Standardna devijacija, σ (m/s)
Matrica / Mikrokuglice	100:0	1,175	5534	85
Matrica / EPS (1,5 mm - 3,5 mm)	50:50	0,627	3051	69
Matrica / EPS (1,5 mm - 3,5 mm)	40:60	0,437	2491	66
Matrica / EPS (1,5 mm - 3,5 mm)	30:70	0,302	2089	59
Matrica / EPS (1,5 mm - 3,5 mm)	20:80	0,218	1710	70
Matrica / EPS (1,5 mm - 3,5 mm)	10:90	0,085	-	-

6.2.3. Određivanje radne sposobnosti i brizantnosti eksploziva

Energija oslobođena detonacijom eksploziva može se iskoristiti 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):

$$W_{\max} = \int c_v dT \quad (6-2)$$

gdje je:

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

c_v – specifični toplinski kapacitet 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“ (Sućeska 1995). 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. Budući da je stijenka bušotine prepreka udarnom valu ekspanzije, na rubu stijenske dolazi do povećanja tlaka.

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

$$p_b = \frac{\rho v_d^2}{8} \quad (6-3)$$

gdje je:

ρ – gustoća eksplozivne tvari (kg/m^3) i

v_d – brzina detonacije (m/s).

p_d – tlak detonacije (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 njejoj gustoći. Nakon inicijalnog drobljenja udarnim djelovanjem u okolini minske bušotine, plinovi detonacije u ekspanziji ulaze u nastale pukotine te daljnje drobe stijenu. Obzirom na to, za ispitivane eksplozive u laboratorijskim uvjetima je određena ukupna radna sposobnost eksploziva te dio rada nastao udarnim djelovanjem. Primjenom eksploziva smanjene gustoće, uz smanjenje brzine detonacije te intenziteta udarnog djelovanja nastoji se smanjiti seizmički utjecaj uz zadržavanje optimalnog stupnja drobljenja stijene.

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.

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,
- linearno povećanje izbojnice,

- određivanje volumena kratera,
- ljevkastih pokusi, itd.

Radna sposobnost eksploziva smanjene gustoće određivana je za prvu skupinu ispitivanja:

- metodom otiska na čeličnoj ploči,
- ispitivanjem s dvostrukim cijevima i
- mjerenjem radne sposobnosti eksploziva modificiranim Trauzlovim testom.

Radna sposobnost eksploziva smanjene gustoće određivana je za drugu skupinu ispitivanja:

- metodom određivanja volumena kratera i
- ljevkastim pokusima.

6.2.3.1. Određivanje brizantnosti metodom otiska na metalnoj pločici

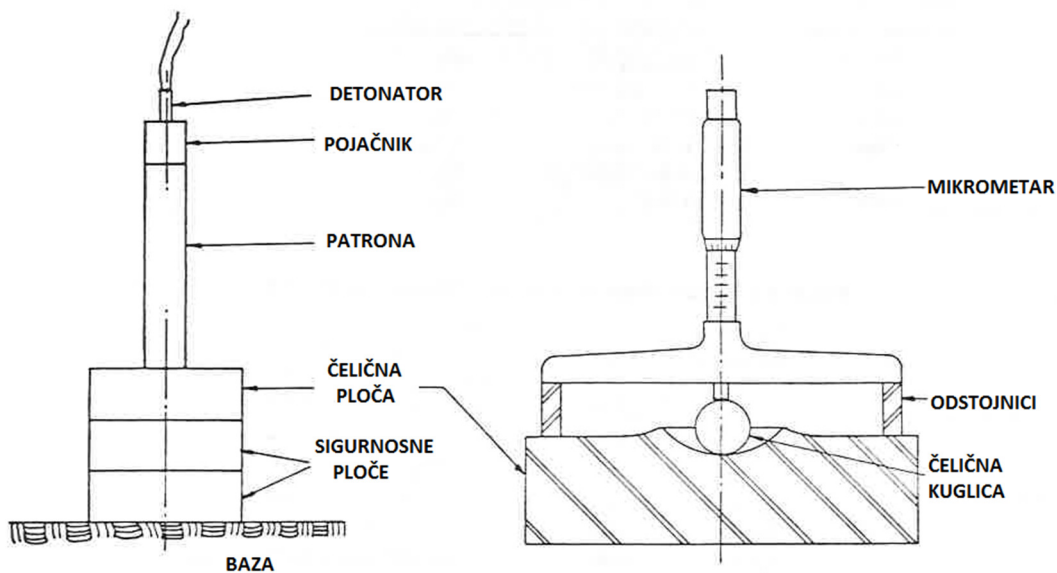
Određivanje brizantnosti eksploziva metodom otiska (udubljenja) na metalnoj pločici (engl. *Plate Dent Test*) razvijeno je ranih 40-ih godina 20. stoljeća u Laboratoriju za ispitivanje eksploziva (engl. *Explosive Research Laboratory*) u Brucetonu, SAD od strane McDougall, D. P. i Eyster E. H. Određivanje brizantnosti eksploziva metodom otiska na metalnoj pločici je bila prva metoda koja je dala vrijednosti koje su dobro korelirale s, tada dostupnim, vrijednostima detonacijskog tlaka u CJ ravnini (Gibbs i Popolato 1980). Metoda je usavršena u slijedećih 30-ak godina u znanstvenom laboratoriju u Los Alamosu (*LASL – Los Alamos Scientific Laboratory*) od strane Smith, L. C., Urizar, M. J. James, Jr., E. i Panowski, J. B.

Metoda se bazira na udubljenju metalne pločice, od hladno valjanog čelika poznate tvrdoće, nastalog detonacijom cilindričnog eksplozivnog punjenja postavljenog okomito na pločicu. Eksplozivno punjenje se inicira detonatorom s vrha punjenja na suprotnoj strani od metalne pločice. Duljina eksplozivnog punjenja mora biti dovoljno velika da omogući razvoj stabilne detonacije u eksplozivu. Metalna pločica mora biti dovoljno masivna i čvrsta kako bi oštećenje, nastalo detonacijom eksploziva, bilo ograničeno na formiranje udubljenja čija dubina ne ovisi o deformaciji same pločice. Za određivanje brizantnosti eksploziva ispitivanja se mogu provoditi na pločicama od čelika, aluminijski ili bakra jer su to materijali s odgovarajućim

poznatim svojstvima te se mogu koristiti kao referentni materijali. Postoji više načina izvođenja metode, a razlike su u dimenzijama čelične ploče na kojoj se mjeri dubina otiska, te u dimenzijama patrone eksploziva.

U prvoj varijanti patrona ispitivanog eksploziva se postavlja na čeličnu ploču debljine 15,875 mm, koja se nalazi na čeličnoj cijevi. Ova se metoda ne koristi često zbog toga što rezultira udubljenom pločom koja ima plastično deformiran otisak na dnu. Kod analize ploče teško je definirati rezultate ispitivanja (Sućeska 1995). Druga varijanta je uobičajenija i strože definirana. Čelična ploča mora biti od hladno vučenog čelika tvrdoće između 74 i 76 prema Rockwellu., debljine 51 mm, širine 152 mm i duljine 152 mm, s masivnom čeličnom bazom za oslonac. Patrona mora biti promjera \varnothing 41 mm i duljine 200 mm, a postavlja se okomito na ploču (Sućeska 1995).

Patrona se inicira rudarskom kapičom br. 8 i s dva ili više tetrilna pojačnika mase 30 g. Tetrilni pojačnik (*trinitrophenylmethylnitramine*) je osjetljivi eksplozivni spoj, koji se koristi kao „most“ između dva neosjetljiva eksploziva, odnosno između eksploziva male energije i eksploziva male osjetljivosti, da bi se prenijela dovoljna količina energije potrebne za detonaciju ispitivanog uzorka. Shematski prikaz metode prikazan je na slici 6-19, kao i način mjerenja dubine otiska nastalog u čeličnoj ploči nakon otpucavanja.



Slika 6-19. Postav za izvođenje ispitivanja otiska na čeličnoj ploči (lijevo) i mikrometar za mjerenja dubine (desno) (Persson et al, 1993).

Rezultati ispitivanja izražavaju se dubinom otiska u ploči ili kao relativna brizantnost ispitivanog eksploziva u odnosu na referentni eksploziv (obično TNT). Relativna brizantnost

dobiva se kao omjer dubine otiska ispitivanog eksploziva i dubine otiska referentnog eksploziva, izražena u postocima.

Za određivanje brizantnosti eksploziva smanjene gustoće metodom otiska na metalnoj pločici korištene su aluminijske pločice i pentrit kao referentni eksploziv. Aluminijske pločice koriste se iz razloga što se koristi eksploziv smanjene gustoće koji ima niže vrijednosti detonacijskog tlaka u odnosu na uobičajene gospodarske eksplozive, a pentrit zato što ima ispitana i dobro definirana svojstva. Kod određivanja brizantnosti metodom otiska na metalnoj pločici mjerena je brzina detonacije eksploziva te dubina, širina i volumen udubljenja na metalnoj pločici.

6.2.3.2. Mjerenja

Kao pločice za bilježenje koristile su se aluminijske pločice promjera \varnothing 100 mm i debljine 40 mm, a za referentni eksploziv su korišteni pentrit i emulzijski eksploziv. Za oslonac je korištena čelična ploča. Aluminijska pločica prije ispitivanja prikazana je na slici 6-20. Podaci o sastavu aluminijske legure pločica AlMgSi1 prema normi *HRN EN 573-3:2003: Aluminij i aluminijske legure -- Kemijski sastav i oblik gnječenih proizvoda -- 3. dio: Kemijski sastav i oblik proizvoda (EN 573-3:2013)* dani su tablicom 6-13, a fizičko-mehanička svojstva u tablici 6-14.



Slika 6-20. Aluminijska pločica prije ispitivanja.

Tablica 6-13. Granični maseni udjeli primjesa aluminijske legure AlMgSi1.

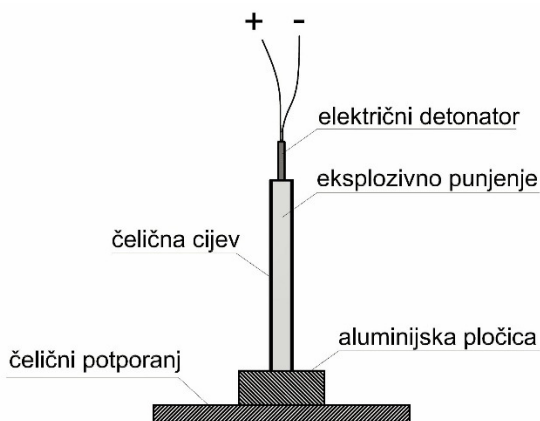
	Maseni udio (%)							
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr
Min.	0,7	-	-	0,4	0,6	-	-	-
Maks.	1,3	0,5	0,1	1	1,2	0,2	0,1	0,25

Tablica 6-14. Fizičko-mehaničke značajke korištene aluminijske legure.

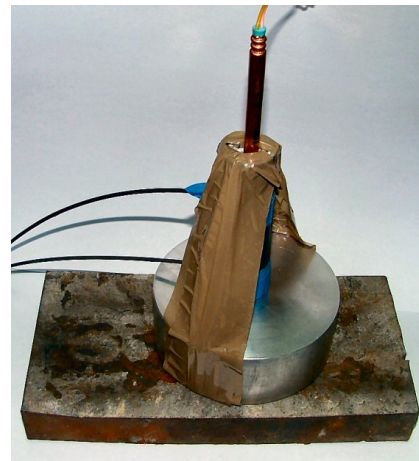
	vlačna čvrstoća, R_m (N/mm ²)	granica razvlačenja, R_p (N/mm ²)	prekidno razvlačenje, A (%)	tvrdoća po Brinelu (HB)
Min.	290	245	10	90
Maks.	340	310	16	120

Ispitano je po 5 uzoraka za svaki omjer eksploziv : EPS i za pentrit. Shemataski prikaz postava mjerenja prikazan je na slici 6-21, a fotografija postava mjerenja na slici 6-22.

Masa eksplozivnog naboja iznosila je $15,85 \pm 0,01$ g. Eksplozivni naboji su bili smješteni u čeličnu cijev unutarnjeg promjera $\varnothing 22,5$ mm, s rasponom duljina punjenja od 34 mm do 223 mm kako bi se zadržala konstantna masa punjenja. Kod otiska na metalnoj pločici izmjereno je najveće udubljenje i volumen udubljenja. Udubljenje je izmjereno mikrourom SCHUT (0 mm – 30 mm / $\pm 0,01$ mm) (slika 6-23), a volumen udubljenja je određen titracijom destiliranom vodom (slika 6-24). Pojedinačni rezultati ispitivanja su prikazani u tablici 6-15.



Slika 6-21. Shemataski prikaz postava mjerenja.



Slika 6-22. Fotografija postava mjerenja.



Slika 6-23. Određivanje udubljenja na Al pločici.



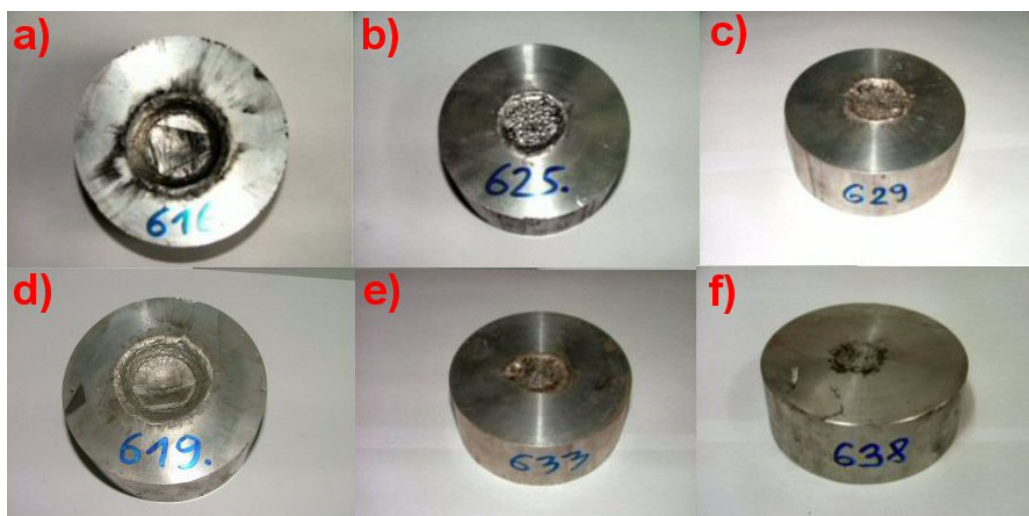
Slika 6-24. Određivanje volumena udubljenja na Al pločici.

Tablica 6-15. Rezultati određivanja brizantnosti eksploziva metodom otiska na metalnoj pločici.

Vrsta eksploziva	Gustoća eksplozivne tvari, ρ_E (g/cm ³)	Izmjerena brzina detonacije, v_d (m/s)	Izračunati tlak detonacije, p_d (kbar)	Udubljenje, h (mm)	Volumen udubljenja, V_h (cm ³)
Pentrit	1,118	5680	90,182	7,62	7,95
Pentrit	1,127	5491	84,962	7,55	8,10
Pentrit	1,161	5561	89,753	7,54	8,15
Pentrit	1,146	5831	97,386	7,92	8,25
Pentrit	1,141	5550	87,853	7,72	8,20
Emulzijski eksploziv	1,173	5495	88,533	6,92	7,25
Emulzijski eksploziv	1,176	5365	84,595	6,79	7,15
Emulzijski eksploziv	1,176	5398	85,657	6,88	7,20
Emulzijski eksploziv	1,168	5488	87,947	6,91	7,20
Emulzijski eksploziv	1,169	5312	82,496	6,87	7,15
Matrica+EPS 50/50	0,611	3095	14,629	2,18	2,65
Matrica+EPS 50/50	0,622	3071	14,659	2,00	2,35
Matrica+EPS 50/50	0,608	3057	14,204	2,16	2,70
Matrica+EPS 50/50	0,605	3063	14,200	2,12	2,50
Matrica+EPS 50/50	0,616	3031	14,139	2,18	2,75
Matrica+EPS 40/60	0,409	2498	6,375	2,20	2,65
Matrica+EPS 40/60	0,412	2390	5,881	2,10	2,55
Matrica+EPS 40/60	0,410	2494	6,385	2,02	2,60
Matrica+EPS 40/60	0,413	2506	6,481	2,01	2,40
Matrica+EPS 40/60	0,404	2454	6,083	1,95	2,10
Matrica+EPS 30/70	0,276	2036	2,860	0,96	1,15
Matrica+EPS 30/70	0,272	2061	2,891	0,81	1,05
Matrica+EPS 30/70	0,272	2098	2,999	0,80	0,90
Matrica+EPS 30/70	0,273	2117	3,059	0,99	0,95
Matrica+EPS 30/70	0,270	2092	2,950	1,02	1,10
Matrica+EPS 20/80	0,177	1640	1,190	0,37	0,40
Matrica+EPS 20/80	0,175	1688	1,249	0,25	0,25
Matrica+EPS 20/80	0,178	1707	1,298	0,12	0,10
Matrica+EPS 20/80	0,177	1622	1,165	0,16	0,05
Matrica+EPS 20/80	0,176	1684	1,249	0,04	0,00

Mjerna nesigurnost prilikom određivanja brzine detonacije je iznosila $U_v = v_d \pm 75$ (m/s). Mjerna nesigurnost prilikom određivanja gustoće je iznosila $U_\rho = \rho_E \pm 0,007$ (g/cm³). Mjerna nesigurnost prilikom određivanja udubljenja je iznosila $U_h = h \pm 0,01$ (mm). Mjerna nesigurnost prilikom određivanja volumena udubljenja je iznosila $U_V = V_h \pm 0,05$ (cm³).

Primjeri otiska na aluminijskoj pločici za svaku pojedinu eksplozivnu tvar su prikazani su na slici 6-25.



Kazalo:

- a) pentrit,
- b) M:EPS 50:50,
- c) M:EPS 40:60,
- d) emulzijski eksploziv,
- e) M:EPS 30:70 i
- f) M:EPS 20:80.

Slika 6-25. Primjer otiska na aluminijskoj pločici.

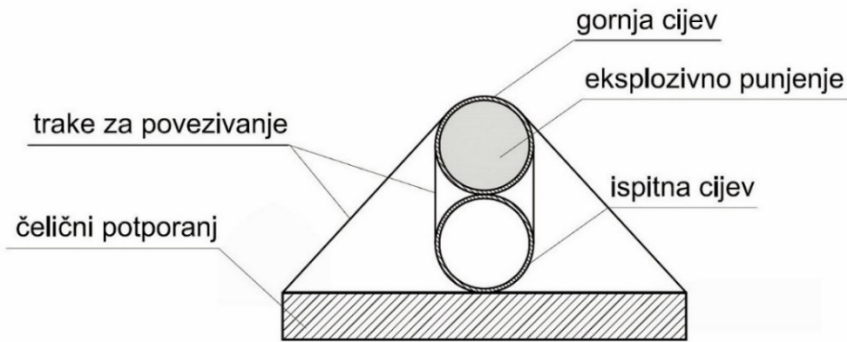
6.2.3.3. Ispitivanjima s dvostrukim cijevima

Metoda ispitivanja radne sposobnosti eksploziva dvostrukim cijevima donekle simulira uvjete u minskoj bušotini. Gornja cijev je napunjena ispitivanim eksplozivom. Udarno djelovanje detonacije eksplozivnog punjenja u čeličnoj cijevi uzrokuje deformaciju, odnosno spljoštenje donje cijevi. Deformacija se mjeri uzduž ispitne cijevi, i ona se može dovesti u vezu s oslobođenom energijom detonacijom eksploziva i s udarnim djelovanjem od udarne energije koja se javlja kao posljedica djelovanja visokog tlaka u detonacijskoj fronti (Allum 2002, Ester 2005).

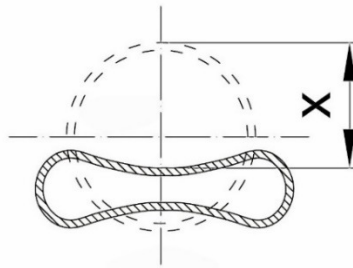
Prednost ove metode ispitivanja učinka eksploziva je u tome što su uvjeti ispitivanja slični onima u minskoj bušotini, odnosno realnim uvjetima koji vladaju prilikom miniranja

same stijene (Ester 2005). Iako je tako navedeno u literaturi, u slučaju provedenih ispitivanja dupla cijev je korištena kao mjera udarnog djelovanja.

Dobiveni podaci se uspoređuju s rezultatima ispitivanja referentnog eksploziva u jednakim uvjetima. Shematski prikaz postava mjerenja prikazan je na slici 6-26., a prikaz deformacije cijevi na slici 6-27.



Slika 6-26. Shematski prikaz postava mjerenja kod ispitivanja s dvostrukim cijevima



Kazalo:

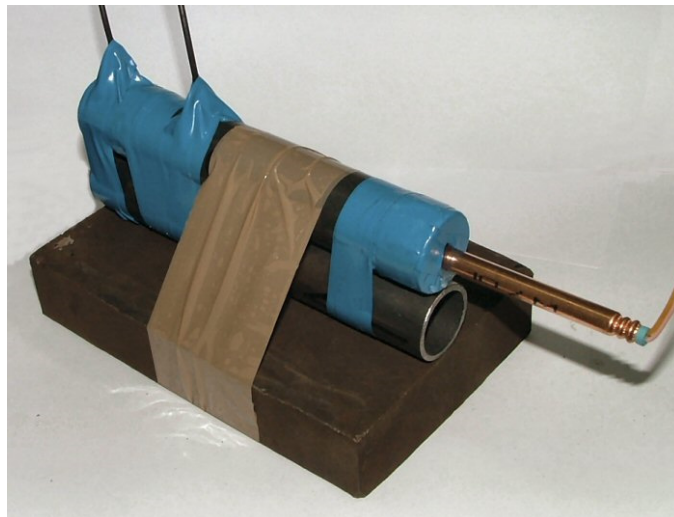
X – mjera spljoštenosti (mm).

Slika 6-27. Deformacija cijevi (Sućeska 1995)

Ispitano je po 5 uzoraka eksploziva od svake pojedine mješavine i 5 uzoraka referentnog eksploziva. Za referentne eksplozive korišteni su pentrit, ANFO i emulzijski eksploziv odnosno matrica senzibilizirana staklenim mikrokuglicama. Gornja cijev punjena eksplozivom imala je unutarnji promjer \varnothing 22 mm, duljine 250 mm i debljinu stijenke 2 mm. Donja prazna ispitna cijev imala je unutarnji promjera \varnothing 35 mm, duljine 150 mm i debljinu stijenke 5 mm za mješavine odnosno 7 mm za referentne eksplozive i mješavinu 50:50. Za referentne eksplozive korištena je ispitna cijev deblje stijenke iz razloga što pentrit i emulzijski eksploziv u potpunosti deformira cijev debljine 5 mm te nije bilo moguće odrediti razliku u deformaciju između njih. ANFO eksploziv se nije pokazao pogodnim kao referentni eksploziv jer nije deformira niti jednu cijev bez obzira na debljinu stijenke. Razlog tome je u načinu iniciranja ANFO eksploziva

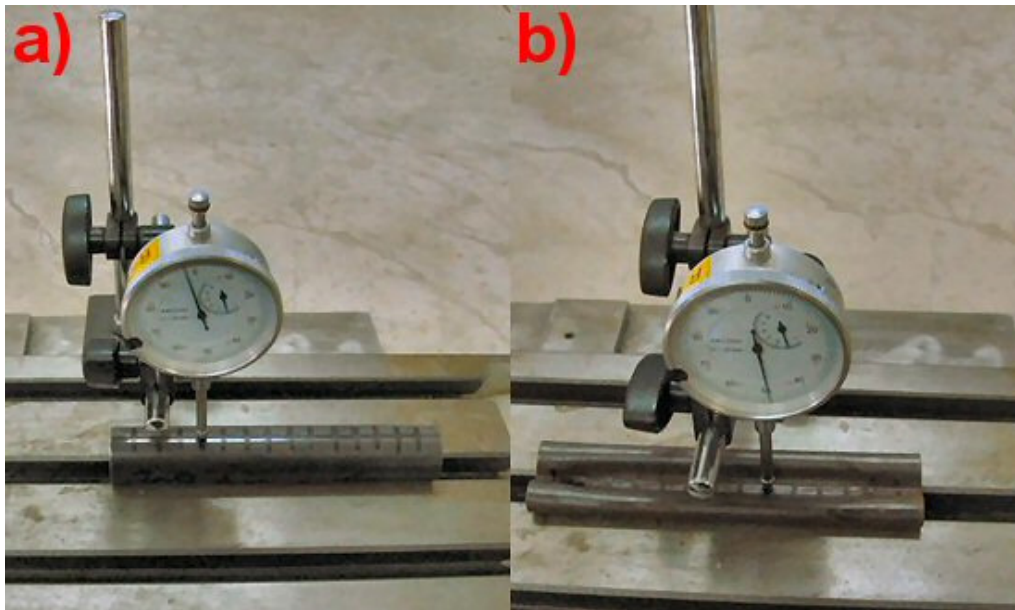
koji je iniciran detonatorom, a ne pojačnikom kako je uobičajeno. Na praznoj ispitnoj cijevi su postavljene oznake na svakih 10 mm duljine. Nulta točka je postavljena na stranu iniciranja. Na oznakama je izmjerena visina ispitne cijevi prije deformacije mikrourom SCHUT (0 mm – 30 mm / $\pm 0,01$ mm). Ljepljivom trakom spojene cijevi učvršćene su na čeličnu podložnu ploču. Deformacija ispitne cijevi izmjerena mikrourom na jednaki način na koji je izmjerena debljina ispitne cijevi prije deformacije. Isto tako, mjerena je i brzina detonacije na segmentima duljine 50 mm od 25 mm do 225 mm. Mjerene brzine detonacije u skladu su s brzinama detonacije pojedinih mješavina mjenjenim na cijevima duljine 1000 mm, sa svrhom određivanja stabilne brzine detonacije.

Fotografija postava mjerenja prikazana je na slici 6-28. Određivanje deformacije ispitne cijevi na slici 6-29. Ispitna cijev je prikazana na slici 6-30.



Slika 6-28. Fotografija postava mjerenja kod ispitivanja s dvostrukim cijevima.

Srednje vrijednosti rezultata mjerenja deformacije pri ispitivanjima s dvostrukim cijevima su prikazane u tablici 6-16. Vrijednosti pojedinačnih izmjerenih deformacija dane su u prilogu broj 5.



Kazalo:

- a) mjerenje debljine ispitne cijevi i
- b) mjerenje deformacije ispitne cijevi.

Slika 6-29. Određivanje deformacije ispitne cijevi.



Kazalo:

- a) prije deformacije i
- b) poslije deformacije.

Slika 6-30. Ispitna cijev.

Tablica 6-16. Srednje vrijednosti rezultata mjerenja deformacije pri ispitivanjima s dvostrukim cijevima.

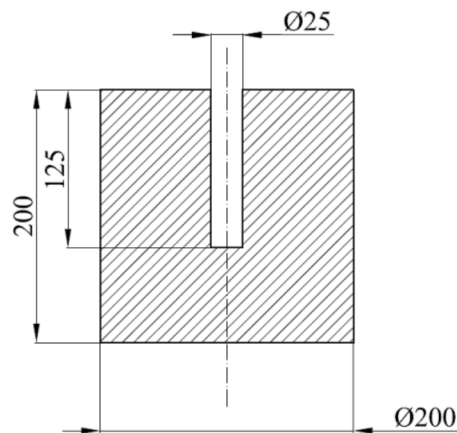
Eksplozivna tvar	Deformacija cijevi (očitanje uzduž cijevi), H (mm)															
	0 (mm)	10 (mm)	20 (mm)	30 (mm)	40 (mm)	50 (mm)	60 (mm)	70 (mm)	80 (mm)	90 (mm)	100 (mm)	110 (mm)	120 (mm)	130 (mm)	140 (mm)	150 (mm)
M+EPS 50/50	15,51	13,65	13,13	12,93	12,76	12,58	12,51	12,44	12,29	11,96	11,87	11,85	11,86	11,90	11,88	12,99
M+EPS 40/60	6,74	5,33	5,03	4,86	4,74	4,70	4,69	4,67	4,55	4,52	4,42	4,15	4,24	4,19	4,35	5,01
M+EPS 30/70	4,29	2,68	2,55	2,45	2,25	2,22	2,20	2,17	2,18	2,19	2,19	2,15	2,12	2,11	2,15	2,42
M+EPS 20/80	0,22	0,13	0,10	0,11	0,10	0,09	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09	0,08	0,09	0,12
Pentrit	38,50	38,50	38,50	38,50	38,50	38,50	38,50	38,50	38,50	38,50	38,50	38,50	38,50	38,50	38,50	38,50
Emulzijski eksploziv	21,42	20,62	20,84	20,91	20,90	21,07	21,09	21,09	21,13	21,45	21,35	21,21	21,59	21,78	22,02	22,51
M+EPS 50/50	3,51	3,41	3,51	3,66	3,77	3,94	4,14	4,25	4,33	4,38	4,39	4,49	4,58	4,67	4,89	5,80

Mjerna nesigurnost prilikom određivanja deformacije je iznosila $U_H = H \pm 0,01$ (mm).

6.2.3.4. Određivanje radne sposobnosti eksploziva po Trauzlu

Isidor Trauzl je 1885.g. razvio metodu određivanja radne sposobnosti eksploziva upotrebom olovnog cilindra. Originalna metoda se temelji na računanju razlike volumena provrta u olovnom cilindru prije i proširenja poslije eksplozije. Cilindar je čistog prerađenog olova, promjera i visine 200 mm, s provrtom u sredini baze cilindra, promjera $\varnothing 25$ mm i dubine 125 mm (slika 6-31). Za ispitivanje se koristi 10 g eksploziva koji se omota u polietilensku foliju u obliku patrone $\varnothing 25$ mm. U sredinu tako napravljene patrone stavlja se inicijalno sredstvo. Patrona eksploziva postavi se na dno provrta u olovni cilindar te se začepi kvarcnim pijeskom (Sućeska 1995).

Nakon otpucavanja volumen šupljeg prostora u cilindru se izmjeri nalijevanjem vode iz menzure, čime se odredi bruto volumen. Dobiveni rezultati korigiraju se obzirom na djelovanje detonatora i obzirom na temperaturu olovnog bloka prilikom ispitivanja. Metoda daje dobre podatke o radnoj sposobnosti eksploziva jer istovremeno uključuje djelovanje i udarnog vala i ekspanzirajućih plinova.



Slika 6-31. Olovni blok s provrtom (Sućeska 1995).

S obzirom na veliku gustoću olova, $\rho_{Cu} = 11,35 \text{ g/cm}^3$, olovni blok ima veliku masu čime je rukovanje takvim blokom otežano i skupo. Moguće je koristiti i druge materijale poput aluminija, gustoće $\rho_{Al} = 2,70 \text{ g/cm}^3$, koji ima značajno manju masu u odnosu na olovni blok. Time je rukovanje olakšano, a ujedno i pojeftinjuje izvođenje ispitivanja.

Za opisana ispitivanja korišteni su blokovi od aluminijske legure AlMgSi1. Za izradu ispitnih blokova korišten je aluminijska legura istih svojstava kao i aluminijska legura korištena

za izradu pločica za bilježenje kod određivanja brizantnosti metodom otiska na metalnoj pločici. Podaci o kemijskom sastavu korištene aluminijske legure AlMgSi1 dani su u tablici 6-18. Podaci o fizičko-mehaničkim svojstvima korištene aluminijske legure AlMgSi1 dani su u tablici 6-19.

Ukupno je otpucano 7 uzoraka eksploziva, po 1 uzorak za svaku pojedinu mješavinu i po jedan uzorak referentnih eksploziva. Za referentne eksplozive korišteni su pentrit, ANFO i emulzijski eksploziv odnosno matrica senzibilizirana staklenim mikrokuglicama. Budući da masa od 10 g ispitnog uzorka nije dala mjerljivo proširenje volumena provrta, a s obzirom na svojstva aluminijske legure u odnosu na olovo kod originalne Trauzlovog testa, korištena je masa od 20 g eksplozivnog punjenja. Za čepljenje je, umjesto kvarcnog pijeska, korištena poliuretanska pjena. Svi eksplozivi su električnim detonatorima istog tipa i jednakih svojstava, iste energije.

Blok pripremljen za ispitivanje prikazan je na slici 6-32. Rezultati ispitivanja su dani u tablici 6-17.



Slika 6-32. Blok pripremljen za ispitivanje.

Tablica 6-17. Rezultati određivanja radne sposobnosti modificiranim Trauzlom.

Blok br.	Eksploziv	Masa eksploziva, m_{ET} (g)	Volumen brutto proširenja, V_{bruto} (cm ³)	Ukupni volumen proširenja, V_{pr} (cm ³)
1	Pentrit	20	128	45,6
2	Emulzija	20	106	23,6
3	ANFO	20	92	9,6
4	M:E 50:50	20	94	11,6
5	M:E 40:60	20	94	11,6
6	M:E 30:70	20	92	9,6
7	M:E 20:80	20	90	7,6

Mjerna nesigurnost prilikom određivanja volumena udubljenja je iznosila $U_V = V_{\text{bruto}} \pm 1 \text{ (cm}^3\text{)}$.

6.3. Analiza prve skupine ispitivanja

U prvoj skupini ispitivanja određena je granična gustoća pojedinih eksplozivnih smjesa pri kojima se postiže detonabilnost. Primijenjene su slijedeće smjese:

- amonij-nitratno praškasti eksploziv Permonex V19 s dodatkom EPS-a,
- ANFO-eksploziv AN 14 s dodatkom EPS-a,
- emulzijski eksploziv Lambrex 1 s dodatkom EPS-a i
- emulzijska matrica s dodatkom EPS-a.

6.3.1. Analiza brzine detonacije u ovisnosti od gustoće eksploziva

Za prvu skupinu ispitivanja je napravljena analiza brzine detonacije u ovisnosti od gustoće eksploziva.

6.3.1.1. Analiza brzine detonacije u ovisnosti od gustoće amonij-nitratno praškastih eksploziva s dodatkom EPS-a

Srednje vrijednosti izmjerenih brzina detonacije za pojedine gustoće amonij-nitratno praškastih eksploziva Permonex V19 s dodatkom EPS-a prikazane su u tablici 6-18. Srednja vrijednost je izračunata iz 10 mjerenja za Permonex V19 i 5 mjerenja za svaku mješavinu.

Tablica 6-18. Srednje vrijednosti izmjerenih brzina detonacije za pojedine gustoće amonij-nitratno praškastih eksploziva s dodatkom EPS-a.

Vrsta eksploziva (veličina granula/zrnaca EPS-a)	Omjer eksploziv : EPS	Gustoća, ρ (g/cm ³)	Brzina detonacije, v_1 (m/s)
Permonex V19	100:0	1,010	3217
GRANULIRANI EPS			
Permonex V19 / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	50:50	0,478	2094
MEHANIČKI USITNJENI EPS			
Permonex V19 / EPS (+ 0,5 mm)	50:50	0,557	1875
Permonex V19 / EPS (+ 0,5 mm)	40:60	0,466	1553
Permonex V19 / EPS (0,5 mm – 0,25 mm)	50:50	0,565	1807
Permonex V19 / EPS (0,25 mm – 0,18 mm)	50:50	0,561	1705
Permonex V19 / EPS (0,25 mm – 0,18 mm)	40:60	0,470	1330
Permonex V19 / EPS (0,18 mm – 0,1 mm)	50:50	0,565	1680
Permonex V19 / EPS (0,18 mm – 0,1 mm)	45:55	0,521	1523
Permonex V19 / EPS (– 0,1 mm)	50:50	0,543	1813

S obzirom da nije izmjerena stabilna brzina detonacije za više različitih omjera za pojedine veličine zrnaca mehanički usitnjenog EPS-a i granuliranog EPS-a, podaci dobiveni mjerenjem nisu prikazani dijagramima. Iz podataka u tablici 6-18 je vidljivo da najniža gustoća mješavine amonij-nitratno praškastog eksploziva i EPS-a kod koje se postiže ujednačena brzina detonacije iznosi 0,466 g/cm³ za uzorke ispitivane u PVC cijevima unutarnjeg promjera Ø 20 mm. Ta gustoća je postignuta kod miješanja eksploziva s mehanički usitnjenim EPS-om veličine zrnaca iznad 0,5 mm. Nešto veće gustoće koje su približno istih vrijednosti kao i najniža, kod kojih se postiže ujednačena brzina detonacije, su postignute kod mješavina eksploziva s mehanički usitnjenim EPS-om veličine zrnaca od 0,25 mm do 0,18 mm ($\rho = 0,470$ g/cm³) i s granuliranim EPS-om veličine zrnaca od 1,5 mm do 3,5 mm ($\rho = 0,478$ g/cm³). Brzina detonacije s najvišim izmjerenim vrijednostima je postignuta kod mješavine eksploziva s granuliranim EPS-om.

6.3.1.2. Analiza brzine detonacije u ovisnosti od gustoće ANFO-eksploziva s dodatkom matrice kao veziva i EPS-a

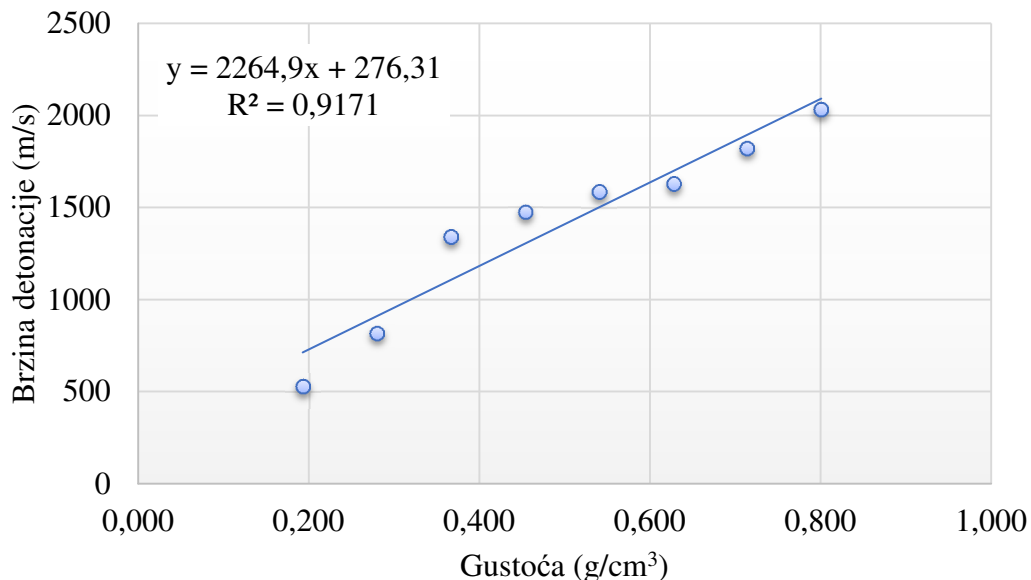
Srednje vrijednosti izmjerenih brzina detonacije za pojedine gustoće ANFO-eksploziva s dodatkom matrice (10 % volumno) kao veziva i EPS-a prikazane su u tablici 6-19. Srednja

vrijednost je izračunata iz 5 mjerenja za ANFO-eksploziv i 4 mjerenja za svaku mješavinu. Zavisnost brzine detonacije od gustoće ANFO-eksploziva s dodatkom matrice kao veziva i EPS-a prikazana je na grafikonu na slici 6-33.

Tablica 6-19. Srednje vrijednosti izmjerenih brzina detonacije za pojedine gustoće ANFO-eksploziva s dodatkom matrice kao veziva i EPS-a.

Vrsta eksploziva (veličina granula/zrnaca EPS-a)	Omjer eksploziv : EPS	Gustoća, ρ (g/cm ³)	Brzina detonacije, v_1 (m/s)
AN14	100:0	0,834	985
AN14 + Matrica	90:10	0,846	1572
(AN14 + Matrica) / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	90:10	0,801	2031
(AN14 + Matrica) / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	80:20	0,714	1819
(AN14 + Matrica) / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	70:30	0,628	1629
(AN14 + Matrica) / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	60:40	0,541	1584
(AN14 + Matrica) / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	50:50	0,454	1474
(AN14 + Matrica) / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	40:60	0,367	1340
(AN14 + Matrica) / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	30:70	0,280	815
(AN14 + Matrica) / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	20:80	0,193	528
(AN14 + Matrica) / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	10:90	0,106	-

Brzina detonacije - Gustoća



Slika 6-33. Zavisnost brzine detonacije od gustoće ANFO-eksploziva s dodatkom matrice kao veziva i EPS-a.

Iz podataka u tablici 6-19 i dijagrama na slici 6-33 je vidljivo da najniža gustoća mješavine ANFO-eksploziva s dodatkom matrice kao veziva i ekspandiranog polistirena kod koje se postiže ujednačena brzina detonacije iznosi $0,193 \text{ g/cm}^3$ za uzorke ispitivane u čeličnim cijevima unutarnjeg promjera $\varnothing 20 \text{ mm}$. Najniža gustoća kod koje se postiže ujednačena brzina detonacije ostvarena je kod omjera 20:80 (eksploziv:EPS). Najniža gustoća dobivena je kod omjera 10:90 (eksploziv:EPS) i iznosi $0,106 \text{ g/cm}^3$ ali kod nje nije ostvarena stabilna brzina detonacije odnosno 1 put od 4 mjerenja nije došlo do iniciranja, a 3 puta je došlo do prekida detonacije neposredno poslije iniciranja.

Za rezultate mjerenja brzine detonacije napravljena je regresijska analiza s gustoćom ANFO-eksploziva s dodatkom EPS-a. Za regresijsku analizu korištena je linearna regresija.

Iz dijagrama na slici 6-33 je vidljivo da se zavisnost brzine detonacije od gustoće ANFO-eksploziva s dodatkom EPS-a može izračunati prema izrazu 6-4 uz koeficijent determinacije $R^2 = 0,9171$ odnosno 91,71 %:

$$v_d = 276,31 + 2264,9 \rho_E, \quad (6-4)$$

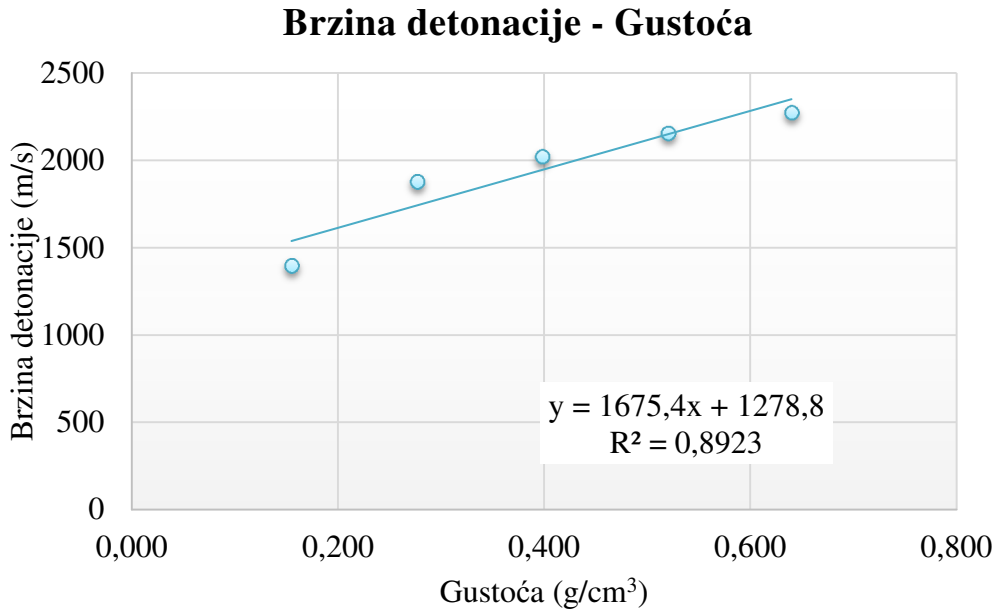
6.3.1.3. Analiza brzine detonacije u ovisnosti od gustoće emulzijskih eksploziva s dodatkom EPS-a

Srednje vrijednosti izmjerenih brzina detonacije za pojedine gustoće emulzijskih eksploziva s dodatkom EPS-a prikazane su u tablici 6-20. Srednja vrijednost je izračunata iz 10 mjerenja za Lambrex 1 i 5 mjerenja za svaku mješavinu.

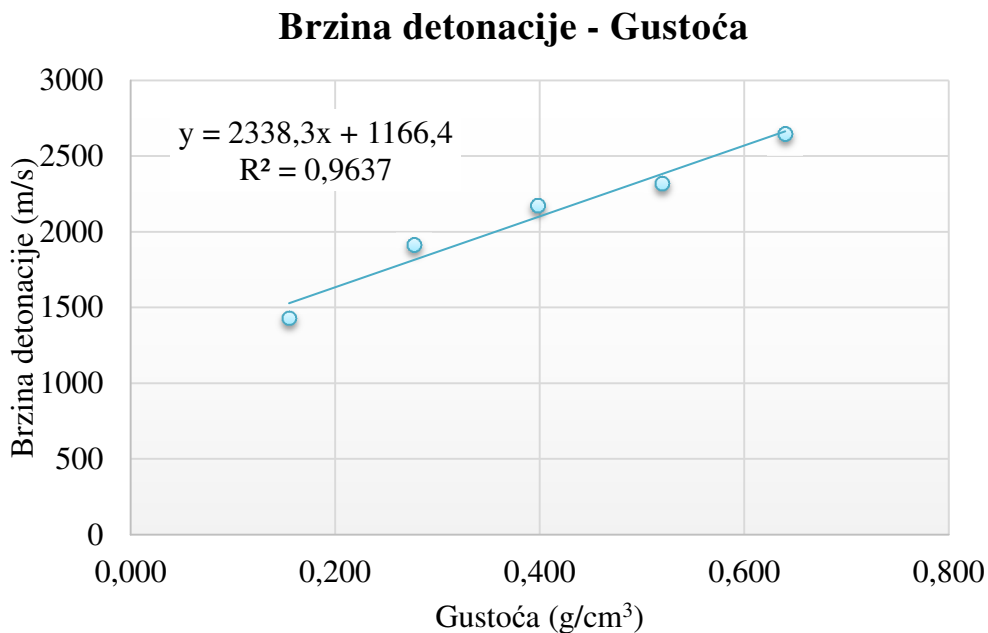
Tablica 6-20. Srednje vrijednosti izmjerenih brzina detonacije za pojedine gustoće emulzijskih eksploziva s dodatkom EPS-a.

Vrsta eksploziva (veličina granula/zrnaca EPS-a)	Omjer eksploziv : EPS	Gustoća, ρ (g/cm ³)	Brzina detonacije (Ø 16 mm), $v_{1'}$ (m/s)	Brzina detonacije (Ø 20 mm), $v_{1'}$ (m/s)
Lambrex 1	100:0	1,250	3366	3491
GRANULIRANI EPS				
Lambrex 1 / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	50:50	0,640	2275	2646
Lambrex 1 / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	40:60	0,520	2155	2319
Lambrex 1 / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	30:70	0,398	2022	2175
Lambrex 1 / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	20:80	0,277	1878	1915
Lambrex 1 / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	10:90	0,155	1398	1430
MEHANIČKI USITNJENI EPS				
Lambrex 1 / EPS (+ 0,5 mm)	60:40	0,916	-	2834
Lambrex 1 / EPS (0,5 mm – 0,25 mm)	50:50	0,792	2925	3049
Lambrex 1 / EPS (0,5 mm – 0,25 mm)	40:60	0,701	2519	2480
Lambrex 1 / EPS (0,25 mm – 0,18 mm)	50:50	0,802	3023	3142
Lambrex 1 / EPS (0,25 mm – 0,18 mm)	40:60	0,713	2750	-
Lambrex 1 / EPS (0,18 mm – 0,1 mm)	50:50	0,793	3086	2892
Lambrex 1 / EPS (0,18 mm – 0,1 mm)	40:60	0,701	2616	2816
Lambrex 1 / EPS (0,18 mm – 0,1 mm)	30:70	0,609	2202	-
Lambrex 1 / EPS (- 0,1 mm)	50:50	0,771	3258	3243
Lambrex 1 / EPS (- 0,1 mm)	40:60	0,675	2906	2911
Lambrex 1 / EPS (- 0,1 mm)	30:70	0,579	2270	-

S obzirom da nije izmjerena stabilna brzina detonacije za više različitih omjera za pojedine veličine zrnaca mehanički usitnjenog EPS-a, podaci dobiveni mjerenjem nisu prikazani dijagramima. Zavisnost brzine detonacije od gustoće emulzijskih eksploziva s dodatkom granuliranog EPS-a za uzorke ispitivane u čeličnim cijevima promjera Ø 16 mm prikazana je na grafikonu na slici 6-34, a u čeličnim cijevima promjera Ø 20 mm na grafikonu na slici 6-35.



Slika 6-34. Zavisnost brzine detonacije o gustoći emulzijskih eksploziva s dodatkom granuliranog EPS-a za promjer Ø 16 mm.



Slika 6-35. Zavisnost brzine detonacije o gustoći emulzijskih eksploziva s dodatkom granuliranog EPS-a za promjer Ø 20 mm.

Iz podataka u tablici 6-20 i iz dijagrama na slikama 6-34 i 6-35 je vidljivo da najniža gustoća smjese kod koje se postiže ujednačena brzina detonacije, za smjese eksploziva s granuliranim EPS-om veličine zrnaca od 1,5 mm do 3,5 mm, iznosi 0,155 g/cm³ za uzorke

ispitivane u cijevima unutarnjega promjera \varnothing 16 mm, odnosno $0,156 \text{ g/cm}^3$ za uzorke ispitivane u cijevima unutarnjega promjera \varnothing 22 mm. Kod miješanja eksploziva s mehanički usitnjenim EPS-om najniža gustoća kod koje se postiže ujednačena brzina detonacije iznosi $0,579 \text{ g/cm}^3$ za uzorke ispitivane u cijevima unutarnjega promjera \varnothing 16 mm, odnosno $0,675 \text{ g/cm}^3$ za uzorke ispitivane u cijevima unutarnjega promjera \varnothing 22 mm. Obje gustoće su postignute prilikom miješanja EPS-a veličine zrnaca ispod 0,1 mm.

Iz podataka u tablici 6-20 vidljivo je da smjesa eksploziv-EPS (veličina zrnaca +0,5 mm) u volumnom omjeru 60:40 postiže manju brzinu detonacije u odnosu na ostale smjese, bez obzira što ima veću gustoću od njih. To se može objasniti oblikom i veličinom zrnaca EPS-a. Za razliku od EPS-a u granulama, čija zrnaca imaju pravilan oblik kugle, zrnca mehanički usitnjenoga EPS-a su nepravilnih oblika. Kuglasti oblik zrnaca omogućava pravilnije raspoređivanje eksploziva oko samih zrnaca, a time i bolju homogenizaciju smjese. Eksploziv je, u tom slučaju, pravilno raspoređen unutar volumena uzorka.

Iz podataka u tablici 6-20 je vidljivo da smjese istih ili približno istih gustoća, kada je upotrijebljen mehanički usitnjen EPS za sniženje gustoće, a većih zrnaca, imaju nešto nižu brzinu detonacije. S obzirom na nepravilan oblik zrnaca i distribuciju eksploziva između njih, dolazi do prekida kontakta i prekida detonacije.

Za rezultate mjerenja brzine detonacije napravljena je regresijska analiza s gustoćom emulzijskih eksploziva s dodatkom EPS-a. Za regresijsku analizu korištena je linearna regresija.

Iz dijagrama na slici 6-34 je vidljivo da se zavisnost brzine detonacije o gustoći emulzijskih eksploziva s dodatkom granuliranog EPS-a za promjer \varnothing 16 mm može izračunati prema izrazu 6-5 uz koeficijent determinacije $R^2 = 0,8923$ odnosno 89,23 %:

$$v_d = 1278,8 + 1675,4 \rho_E, \quad (6-5)$$

Iz dijagrama na slici 6-35 je vidljivo da se zavisnost brzine detonacije o gustoći emulzijskih eksploziva s dodatkom granuliranog EPS-a za promjer \varnothing 20 mm može izračunati prema izrazu 6-6 uz koeficijent determinacije $R^2 = 0,9637$ odnosno 96,37 %:

$$v_d = 1166,4 + 2338,3 \rho_E, \quad (6-6)$$

Granulirani EPS, iako većih zrnaca u odnosu na mehanički usitnjeni EPS, pokazao se kao bolje sredstvo za snižavanje gustoće emulzijskih eksploziva obzirom na veličinu i ujednačenost vrijednosti mjerenih brzina detonacije.

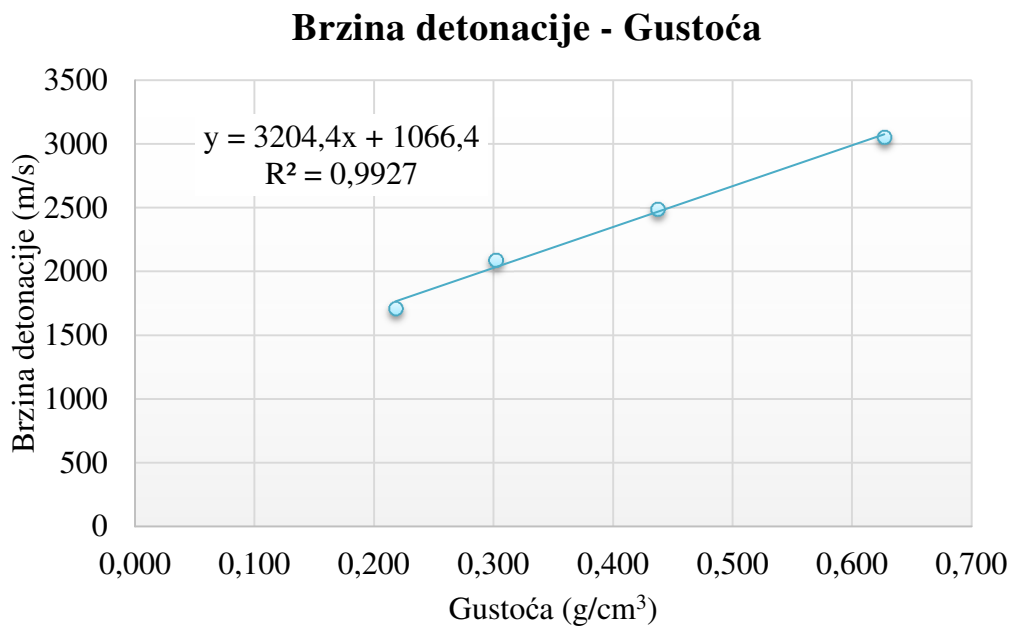
6.3.1.4. Analiza brzine detonacije u ovisnosti od gustoće emulzijske matrice s dodatkom EPS-a

Kao referentna mješavina korištena je emulzijska matrica senzibilizirana mikrokuglicama u volumnom omjeru 75:25. Srednje vrijednosti izmjerenih brzina detonacije za pojedine gustoće emulzijske matrice s dodatkom EPS-a prikazane su u tablici 6-21. Srednja vrijednost je izračunata iz 8 mjerenja za referentnu mješavinu i 13 mjerenja za svaku mješavinu.

Tablica 6-21. Srednje vrijednosti izmjerenih brzina detonacije za pojedine gustoće emulzijske matrice s dodatkom EPS-a.

Vrsta eksploziva (veličina granula EPS-a)	Omjer eksploziv : EPS	Gustoća, ρ (g/cm ³)	Brzina detonacije, v (m/s)
Matrica / Mikrokuglice	100:0	1,175	5534
Matrica / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	50:50	0,627	3051
Matrica / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	40:60	0,437	2491
Matrica / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	30:70	0,302	2089
Matrica / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	20:80	0,218	1710
Matrica / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	10:90	0,085	-

Zavisnost brzine detonacije od gustoće emulzijske matrice s dodatkom EPS-a prikazana je na grafikonu na slici 6-36.



Slika 6-36. Zavisnost brzine detonacije od gustoće emulzijske matrice s dodatkom granuliranog EPS-a.

Iz podataka u tablici 6-21 i iz dijagrama na slici 6-36 je vidljivo da najniža gustoća smjese kod koje se postiže stabilna brzina detonacije iznosi $0,218 \text{ g/cm}^3$.

Za rezultate mjerenja brzine detonacije napravljena je regresijska analiza s gustoćom emulzijske matrice s dodatkom EPS-a. Za regresijsku analizu korištena je linearna regresija.

Iz dijagrama na slici 6-36 je vidljivo da se zavisnost brzine detonacije o gustoći emulzijske matrice s dodatkom granuliranog EPS-a može izračunati prema izrazu 6-7 uz koeficijent determinacije $R^2 = 0,9927$ odnosno $99,27 \%$:

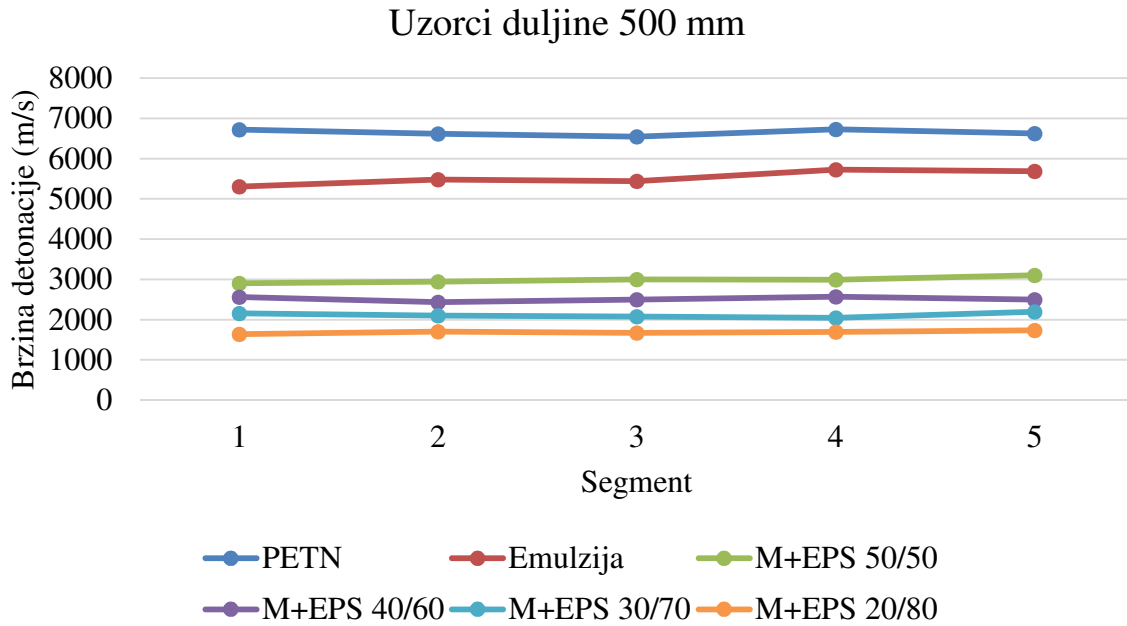
$$v_d = 1066,4 + 3204,4 \rho_E, \quad (6-7)$$

S obzirom da su mješavine emulzijske matrice s granuliranim EPS-om pokazale najznačajniju zavisnost izmjerenih brzina detonacije s gustoćama pojedinih mješavina, njih će se koristiti za izvedbu novog eksploziva smanjene gustoće. Sva daljnja ispitivanja će se obaviti s takvim mješavinama.

Brzina detonacije mješavina emulzijske matrice s granuliranim EPS-om te mješavina emulzijske matrice i mikrokuglica i pentrita, koji se koriste kao referentni eksplozivi, je provjerena na uzorcima duljine 500 mm i 1000 mm na više segmenata. Obavljena su 3 mjerenja na uzorcima duljine 500 mm i 1 mjerenje na uzorcima 1000 mm za svaki eksploziv. Na uzorcima duljine 500 mm brzina detonacije je mjerena na 5 segmenata s međusobnim razmakom od 50 m, na uzorcima duljine 1000 mm na 9 segmenata s međusobnim razmakom od 100 mm. Rezultati mjerenja brzine detonacije na uzorcima duljine 500 mm su dani u tablici 6-22 i prikazani dijagramom na slici 6-37, a rezultati mjerenja brzine detonacije na uzorcima duljine 1000 mm u tablici 6-23 i prikazani dijagramom na slici 6-38.

Tablica 6-22. Srednje vrijednosti izmjerenih brzina detonacije na uzorcima duljine 500 mm.

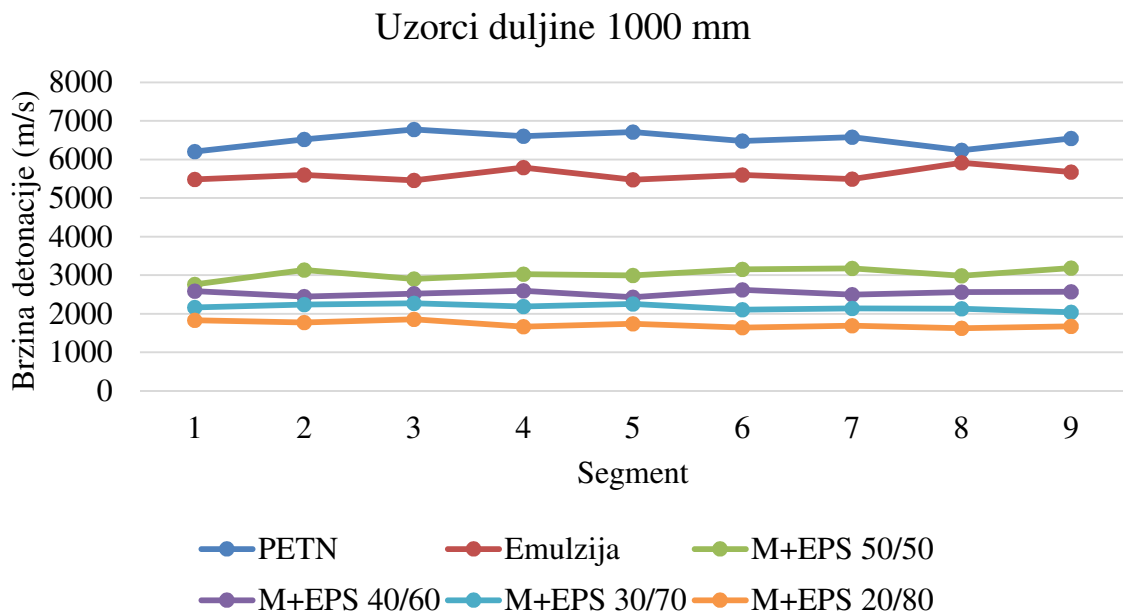
Segment br	Brzina detonacije (m/s)					Sred. vrijednost
	1	2	3	4	5	
PETN	6723	6622	6547	6727	6627	6649
Emulzija	5309	5478	5444	5726	5689	5529
M+EPS 50/50	2904	2944	3002	2993	3102	2989
M+EPS 40/60	2564	2437	2495	2568	2499	2513
M+EPS 30/70	2153	2104	2077	2041	2192	2113
M+EPS 20/80	1639	1701	1674	1692	1732	1688



Slika 6-37. Prikaz brzine detonacije po segmentima za uzorke duljine 500 mm.

Tablica 6-23. Vrijednosti izmjenjen brzina detonacije na uzorcima duljine 1000 mm.

Segment br	Brzina detonacije (m/s)									Sred. vrijednost
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
PETN	6210	6523	6777	6608	6715	6481	6578	6238	6551	6520
Emulzija	5482	5598	5456	5793	5478	5602	5490	5913	5672	5609
M+EPS 50/50	2766	3133	2905	3027	2995	3151	3177	2985	3185	3036
M+EPS 40/60	2587	2448	2522	2601	2427	2619	2493	2561	2569	2536
M+EPS 30/70	2168	2240	2274	2188	2254	2106	2144	2135	2042	2172
M+EPS 20/80	1835	1771	1860	1665	1746	1643	1694	1629	1673	1724



Slika 6-38. Prikaz brzine detonacije po segmentima za uzorke duljine 1000 mm.

Iz podataka u tablicama 6-22 i 6-23 i iz dijagrama na slikama 6-37 i 6-38 vidljivo je da nema značajnijih odstupanja u brzini detonacije po cijeloj duljini uzorka. Eksplozivi smanjene gustoće na bazi emulzijske matrice i granuliranog EPS-a postižu ujednačenu i stabilnu brzinu detonacije.

Na osnovu izmjerenih vrijednosti brzine detonacije i gustoće eksploziva smanjene gustoće na bazi emulzijske matrice i granuliranog EPS-a izračunati su tlak detonacije i tlak u bušotini prema izrazu 3-19:

$$P_d = \frac{\rho v_d^2}{4} \quad (3-19)$$

i prema izrazu 3-32

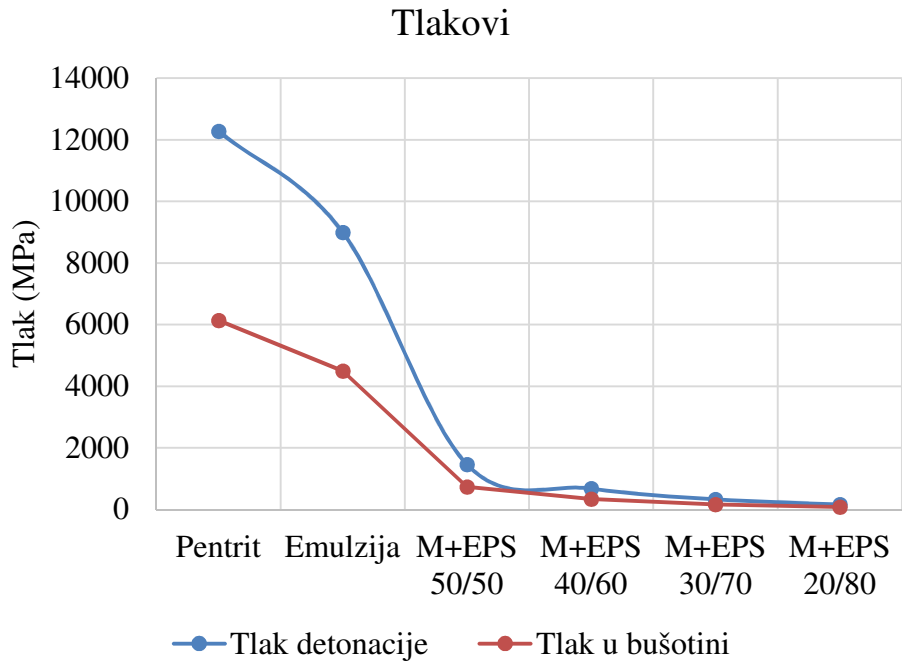
$$P_b = \frac{\rho \cdot v_d^2}{8} \quad (3-32)$$

Rezultati proračuna su dani u tablici 6-32 i prikazani su grafikonom na slici 6-39. U tablici 6-24 su prikazane i vrijednosti proračuna tlakova za pentrit iz razloga što pentrit ima poznate vrijednosti tlakova te se koristi kao referentni eksploziv u daljnjim mjerenjima. Vrijednosti u tablici 6-24 za brzinu detonacije i gustoću eksploziva su srednje vrijednosti iz prethodnih mjerenja.

Tablica 6-24. Proračunate vrijednosti tlakova detonacije i tlakova u bušotini.

Vrsta eksploziva	Gustoća, ρ (g/cm ³)	Gustoća, ρ (kg/m ³)	Brzina detonacije, v (m/s)	Tlak detonacije (MPa)	Tlak u bušotini (MPa)
Pentrit	1,126	1126,0	6604	12277	6139
Emulzija	1,175	1175,1	5534	8998	4499
M+EPS 50/50	0,627	627,0	3051	1460	730
M+EPS 40/60	0,437	437,0	2491	678	339
M+EPS 30/70	0,302	301,8	2089	329	165
M+EPS 20/80	0,218	218,0	1710	159	80

Iz podataka u tablici 6-24 i iz dijagrama na slici 6-39 vidljivo je da, s obzirom na tlačnu čvrstoću dijabaza (200 MPa – 400 MPa), se eksplozivi smanjene gustoće mogu primijeniti za miniranja u diajbazu.



Slika 6-39. Tlak detonacije i tlak u bušotini za pojedine eksplozive.

6.3.2. Analiza brizantnosti i radne sposobnosti eksploziva smanjene gustoće

Određena je brizantnost i radna sposobnost eksploziva različitih gustoća izvedenog miješanjem emulzijske matrice i granuliranog EPS-a u različitim volumnim omjerima. korištene su slijedeća metode:

- metoda određivanja brizantnosti otiskom na metalnoj pločici,
- metoda određivanja brizantnosti ispitivanjima duplom cijevi i
- metoda određivanja radne sposobnosti prema Trauzlu (modificirani Trauzl).

6.3.2.1. Analiza brizantnosti eksploziva smanjene gustoće dobivene metodom otiska na metalnoj pločici

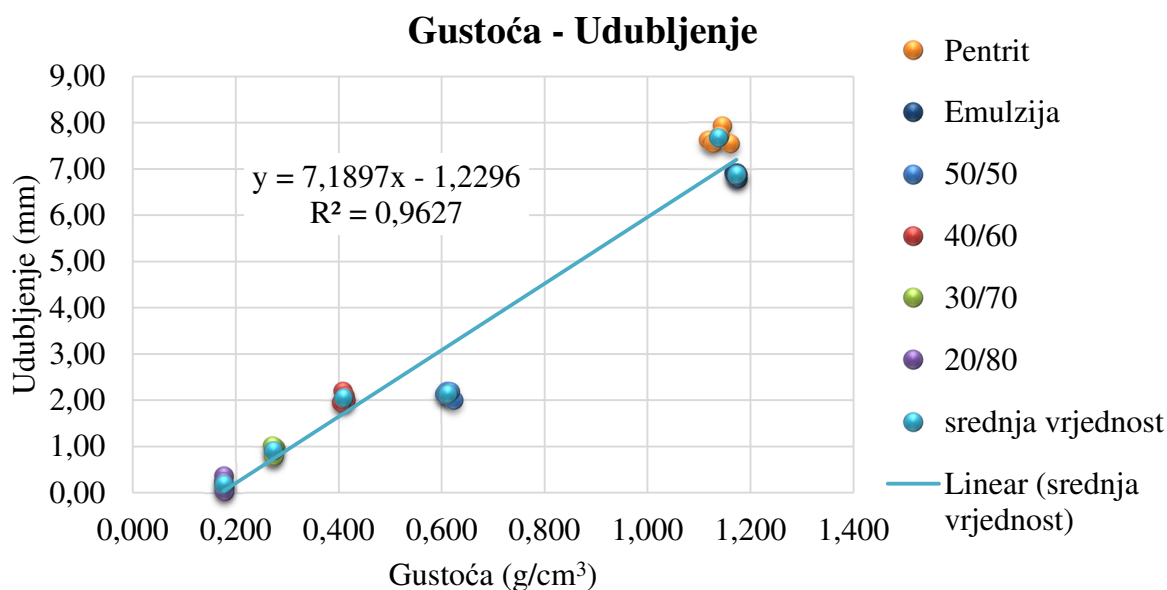
Srednje vrijednosti rezultata mjerenja prilikom određivanja brizantnosti eksploziva smanjene gustoće metodom otiska na metalnoj pločici prikazane su u tablici 6-25. Srednja vrijednost je izračunata iz 5 mjerenja za svaki referentni eksploziv i 5 mjerenja za svaku mješavinu.

Tablica 6-25. Srednje vrijednosti rezultata mjerenja prilikom određivanja brizantnosti eksploziva metodom otiska na metalnoj pločici.

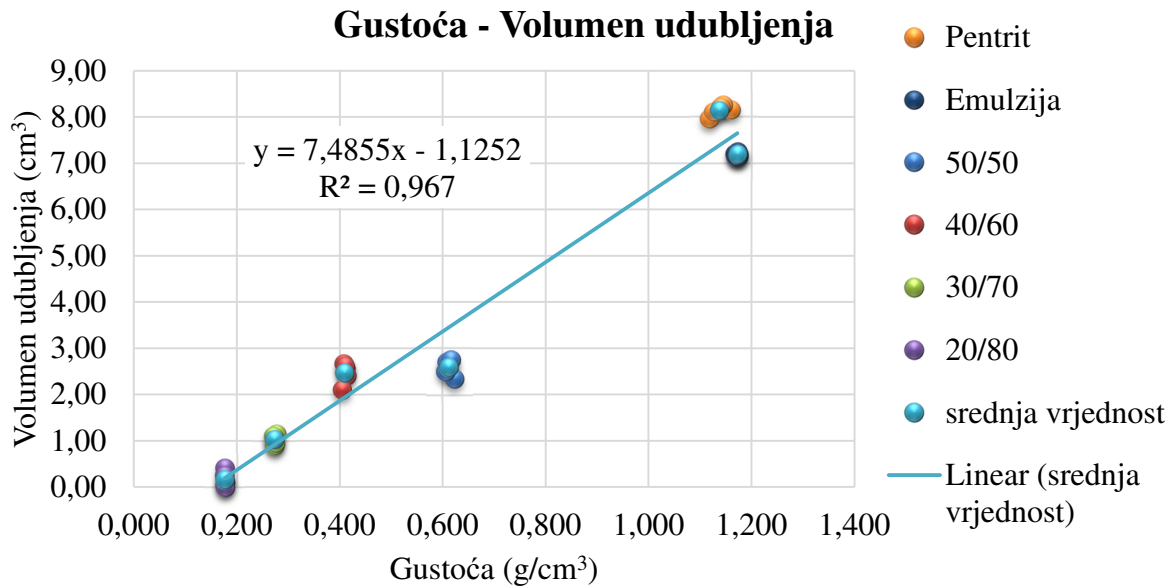
Vrsta eksploziva	Gustoća eksplozivne tvari, ρ_E (g/cm^3)	Izmjerena brzina detonacije, v_d (m/s)	Izračunati tlak detonacije, p_d (kbar)	Udubljenje, h (mm)	Volumen udubljenja, V_h (cm^3)
	Srednje vrijednosti				
Pentrit	1,139	5623	90,027	7,67	8,13
Emulzijski eksploziv	1,172	5412	85,845	6,87	7,19
Matrica+EPS 50/50	0,612	3064	14,366	2,13	2,59
Matrica+EPS 40/60	0,41	2469	6,241	2,05	2,46
Matrica+EPS 30/70	0,273	2081	2,952	0,91	1,03
Matrica+EPS 20/80	0,177	1668	1,230	0,18	0,16

Zavisnost udubljenja na metalnoj pločici od gustoće eksplozivnog punjenja prikazana je na grafikonu na slici 6-40, a zavisnost volumena udubljenja na metalnoj pločici od gustoće eksplozivnog punjenja prikazana je na grafikonu na slici 6-41. Zavisnost udubljenja na metalnoj pločici od brzine detonacije eksplozivnog punjenja prikazana je na grafikonu na slici 6-42, a zavisnost volumena udubljenja na metalnoj pločici od brzine detonacije eksplozivnog punjenja prikazana je na grafikonu na slici 6-43.

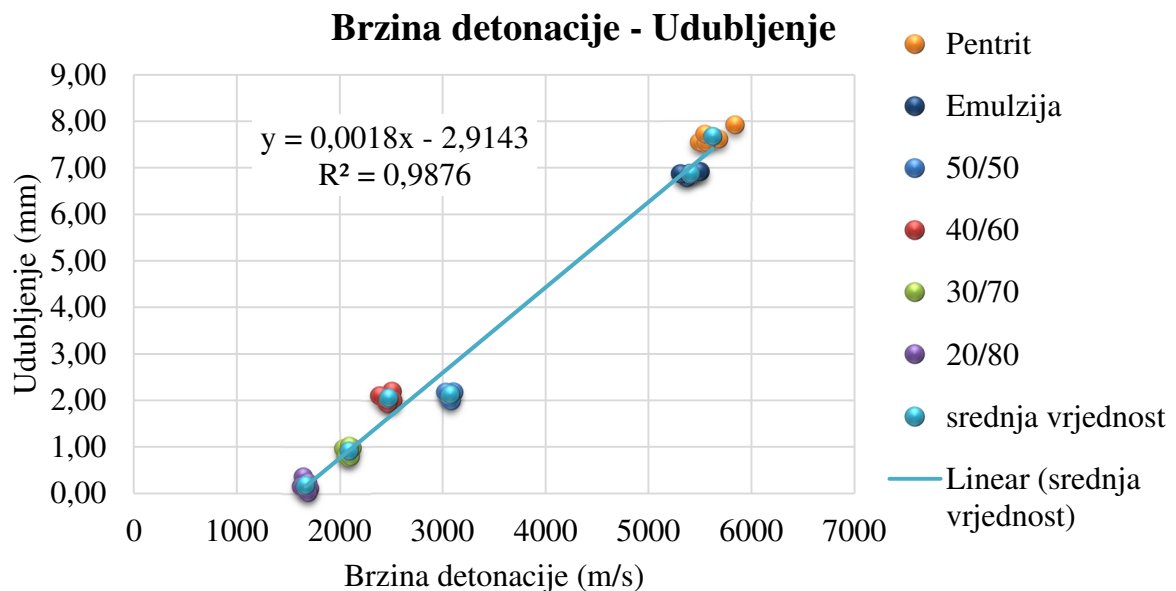
Zavisnost udubljenja na metalnoj pločici od tlaka detonacije eksplozivnog punjenja prikazana je na grafikonu na slici 6-44, a zavisnost volumena udubljenja na metalnoj pločici od tlaka detonacije eksplozivnog punjenja prikazana je na grafikonu na slici 6-45.



Slika 6-40. Zavisnost udubljenja i gustoće eksplozivnog punjenja.



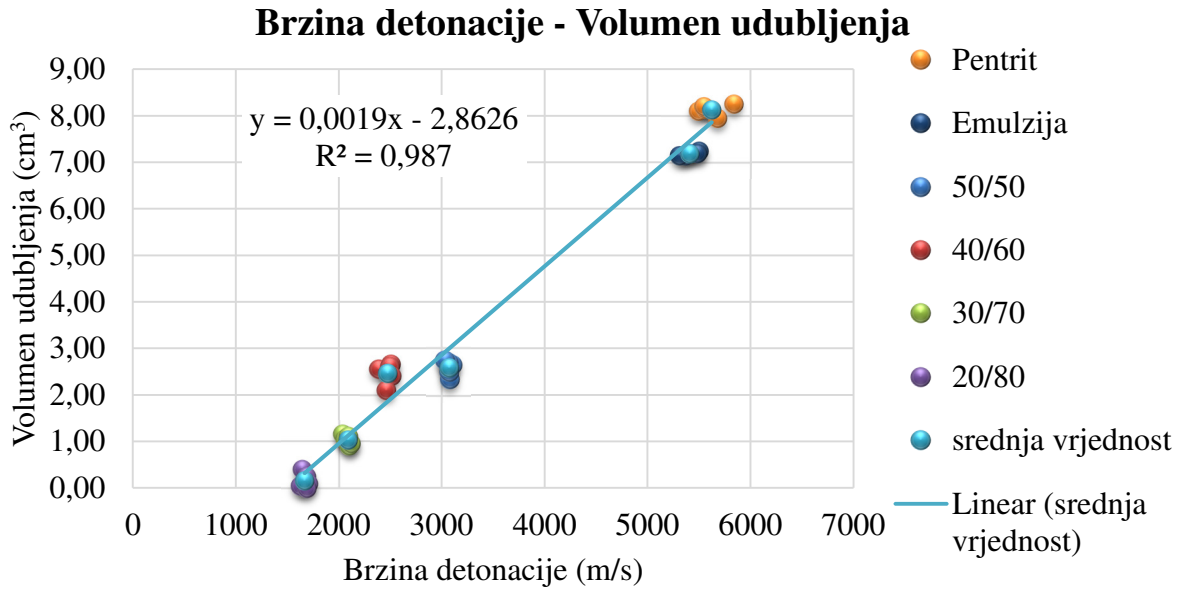
Slika 6-41. Zavisnost volumena udubljenja od gustoće eksplozivnog punjenja.



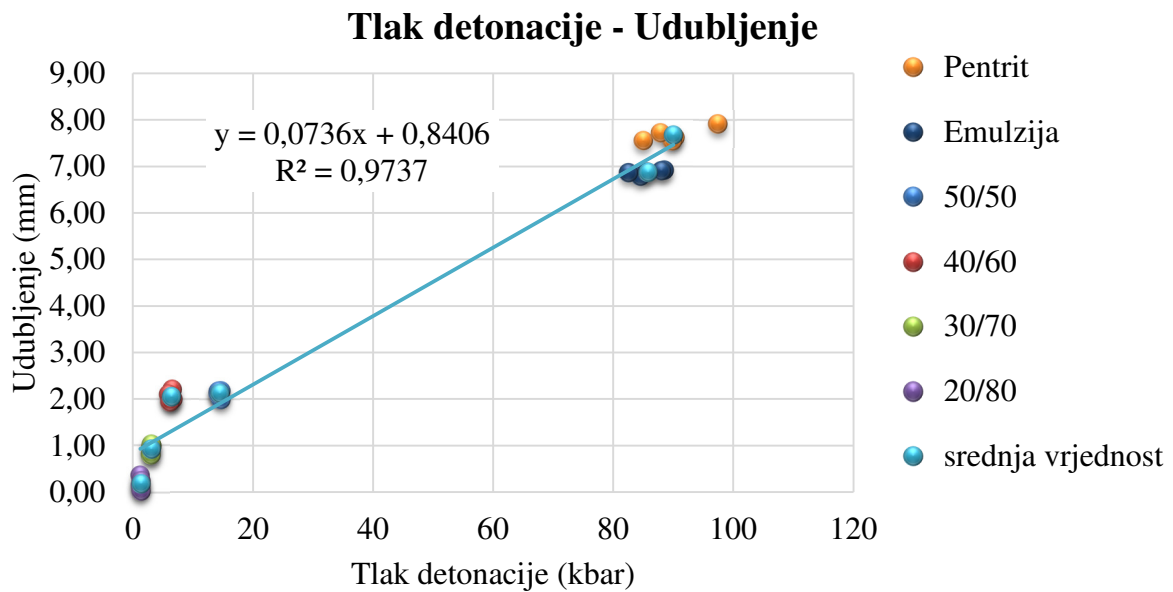
Slika 6-42. Zavisnost udubljenja od brzine detonacije eksplozivnog punjenja.

Zavisnost tlaka detonacije od gustoće eksplozivnog punjenja prikazana je na grafikonu na slici 6-46.

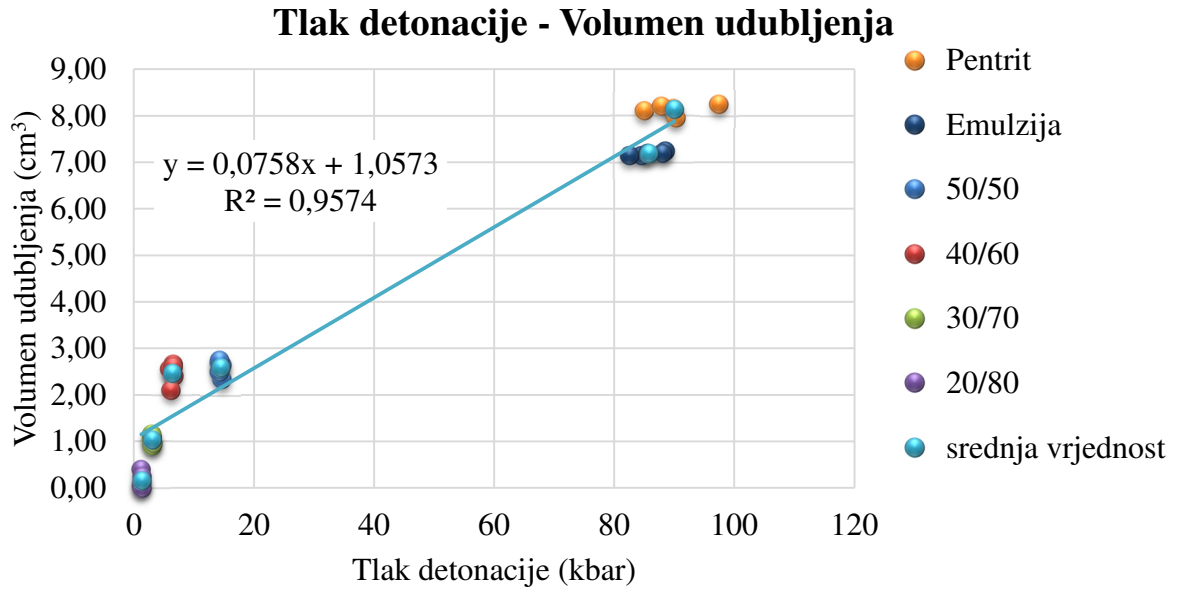
Međusobni odnos pojedinih mjerenih veličina prikazan je grafikonom na slici 6-47.



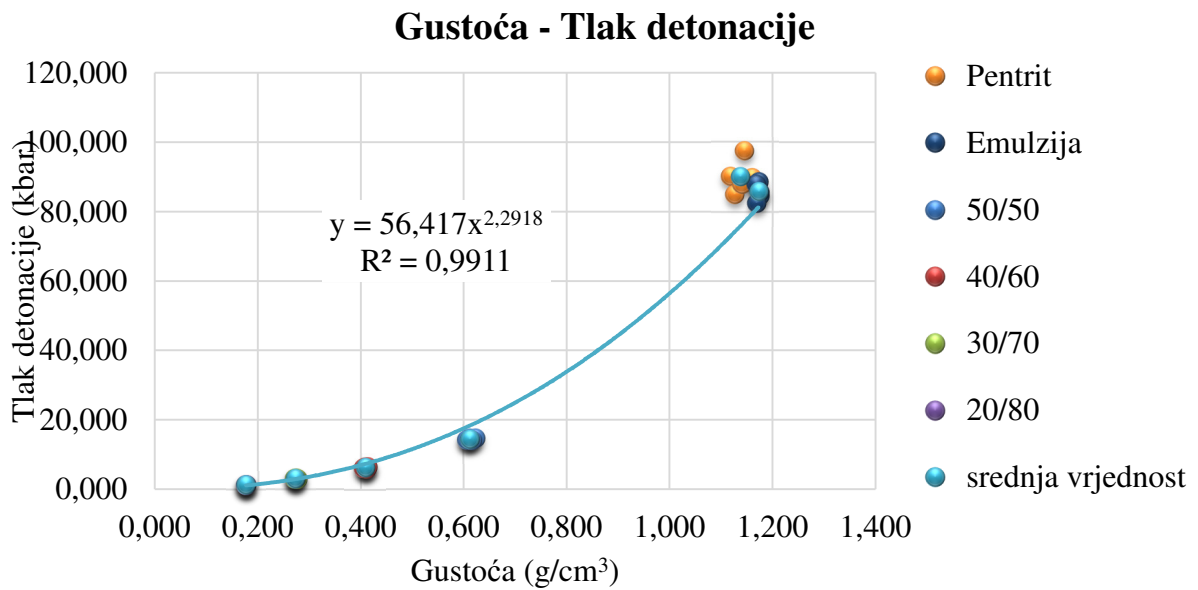
Slika 6-43. Zavisnost volumena udubljenja od brzine detonacije eksplozivnog punjenja.



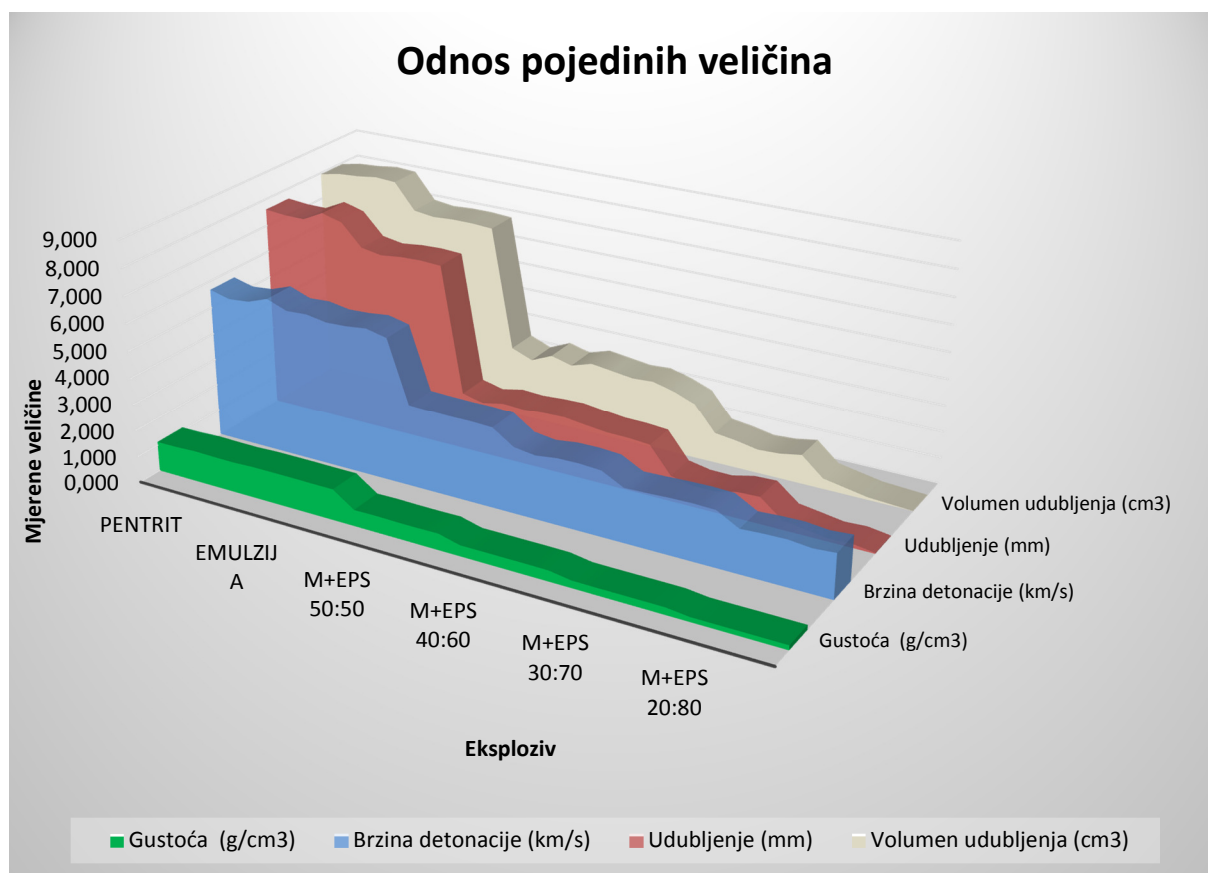
Slika 6-44. Zavisnost udubljenja od tlaka detonacije eksplozivnog punjenja.



Slika 6-45. Zavisnost volumena udubljenja od brzine detonacije eksplozivnog punjenja.



Slika 6-46. Zavisnost tlaka detonacije od gustoće eksplozivnog punjenja.



Slika 6-47. Međusobni odnos pojedinih mjerenih veličina.

Iz slike 6-40 je vidljivo da se zavisnost udubljenja na metalnoj pločici, nastalo detonacijom eksplozivnog punjenja, od gustoće eksplozivnog punjenja može izračunati prema izrazu 6-8 uz koeficijent determinacije $R^2 = 0,9627$ odnosno 96,27 %:

$$h = 7,1897 \rho_E - 1,2296, \quad (6-8)$$

gdje je:

h – udubljenje na metalnoj pločici (mm),

ρ_E – gustoća eksplozivnog punjenja (g/cm³).

Iz slike 6-41 je vidljivo da se zavisnost volumena udubljenja na metalnoj pločici, nastalo detonacijom eksplozivnog punjenja, od gustoće eksplozivnog punjenja može izračunati prema izrazu 6-9 uz koeficijent determinacije $R^2 = 0,967$ odnosno 96,7 %:

$$V_h = 7,4855 \rho_E - 1,1252, \quad (6-9)$$

gdje je:

V_h – volumen udubljenja na metalnoj pločici (cm³).

Iz slike 6-42 je vidljivo da se zavisnost udubljenja na metalnoj pločici, nastalo detonacijom eksplozivnog punjenja, od brzine detonacije eksplozivnog punjenja može izračunati prema izrazu 6-10 uz koeficijent determinacije $R^2 = 0,9876$ odnosno 98,76 %:

$$h = 0,0018 v_d - 2,9143, \quad (6-10)$$

gdje je:

v_d – brzina detonacije eksploziva (m/s).

Iz slike 6-43 je vidljivo da se zavisnost volumena udubljenja na metalnoj pločici, nastalo detonacijom eksplozivnog punjenja, od brzine detonacije eksplozivnog punjenja može izračunati prema izrazu 6-11 uz koeficijent determinacije $R^2 = 0,987$ odnosno 98,7 %:

$$V_h = 0,0019 v_d - 2,8626, \quad (6-11)$$

Iz slike 6-44 je vidljivo da se zavisnost udubljenja na metalnoj pločici, nastalo detonacijom eksplozivnog punjenja, od tlaka detonacije eksplozivnog punjenja može izračunati prema izrazu 6-12 uz koeficijent determinacije $R^2 = 0,9737$ odnosno 97,37 %:

$$h = 0,0736 p_d - 0,8406, \quad (6-12)$$

gdje je:

p_d – tlak detonacije (kbar).

Iz slike 6-45 je vidljivo da se zavisnost volumena udubljenja na metalnoj pločici, nastalo detonacijom eksplozivnog punjenja, od tlaka detonacije eksplozivnog punjenja može izračunati prema izrazu 6-13 uz koeficijent determinacije $R^2 = 0,9574$ odnosno 95,74 %:

$$V_h = 0,0758 p_d - 1,0573, \quad (6-13)$$

Iz slike 6-46 je vidljivo da se zavisnost tlaka detonacije od gustoće eksplozivnog punjenja može izračunati prema izrazu 6-14 uz koeficijent determinacije $R^2 = 0,9911$ odnosno 99,11 %:

$$p_d = 56,417 \rho_E^{2,2918}, \quad (6-14)$$

Iz slike 6-47 je vidljivo da pojedine mjerene vrijednosti gustoće eksplozivnog punjenja, brzine detonacije, udubljenja na aluminijskoj pločici i volumena udubljenja su u međusobno proporcionalnom odnosu, odnosno povećanjem ili smanjenjem jedne mjerene veličine proporcionalno se povećavaju ili smanjuju i ostale veličine.

Brizantnost eksploziva smanjene gustoće je određena na dva načina:

1. na osnovu izmjerenog udubljenja na metalnoj pločici i
2. na osnovu izmjerenog volumena udubljenja.

Kod oba načina određivanja brizantnosti, pentrit i emulzijski eksploziv su korišteni kao referentni eksplozivi. Udubljenje, odnosno volumen udubljenja, na metalnoj pločici nastalo detonacijom referentnog eksploziva koristi se kao referentno udubljenje, odnosno referentni volumen udubljenja. Brizantost na osnovu udubljenja je određena prema izrazu 6-15:

$$B = \frac{h}{h_{\text{REF}}}, \quad (6-15)$$

gdje je:

B – brizantnost,

h_{REF} – udubljenje na metalnoj pločici od referentnog eksploziva (mm).

Brizantost na osnovu volumena udubljenja je određena prema izrazu 6-16:

$$B = \frac{V_h}{V_{h\text{REF}}}, \quad (6-16)$$

gdje je:

$V_{h\text{REF}}$ – volumen udubljenja na metalnoj pločici od referentnog eksploziva (cm³).

Rezultati određivanja brizantnosti eksploziva smanjene gustoće metodom otiska na čeličnoj pločici su prikazani u tablici 6-26.

Tablica 6-26. Brizantnost eksploziva smanjene gustoće – metoda otiska na čeličnoj pločici.

Vrsta eksploziva	Srednja vrijednost udubljenja h_{sr} (mm)	Brizantost na osnovu udubljenja B_1		Srednja vrijednost volumena udubljenja V_{hsr} (cm ³)	Brizantost na osnovu volumena udubljenja B_2	
Pentrit	7,67	1	1,12	8,13	1	1,13
Emulzijski eksploziv	6,87	0,90	1	7,19	0,88	1
Matrica+EPS 50/50	2,13	0,28	0,31	2,59	0,32	0,36
Matrica+EPS 40/60	2,05	0,27	0,30	2,46	0,30	0,34
Matrica+EPS 30/70	0,91	0,12	0,13	1,03	0,13	0,14
Matrica+EPS 20/80	0,18	0,02	0,03	0,16	0,02	0,02

Iz podataka u tablici 6-26 je vidljivo da brizantnost dobivena preko izmjenjenog volumena udubljenja na metalnoj pločici ima nešto veće vrijednosti u odnosu na brizantnost dobivenu preko mjerenja maksimalnog udubljenja na metalnoj pločici. To se može objasniti činjenicom da je volumen moguće preciznije odrediti od maksimalne dubine udubljenja. Prilikom određivanja volumena titracijom s tekućinom (destilirana voda, mješavina vode i etilnog alkohola, etilni alkohol i sl.), tekućina zauzme volumen udubljenja u potpunosti. Prilikom određivanja maksimalne dubine pomoću mikrometra postoji mogućnost da mikrometar nije pozicioniran na maksimalnu dubinu. Zbog preciznije određivanja volumena u odnosu na dubinu, vrijednosti brizantnosti dobivene preko volumena udubljenja su relevantnije za usporedbu pojedinih eksploziva smanjene gustoće.

Brizantnost eksploziva smanjene gustoće određena metodom otiska na metalnoj pločici iznosi od 2 % do 32 % u odnosu na pentrit, odnosno od 2 % do 36 % u odnosu na emulzijski eksploziv. Prema podacima iz tablice 6-26 i iz grafikona na slikama od 6-40 do 6-46, mješavine emulzijske matrice i ekspaniranog polistirena u volumnim omjerima 50:50 i 40:60 imaju približno jednaku brizantnost u odnosu na referentne eksplozive. Brizantnost određena na osnovu udubljenja za omjer 50:50 iznosi 28 % brizantnosti pentrita, a za omjer 40:60 iznosi 27 %, odnosno za omjer 50:50 iznosi 31 % brizantnosti emulzijskog eksploziva, a za omjer 40:60 iznosi 30 %. Brizantnost određena na osnovu volumena udubljenja za omjer 50:50 iznosi 32 % brizantnosti pentrita, a za omjer 40:60 iznosi 30 %, odnosno za omjer 50:50 iznosi 36 % brizantnosti emulzijskog eksploziva, a za omjer 40:60 iznosi 34 %. Ostale mješavine imaju puno niže vrijednosti brizantnosti, sve do samo 2 % brizantnosti pentrita i do 3 % brizantnosti emulzijskog eksploziva (mješavina matrice i EPS-a u omjeru 20:80). Na osnovu toga može se zaključiti da mješavine emulzijske matrice i EPS-a u volumnim omjerima 50:50 i 40:60 s

pripadajućim gustoćama od $0,612 \text{ g/cm}^3$ (50:50) i $0,410 \text{ g/cm}^3$ (40:60) predstavljaju optimalne mješavine.

Uočena je zavisnost udubljenja, odnosno volumena udubljenja, dobivenih na aluminijskim pločicama detonacijom eksplozivnog punjenja u čeličnim cijevima postavljenima okomito na pločicu o gustoći odnosno o brzini detonacije. Brzina detonacije je pokazala snažniju zavisnost o udubljenju odnosno o volumenu udubljenja u odnosu na gustoću. Volumen udubljenja se pokazao kao bolja veličina za izračun brizantosti u odnosu na maksimalno udubljenje.

6.3.2.2. Analiza brizantnosti eksploziva smanjene gustoće dobivene ispitivanjima s dvostrukom cijevi

Srednje vrijednosti rezultata mjerenja deformacije pri ispitivanjima s dvostrukim cijevima s debljinom stijenke ispitne cijevi 5 mm su prikazane grafikonom na slici 6-48, a s debljinom stijenke 7 mm na slici 6-49.

Cijevi različitih debljina stijenki su korištene zato da bi se mogla odrediti razlika u spljoštenju ispitnih cijevi za Pentrit i Emulzijski eksploziv. Oba referentna eksploziva u potpunosti spljošte ispitnu cijev debljine stijenke 5 mm, a kod ispitne cijevi debljine stijenke 7 mm postoji razlika u spljoštenju. Od svih mješavina emulzijske matrice i granuliranog EPS-a jedino je mješavina s volumnim omjerom 50:50 napravila spljoštenje na ispitnim cijevima obiju debljini stijenke. Iz tog razloga je prvo određena relativna brizantnost u odnosu na M+EPS 50:50, a zatim je određena relativna brizantnost u odnosu Pentrit i u odnosu na Emulzijski eksploziv. Rezultati određivanja brizantnosti eksploziva smanjene gustoće ispitivanjima s duplom cijevi su prikazani u tablici 6-27. Relativna brizantnost s postotnim spljoštenjem svih mješavina je prikazana grafikonom na slici 6-50. Relativna brizantnost na osnovu deformacije cijevi odnosu na M+EPS 50:50 je određena prema izrazu 6-17:

$$B_{50/50} = \frac{H}{H_{50/50}}, \quad (6-17)$$

gdje je:

H – deformacija cijevi (mm) i

$H_{50/50}$ – deformacija cijevi od M+EPS 50:50 (mm).

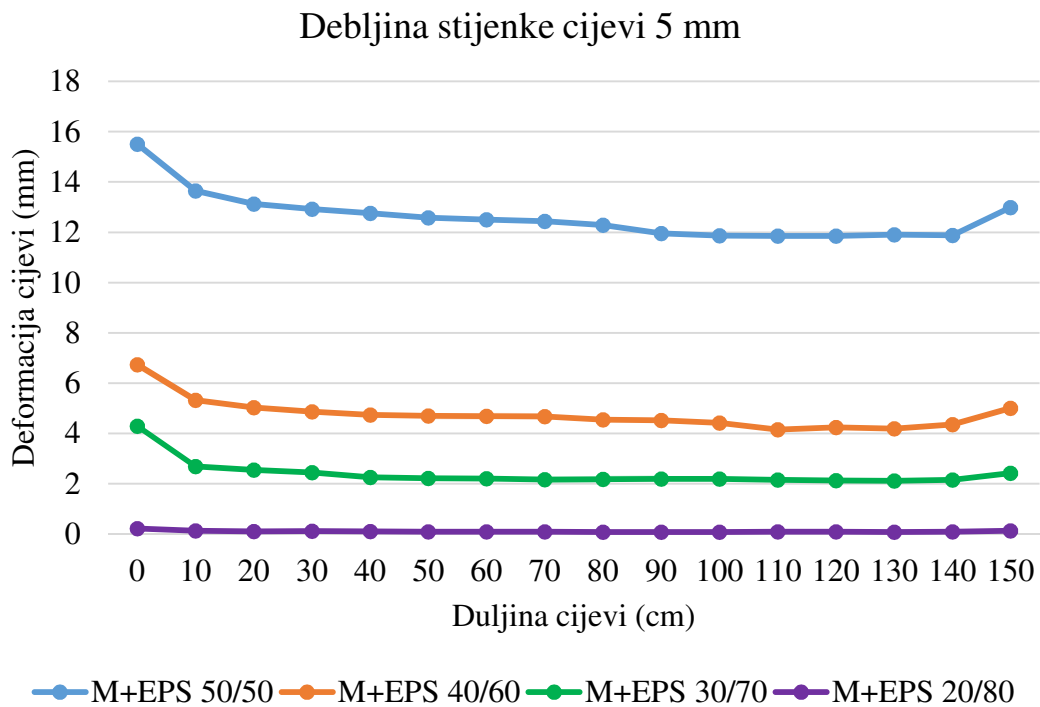
Relativna brizantost na osnovu deformacije cijevi odnosu na Pentrit je određena prema izrazu 6-17:

$$B_P = \frac{H}{H_P}, \quad (6-17)$$

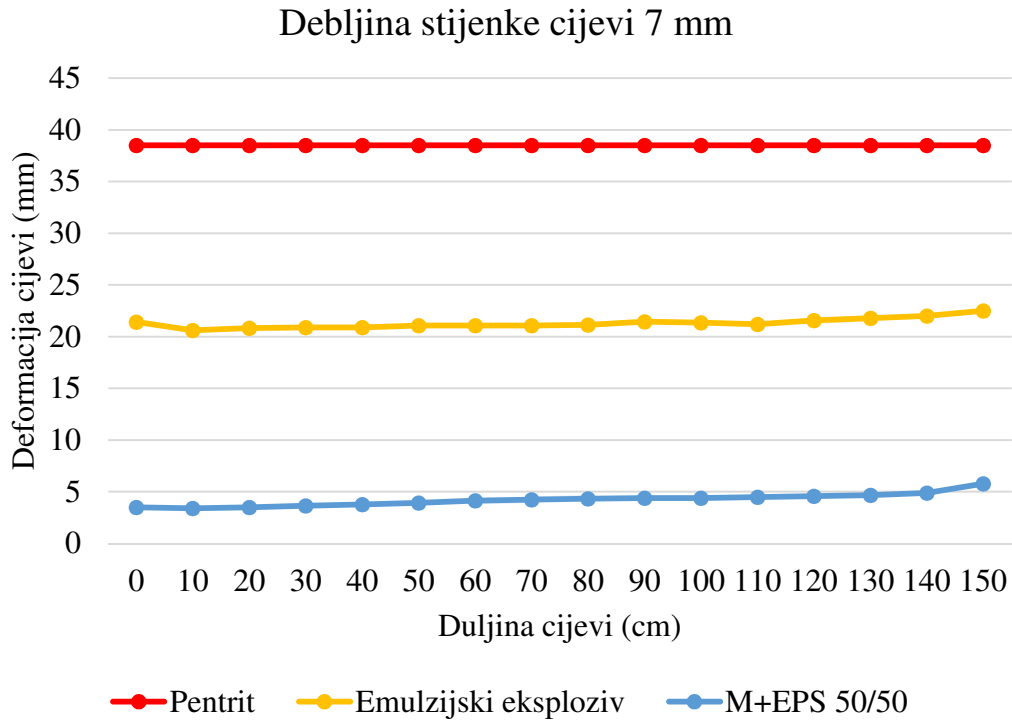
gdje je:

H – deformacija cijevi (mm) i

H_P – deformacija cijevi od Pentrita (mm).



Slika 6-48. Grafički prikaz srednjih vrijednosti rezultata ispitivanja s dvostrukom cijevi – debljina stijenke ispitne cijevi 5 mm.

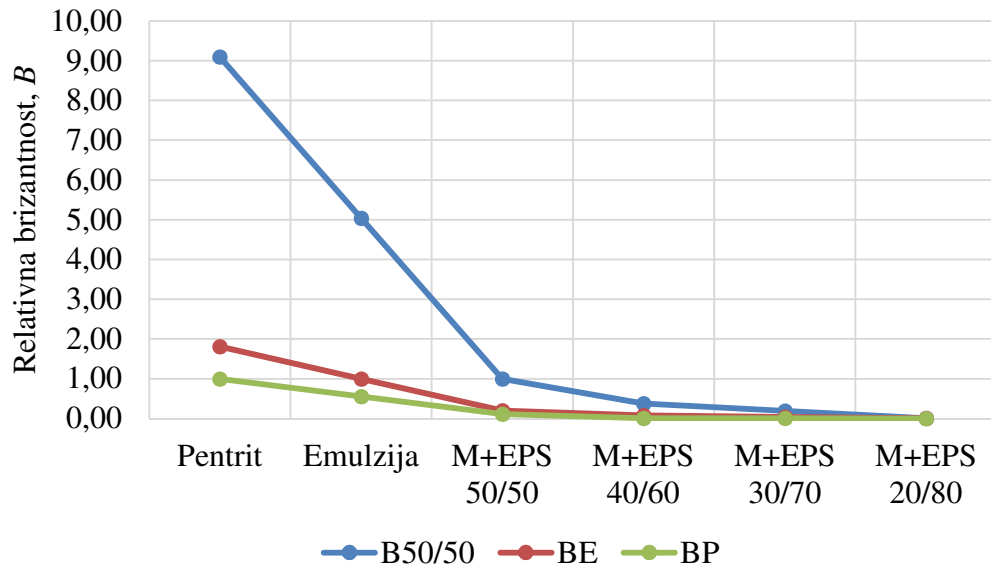


Slika 6-49. Grafički prikaz srednjih vrijednosti rezultata ispitivanja s dvostrukom cijevi – debljina stijenke ispitne cijevi 7 mm.

Tablica 6-27. Brizantnost eksploziva smanjene gustoće – ispitivanja s duplom cijevi.

Eksplzivna tvar	Deformacija ispitne cijevi debljine stijenke 7 mm, H (mm)	Deformacija ispitne cijevi debljine stijenke 5 mm, H (mm)	Relativna brizantnost u odnosu na M+EPS 50/50, $B_{50/50}$	Relativna brizantnost u odnosu na Emulzijski eksploziv, B_E	Relativna brizantnost u odnosu na Pentrit, B_P
Pentrit	38,50	-	9,0963	1,8066	1
Emulzija	21,31	-	5,0351	1	0,5535
M+EPS 50/50	4,23	12,63	1	0,1986	0,1099
M+EPS 40/60	-	4,76	0,3768	0,0748	0,0046
M+EPS 30/70	-	2,40	0,1896	0,0377	0,0023
M+EPS 20/80	-	0,10	0,0081	0,0016	0,0001

Relativna brizantnost - ispitivanje s dvostrukim cijevima



Slika 6-50. Relativna brizantnost s postotnim spljoštenjem svih mješavina.

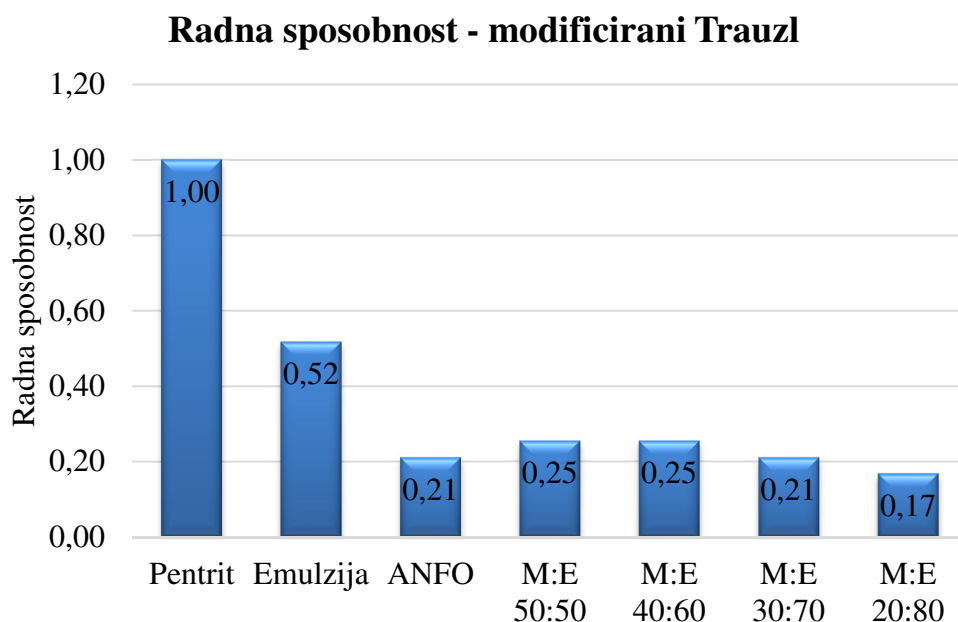
Prema podacima iz tablice 6-27 i sa grafikona na slikama od 6-48 do 6-50, emulzija daje najveću deformaciju cijevi u odnosu na pentrit, dok ostale mješavine daju puno manju deformaciju. Brizantnost za emulzijski eksploziv iznosi 55,35 % brizantnosti pentrita, za omjer 50:50 iznosi 10,99 %, a za omjer 40:60 iznosi 0,46 %. Ostale mješavine imaju puno niže vrijednosti brizantnosti, sve do 0,01 % (mješavina matrice i EPS-a u omjeru 20:80). Brizantnost za omjer 50:50 iznosi 19,86 % emulzijskog eksploziva, a za omjer 40:60 iznosi 7,48 %. Ostale mješavine imaju puno niže vrijednosti brizantnosti, sve do 0,16 % (mješavina matrice i EPS-a u omjeru 20:80).

6.3.2.3. Analiza radne sposobnosti eksploziva smanjene gustoće dobivene modificiranim Trauzlom

Rezultati određivanja radne sposobnosti modificiranim Trauzlom su prikazani u tablici 6-28 i grafikonom na slici 6-51.

Tablica 6-28. Rezultati određivanja radne sposobnosti modificiranim Trauzlom.

Blok br.	Eksploziv	Masa eksploziva, m_{ET} (g)	Volumen brutto proširenja, V_{bruto} (cm ³)	Ukupni volumen proširenja, V_{pr} (cm ³)	Radna sposobnost, V/V_{ref}	
1	Pentrit	20	128	45,6	1,00	1,93
2	Emulzija	20	106	23,6	0,52	1,00
3	ANFO	20	92	9,6	0,21	0,41
4	M:E 50:50	20	94	11,6	0,25	0,49
5	M:E 40:60	20	94	11,6	0,25	0,49
6	M:E 30:70	20	92	9,6	0,21	0,41
7	M:E 20:80	20	90	7,6	0,17	0,32

**Slika 6-51.** Radna sposobnost prema modificiranom Trauzlu.

Radna sposobnost prema modificiranom Trauzlu je određena prema izrazu 6-18:

$$RS = \frac{V_{pr}}{V_{REF}}, \quad (6-18)$$

gdje je:

RS – radna sposobnost,

V_{pr} – ukupni volumen proširenja (cm³) i

V_{REF} – volumen proširenja od referentnog eksploziva (cm³).

Prema podacima iz tablice 6-28 i iz grafikona na slici 6-51, mješavine emulzijske matrice i ekspaniranog polistirena u volumnim omjerima 50:50 i 40:60 imaju gotovo jednaku radnu sposobnost, a koja iznosi 21 % u odnosu na Pentrit. ANFO-eksploziv je pokazao manju, a emulzijski eksploziv veću radnu sposobnost u odnosu na mješavine emulzijske matrice i ekspaniranog polistirena u volumnim omjerima 50:50 i 40:60. ANFO-eksploziv iniciran detonatorom ima nisku vrijednost brzine eksplozije od 897 m/s, koja je posljedica niže energije iniciranja u odnosu na pojačnik koji se redovito koristi za iniciranja kod miniranja stijena. Smanjeno udarno djelovanje ANFO-eksploziva dokazano je i ispitivanjem s dvostrukom cijevi. Obzirom na to, ANFO-eksploziv nije pogodan za korištenje kao referentni eksploziv kod određivanja radne sposobnosti modificiranim Trauzlom te zbog mehaničkih svojstava aluminijske legure ispitnog cilindra.

Radna sposobnost eksploziva smanjene gustoće na bazi emulzijske matrice i granuliranog EPS-a određena je na tri načina: metodom otiska na metalnoj pločici i ispitivanjima s duplom cijevi, koje daju mjeru udarnog, brizantnog djelovanja i metodom modificiranog Trauzla, koji je primjeren za određivanje ukupne radne sposobnosti.

Metodom otiska na metalnoj pločici određena je relativna brizantnost eksploziva smanjene gustoće u odnosu na pentrit. Smanjenje gustoće eksploziva dovelo je do smanjenja brzine detonacije, a time je i smanjeno udarno djelovanje eksploziva. Udarno djelovanje eksploziva smanjene gustoće je manje od 33 % udarnog djelovanja pentrita. Relativna brizantnost za omjer 50:50 iznosi 32 % udarnog djelovanja pentrita, a za omjer 40:60 iznosi 30 %. Ostale mješavine imaju puno niže vrijednosti brizantnosti, sve do samo 2 % udarnog djelovanja pentrita (mješavina matrice i EPS-a u omjeru 20:80).

Ispitivanja s duplom cijevi su korištena kao mjera udarnog djelovanja eksploziva smanjenje gustoće. Udarno djelovanje za Emulziju iznosi 55,35 % udarnog djelovanja pentrita, za omjer 50:50 iznosi 10,99 %, a za omjer 40:60 iznosi 0,46 %. Ostale mješavine imaju puno niže vrijednosti brizantnosti, sve do samo 0,01 % udarnog djelovanja pentrita (mješavina matrice i EPS-a u omjeru 20:80).

Ukupna radna sposobnost eksploziva određena je metodom modificiranog Trauzla. Ukupna radna sposobnost za Emulziju iznosi 52 % radne sposobnosti pentrita, za omjere 50:50 i 40:60 iznosi 25 %, za omjer 30:70 iznosi 21 %, a za omjer 20:80 17 %.

Mješavine matrice i EPS-a u omjerima 50:50 i 40:60 imaju jednaku ukupnu radnu sposobnost u odnosu na pentrit, približno jednako smanjenje udarnog djelovanja dobiveno metodom otiska na metalnoj pločici u odnosu na pentrit ali omjer 40:60 ima znatno veće smanjenje udarnog djelovanja dobiveno ispitivanjima s dvostrukim cijevima u donosu na pentrit. Kod mješavina matrice i EPS-a u omjeru 20:80 se je pokazalo veliko smanjenje udarnog djelovanja u odnosu na pentrit, 2 % metodom otiska na metalnoj pločici i 0,01 % ispitivanjima s dvostrukim cijevima, ali se je pokazalo da ima ukupnu radnu sposobnost od omjera 50:50 u odnosu na pentrit.

Na osnovu provedenih ispitivanja određivanja radne sposobnosti odnosno brizantnosti eksploziva smanjene gustoće može se zaključiti da mješavine emulzijske matrice i EPS-a u volumnim omjerima 50:50 i 40:60 s pripadajućim gustoćama od $0,612 \text{ g/cm}^3$ (50:50) i $0,410 \text{ g/cm}^3$ (40:60) predstavljaju optimalne mješavine obzirom na smanjenje udarnog djelovanja uz zadržavanje ukupne radne sposobnosti.

6.4. Druga skupina ispitivanja

U drugu skupinu ispitivanja spadaju terenska ispitivanja koja uključuju određivanje učinka eksploziva smanjene gustoće u stijenskoj masi te utjecaja miniranja na okolinu i laboratorijska metoda određivanja granulometrijskog sastava odminiranog materijala.

Za određivanje učinka eksploziva smanjene gustoće na stijensku masu primijenjene su slijedeće metode:

- mjerenje brzine detonacije u bušotini,
- modificirani ljevkaški pokusi – određivanje volumena odloma,
- određivanje granulometrijskog sastava odminiranog materijala i
- mjerenje brzina oscolacija.

Izbušeno je ukupno 25 bušotina, odnosno po 5 bušotina za emulzijski eksploziv i za svaku mješavinu emulzijske matrice s granuliranim EPS-om. Bušotine su bile promjera $\varnothing 32$ mm i dubine 240 mm.

Pripremljene su patrone od PVC cijevi vanjskog promjera $\varnothing 25$ mm i istih duljina pri čemu je zadržan konstantan volumen punjenja, a masa punjenja se mijenjala ovisno o gustoći pojedine mješavine.

Bušotine su punjenje do 2/3 dubine odnosno 160 mm, a 1/3 dubine je čepljena. Čepljene su s kamenom sitneži frakcije 4/8 mm i prekrivene geotekstilom na kojeg su stavljeni krupniji komadi kamena kako bi se spriječilo razbacivanje materijala nakon otpucavanja eksplozivnog punjenja u bušotini.

Iniciranje eksplozivnih naboja je bilo s dna minske bušotine električnim detonatorima istog tipa i jednakih svojstava, iste energije koja odgovara referentnog detonatora br. 4.

Mjerena je brzina detonacije u bušotini i brzine oscilacija seizmičkog utjecaja prilikom svakog otpucavanja.

Nakon pojedinog otpucavanja izvađen je materijal iz formiranog lijevka. U laboratoriju je određen volumen odminiranog materijala i njegova granulacija. Lijevku je izmjerena dubina i promjer.

Izračunat je volumen specifičnog odloma lijevka ovisno o masi eksplozivnog punjenja u minskoj bušotini (volumen (cm³) odminiranog materijala po masi (g) eksplozivnog punjenja).

Sva terenska ispitivanja su obavljena na kamenolomu Jazvine koji se nalazi na Kalničkoj gori u sklopu eksploatacijskog polja Hruškovec i pod vlasništvom je tvrtke „Kaming“ d.d. Ljubeščica.

6.4.1. Geološke značajke ležišta

Crnković je 1982.g. istraživao ležište dijabaza Hruškovec te je utvrdio da se nalazi u krednim kaotičnim naslagama heterogenog petrografskog sastava i složene građe. Složenost i heterogenost ležišta, velika i česta promjenljivost strukture i alteracija, uz relativno ujednačeni kemijski sastav dijabaza u stijenskoj masi te često registrirane uklopke i anklave, prvenstveno karbonatnih stijena, rezultat su složenih genetskih i postgenetskih zbivanja na širem području ležišta Hruškovec. Na osnovi petrografskih značajki stijena ležišta, Crnković je izdvojio dvije skupine s nizom varijacija. Prvu skupinu čine klastični sedimenti kredne starosti, koji pripadaju kaotičnim naslagama i karakterizira ih nizak udio karbonatne komponente. Drugu skupinu čine eruptivne stijene različitih struktura i stupnja alteracije (Vrkljan i Klanfar, 2010).

Crnkoviću (1982) tvrdi da eruptivno tijelo ležišta “Hruškovec” nije cjelovito, što pripisuje rezultatu procesa tijekom geneze, ali i tektonskih zbivanja u vidu nekoliko uzastopnih izljeva i ekstruzija lave. Pod pretpostavkom da je dijabazno tijelo cjelovito, u njegovom središnjem dijelu morale bi se nalaziti prave krupnozrnaste, dijabazne strukture doleritskog tipa. tj. stijenu koja je polagano hlađena i kristalizirala u središnjem dijelu magmatskog tijela

(Vrkljan i Klanfar, 2010). Istražnim bušotinama nabušena je uglavnom stijena bazaltnog izgleda, devitrificirano i alterirano bazaltno i vulkansko staklo te mjestimično vulkanska breča i aglomerati. Navedeno ukazuje da se ne radi o dijabaznoj gredi ili masivu, već na činjenicu da eksploatacijsko polje Hruškovec izgrađuju nepravilna, klinasta, piramidalna i pločasta eruptivna tijela, koja su nastala tijekom nekoliko ekstruzija i efuzija, a tvore prividnu cjelinu (Vrkljan i Klanfar, 2010)

Dijabaz je hipoabisalna (potpovršinska ili žilna) vulkanska stijena nastala utiskivanjem gabroidne magme ili lave plitko pod površinom Zemlje pa je to stijena na prijelazu između gabra i bazalta odnosno na prijelazu između intruzivnih i efuzivnih stijena (Tišljar 1999). Dijabaz posjeduje tipičnu dijabaznu ofitsku strukturu (struktura isprepletenih štapićastih plagioklasa čije međuprostore ispunjava piroksen, najčešće augit), homogenu teksturu i agregat plagioklasa, piroksena, klorita, kvarca, opakog minerala i ostalih sastojaka. Plagioklasi se nalaze kao kratki i izduženi idiomorfni prizmatski presjeci. Procesima trošenja prelaze u sericit, kalcit i kaolin. Pirokseni se nalaze kao veća alotriomorfna zrna izrazite kalavosti i dvostruke kalavosti. Od ostalih minerala najviše ima Fe – kalcita, sericita i kaolina nastalih u procesima alteracije. Akcesorni minerali su apatit i granit. Dijabazna ofitska struktura uzrok je velikoj kompaktnosti dijabaza koji je jedna od najčvršćih i najžilavijih stijena uopće.

Stijene koje imaju dijabaznu ili intersertalnu strukturu su posebno žilave, imaju veliku tlačnu čvrstoću i veliki otpor na udarce i na habanje. Krupnozrnasti varijeteti dijabaza tj. dijabazi izrazito krupnozrnaste dijabazne strukture poznati su kao doleriti. U tablici 6-29. prikazana su karakteristična fizičko-mehanička svojstva dijabaza.

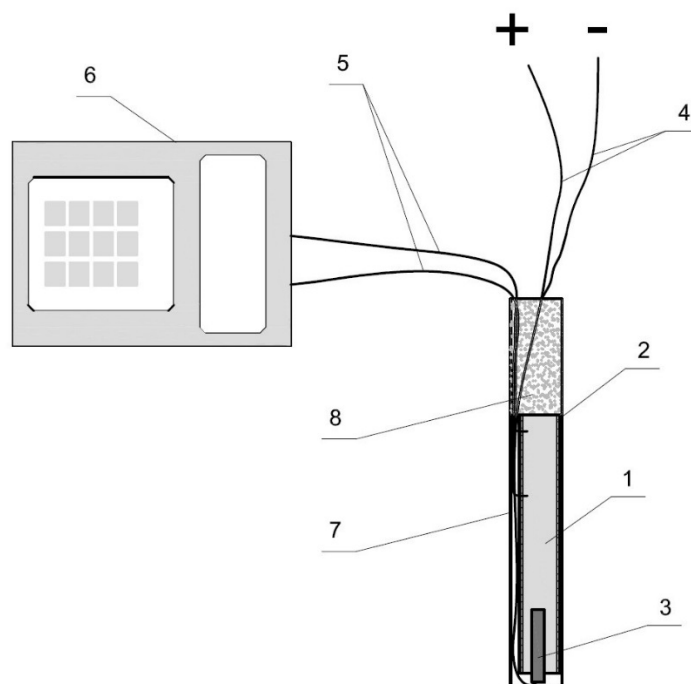
Tablica 6-29. Karakteristična fizičko-mehanička svojstva dijabaza (Vrkljan i Klanfar, 2010).

DIJABAZ		
Gustoća	2,85 – 3,15	g/cm ³
Prostorna masa	2,8 – 3,1	g/cm ³
Poroznost	0,1 – 1	% volumena
Upijanje vode	0,2 – 1	% mase
Tlačna čvrstoća	200 – 400	MPa

6.4.2. Određivanje brzine detonacije u bušotini

Brzina detonacije mjerena je u bušotinama na 5 uzoraka za svaku pojedinu mješavinu i za emulzijski eksploziv, elektrooptičkom metodom s dva osjetila. Osjetila su postavljena na udaljenosti od 100 mm od mjesta iniciranja s međusobnom udaljenošću od 50 mm.

Postav mjerenja je prikazan na slici 6-52.



Kazalo:

- 1 – eksplozivna tvar,
- 2 – PVC cijev,
- 3 – električni detonator,
- 4 – vodiči,
- 5 – osjetila (svjetlovodi),
- 6 – elektronički sat,
- 7 – minska bušotina i
- 8 – čep od inertnog materijala

Slika 6-52. Postav mjerenja brzine detonacije u bušotini.

Odnos srednjih vrijednosti izmjerenih brzina detonacije u bušotini i u čeličnim cijevima za pentrit, emulzijski eksploziv, ANFO-eksploziv i za pojedine omjere emulzijske matrice s

dodatkom EPS-a prikazan je u tablici 6-30. Dijagram odnosa brzina detonacije u stijeni i u čeličnim cijevima prikazan je grafikonom na slici 6-53.

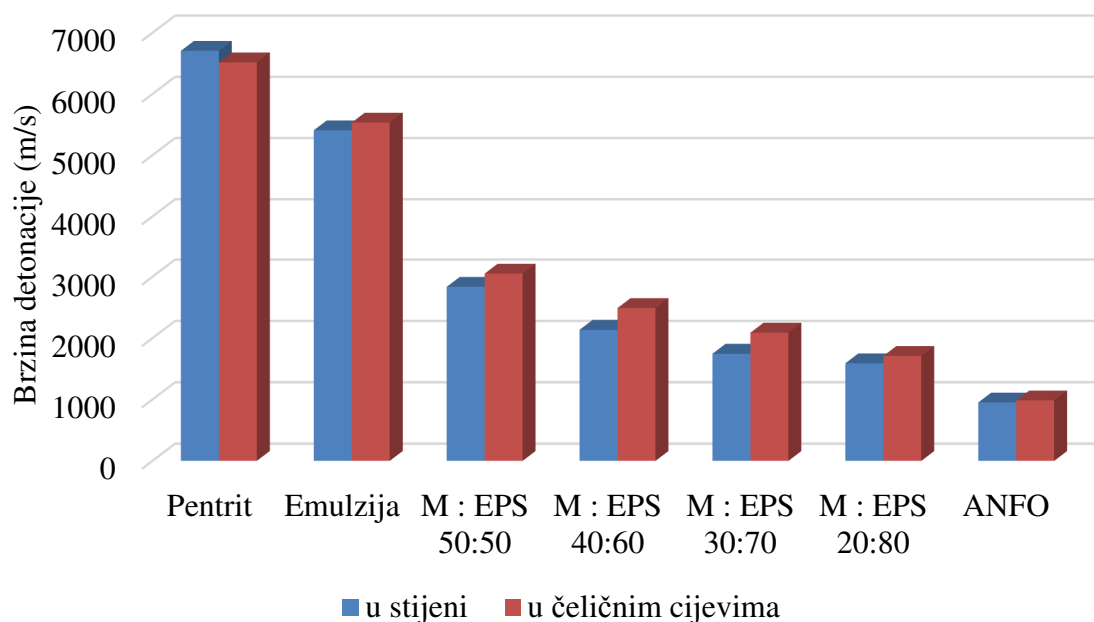
Vrijednosti pojedinačnih izmjerenih brzina detonacije u bušotini za pentrit, emulzijski eksploziv, ANFO-eksploziv i za pojedine omjere emulzijske matrice s dodatkom EPS-a dane su u prilogu broj 6.

Tablica 6-30. Odnos brzina detonacije u stijeni i u cijevima za korištene eksplozive.

Vrsta eksploziva	Brzina detonacije u stijeni, v (m/s)	Brzina detonacije u čeličnim cijevima, $v_{\text{čc}}$ (m/s)	Razlika brzina detonacije (m/s)
Pentrit	6706	6517	189
Emulzija	5408	5534	126
M : EPS 50:50	2836	3051	215
M : EPS 40:60	2136	2491	355
M : EPS 30:70	1746	2089	343
M : EPS 20:80	1590	1710	120
ANFO	952	985	33

Mjerna nesigurnost prilikom određivanja brzine detonacije je iznosila $U = v \pm 75$ (m/s).

Odnos brzina detonacije



Slika 6-53. Dijagram odnosa brzina detonacije u stijeni i u čeličnim cijevima.

6.4.3. Modificirana metoda ljevkastih pokusa – određivanje volumena odloma

Na temelju ispitivanja koje je izveo kao član ekipe sastavljene u svrhu ispitivanja vojnih eksploziva, C.W. Livingston razvio je 50-tih godina 20.st. teoriju ljevkastih pokusa.

Livingston je, na osnovu vlastitih ispitivanja, zaključio da deformacija čvrstih tvari ovisi o prijenosu energije kroz samu čvrstu tvar i da količina prenesene energije kroz tvar od mjesta detonacije ovisi podjednako i o svojstvima eksploziva i o svojstvima čvrste tvari. Također je zaključio da je ukupno ostvareno djelovanje pri prijenosu energije kroz čvrstu tvar jednako pri povećanju mase eksploziva pri konstantnoj dubini na kojoj je smješten eksploziv onome kod smanjenja dubine eksploziva i konstantnoj masi eksploziva. Mijenjajući dubinu eksplozivnog punjenja uz konstantnu masu, te povećavajući masu eksplozivnog punjenja uz konstantnu dubinu na kojoj je smješteno eksplozivno punjenje, Livingston je odredio četiri područja ponašanja čvrstih tvari:

- područje energije naprezanja,
- područje udarnog djelovanja,
- područje usitnjavanja i
- područje prostiranja zračno-zvučnog vala.

Za metodu ljevkastih pokusa primijenjen je načelan princip livingstonovog pokusa. Ljevkasti pokusi su izvedeni zbog određivanja učinka eksploziva smanjene gustoće na stijenu te određivanja najpovoljnijeg eksploziva smanjene gustoće za miniranja u ispitivanoj stjenskoj masi.

6.4.3.1. Mjerenja volumena odloma

Manji dio mjerenja je odbačen zbog utjecaja geoloških uvjeta u miniranoj stjenskoj masi odnosno zbog postojanju pukotina koje su utjecale na prekomjerni odlom stjenskog materijala miniranjem. Rezultati ljevkastih pokusa s eksplozivima smanjene gustoće su prikazani u tablici 6-31. Na slici 6-54 nalazi se fotografija lijevaka s najvećim odlomom ostvarenim otpucavanjem mješavine emulzijske matrice i granuliranog EPS-a, a na slici 6-55 nalazi se fotografija lijevaka s najmanjim odlomom ostvarenim otpucavanjem mješavine emulzijske matrice i granuliranog EPS-a.

Tablica 6-31. Rezultati ljevkastih pokusa.

Red. broj	Oznaka minske bušotine	Masa odminiranog materijala, m_{OM} (g)	Dubina lijevka, h_L (mm)	Masa eksplozivne tvari, Q (g)	Gustoća dijabaza, ρ_D (g/cm ³)	Volumen odminiranog materijala, V_{OD} (cm ³)	Specifični odlom, V/Q (cm ³ /g)
Pentrit							
1		38825	205	72,03	2,9	13388	185,86
Srednja vrijednost		38825	205	72,03	2,90	13388	185,86
ANFO							
1		26110	105	66,03	2,9	9003	136,35
Srednja vrijednost		26110	105	66,03	2,90	9003	136,35
Emulzijski eksploziv							
1	T57	18800	140	72,18	2,9	6483	89,81
2	T58	20683	165	73,24	2,9	7132	97,38
3	T59	17147	160	72,36	2,9	5913	81,71
4	T59A	13926	145	73,11	2,9	4802	65,68
5	T73	19770	140	73,18	2,9	6817	93,16
Srednja vrijednost		18065	150	72,81	2,90	6229	85,55

Tablica 6-31. Rezultati ljevkastih pokusa (nastavak).

Red. broj	Oznaka minske bušotine	Masa odminiranog materijala, m_{OM} (g)	Dubina lijevka, h_L (mm)	Masa eksplozivne tvari, Q (g)	Gustoća dijabaza, ρ_D (g/cm ³)	Volumen odminiranog materijala, V_{OD} (cm ³)	Specifični odlom, V/Q (cm ³ /g)
Emulzijska matrica : EPS 50:50							
1	T60	18370	145	41,42	2,9	6334	152,93
2	T61	19126	160	42,40	2,9	6595	155,55
3	T62A	15865	135	42,80	2,9	5471	127,82
4	T75	15723	130	42,54	2,9	5422	127,45
5		14896	140	41,85	2,9	5137	122,74
Srednja vrijednost		16796	142	42,20	2,90	5792	137,30
Emulzijska matrica : EPS 40:60							
1	T63	17051	140	33,55	2,9	5880	175,25
2	T65	16922	145	33,70	2,9	5835	173,15
3	T65A	15897	130	33,81	2,9	5482	162,13
4	T65B	14310	125	33,51	2,9	4934	147,25
5		14523	135	33,79	2,9	5008	148,21
Srednja vrijednost		15741	135	33,67	2,90	5428	161,20
Emulzijska matrica : EPS 30:70							
1	T49	11310	110	23,64	2,9	3900	164,97
2	T66	9266	100	23,65	2,9	3195	135,10
3	T67	10596	110	23,72	2,9	3654	154,04
4	T68	11282	105	23,78	2,9	3890	163,60
5	T68A	9749	95	23,20	2,9	3362	144,90
Srednja vrijednost		10441	104	23,60	2,90	3600	152,52
Emulzijska matrica : EPS 20:80							
1	T53	2070	95	15,23	2,9	714	46,87
2	T69	2892	60	15,64	2,9	997	63,76
3	T71	2762	80	15,84	2,9	952	60,13
4	T72	3065	75	15,67	2,9	1057	67,45
5	T72A	3927	85	15,78	2,9	1354	85,81
Srednja vrijednost		2943	79	15,63	2,90	1015	64,80



Kazalo:

- a) stjenska masa prije otpucavanja,
- b) stjenska masa nakon otpucavanja i
- c) lijevak nastao otpucavanjem eksplozivnog punjenja minske bušotine.

Slika 6-54. Lijevak s najvećim odlomom (M+EPS 40:60).



Kazalo:

- a) stjenska masa prije otpucavanja,
- b) stjenska masa nakon otpucavanja i
- c) lijevak nastao otpucavanjem eksplozivnog punjenja minske bušotine.

Slika 6-55. Lijevak s najmanjim odlomom (M+EPS 20:80).

6.4.4. Granulometrijski sastav odminiranog materijala

Granulometrijski sastav materijala prikazuje postotak čestica određene krupnoće u ukupnoj masi uzorka. Prikazuje se granulometrijskom krivuljom u polulogaritamskom mjerilu, kod kojeg je na osi apscisa promjer zrna D (mm) u logaritamskom mjerilu, a na osi ordinata prolaz kroz sito određenog otvora u postocima.

Ukoliko je materijal sastavljen isključivo od krupnozrnatih čestica (šljunka i pijeska), provodi se analiza sijanem.

U laboratoriju je sijanem određen granulometrijski sastav odminiranog materijala. Korištena su sita sa slijedećim otvorima: 4 mm, 8 mm, 16 mm, 32 mm, 50 mm i 70 mm.

Rezultati granulometrijske analize su, tablično i grafički, dani u sklopu analize druge skupine ispitivanja. Fotografije odminiranog materijala pojedinih veličina zrnaca su prikazane na slici 6-56.



Kazalo:

- a) + 70 mm,
- b) 70/50 mm,
- c) 50/32 mm,
- d) 32/16,
- e) 16/8,
- f) 8/4 i
- g) – 4 mm.

Slika 6-56. Veličine zrnaca odminiranog materijala.

6.4.5. Mjerenje brzina oscilacija

Prilikom svakoga miniranja najveći dio oslobođene energije eksplozivnoga punjenja utroši se na razaranje i drobljenje stijene. Dio oslobođene energije eksplozivnog punjenja koji se nije utrošio na razaranje i drobljenje stijene pretvara se u kinetičku energiju različitih tipova elastičnih valova koji se međusobno razlikuju u brzini širenja, intenzitetu i obliku deformacije (Krsnik 1989).

Eksplozivno punjenje minske bušotine može se smatrati epicentrom umjetno izazvanog potresa. Oscilacije se prenose elastičnim valovima od epicentra radijalno kroz stjensku masu u svim smjerovima. Prolazom kroz stjensku masu energija se troši, a amplitude oscilacija (pomak, brzina i akceleracija) prigušuju se eksponencijalno udaljavanjem od epicentra.

Brzina oscilacije stijene, objekta, ili dijela objekta na mjestu mjerenja prihvaćena je veličina za ocjenu mogućnosti nastanka oštećenja na njima. Oštećenja se mogu svrstati u više kategorija, od onih estetske prirode poput oštećenja na fasadama, žbukama, spojevima i sl., do bitnih oštećenja nosivih elemenata objekta. Prilikom miniranja potrebno je osigurati da ne dođe do oštećenja bilo koje razine, budući da i ona kozmetičke naravi pretpostavljaju sanaciju, što osim kroz troškove stvara psihološki otpor stanovništva i nepovjerenje u sigurno izvođenje miniranja. Dozvoljeni intenzitet seizmičkih valova je reguliran zakonskim normama (Stanković 2011).

Poznato je nekoliko najčešće korištenih normi čije se dozvoljene veličine međusobno razlikuju. Svaka norma ima nekoliko različitih granica kojima se određuju veličine dopuštenih oscilacija za pojedine tipove građevina. Za novije i kvalitetnije izgrađene objekte raste i dozvoljena brzina oscilacija. Najčešće korištene norme su (Stanković 2011):

- USBM RI8507 And OSMRE,
- ISO 4866:1990,
- DIN 4150,
- British Standard 7385 i
- Švedska norma.

Sve norme određuju dozvoljene veličine na osnovu brzine oscilacija tla v (mm/s) i frekvencije f (Hz).

6.4.5.1. Seizmografi

Seizmografi su uređaji za praćenje valnih pojava u stjenjnoj masi. Pojedine vrste uređaja primjenjuju se za detekciju, praćenje i mjerenje valova prirodnih potresa, za mjerenja brzina seizmičkih valova istražnim geofizičkim metodama ili za praćenje utjecaja miniranja na okolnu stjenjnu masu i građevine.

U slučaju provedenih mjerenja, brzina oscilacija korištena je kao veličina za ocjenu smanjenja udarnog djelovanja eksplozivnog punjenja. S druge strane veličina brzina oscilacija parametar je ocjene potencijalno štetnog utjecaja miniranja na okolinu.

Za mjerenje brzina oscilacija korišteni su seizmografi Instancel.

Generalne značajke i mjernih mogućnosti seizmografa i osjetila dane su u tablici 6-32.

Tablica 6-32. Tehničke i mjerne značajke seizmografa Instantel (<http://www.instantel.com/pdf/714b0063.pdf>).

Instantel BlastMate Series III	
Četvorokanalni	
Seizmički kanali x 3	1024-16,384 uzoraka/s/kanal
Maks.raspon	254 mm/s
rezolucija	0,0159 mm/s
Akceleracija i pomak	proračun računalnom obradom
Pomak	0,00023-3,5 cm
Buka i zračni udar x 1	1024-16,384 uzoraka/s/kanal
Raspon	88-148 dB (linearni), 50-110 dB («A»)
Rezolucija	0,25 Pa (linearni), 0,1 dB («A»)
Obrada podataka	programski paket Instantel BlastWare III

Mjerni sustav za mjerenje brzina oscilacija sastoji se od mjernog uređaja i geofona, odnosno osjetila. Mjerena veličina je brzina oscilacija na mjestu postavljanja geofona. Brzina oscilacija mjeri se kontinuirano u određenom vremenskom intervalu, a mjerni zapis pokazuje trajektoriju brzina oscilacija. Seizmografi tipa BlastMate i MiniMate, te trokomponentni geofon prikazani su slikom 6-57.



Slika 6-57. Seizmografi i trokomponentni geofon (www.instantel.com/pdf/714b0063.pdf).

Geofoni su trokomponentni, odnosno istovremeno mogu pratiti oscilacije unutar tri prostorne međusobno okomite osi. Prema tome razlikuju se i tri komponente mjerenih brzina oscilacija:

- longitudinalna ili radijalna,
- transverzalna i

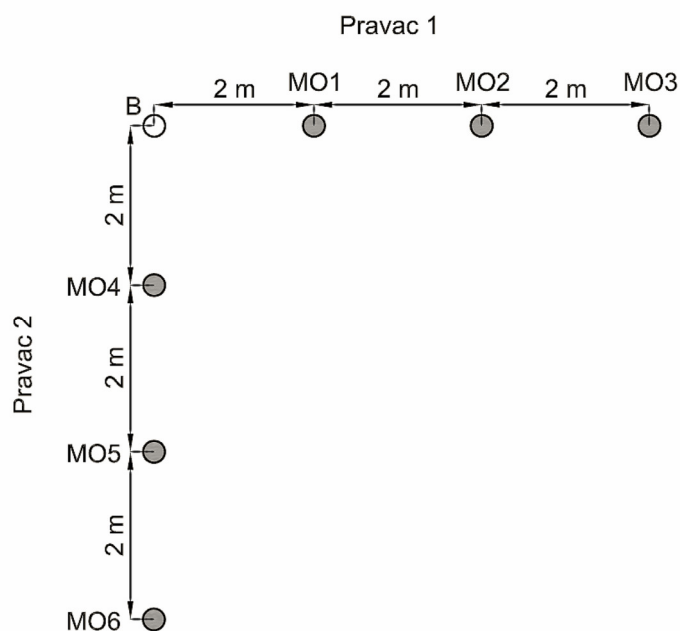
- vertikalna komponenta.

Najveća vektorska suma prostorne brzine oscilacija koristi se za ocjenu djelovanja miniranja.

6.4.5.2. Mjerenja

Otpucano je ukupno 27 bušotina, po 5 za svaku mješavinu i 5 za emulzijski eksploziv te po 1 bušotina za Pentrit i za ANFO-eksploziv, a pojedinačno, su mjerene brzine oscilacija na mjernim mjestima prema rasporedu prikazanom na slici 6-58. Prilikom mjerenja brzina oscilacija seizmičkih mjerenja postavljeno je 6 seizmografa, po 3 u dva međusobno okomita pravaca na jednakim međusobnim udaljenostima od 2 m. Na taj način omogućen je proračun prigušenja amplituda brzina oscilacija i analiza u pojedinom smjeru.

Postav provedenih mjerenja prikazan je na slici 6-58.



Kazalo:

B – bušotina,

MO 1 – MO6 – mjesto opažanja.

Slika 6-58. Postav mjerenja.

Prilikom pojedinih miniranja znalo je doći do odbacivanja krupnijih komada kamena koji su se koristili kao opterećenje na geotekstilu koji je imao ulogu prekrivanja bušotine sa

svrhom sprječavanja razbacivanja odminiranog materijala te su znali pasti u neposrednoj blizini postavljenih geofona koji su onda zabilježili veće brzine oscilacija u odnosu na miniranje te je zbog toga manji dio mjerena odbačen.

Karakteristični snimak trajektorija komponentnih brzina oscilacija prikazan je na slici 6-59.

Srednje vrijednosti izmjerenih brzina oscilacija od pentrita, ANFO-eksploziva, emulzijskog eksploziva i od pojedinih mješavina emulzijske matrice i granuliranog EPS-a dane su u tablici 6-33, a pojedine vrijednosti izmjerenih brzina oscilacija dane su u prilogu 7. U navedenoj tablici su prikazane i mase eksplozivne tvari te svedene vrijednosti brzina oscilacija po masi eksplozivne tvari. S obzirom da se je prilikom ispitivanja održavao konstantan volumen eksplozivne tvari, a mijenjala se gustoća i masa, bilo je potrebno svesti izmjerene brzine oscilacija po masi. Izračunala se je srednja vrijednost brzina oscilacija iz 5 mjerenja te se je ta vrijednost podijelila s masom prema slijedećem izrazu:

$$PVS_{\text{sved}} = \frac{PVS_{\text{sr}}}{m_{\text{ET}}}, \quad (6-19)$$

gdje je:

PVS_{sved} – svedena vrijednost brzina oscilacija po masi (mm/s/g),

PVS_{sr} – srednja vrijednost brzina oscilacija (mm/s) i

m_{ET} – masa eksplozivne tvari (g).



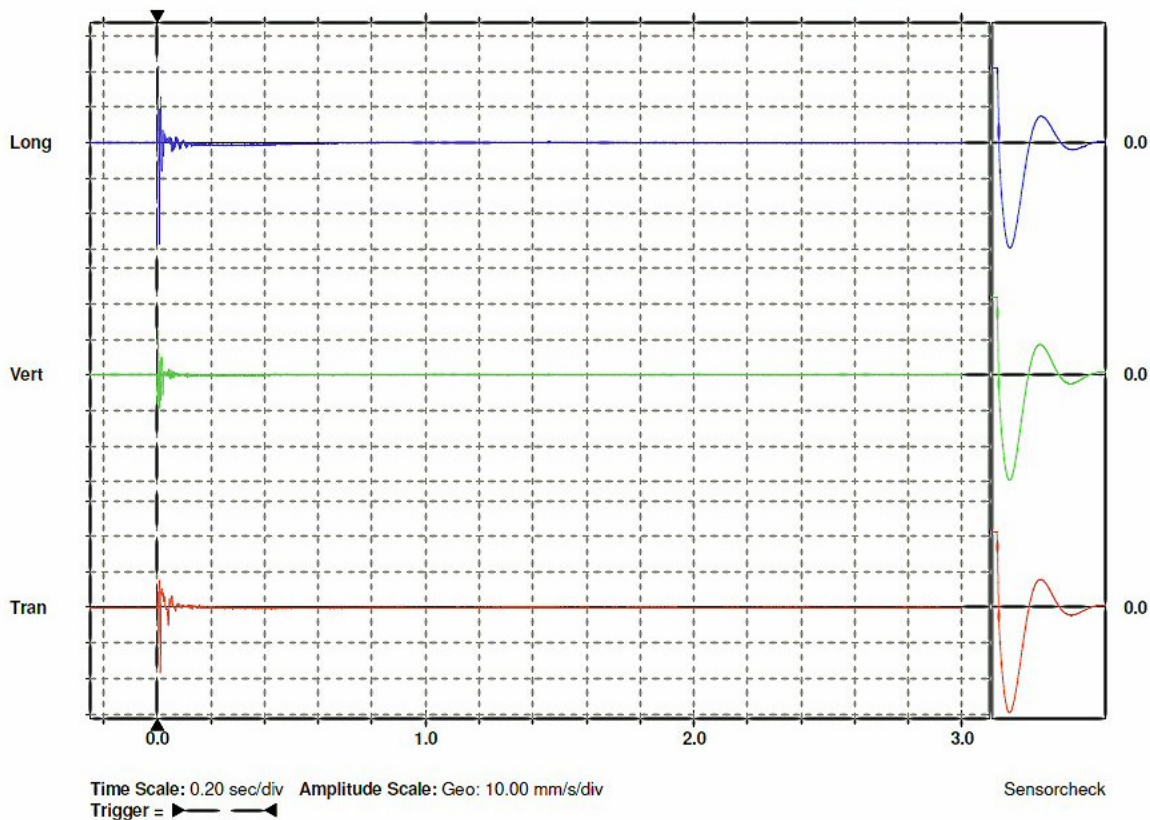
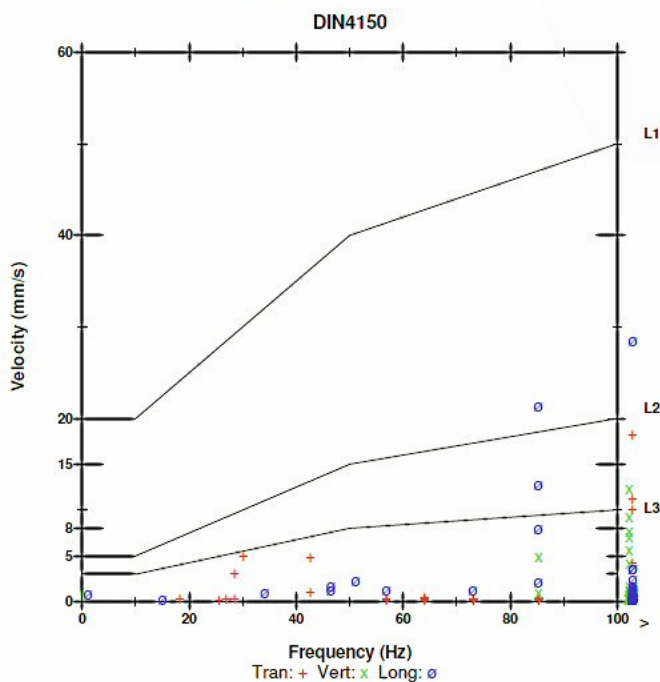
Event Report

Date/Time Vert at 13:25:46 July 15, 2014
 Trigger Source Geo: 1.00 mm/s
 Range Geo : 254 mm/s
 Record Time 3.0 sec at 1024 sps
 Notes
 Location: Kamenolom Jazvine
 Client: RGNF
 User Name: RGNF
 General: Disertacija

Serial Number BE10774 V 8.01-8.0 MiniMate Plus/8
 Battery Level 6.4 Volts
 Unit Calibration December 21, 2005 by InstanTEL, Inc
 File Name L774FEWY.MYO

	Tran	Vert	Long	
PPV	18.4	12.4	28.6	mm/s
ZC Freq	>100	>100	>100	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.012	0.004	0.008	sec
Peak Acceleration	1.66	1.10	3.18	g
Peak Displacement	0.0246	0.0100	0.120	mm
Sensorcheck	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.6	7.6	7.4	Hz
Overswing Ratio	3.8	3.5	4.0	

Peak Vector Sum 29.6 mm/s at 0.008 sec



Slika 6-59. Karakteristični snimak brzina oscilacija (emulzijski eksploziv).

Tablica 6-33. Brzine oscilacija.

Pentrit							
	Pravac 1			Pravac 2			Masa eksplozivne tvari (g)
	MO1	MO2	MO3	MO4	MO5	MO6	
Srednja vrijednost PVS (mm/s)	61,30	16,76	8,64	112,70	38,95	8,95	71,98
Svedena vrijednost ((mm/s)/g)	0,852	0,233	0,120	1,566	0,541	0,124	
ANFO eksploziv							
Srednja vrijednost PVS (mm/s)	27,06	4,10	3,57	38,20	3,18	2,54	66,03
Svedena vrijednost ((mm/s)/g)	0,410	0,062	0,054	0,579	0,048	0,038	
Emulzijski eksploziv							
Srednja vrijednost PVS (mm/s)	39,40	22,16	11,73	33,65	20,03	6,82	72,81
Svedena vrijednost ((mm/s)/g)	0,541	0,304	0,161	0,462	0,275	0,094	
Matrica : EPS 50 : 50							
Srednja vrijednost PVS (mm/s)	26,73	13,62	7,66	33,67	10,13	3,91	42,29
Svedena vrijednost ((mm/s)/g)	0,632	0,322	0,181	0,796	0,239	0,093	
Matrica : EPS 40 : 60							
Srednja vrijednost PVS (mm/s)	16,60	6,47	4,30	15,00	8,16	2,45	33,67
Svedena vrijednost ((mm/s)/g)	0,493	0,192	0,128	0,446	0,242	0,073	
Matrica : EPS 30 : 70							
Srednja vrijednost PVS (mm/s)	12,27	6,04	3,78	14,44	6,24	3,96	23,60
Svedena vrijednost ((mm/s)/g)	0,520	0,256	0,160	0,612	0,264	0,168	
Matrica : EPS 20 : 80							
Srednja vrijednost PVS (mm/s)	7,44	3,96	2,86	5,66	4,40	1,16	15,63
Svedena vrijednost ((mm/s)/g)	0,476	0,253	0,183	0,362	0,281	0,074	

6.5. Analiza druge skupine ispitivanja

U drugoj skupini ispitivanja određen učinak eksploziva smanjene gustoće u stjenjnoj masi slijedećim metodama:

- mjerenje brzine detonacije u bušotini,
- ljevkaški pokusi,
- određivanje granulometrijskog sastava odminiranog materijala i
- mjerenje brzina oscilacija.

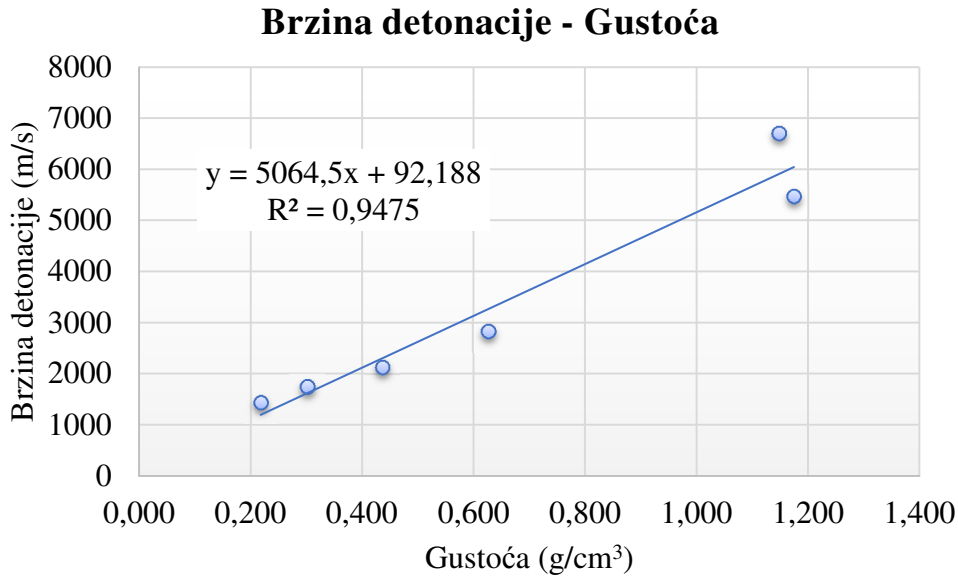
6.5.1. Analiza brzine detonacije u bušotini u ovisnosti od gustoće

Srednje vrijednosti izmjerenih brzina detonacije za pojedine gustoće pentrita, ANFO-eksploziva, emulzijske matrice s mikrokuglicama i emulzijske matrice s dodatkom granuliranog EPS-a prikazane su u tablici 6-34.

Tablica 6-34. Srednje vrijednosti izmjerenih brzina detonacije za pojedine gustoće eksploziva.

Vrsta eksploziva	Omjer eksploziv : EPS	Gustoća, ρ (g/cm ³)	Brzina detonacije, v (m/s)
Pentrit	100:0	1,148	6706
Matrica / Mikrokuglice	100:0	1,175	5478
Matrica / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	50:50	0,627	2836
Matrica / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	40:60	0,437	2136
Matrica / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	30:70	0,302	1746
Matrica / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	20:80	0,218	1438
ANFO-eksploziv	100:0	0,838	952

Zavisnost brzine detonacije u bušotini od gustoće eksploziva je na grafikonu na slici 6-60.



Slika 6-60. Zavisnost brzine detonacije u bušotini od gustoće eksplozivne tvari.

Iz tablice 6-34 i iz dijagrama na slici 6-60 je vidljivo da najniža gustoća smjese kod koje se postiže stabilna brzina detonacije u bušotini iznosi 0,218 g/cm³.

Za rezultate mjerenja brzine detonacije napravljena je regresijska analiza s gustoćom emulzijske matrice s dodatkom EPS-a. Za regresijsku analizu korištena je linearna regresija.

Iz dijagrama na slici 6-60 je vidljivo da se zavisnost brzine detonacije o gustoći emulzijske matrice s dodatkom granuliranog EPS-a može izračunati prema izrazu 6-20 uz koeficijent determinacije $R^2 = 0,9475$ odnosno 94,75 %:

$$v_d = 92,188 + 5064,5 \rho_E \quad (6-20)$$

Brzine detonacije u bušotini su nižih vrijednosti, prosječno 11,18 %, u odnosu na brzine detonacije u čeličnim cijevima za pojedine mješavine dok je razlika za emulzijski eksploziv (mješavina emulzijske matrice i mikrokuglica) značajno manja. U tablici 6-35 je prikazana usporedba rezultata mjerenja brzine detonacije u bušotini s mjerenjima brzine detonacije u čeličnim cijevima. Razlika u brzini detonacije se može objasniti uvjetima zatvorenog prostora. Za razliku od ispitivanja u čeličnim cijevima, pojedine mješavine prilikom stavljanja u bušotinu su bile patronirane u PVC cijevi koje imaju puno manju tlačnu čvrstoću u odnosu na čelične cijevi te postižu uvjete zatvorenog prostora tek u bušotini. S obzirom da je bušotina šira u odnosu na PVC cijev (32 mm/25 mm), između stijenke bušotine i cijevi postoji zračni prostor koji prigušuje i udarni val i uzrokuje smanjenje tlaka plinova u ekspanziji što u konačnici zbog smanjene refleksije valova utječe na brzinu detonacije smanjuje.

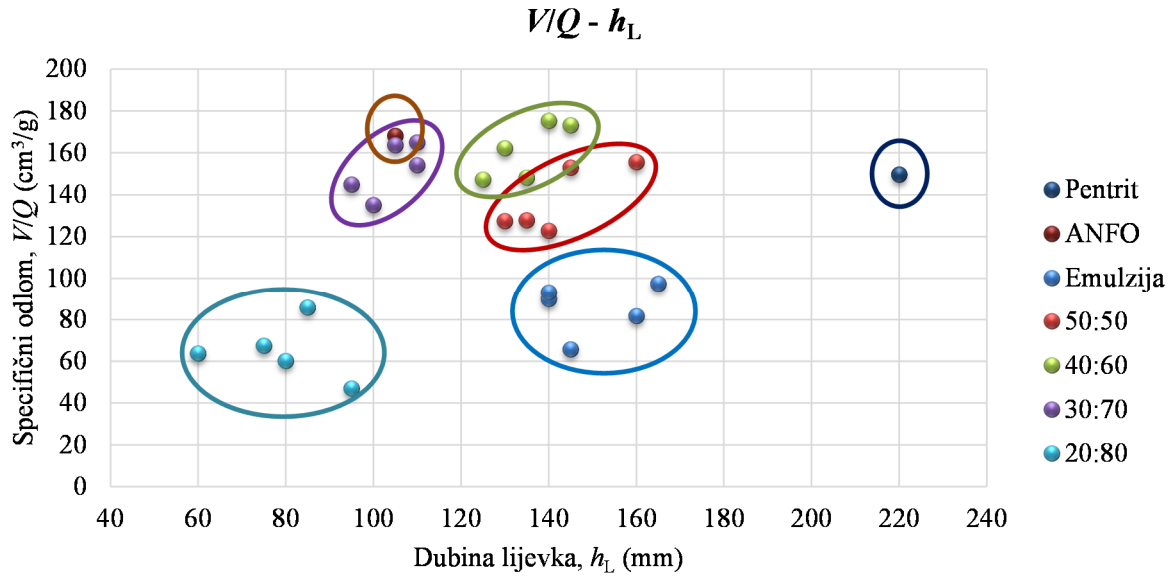
Tablica 6-35. Usporedba vrijednosti izmjerenih brzina detonacije u bušotini i u čeličnim cijevima.

Vrsta eksploziva (veličina granula EPS-a)	Omjer eksploziv: EPS	Brzina detonacije u bušotini, v_b (m/s)	Brzina detonacije u čeličnim cijevima, $v_{\check{c}e}$ (m/s)	Razlika brzina detonacije (m/s)
Pentrit	100:0	6706	6517	189
Matrica / Mikrokglice	100:0	5478	5534	56
Matrica / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	50:50	2836	3051	215
Matrica / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	40:60	2136	2491	355
Matrica / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	30:70	1746	2089	344
Matrica / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	20:80	1438	1710	272
ANFO-eksploziv	100:0	952	985	33

6.5.2. Analiza ljevkastih pokusa

Na grafikonu na slici 6-61 prikazan je odnos specifičnog odloma i dubine lijevka u stijenskoj masi dobivenog otpucavanjem eksplozivnog punjenja minske bušotine za pojedinu eksplozivnu tvar.

Specifični volumen odloma svedeni je volumen lijevka na jediničnu masu masom eksplozivnog punjenja minske bušotine. Volumen odloma (ljevka) je dobiven preko odminiranog materijala i to na način da se je masa odminiranog materijala podijelila s gustoćom materijala u sraslom stanju. Takav pristup uključuje grešku zbog postojećih pukotina ali s obzirom da su sve minske bušotine otpucavane u istim uvjetima, u istom geološkom sklopu, onda je greška zbog postojećih pukotina jednaka za sva otpucavanja i ne treba ju posebno uzeti u obzir.

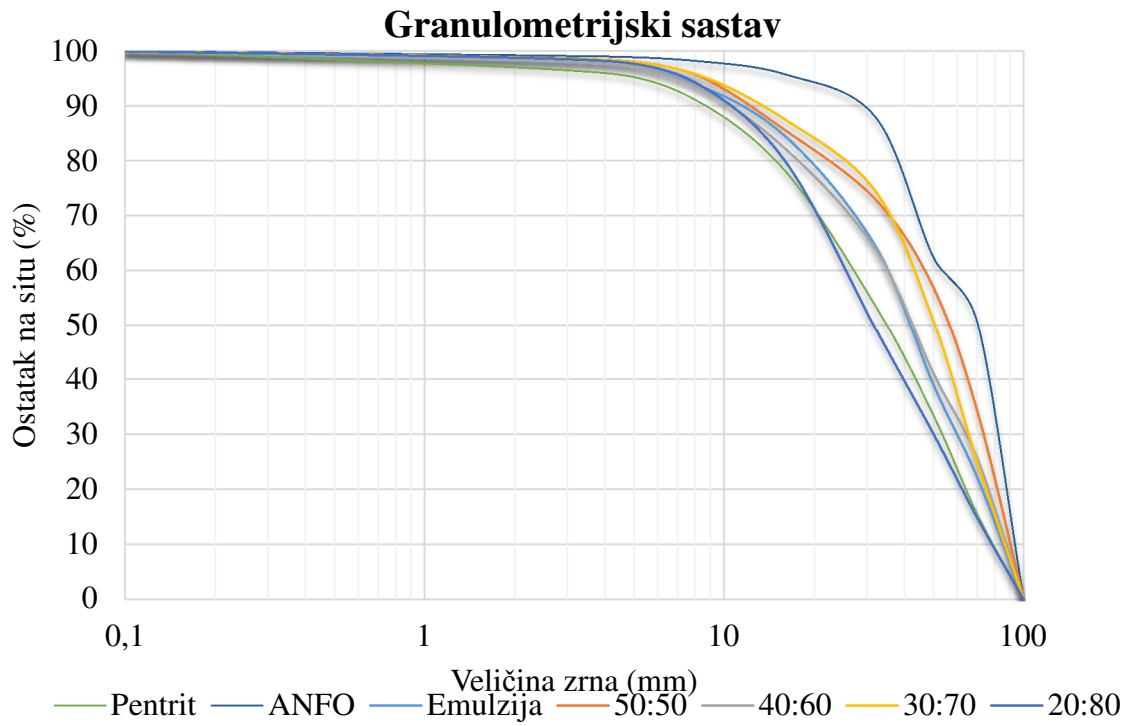


Slika 6-61. Odnos specifičnog odloma i dubine lijevka $V/Q - h_L$ – grupirani podaci.

Iz dijagrama na slici 6-61 je vidljivo da je najveći specifični odlom u odnosu na ostvarenu dubinu lijevka ostvaren s mješavinom emulzijske matrice i granuliranog EPS-a u volumnom omjeru 40:60. Dobar specifični odlom u odnosu na dubinu lijevka je ostvaren i s mješavinom emulzijske matrice i granuliranog EPS-a u volumnom omjeru 50:50 te s ANFO-eksplozivom. Pentritom je ostvarena najveća dubina lijevka uz dosta veliki specifični odlom. Optimizirajući odnos dubine lijevka i specifičnog odloma na način da se ostvari što veća dubina lijevka uz što veći specifični odlom može se utjecati na dubinu probušnja kod miniranja.

6.5.3. Analiza granulometrijskog sastava odminiranog materijala

Rezultati granulometrijske analize odminiranog materijala dani su u tablici 6-36, a granulometrijski sastav prikazan je dijagramom na slici 6-62.



Slika 6-62. Granulometrijski sastav odminiranog materijala.

Tablica 6-36. Granulometrijska analiza odminiranog materijala.

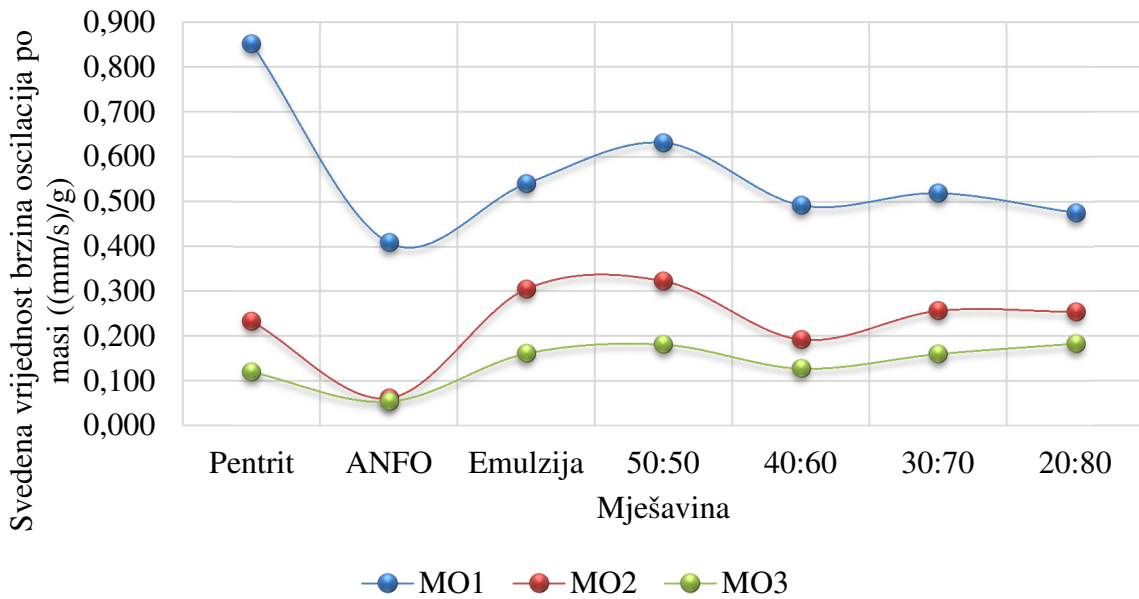
Pentrit			ANFO		
Klasa, (mm)	Masa, (g)	Masa, (%)	Klasa, (mm)	Masa, (g)	Masa, (%)
+70	5716,4	14,72	+70	12944,2	49,58
70/50	6922,0	17,83	70/50	3111,7	11,92
50/32	7865,8	20,26	50/32	6750,3	25,85
32/16	9684,1	24,94	32/16	2037,9	7,81
16/8	4964,2	12,79	16/8	692,1	2,65
8/4	1922,9	4,95	8/4	258,9	0,99
-4	1749,1	4,51	-4	314,8	1,21
Σ	38824,5	100	Σ	26109,9	100
Emulzijski eksploziv			M:EPS 30:70		
Klasa, (mm)	Masa, (g)	Masa, (%)	Klasa, (mm)	Masa, (g)	Masa, (%)
+70	19883,6	22,12	+70	12862,9	24,83
70/50	15150,9	16,85	70/50	13378,6	25,82
50/32	22885,6	25,46	50/32	12322,0	23,78
32/16	18004,7	20,03	32/16	6767,2	13,06
16/8	8581,7	9,55	16/8	4322,6	8,34
8/4	3236,7	3,60	8/4	1321,5	2,55
-4	2152,2	2,39	-4	832,1	1,61
Σ	89895,4	100	Σ	51806,9	100
M:EPS 50:50			M:EPS 20:80		
Klasa, (mm)	Masa, (g)	Masa, (%)	Klasa, (mm)	Masa, (g)	Masa, (%)
+70	23533,1	34,18	+70	2115,6	14,79
70/50	15589,8	22,64	70/50	2183,0	15,26
50/32	11097,0	16,12	50/32	2755,3	19,26
32/16	8674,5	12,60	32/16	4375,4	30,58
16/8	7009,1	10,18	16/8	2060,7	14,40
8/4	1865,2	2,71	8/4	561,8	3,93
-4	1078,8	1,57	-4	255,0	1,78
Σ	68847,5	100	Σ	14306,8	100
M:EPS 40:60					
Klasa, (mm)	Masa, (g)	Masa, (%)			
+70	14638,9	25,56			
70/50	8861,5	15,47			
50/32	13088,2	22,85			
32/16	10486,9	18,31			
16/8	6553,6	11,44			
8/4	2300,0	4,02			
-4	1346,9	2,35			
Σ	57276,0	100			

Veliki udio sitnih frakcija nastaje prekomjernim udarnim djelovanjem i nepoželjan je. S druge strane jednoliki udio pojedinih krupnijih frakcija je poželjan. Prema podacima iz tablice 6-36 i iz dijagrama na slici 6-61 vidljivo je da je najveći udio sitnih frakcija (-4 mm i $4/8\text{ mm}$) dobiven kod djelovanja pentrita koji ima najveće udarno djelovanje prema podacima iz određivanja brizantnosti. Jednoliki udio pojedinih krupnijih frakcija je dobiven kod djelovanja mješavine emulzijske matrice i EPS-a u volumnom omjeru 40:60 i kod djelovanja emulzijskog eksploziva. Prema ispitivanjima s dvostrukim cijevima udarno djelovanje za emulziju iznosi 55,35 % udarnog djelovanja pentrita, za omjer 50:50 iznosi 10,99 %, a za omjer 40:60 iznosi 0,46 %, dok ukupna radna sposobnost, određena modificiranim Trauzlom, za emulziju iznosi 52 % radne sposobnosti pentrita, a za omjere 50:50 i 40:60 25 %. Prilikom mjerenja brzina oscilacija, pentrit i emulzija su imali najveće vrijednosti svedenih brzina oscilacija po jedinici mase eksploziva. Iz tih podataka je vidljivo da veliko udarno djelovanje daje veliki udio sitne frakcije uz velike brzine oscilacija odnosno ima veći štetni utjecaj miniranja na okolinu u odnosu na eksplozive sa smanjenim udarnim djelovanjem. Eksplozivi smanjene gustoće sa smanjenim udarnim djelovanjem ali uz dovoljnu ukupnu radnu sposobnost daju optimalnu fragmentaciju uz smanjeni štetni utjecaj miniranja na okolinu.

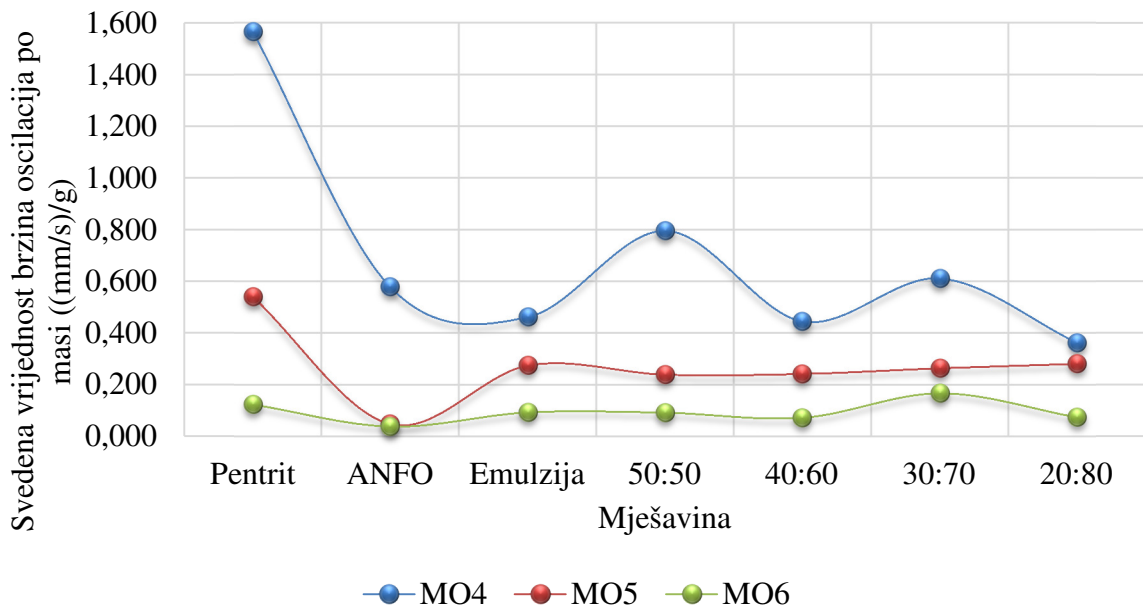
Na osnovu granulometrijske analize odminiranog materijala može se zaključiti da mješavina emulzijske matrice i EPS-a u volumnom omjeru 40:60 s gustoćom od $0,410\text{ g/cm}^3$ predstavlja optimalnu mješavinu.

6.5.4. Analiza seizmičkog utjecaja miniranja

Na dijagramu na slici 6-63 prikazani su rezultati svedenih vrijednosti brzina oscilacija po masi za pojedine mješavine za mjerenja u pravcu 1, a na dijagramu na slici 6-64 za mjerenja u pravcu 2.

Pravac 1 - zbirno

Slika 6-63. Svedena vrijednost brzina oscilacija po masi za pojedine mješavine za mjerenja u pravcu 1.

Pravac 2 - zbirno

Slika 6-64. Svedena vrijednost brzina oscilacija po masi za pojedine mješavine za mjerenja u pravcu 2.

Iz dijagrama na slikama 6-64 i 6-65 vidljivo je da ANFO-eksploziv ima najmanje svedene vrijednosti brzina oscilacija po masi i to u oba pravca. To se može objasniti činjenicom da je ANFO-eksploziv iniciran detonatorom, a ne pojačnikom. Mješavina 3 (omjer 40:60), u

odnosu na ostale eksplozive, izuzev ANFO-eksploziva, ima najmanje svedene vrijednosti brzina oscilacija po masi i to u oba pravca i na većini mjesta opažanja. Manje svedene vrijednosti brzina oscilacija po masi zabilježene su kod mješavine 5 (omjer 20:80).

Na osnovu analize druge skupine ispitivanja može se zaključiti da mješavina emulzijske matrice i granuliranog EPS-a je optimalna mješavina. Iako mješavina u omjeru 50:50 pokazuje nešto slabije rezultate prilikom određivanja seizmičkog utjecaja miniranja u odnosu na mješavinu u omjeru 40:60 i ona će se uzeti u obzir kod treće skupine ispitivanja iz razloga što se je prilikom ostalih ispitivanja pokazala dobrom.

6.6. Treća skupina ispitivanja

U treću skupinu ispitivanja spada određivanje minersko-tehničkih značajki eksploziva smanjene gustoće odnosno optimalnih mješavina emulzijske matrice i granuliranog EPS-a.

Minersko – tehničke značajke odabranog eksploziva moraju biti u skladu s fizikalno – mehaničkim svojstvima stijene koju se minira. Ukupna učinkovitost i primjena eksploziva u određenoj sredini ovisi o tome kolika se energija oslobađa prilikom detonacije eksplozivnog punjenja i koliki mehanički rad ta energija i produkti reakcije ostvaruju na okolni materijal. Minersko – tehničke značajke opisuju navedenu sposobnost pojedinih gospodarskih eksploziva.

U minersko-tehničke značajke eksploziva spadaju:

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

6.6.1. Brzina detonacije

Brzina detonacije je jedna od važnijih karakteristika eksploziva, a prema njenom iznosu može se ocijeniti adekvatnost eksploziva za pojedinu upotrebu. O brzini detonacije ovisi i razorna snaga, odnosno brizantnost eksploziva. Za mjerenje brzine detonacije primijenjeni su zahtjevi norme *HRN EN 13631-14:2004: Eksplozivi za civilnu uporabu. Jaki eksplozivi. 14. dio: Određivanje brzine detonacije (EN 13631-14:2004)*.

Brzina detonacije je određena u laboratorijskim uvjetima i na terenu direktno u bušotini. Srednje vrijednosti rezultata mjerenja brzine detonacije u laboratorijskim uvjetima i na terenu direktno u bušotini dani su u tablici 6-37.

Tablica 6-37. Brzina detonacije emulzijske matrice s dodatkom EPS-a određena u laboratoriju i na terenu

Vrsta eksploziva (veličina granula EPS-a)	Omjer eksploziv: EPS	Brzina detonacije u laboratoriju (m/s)	Brzina detonacije na terenu (m/s)
Matrica / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	50:50	3051	2836
Matrica / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	40:60	2491	2136

6.6.2. Gustoća

Gustoća je određena eksperimentalno prema zahtjevima norme *HRN EN 13631-13:2003: Eksplozivi za civilnu uporabu. Jaki eksplozivi. 14. dio: Određivanje gustoće (EN 13631-13:2003)*.

Gustoća je određena na 5 uzoraka za obje mješavine emulzijske matrice i EPS-a . U tablici 6-38 su prikazane srednje vrijednosti gustoća.

Tablica 6-38. Gustoće matrice za emulziju s dodatkom EPS-a.

Vrsta eksploziva (veličina granula EPS-a)	Omjer eksploziv: EPS	Gustoća, ρ (g/cm ³)
Matrica / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	50:50	0,627
Matrica / EPS (1,5 mm – 3,5 mm)	40:60	0,437

6.6.3. Mogućnosti iniciranja

Mogućnost iniciranja eksploziva smanjene gustoće je određena na 10 uzorka za mješavine emulzijske matrice i granuliranog EPS-a u volumnim omjerima 50:50 i 40:60.

Eksploziv smanjene gustoće na bazi emulzijske matrice i EPS-a je osjetljiv na inicijalni impuls referentnog detonatora br. 4 u uvjetima zatvorenog prostora (u čeličnoj cijevi, u bušotini, ...).

6.6.4. Temperatura paljenja

Temperatura paljenja eksploziva je najniža temperatura kod koje dođe do reakcije eksploziva (eksplozija, paljenje, pojava dima, ...).

Za određivanje temperature paljenja koristi se metalna posuda dimenzija \varnothing 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. Posuda se zagrijava s porastom temperature od 5 °C u jednoj minuti i to sve dok ne nastupi reakcija. Temperatura paljenja je određena na 3 uzorka mase 0,2 g za mješavine emulzijske matrice i granuliranog EPS-a u volumnim omjerima 50:50 i 40:60.

Rezultati određivanja temperature paljenja eksploziva smanjene gustoće su dani u tablici 6-39.

Tablica 6-39. Određivanje temperature paljenja eksploziva smanjene gustoće.

Eksploziv	Ispitivanje br.	Masa (g)	Temperatura (°C)
50:50	1	0,2	186
50:50	2	0,2	183
50:50	3	0,2	187
40:60	1	0,2	187
40:60	2	0,2	185
40:60	3	0,2	184

Najniža temperatura paljenja za mješavinu emulzijske matrice i EPS-a u volumnom omjeru 50:50 iznosi 183 °C, a u omjeru 40:60 iznosi 184 °C.

6.6.5. Osjetljivost na udar

Određivanje osjetljivosti eksploziva na udar i udarne energije pri kojoj dolazi do reakcije važan je podatak pri transportu eksploziva i općenito pri izvođenju minerskih radova.

Određivanje osjetljivosti na udar različitih vrsta eksploziva daje podatak o razini sigurnosti rukovanja i manipulacije eksplozivima. Na osnovu tog podatka moguće je ocijeniti sigurnost rukovanja i način manipulacije eksplozivima te rizik od neželjenog iniciranja zaostalih mina udarom za pojedinu vrstu korištenog eksploziva prilikom strojnog iskopa nakon miniranja.

Osjetljivost na udar različitih eksploziva, krutih, tekućih ili želatinoznih, određuje se različitim metodama koje rade na istom principu „padajućeg čekića“. Uteg poznate mase slobodnim padom udara na uzorak koji je postavljen tako da ne dolazi do značajnije pojave trenja između prijenosnika udara i eksploziva. Osjetljivošću na udar se smatra najmanja energija udara pri kojoj je došlo do reakcije najmanje jednom u šest ispitivanja. Energija udara je kinetička energija neposredno pred kontakt utega s eksplozivom.

Osjetljivost eksploziva smanjene gustoće na udar je određena na uzorcima mješavine emulzijske matrice i granuliranog EPS-a u volumnim omjerima 50:50 i 40:60 prema zahtjevima norme HRN EN 13631-4:2004.

Osjetljivost na udar ispitana je uređajem za ispitivanje osjetljivosti na udar BAM konstrukcije. Na uzorak volumena 40 mm³ puštan je uteg mase 5 kg s visine od 1 m. U šest ispitivanja za 3 uzorka za svaki pojedini omjer nije došlo do eksplozije. Osjetljivost na udar za uzorke mješavina emulzijske matrice i granuliranog EPS-a u volumnim omjerima 50:50 i 40:60 veća je od 50 J.

6.6.6. Osjetljivost na trenje

Osjetljivost eksploziva smanjene gustoće na trenje je određena na uzorcima mješavine emulzijske matrice i granuliranog EPS-a u volumnim omjerima 50:50 i 40:60 prema normi HRN EN 13631-3:2007. 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 je najmanje opterećenje pri kojemu je došlo do reakcije u jednom od šest ispitivanja.

Opterećenje silom 360 N u šest ispitivanja za svaki pojedini omjer nije uzrokovalo reakciju. Osjetljivost na trenje za uzorke mješavina emulzijske matrice i granuliranog EPS-a u volumnim omjerima 50:50 i 40:60 je veća od 360 N.

6.6.7. Brizantnost

Rezultati određivanja brizantnosti i radne sposobnosti za uzorke mješavina emulzijske matrice i granuliranog EPS-a u volumnim omjerima 50:50 i 40:60 u tablici 6-40.

Tablica 6-40. Brizantnost i radna sposobnost mješavina emulzijske matrice i granuliranog EPS-a u volumnim omjerima 50:50 i 40:60.

Eksploziv	Brizantnost - metoda otiska na metalnoj pločici	Brizantnost - ispitivanje dvostrukim cijevima	Radna sposobnost - modificirani Trauzl
U odnosu na pentrit			
Pentrit	1	1	1
Emulzijski eksploziv	0,77	0,5335	0,52
M:E 50:50	0,32	0,1099	0,25
M:E 40:60	0,30	0,0046	0,25
U odnosu na emulzijski eksploziv			
Pentrit	1,29	1,8066	1,93
Emulzijski eksploziv	1	1	1
M:E 50:50	0,41	0,1986	0,49
M:E 40:60	0,39	0,0748	0,49

6.7. Analiza treće skupine ispitivanja

U trećoj skupini ispitivanja određene su minersko-tehničke značajke eksploziva smanjene gustoće odnosno optimalnih mješavina emulzijske matrice i granuliranog EPS-a. Rezultati određivanja minersko-tehničkih značajki za uzorke mješavina emulzijske matrice i granuliranog EPS-a u volumnom omjeru 50:50 dani su u tablici 6-41, a za 40:60 u tablici 6-42.

Tablica 6-41. Minersko-tehničke značajke mješavina emulzijske matrice i granuliranog EPS-a u volumnom omjeru 50:50.

M:EPS 50:50	
brzina detonacije, v (m/s)	2800 – 3100
gustoća eksploziva, ρ (g/cm ³)	0,627
mogućnost iniciranja	Referentni detonator br. 4 u cijevi promjera \varnothing 22,5 mm
vodootpornost	DA
temperatura paljenja, t (°C)	183
osjetljivost na udar, W (J)	> 50
osjetljivost na trenje, F (N)	> 360
brizantnost u odnosu na emulzijski eksploziv, PDT	0,41
brizantnost u odnosu na emulzijski eksploziv, DC	0,1986
radna sposobnost u odnosu na emulzijski eksploziv	0,49

Tablica 6-42. Minersko-tehničke značajke mješavina emulzijske matrice i granuliranog EPS-a u volumnom omjeru 40:60.

M:EPS 40:60	
brzina detonacije, v (m/s)	2100 – 2500
gustoća eksploziva, ρ (g/cm ³)	0,437
mogućnost iniciranja	Referentni detonator br. 4 u cijevi promjera \varnothing 22,5 mm
vodootpornost	DA
temperatura paljenja, t (°C)	184
osjetljivost na udar, W (J)	> 50
osjetljivost na trenje, F (N)	> 360
brizantnost u odnosu na emulzijski eksploziv, PDT	0,39
brizantnost u odnosu na emulzijski eksploziv, DC	0,0748
radna sposobnost u odnosu na emulzijski eksploziv	0,49

7. ZAKLJUČAK

Istraživanja su provedena na eksplozivnim smjesama grupiranima u tri skupine.

U prvoj skupini ispitivanja su određene granične gustoće eksplozivnih smjesa pri kojima se postiže detonabilnost dokazana konstantnom brzinom detonacije.

Ispitane su sljedeće smjese:

- amonij-nitratno praškasti eksploziv s dodatkom EPS-a,
- ANFO-eksploziv s dodatkom EPS-a,
- emulzijski eksploziv s dodatkom EPS-a i
- emulzijska matrica s dodatkom EPS-a.

Granulirani EPS pokazao se kao bolje sredstvo za snižavanje gustoće eksploziva u odnosu na mehanički usitnjeni EPS, obzirom na veličinu i ujednačenost vrijednosti mjerenih brzina detonacije. Za razliku od EPS-a u granulama, čija zrnca imaju pravilan oblik kugle, zrnca mehanički usitjenoga EPS-a su nepravilnih oblika. Kuglasti oblik granula omogućava pravilnije raspoređivanje eksploziva oko samih granula, a time i bolju homogenizaciju smjese. Eksploziv je, u tom slučaju, pravilno raspoređen unutar volumena uzorka.

Budući da su mješavine emulzijske matrice s granuliranim EPS-om, veličine granula od 1,5 mm do 3,5 mm, pokazale zavisnost izmjerenih brzina detonacije od gustoće s koeficijentom determinacije $R^2 = 0,9927$ odnosno 99,27 % pojedinih mješavina, te ujednačenost mjerenih brzina detonacije s rasponom standardnih devijacija od 59 m/s do 70 m/s za pojedine mješavine, odabrane su za daljnja ispitivanja.

Radna sposobnost eksploziva smanjene gustoće na bazi emulzijske matrice i granuliranog EPS-a određena je na tri načina: metodom otiska na metalnoj pločici i ispitivanjima s duplom cijevi, koje daju mjeru udarnog, brizantnog djelovanja i metodom modificiranog Trauzla, koji je primjeren za određivanje ukupne radne sposobnosti.

Metodom otiska na metalnoj pločici određena je relativna brizantnost eksploziva smanjene gustoće u odnosu na pentrit i emulzijski eksploziv. Smanjenje gustoće eksploziva dovelo je do smanjenja brzine detonacije, tlaka detonacije, a time je i smanjeno udarno djelovanje eksploziva. Relativna brizantnost za omjer emulzijske matrice i EPS-a 50:50 iznosi 32 % udarnog djelovanja pentrita, a za omjer emulzijske matrice i EPS-a 40:60 iznosi 30 %. Relativna brizantnost za omjer emulzijske matrice i EPS-a 50:50 iznosi 36 % udarnog djelovanja emulzijskog eksploziva, a za omjer emulzijske matrice i EPS-a 40:60 iznosi 34 %. Ostale mješavine manjeg udjela emulzijske matrice imaju niže vrijednosti relativne

brizantnosti, do samo 2 % udarnog djelovanja pentrita odnosno 3 % udarnog djelovanja emulzijskog eksploziva (mješavina matrice i EPS-a u omjeru 20:80).

Rezultati ispitivanja s metodom „duplih cijevi“, koji u većoj mjeri simuliraju uvjete u minskoj bušotini, su korišteni za određivanje relativnog udarnog djelovanja. Udarno djelovanje za emulzijski eksploziv iznosi 55,35 % udarnog djelovanja pentrita, za omjer emulzijske matrice i EPS-a 50:50 iznosi 10,99 %, a za omjer emulzijske matrice i EPS-a 40:60 iznosi 0,46 %. Udarno djelovanje za omjer emulzijske matrice i EPS-a 50:50 iznosi 19,86 % udarnog djelovanja emulzijskog eksploziva, a za omjer emulzijske matrice i EPS-a 40:60 iznosi 7,48 %. Ostale mješavine imaju značajno niže vrijednosti relativnog udarnog djelovanja u duploj cijevi do 0,01 % udarnog djelovanja pentrita (mješavina emulzijske matrice i EPS-a u omjeru 20:80).

Ukupna radna sposobnost eksploziva određena je metodom modificiranog Trauzla. Ukupna radna sposobnost za emulzijski eksploziv iznosi 52 % radne sposobnosti pentrita, za omjere emulzijske matrice i EPS-a 50:50 i 40:60 iznosi 25 %, za omjer emulzijske matrice i EPS-a 30:70 iznosi 21 %, a za omjer emulzijske matrice i EPS-a 20:80 17 %. Ukupna radna sposobnost za omjere emulzijske matrice i EPS-a 50:50 i 40:60 iznosi 49 % radne sposobnosti emulzijskog eksploziva.

Mješavine matrice i EPS-a u omjerima 50:50 i 40:60 imaju jednaku ukupnu radnu sposobnost u odnosu na pentrit, približno jednako smanjenje udarnog djelovanja dobiveno metodom otiska na metalnoj pločici u odnosu na pentrit, a mješavina omjera 40:60 ima znatno veće smanjenje udarnog djelovanja dobiveno ispitivanjima s dvostrukim cijevima u donosu na pentrit.

Na osnovu provedenih ispitivanja određivanja radne sposobnosti odnosno brizantnosti i udarnog djelovanja dvostrukom cijevi eksploziva smanjene gustoće može se zaključiti da mješavine emulzijske matrice i EPS-a u volumnim omjerima 50:50 i 40:60 s pripadajućim gustoćama od $0,612 \text{ g/cm}^3$ (50:50) i $0,410 \text{ g/cm}^3$ (40:60) predstavljaju optimalne mješavine obzirom na smanjenje udarnog djelovanja uz zadržavanje ukupne radne sposobnosti.

Kod određivanja udarnog djelovanja ispitivanjima s dvostrukom cijevi, budući da uvjeti ispitivanja određuju djelovanje udarnog vala i ekspanzije plinovitih produkata u ravnini paralelnoj s osi cijevi, odnosno osi bušotine, preko deformacije ispitne cijevi, određuje se učinak od udarnog vala koji prelazi u okolinu. S druge strane kod metode otiska na čeličnoj ploči, veličina udubljenja je posljedica djelovanja ukupnog tlaka u fronti detonacijskog vala, što u uvjetima bušotine nije relevantno za obavljeni rad u stijeni. Metoda modificiranog Trauzla daje dobre podatke o radnoj sposobnosti eksploziva jer istovremeno uključuje djelovanje i udarnog vala i ekspanzirajućih plinova. Omjer 40:60 se je, prema ispitivanjima s dvostrukim

cijevima smanjenjem udarnog djelovanja u odnosu na omjer 50:50, a uz zadržavanje ukupne radne sposobnosti jednakom, pokazao optimalnijim eksplozivom smanjene gustoće.

U drugoj skupini ispitivanja određen je učinak eksploziva smanjene gustoće u stjenskoj masi. Za određivanje učinka novog eksploziva primijenjene su slijedeće metode:

- metode mjerenja brzine detonacije u bušotini,
- modificirana metoda ljevkastih pokusa – određivanje volumena odloma,
- metoda određivanja granulometrijskog sastava i
- mjerenje brzina oscilacija.

Dobiveni podaci su uspoređeni s podacima o djelovanju referentnih eksploziva te su na osnovu tih podataka odabrane optimalne eksplozivne smjese.

Brzine detonacije izmjerene u bušotini su nižih vrijednosti, prosječno 11,18 %, u odnosu na brzine detonacije izmjerene u čeličnim cijevima za pojedine mješavine dok je razlika za emulzijski eksploziv (mješavina emulzijske matrice i mikrokuglica) značajno manja. Razlika u brzini detonacije se može objasniti uvjetima zatvorenog prostora. Za razliku od ispitivanja u čeličnim cijevima, pojedine mješavine prilikom stavljanja u bušotinu su bile patronirane u PVC cijevi koje imaju manju tlačnu čvrstoću u odnosu na čelične cijevi te postižu uvjete zatvorenog prostora tek u bušotini. S obzirom da je bušotina šira u odnosu na PVC cijev (32 mm/25 mm), između stijenke bušotine i cijevi postoji zračni prostor koji prigušuje udarni val i uzrokuje smanjenje tlaka plinova u ekspanziji što u konačnici zbog smanjene refleksije valova utječe na brzinu detonacije.

Ljevkasti pokusi su izvedeni zbog određivanja učinka eksploziva smanjene gustoće na stijenu odnosno ocijene djelovanja različitih mješavina eksploziva smanjene gustoće u stjenskoj masi te određivanja najpovoljnijeg eksploziva smanjene gustoće za miniranja u ispitivanoj stjenskoj masi. Kod izvođenja ljevkastih pokusa najveći specifični odlom u odnosu na ostvarenu dubinu lijevka ostvaren je s mješavinom emulzijske matrice i granuliranog EPS-a u volumnom omjeru 40:60. Dobar specifični odlom u odnosu na dubinu lijevka je ostvaren i s mješavinom emulzijske matrice i granuliranog EPS-a u volumnom omjeru 50:50 te s ANFO-eksplozivom. Pentritom je ostvarena najveća dubina lijevka uz dosta veliki specifični odlom.

Kod određivanja granulometrijskog sastava odminiranog materijala jednoliki udio pojedinih krupnijih frakcija je dobiven kod djelovanja mješavine emulzijske matrice i EPS-a u volumnom omjeru 40:60 i kod djelovanja emulzijskog eksploziva. Najveći udio sitnih frakcija dobiven je kod djelovanja pentrita koji ima najveće udarno djelovanje.

Na osnovu granulometrijske analize odminiranog materijala može se zaključiti da mješavina emulzijske matrice i EPS-a u volumnom omjeru 40:60 s gustoćom od $0,410 \text{ g/cm}^3$ predstavlja optimalnu mješavinu.

Kod mjerenja brzina oscilacija, pentrit i emulzija su imali najveće vrijednosti svedenih brzina oscilacija po jedinici mase eksploziva. To se može objasniti većim udarnim djelovanjem tih eksploziva u odnosu na ostale mješavine. ANFO-eksploziv je imao najmanje svedene vrijednosti brzina oscilacija po masi i to u oba pravca. To se može objasniti činjenicom da je ANFO-eksploziv iniciran detonatorom, a ne pojačnikom. Mješavina emulzijske matrice i EPS-a u omjeru 40:60, u odnosu na ostale eksplozive, izuzev ANFO-eksploziva, ima najmanje svedene vrijednosti brzina oscilacija po masi i to u oba pravca i na većini mjesta opažanja.

Prilikom mjerenja brzina oscilacija, pentrit i emulzija su imali najveće vrijednosti svedenih brzina oscilacija po jedinici mase eksploziva. Veliko udarno djelovanje dalo je veliki udio sitne frakcije uz velike brzine oscilacija po jedinici mase. Eksplozivi smanjene gustoće sa smanjenim udarnim djelovanjem ali uz dovoljnu ukupnu radnu sposobnost daju optimalnu fragmentaciju i smanjenje brzina oscilacija odnosno smanjenje štetnog utjecaja miniranja na okolinu.

Na osnovu analize druge skupine ispitivanja može se zaključiti da mješavina emulzijske matrice i granuliranog EPS-a u omjeru 40:60 gustoće $0,410 \text{ g/cm}^3$ je optimalna mješavina obzirom na smanjenje udarnog djelovanja i uz zadržavanje ukupne radne sposobnosti.

LITERATURA

KNJIGE:

1. Agrawal, J.P. (2010): High Energy Materials – Propellants, Explosives and Pyrotechnics. Wiley-VCH. 495 pp, Padstow, Cornwall.
2. Bhandari, S., (1997): *Engineering rock blasting operations*, Rotterdam: A.A. Balkema.
3. Baranov, E.G., Vedin, A.T., Bondarenko, I.F., (1996): Mining and Industrial Applications of Low – Density Explosives. A.A.Balkema, 116 pp, Rotterdam.
4. Ester, Z. (2005): Miniranje I - Eksplozivne tvari, svojstva i metode ispitivanja, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 176 str., Zagreb
5. Gokhale, B.V., (2011): Rotary drilling and blasting in large surface mines. CRC Press/Balkema, pp 777, Leiden, Nizozemska.
6. Gustafsson, R. (1973): Swedish Blasting Technique. SPI, pp 328, Gothenburg, Sweden.
7. Hustrulid, W., (1999): Blasting Principles for Open Pit Mining: Theoretical Foundations, Volume 2, Balkema, Rotterdam, pp 1013.
8. Konya, C. J., Walter, E., J., (1991): *Rock blasting and overbreak control*. National highway institute. US department of transportation.
9. Krsnik, J. (1989): Miniranje, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 180 str., Zagreb
10. Pleše, M. (1987): *Fizika eksploziva*, Štamparija CVTŠ, Zagreb, 309
11. Persson, P.A., Holmberg. R., Lee, J., (1994): *Rock blasting and explosives engineering*, Boca Raton, London, New York, Washington D.C.: CRC Press.
12. Sućeska, M. (2001): Eksplozije i eksplozivi – njihova mirnodopska primjena, Brodarski institut, 305 str., Zagreb.
13. Sućeska, M. (1995): *Test methods for explosives*, New York: Springer – Verlag.

ČLANCI:

14. Akbari Mousavi, A.A., Byers Brown, W., Burley, S.J., Al-Hassani, S.T.S, (2004): Simulation of Explosive Welding with ANFO mixtures, *J Prop Exp Pyro* 29 (3) (2004), pp. 188–196.
15. Akbari Mousavi, A.A., Burley, S.J., Al-Hassani, S.T.S, (2005): Simulation of explosive welding using the Williamsburg equation of state to model low detonation velocity explosives. *International Journal of Impact Engineering* 31, Elsevier, pp 719–734.
16. Anderson, C.J., Rosen, K.V., Gibb, A.W., Moen, I.O., (1989). Detonation properties of explosive foams. *Proc. of the Ninth Symposium (Intern.) on Detonation*. Portland, 1989, P. 601.
17. Armstrong, L. W., Moxon, N.T. (1990): Low Shock Energy Emulsion Based Wet Hole Explosives; 3rd International Symposium on Rock Fragmentation By Blasting. pp 45-53. Brisbane.
18. Ash, R.L. (1973): Flexural Rupture as a Rock Breakage Mechanism in Blasting, *Fragmentation by blasting, SEM*, pp 24-29.
19. Beach, F., Gribble, D., Littlefair, M., Rounsley, R., Testrow, I., Wiggin, M., (2004): Blastlite – The Practical Low Density Solution, in *Proceedings Explo 2004*, the Australasian Institute Of Mining And Metallurgy: Melbourne, pp 147-151.
20. Brent, G.F., Armstrong L.W., (1998): Large Diameter Presplitting Improved Trough Two Novel Techniques, in *Proceedings of the Twenty-Fourth Annual Conference on Explosives and Blasting Technique*, 8-11.02. 1998., New Orleans, ISEE, Cleveland, pp 511-521.
21. Brinkman, J.R. (1987): Separating Shock Wave and Gas Expansion Breakage Mechanisms, *Second International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Keystone*, pp 6-15.
22. Britton, R.R, Konya, C.J., Skidmore, D.R., (1984): Primary Mechanism for Breaking Rock with Explosives, pp 942-948.
23. Coursen, D.L. (1980): A Gas Penetration Model of Fragmentation, *Proc.Soc.Experimental Stress Analysis*, Fall meeting, pp 24-29.
24. Curtis, M.E. (1997): Regulating the velocity of detonation of ANFO utilizing blends of non-explosive materials. *13th Annual Symposium on Explosives and Blasting Research*, 02-05.02 1997., Las Vegas, pp 47 – 54.

25. Dobrilović, M., Škrlec, V., Bohanek, V. (2013): Velocity of Detonation of Low Density ANFO Mixture, *Proceeding of 16th seminar on New Trends in Research of Energetic Materials*, Pardubice, Czech Republic, pp 543 – 554.
26. Dowding, C.H. Aimone, C.T., (1992): *Rock Breakage: Explosives*, Mining Engineering Handbook. Sacramento: CO:Society Mining, Metallurgy and Exploration, pp 722-760.
27. Esen, S., Onderra, I., Bilgin, H.A., (2003): Modelling the Size of The Crushed Zone Around a Blasthole, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 40, Pergamon, pp485–495.
28. Ghosh, A., Daemen, J.J.K. (1995): Rock Fragmentation in Bench Blasting - A Numerical Study, *Rock Mechanics*, Daemen & Schultz (eds), Balkema, Rotterdam, pp 553 – 558.
29. Golubev, V.K., Medvedkin, V.A., (2000): Loading of obstacles by explosion of a low-density sheet explosive. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, vol. 41, No 3, pp 416-420.
30. Golubev, V.K., Medvedkin, V.A., (2001): Application of a low-intensity explosive loading method to ammunition dismantling. *Strength of Materials*, vol. 33, No 6, pp 605-606.
31. Grouhel, P. H. J. And Hunsaker, R. D., (1995): An Introduction to A Revolutionary Low Density Bulk Explosive For Surface Blasting Operations, In *Proceedings Explo '95*, Pp 67-71. The Australasian Institute Of Mining And Metallurgy: Melbourne.
32. Hagan, T. N. (1979): Rock breakage by explosives. *Acta Astronaut*, 6 (3):4, 329-340.
33. Haghghi, R.H., Konya, C.J., & Lundquist, R.G., (1985): Finite Element Modeling of Rock Breakage Mechanism, 26th US Symposium on Rock Mechanics, Rapid City, SD, pp 651-658.
34. Harries, G. & Gribble, D.P. (1993): The development of a low shock energy explosive – ANRUB. *Rock Fragmentation by Blasting*, Rossmanith (ed.), Balkema, ISBN 90 5410 3167.
35. Hartman, H.L., (1992): *SME Mining Engineering Handbook 2nd edition vol.1*, Littleton, Colorado: Society of mining, metallurgy and exploration Inc.
36. Heltzen, A.M. and Kure, K., (1979): Blasting with Anfo/Polystyrene Mixtures, in *Proceedings ISEE Annual Conference*, pp 105-116, Cleveland.
37. Hino, K. (1956): Fragmentation of Rock Through Blasting and Shock Wave Theory of Blasting, *Quarterly of the school of mines*, pp 191-209.

38. Hunter, C., Fedak, K., Todoschuck, J.P., (1993): Development of Low Density Explosives with Wall Control Applications, in Proceedings ISEE Annual Conference, pp 549-554, Cleveland.
39. 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.
40. Katsabanis, P.D., Rizk, M., (1992): Underwater performance of polyurethane – PETN explosives. *Journal of Energetic materials*, vol. 10, pp 97-126, Dowden. Brodman & Devine inc.
41. Kuznetsov, V. M., Matveenkov, F.I., (1977): Detonation of a Mixture of an Explosive with Polystyrene. *Combustion, Explosives and Shock Waves*; pp 805.
42. Li Chun-rui, Kang Li-jun, Qi Qing-xing, Mao De-bing, Liu Quan-ming, Xu Gang, (2009): The Numerical Analysis of Borehole Blasting and Application in Coal Mine Roof-Weaken, The 6th International Conference on Mining Science & Technology, *Procedia Earth and Planetary Science* 1, pp 451–459, Beijing, China
43. Licht, H. H., (2000): Performance and sensitivity of explosives. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics* 25, pp 126-132, Weinheim.
44. Livingston, C.W., (1956): Fundamentals of rock failure, *Quarterly of the Colorado School of Mines* 51, pp 1-14.
45. Maranda, A., Cudzilo, S., (2001): Explosive mixtures detonating at low velocity. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 26, pp 165-167. Military University of Technology, Warsaw.
46. Maranda, A., Drobysz, B., Paszula, J., (2014): Research on detonation parameters of low density emulsion explosives modified by microballoons. *CHEMIK* 2014, 68, 1, 17–22. *Chemik International Edition*, Gliwice.
47. Nifad'ev, V; Kalinina, N. (1992): Gasification of foamed polystyrene during shock loading. *Combustion, Explosion and Shock Waves*; pp 630.
48. Nifad'ev, V; Kalinina, N. (1992): Detonation mechanism in explosive mixtures containing polystyrene foam. *Combustion, Explosion and Shock Waves*; pp 650.
49. Nielsen, K., Heltzen, A.M., (1987): Recent Norwegian Experience with Polystyrene Diluted ANFO (Isanol), *Second international symposium on rock fragmentation by blasting*, pp 231-238, Society for Experimental Mechanics: Bethel, Connecticut.

50. Outcherlony, F. (1997): Prediction of Crack Lengths in Rock after Cautious Blasting with Zero Inter-Hole Delay. FRAGBLAST, International Journal of Blasting and Fragmentation, 1, pp 417-444.
51. Ozkahraman, H. T. (2008): Breakage Mechanisms and an Encouraging Correlation Between the Bond Parameters and the Friability Value, 2008 Conference, held in the UK, The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, pp 153-159.
52. Pal Roy, P., Sawmiliana, C., Singh, R.K., Chakunde, V.K., (2012): Effective blasting using mixture of ammonium nitrate, fuel oil, sawdust and used oil at limestone mine. Mining Technology, volume 121, No 1, pp 46 – 51.
53. Pimbley, G. H., Bowman, A. L., Fox, W. P., Kershner, J. D., Mader, C. L., Urizar, M. J., (1980): *Investigating Explosive and Material Properties by Use of the Plate Dent Test*. Los Alamos data center for dynamic material properties. Berkely and Los Angeles: University of California Press.
54. Perrson, P.A., Lundborg, N., Johansson, C.H. (1970): The Basic Mechanism in Rock Blasting, *Proceedings of the 2nd Congress of the International Society for Rock echanics*, Belgrade, 3-5.
55. Rathore, S.S., Bhandari, S., (2006): Controlled fracture growth by blasting while protecting damages to remaining rock, *Rock mechanics and rock engineering*, Springer-Verlag, Netherlands, 317-326.
56. Rock, J., (2004): Improving blasting outcomes using *SoftLOAD* low-density explosives, in *Proceedings Explo 2004*, pp 153-158, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne.
57. Rock, J., Maurer, A., Pereira, N., (2005): Coming Of Age for Low-Density Explosives. *Coal 2005: Coal Operators' Conference*, University Of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, pp 175–182. Brisbane.
58. Rossmanith, H. P., Foruney, W.L., Knasmillner, R.E., (1987): Fracture Initiation by Stress Wave Diffraction at Cracked Interfaces, *Second International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*, Keystone, pp 172-191.
59. Rossmanith, H. P., (2002): *Advanced Blasting in Jointed and Faulted Rock*, Naturwissenschaftlicher Verein für Steiermark, Graz, 39-42.
60. Scoble M.J., Lizotte Y.C., Paventi, M., Mohanty B.B., (1997): Measurement of Blast Damage, *Technical papers on Mining engineering*, SME Annual Meeting, Phoenix, pp 103-108.

61. Sil'vestrov, V.V., Plastinin, A.V., Rafeichik, S.I., Gulevitch, M.A., Pai, V.V., (2010): Explosive welding using the emulsion explosives. X International Symposium on Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business, and Innovations (EPNM-2010) June 7 – 11, 2010, Bečići, Crna Gora.
62. Silva, G., Orlandi, C.P. (2013): PANFO-A novel low-density dry bulk explosive. Performance of Explosives and New Developments. Mohatny & Singh. London. pp 81-90.
63. Singh, A.K., Pingua, B.M.P., Nabiullah, Panda, M.K., Akhtar, S. (2013): Study And Performance of Low Density Emulsion Explosive. Performance of Explosives and New Developments. Taylor & Francis Group, pp 75-79. London.
64. Smith, L. C., (1963): On Brisance, and a Plate-Denting Test for the Estimation of Detonation Pressure. US Atomic Energy Comission. Los Alamos.
65. Solov'ev, V.S., Attetkov, A.V., Boiko, M.M., Vlasova, L.N., Kramarenko, V.N., Chernov, A.I. (1986): Experimental study of the mechanism of initiation of detonation in low-density explosives. Combustion, explosion ans shock waves, volume 22/504/51, pp 469-472.
66. Van Niekerk, G. de B. (1989): Mining technology that could improve productivity in South Africa. Journal Of The South African Institute Of Mining And Metallurgy, vol. 89, no. 2., pp 41-45.
67. Winzer, S.R., Ritter, A.P. (1983): Role of Stress Waves and Discontinuities in Rock Fragmentation, *Fragmentation by blasting*, SEM, pp 11-23.

OSTALO:

68. Antičević, H. (2011): Određivanje zone oštećenja stijenske mase pri iskopu tunela miniranjem. Disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 265 pp, Zagreb.
69. Atlas Powder Company, (1987): *Explosives and Rock Blasting*, Dallas: Maple Press.
70. BlastMate III Operator Manual. 2001. Instantel Inc., Ontario.
71. Bohanek, V. (2013): *Model nastajanja i analiza djelovanja kumulativnog procesa linearnih eksplozivnih nabojâ*. Doktorska disertacija. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, pp 156, Zagreb.
72. Cordova, P.F.P., Lopez, L.A.C., (2012): Low Density Emulsion Explosive. United States Patent No: US 8.187.397.B2.
73. Dessureault, S., (2004): *Rock excavation course notes: spring 2003*, Arizona: University of Arizona, Mining and geological engineering.
74. Dobrilović, M. (2008.): *Raspoloživa energija tlačnog udarnog vala udarne cjevčice i njezina primjena u iniciranju elektroničkog detonatora*, Disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.
75. Dobrilović, M., Bohanek, V., (2013): Utjecaj miniranja u cestogradnji na okolne prometnice. Dani prometnica 2013 – Mjerenja, ispitivanja i monitoring na prometnicama. Sveučilište u Zagrebu, Građevinarski fakultet, 313-347.
76. Ester, Z. (1996): Utjecaj zaloma na rezultate miniranja podzemnih prostorija. Disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, pp 109, Zagreb
77. Fourney, W.L., Holloway, D.C., Wilson, W.H., Barker, D.B., (1979): Mechanism of Fragmentation in a Jointed Formation, University of Md, Report to NFS.
78. Gibbs, T.R., Popolato, A., (1980): *LASL Explosive Property Data*. Los Alamos data center for dynamic material properties. Berkely and Los Angeles: University of California Press.
79. Kovač, D., (2010): Explosives Engineering. Ppt prezentacija. The 2nd ESSEEM Conference on European Shotfire Training, 24th september 2010.
80. Pisk, R., (2011): *Mogućnost primjene konturnog miniranja metodom zračnog međučepa*. Magistarski rad. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, pp 125, Zagreb.

81. Poparić, I., Milavec, J. (2008): *Ekspandirani polistiren, EPS – Od nafte do ploča za toplinsku i zvučnu izolaciju*. Predavanje. Zagreb: Hrvatska komora arhitekata.
82. Prasad, U., (1994). *Energy utilisation in comminution and its application to rock blasting*. Thesis pp 113, Montreal: Department of mining and metallurgical engineering McGill University.
83. 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.
84. Stanković, S., (2011): *Određivanje ovisnosti brzina oscilacija tla o parametrima miniranja*. Doktorska disertacija. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, pp 191, Zagreb.
85. Vidović, E. (2011): *Aromatski ugljikovodici*. Skripta. Zagreb: Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu.
86. Zagreba, S. V., (2003): *Fragm: A Blasting Fragmentation Model of Rocks*. Thesis. 175 pp, Morgantown. West Virginia University.
87. Zakon o eksplozivnim tvarima (NN 178/04),
88. Zakon o izmjenama i dopunama Zakona o eksplozivnim tvarima (NN 109/07),
89. Zakon o izmjenama i dopunama Zakona o eksplozivnim tvarima (NN 67/08),
90. Zakon o izmjenama i dopunama Zakona o eksplozivnim tvarima (NN 144/10).

INTERNET STRANICE:

91. Celuloza (<http://www.ecosorb.com/>).
92. Drveno brašno: <http://cqwmf.en.ecplaza.net/trade-leads/fir-wood-powder--239164-6807599.html>.
93. EPS: http://iskraplast.rs/o_epsu.htm.
94. EPS – svojstva, URL: <http://www.kumal.hr/hr/ekspandirani-polistiren-svojstva.html>.
95. Lambrex 1:
http://www.detonet.hu/showgalery.php?galery=detonet_stuffs&PicNum=6&pic=1.
96. Ljuske žitarica: http://www.simetric.co.uk/si_materials.htm.
97. Otpaci iz prerade šećerne trske: <http://www.sugartech.co.za/>.
98. Otpaci iz prerade šećerne trske – slika: <http://www.afp.com.vn/vi/san-pham/38/than-trang.html>.
99. Perlit: <http://www.milosminingmuseum.gr/>.
100. Plastične mikrokuglice:
http://www.akzonobel.com/expancel/knowledge_center/downloads/.
101. Poliuretanska pjena: <http://www.oriolik.hr/index.php?cid=3&page=catalog>.
102. Seizmografi: <http://www.instantel.com/pdf/714b0063.pdf>.
103. Staklene mikrokuglice: <http://www.potterseurope.org/default.asp?MIS=49>.
104. Staklene mikrokuglice – slika: (<http://www.techapps.com/>).
105. Ugljen u prahu: http://hr.swewe.com/word_show.htm/?80015_1&Ugljen.
106. Ugljen u prahu – slika: http://hr.wikipedia.org/wiki/Datoteka:Activated_Carbon.jpg.
107. Vermikulit: <https://themajka.com/vermikulit-i-gdje-ga-nabaviti-t49.html>.
108. Zrnca perlita: <http://www.renova.com.mk/en/perlit.html>.
109. Zrnca vermikulita: <http://www.bilgisiburada.com/vermikulit-nerelerde-kullanilir>.

Popis tablica

Tablica 3-1. Rezultati detonacijskog pokusa u vodi (Persson et al 1994).....	23
Tablica 3-2. Usporedba rezultati detonacijskog pokusa u vodi s proračunatim vrijednostima energija (Sanchidrián 1998).	24
Tablica 3-3. Rezultati detonacijskog pokusa u vodi za eksploziv smanjene gustoće (Harries i Gribble 1993).....	24
Tablica 3-4. Preporučene vrijednosti parametara miniranja za prethodno konturno miniranje (Gustafsson 1973).....	45
Tablica 3-5. Preporučene vrijednosti parametara miniranja za glatko konturno miniranje ovisno o promjeru konturnih bušotina (Gustafsson 1973).....	46
Tablica 4-1. Rezultati mjerenja brzine detonacije eksploziva smanjene gustoće (Kuznetov & Matveenkov, 1977).....	63
Tablica 4-2. Rezultati ispitivanja radne sposobnosti (Baranov et al 1996).....	66
Tablica 4-3. Rezultati mjerenja brzine detonacije eksploziva smanjene gustoće s pripadajućim izračunatim tlakovima detonacije (Hunter et al, 1993).	73
Tablica 4-4. Rezultati mjerenja detonacijskih svojstava eksploziva smanjene gustoće s kuglicama smole kao sredstvom za smanjenje gustoće (Maranada i Cudzilo 2001).	77
Tablica 4-5. Rezultati mjerenja detonacijskih svojstava eksploziva smanjene gustoće sa silicijevim dioksidom kao sredstvom za smanjenje gustoće (Maranada i Cudzilo 2001).....	77
Tablica 4-6. Rezultati mjerenja brzine detonacije eksplozivnih smjesa s dodatkom LDRA-e (Silva 2007).	79
Tablica 4-7. Rezultati mjerenja brzine detonacije eksploziva smanjene gustoće (Maranda et al, 2014).....	81
Tablica 4-8. Prethodna istraživanja na području eksploziva smanjene gustoće.....	83
Tablica 4-9. Komercijalni eksplozivi smanjene gustoće.....	84
Tablica 5-1. Veličine zona drobljenja i granica loma (Hustrild 1999).....	91
Tablica 5-2. Veličine zona oštećenja (Dessureault 2004).	93
Tablica 5-3. Prikaz teorija miniranja i mehanizama loma (Antičević 2011; Atlas Powder Company 1987).	109
Tablica 6-1. Teoretske značajke korištenih eksploziva prema specifikaciji proizvođača.....	112

Tablica 6-2. Rezultati određivanja brzine detonacije korištenih eksploziva.....	113
Tablica 6-3. Rezultati kemijske analize emulzijske matrice.	114
Tablica 6-4. Gustoće mehanički usitnjenog EPS-a.	115
Tablica 6-5. Gustoće eksplozivnih smjesa sastavljenih od amonij-nitratno praškastih eksploziva s dodatkom EPS-a.	118
Tablica 6-6. Gustoće ANFO-eksploziva s dodatkom EPS-a.....	120
Tablica 6-7. Gustoće emulzijskih eksploziva s dodatkom EPS-a.	122
Tablica 6-8. Gustoće emulzijske matrice s dodatkom EPS-a.....	123
Tablica 6-9. Brzina detonacije amonij-nitratno praškastih eksploziva s dodatkom EPS-a...	129
Tablica 6-10. Brzina detonacije ANFO-eksploziva s dodatkom EPS-a.....	129
Tablica 6-11. Brzina detonacije emulzijskih eksploziva s dodatkom EPS-a.	130
Tablica 6-12. Brzina detonacije emulzijske matrice s dodatkom EPS-a.....	130
Tablica 6-13. Granični maseni udjeli primjesa aluminijske legure AlMgSi1.....	135
Tablica 6-14. Fizičko-mehaničke značajke korištene aluminijske legure.....	136
Tablica 6-15. Rezultati određivanja brizantnosti eksploziva metodom otiska na metalnoj pločici.	138
Tablica 6-16. Srednje vrijednosti rezultata mjerenja deformacije pri ispitivanjima s dvostrukim cijevima.	143
Tablica 6-17. Rezultati određivanja radne sposobnosti modificiranim Trauzlom.	145
Tablica 6-18. Srednje vrijednosti izmjerenih brzina detonacije za pojedine gustoće amonij-nitratno praškastih eksploziva s dodatkom EPS-a.....	147
Tablica 6-19. Srednje vrijednosti izmjerenih brzina detonacije za pojedine gustoće ANFO-eksploziva s dodatkom matrice kao veziva i EPS-a.	148
Tablica 6-20. Srednje vrijednosti izmjerenih brzina detonacije za pojedine gustoće emulzijskih eksploziva s dodatkom EPS-a.	150
Tablica 6-21. Srednje vrijednosti izmjerenih brzina detonacije za pojedine gustoće emulzijske matrice s dodatkom EPS-a.....	153
Tablica 6-22. Srednje vrijednosti izmjerenih brzina detonacije na uzorcima duljine 500 mm.	154
Tablica 6-23. Vrijednosti izmjerenih brzina detonacije na uzorcima duljine 1000 mm.	155
Tablica 6-24. Proračunate vrijednosti tlakova detonacije i tlakova u bušotini.	156
Tablica 6-25. Srednje vrijednosti rezultata mjerenja prilikom određivanja brizantnosti eksploziva metodom otiska na metalnoj pločici.....	158

Tablica 6-26. Brizantnost eksploziva smanjene gustoće – metoda otiska na čeličnoj pločici.	165
Tablica 6-27. Brizantnost eksploziva smanjene gustoće – ispitivanja s duplom cijevi.	168
Tablica 6-28. Rezultati određivanja radne sposobnosti modificiranim Trauzlom.	170
Tablica 6-29. Karakteristična fizičko-mehanička svojstva dijabaza (Vrkljan i Klanfar, 2010).	174
Tablica 6-30. Odnos brzina detonacije u stijeni i u cijevima za korištene eksplozive.	176
Tablica 6-31. Rezultati ljevkastih pokusa.	178
Tablica 6-31. Rezultati ljevkastih pokusa (nastavak).	179
Tablica 6-32. Tehničke i mjerne značajke seizmografa InstanTEL (http://www.instanTEL.com/pdf/714b0063.pdf).	183
Tablica 6-33. Brzine oscilacija.	187
Tablica 6-34. Srednje vrijednosti izmjerenih brzina detonacije za pojedine gustoće eksploziva.	188
Tablica 6-35. Usporedba vrijednosti izmjerenih brzina detonacije u bušotini i u čeličnim cijevima.	190
Tablica 6-36. Granulometrijska analiza odminiranog materijala.	193
Tablica 6-37. Brzina detonacije emulzijske matrice s dodatkom EPS-a određena u laboratoriju i na terenu.	197
Tablica 6-38. Gustoće matrice za emulziju s dodatkom EPS-a.	197
Tablica 6-39. Određivanje temperature paljenja eksploziva smanjene gustoće.	198
Tablica 6-40. Brizantnost i radna sposobnost mješavina emulzijske matrice i granuliranog EPS- a u volumnim omjerima 50:50 i 40:60.	200
Tablica 6-41. Minersko-tehničke značajke mješavina emulzijske matrice i granuliranog EPS-a u volumnom omjeru 50:50.	201
Tablica 6-42. Minersko-tehničke značajke mješavina emulzijske matrice i granuliranog EPS-a u volumnom omjeru 40:60.	201

Popis slika

Slika 2-1. Eksplozija (Sućeska 2001; Dobrilović 2008).	9
Slika 2-2. Detonacijski proces u patroni eksploziva (Ester 2005; Dobrilović 2008).	11
Slika 2-3. Raspored tlakova prilikom detonacije u eksplozivu (Sućeska 2001; Dobrilović 2008).	12
Slika 2-4. Detonacijski proces u p-v dijagramu (Sućeska 2001; Dobrilović 2008).	13
Slika 2-5. Opća podjela eksplozivnih tvari (Bohanek, 2013).	15
Slika 3-1. Razdjelno punjenje minske bušotine.	18
Slika 3-2. Korištenje patrona znatno manjeg promjera u odnosu na promjer minske bušotine.	19
Slika 3-3. Shematski prikaz detonacijskog pokusa u vodi (Ester 2005).	22
Slika 3-4. Vremenski histogram detonacijskog pokusa u vodi (Persson et al. 1994).	22
Slika 3-5. Raspodjele energija u p-v dijagramu (Antičević, 2011).	25
Slika 3-6. Dijagram tlaka plinova i naprezanja u stijeni u odnosu na volumen (Antičević, 2011).	27
Slika 3-7. Putanje djelovanja tlaka na stjenku bušotine (Harries & Gribble 1993).	28
Slika 3-8. Promjene tlaka u bušotini u jedinici vremena (Harries & Gribble 1993).	29
Slika 3-9. Dijagram tlaka plinova u odnosu na volumen za ANFO eksploziv i eksploziv smanjene gustoće (Rock 2004).	30
Slika 3-10. Patrona eksploziva pri detonaciji (Kovač, 2010).	34
Slika 3-11. Završna kosina izvedena konturnim miniranjem (Dobrilović, 2008).	40
Slika 3-12. Shematski prikaz stvaranja konturne pukotine (Krsnik, 1989).	41
Slika 3-13. Nastanak konturne pukotine djelovanjem vlačnih naprezanja (Pisk 2011).	42
Slika 3-14. Izvedba prethodnog konturnog miniranja (Pisk 2011).	43
Slika 3-15. Bušenje u liniji (Bhandari 1997).	47
Slika 3-16. Miniranje sa zračnim međučepom.	50
Slika 4-1. Zrnca perlita (http://www.renova.com.mk/en/perlit.html).	52
Slika 4-2. Zrnca vermikulita (http://www.bilgisiburada.com/vermikulit-nerelerde-kullanilir).	53
Slika 4-3. Staklene mikrokuglice (http://www.techapps.com/).	54
Slika 4-4. Plastične mikrokuglice (http://www.akzonobel.com/expancel/knowledge_center/downloads/).	54

Slika 4-5. Zrnca polistirena (Vidović 2011).....	55
Slika 4-6. Zrnca ekspaniranog polistirena (Vidović 2011).	56
Slika 4-7. Poliuretanska pjena (http://www.oriolik.hr/index.php?cid=3&page=catalog).....	56
Slika 4-8. Ugljen u prahu (http://hr.wikipedia.org/wiki/Datoteka:Activated_Carbon.jpg).	57
Slika 4-9. Drveno brašno (http://cqwmf.en.ecplaza.net/trade-leads/fir-wood-powder--239164-6807599.html).	58
Slika 4-10. Otpaci iz prerade šećerne trske (http://www.afp.com.vn/vi/san-pham/38/than-trang.html).	58
Slika 4-11. Granule celuloze (http://www.ecosorb.com/).....	59
Slika 4-12. Ovisnost brzine detonacije o volumnom udjelu EPS-a za mješavinu heksogen-EPS (Kuznetov & Matveenkov, 1977).....	63
Slika 4-13. Ovisnost brzine detonacije o volumnom udjelu EPS-a za mješavinu amonit-EPS (Kuznetov & Matveenkov, 1977).....	64
Slika 4-14. Ovisnost brzine detonacije <i>Isanola</i> o volumnom udjelu ANFO-eksploziva (Heltzen i Kure, 1979, Nielsen i Heltzen, 1987).....	65
Slika 4-15. Odnos volumena kratera i gustoće eksploziva (Baranov et al 1996).....	67
Slika 4-16. Ovisnost brzine detonacije i detonacijskog tlaka o volumnom udjelu piljevine (Pal Roy et al, 2012).	68
Slika 4-17. Odnos brzine detonacije i gustoće za PETN/poliuretanska pjena (Anderson et al, 1989).....	69
Slika 4-18. Odnos tlaka detonacije i gustoće za PETN/poliuretanska pjena (Anderson et al, 1989).....	70
Slika 4-19. Odnos brzine detonacije i gustoće za nitrometansku pjenu (Anderson et al, 1989).	70
Slika 4-20. Odnos tlaka detonacije i gustoće za nitrometansku pjenu (Anderson et al, 1989).71	
Slika 4-21. Odnos brzine detonacije i gustoće (Hunter et al, 1993).....	73
Slika 4-22. Odnos tlaka detonacije i gustoće (Hunter et al, 1993).	73
Slika 4-23. <i>BlastLite</i> – mješavina ANFO-eksploziva i ljusaka pšenice(Beach et al, 2004). ...	78
Slika 4-24. Brzina detonacije u ovisnosti o promjeru bušotine za <i>BlastLite</i> i ANFO-eksploziv (Beach et al, 2004).....	78
Slika 4-25. Brzina detonacije u ovisnosti o gustoći eksploziva(Maranda et al, 2014).....	82
Slika 4-26. Zrnca i ekspanirana zrnca polistirena (Poparić 2008).	86
Slika 4-27. EPS – ekspanirani polistiren (Iskraplant 2013).....	87
Slika 5-1. Djelovanje detoniranog eksplozivnog punjenja u bušotini.....	89

Slika 5-2. Područja djelovanja eksplozivnog punjenja minske bušotine (Dobrilović i Bohanek 2013).....	90
Slika 5-3. Osnovni koncept teorije refleksije (Antičević 2011; Ester 1996).	96
Slika 5-4. Interakcija između radijalnih pukotina i reflektiranog vlačnog vala (Ester 1996)..	98
Slika 5-5. Model savijanja i loma grede poslije detonacije (Antičević 2011; Atlas Powder Company 1987).	99
Slika 5-6. Prva faza mehanizma loma stijene prema kombiniranoj teoriji (Antičević 2011; Ester 1996).....	101
Slika 5-7. Druga faza mehanizma loma stijene prema kombiniranoj teoriji (Antičević 2011; Ester 1996).....	102
Slika 5-8. Treća faza mehanizma loma stijene prema kombiniranoj teoriji (Antičević 2011; Ester 1996).....	103
Slika 5-9. Shematski prikaz teorije jezgre ili valova naprezanja i pukotina (Antičević 2011; Ester 1996).....	105
Slika 6-1. Emulzijska matrica.	114
Slika 6-2. Zrnca granuliranog EPS-a (1,5 mm – 3,5 mm, uvećanje 50×, mikroskop Dino-Lite Pro).	116
Slika 6-3. Zrnca mehanički usitnjenog EPS-a različitih veličina (uvećanje 500×, mikroskop Dino-Lite Pro).	116
Slika 6-4. Izgled pojedinih mješavina amonij-nitratnih eksploziva i EPS-a.....	118
Slika 6-5. Struktura smjese Permonexa V19 i EPS-a (– 0,1 mm) u omjeru 50:50 (uvećanje 200×, mikroskop Dino-Lite Pro).	119
Slika 6-6. (ANFO + Matrica) / EPS 30:70.	120
Slika 6-7. Izgled pojedinih mješavina ANFO-eksploziva i EPS-a.....	121
Slika 6-8. Struktura mješavine Lambrexa 1 i EPS-a (1,5 mm – 3,5 mm) u omjeru 40:60 (uvećanje 50×, mikroskop Dino-Lite Pro).	122
Slika 6-9. Struktura mješavine Lambrexa 1 i EPS-a (0,18 mm – 0,25 mm) u omjeru 40:60 (uvećanje 500×, mikroskop Dino-Lite Pro).	122
Slika 6-10. Emulzijska matrica senzibilizirana mikrokuglicama (uvećanje 200×, mikroskop BIM 313T).....	124
Slika 6-11. Mješavina emulzijske matrice i EPS-a u volumnom omjeru 50:50 (uvećanje 40×, mikroskop BIM 313T).....	124
Slika 6-12. Elektronički sat Explomet – Fo 2000 (Dobrilović 2008).	125
Slika 6-13. Shematski prikaz određivanja brzine detonacije.	125

Slika 6-14. Fotografija mjernog postava u PVC cijevi unutarnjeg promjera \varnothing 20 mm.....	126
Slika 6-15. Fotografija mjernog postava u čeličnoj cijevi unutarnjeg promjera \varnothing 20 mm....	126
Slika 6-16. Fotografija mjernog postava u čeličnoj cijevi unutarnjeg promjera \varnothing 16 mm....	127
Slika 6-17. Fotografija mjernog postava u čeličnoj cijevi unutarnjeg promjera \varnothing 20 mm....	127
Slika 6-18. Fotografija mjernog postava u čeličnoj cijevi unutarnjeg promjera \varnothing 20 mm....	128
Slika 6-19. Postav za izvođenje ispitivanja otiska na čeličnoj ploči (lijevo) i mikrometar za mjerenja dubine (desno) (Persson et al, 1993).	134
Slika 6-20. Aluminijska pločica prije ispitivanja.	135
Slika 6-21. Shematski prikaz postava mjerenja.	136
Slika 6-22. Fotografija postava mjerenja.	136
Slika 6-23. Određivanje udubljenja na Al pločici.	137
Slika 6-24. Određivanje volumena udubljenja na Al pločici.	137
Slika 6-25. Primjer otiska na aluminijskoj pločici.	139
Slika 6-26. Shematski prikaz postava mjerenja kod ispitivanja s dvostrukim cijevima	140
Slika 6-27. Deformacija cijevi (Sućeska 1995).....	140
Slika 6-28. Fotografija postava mjerenja kod ispitivanja s dvostrukim cijevima.	141
Slika 6-29. Određivanje deformacije ispitne cijevi.	142
Slika 6-30. Ispitna cijev.....	142
Slika 6-31. Olovni blok s provrtom (Sućeska 1995).....	144
Slika 6-32. Blok pripremljen za ispitivanje.....	145
Slika 6-33. Zavisnost brzine detonacije od gustoće ANFO-eksploziva s dodatkom matrice kao veziva i EPS-a.....	148
Slika 6-34. Zavisnost brzine detonacije o gustoći emulzijskih eksploziva s dodatkom granuliranog EPS-a za promjer \varnothing 16 mm.	151
Slika 6-35. Zavisnost brzine detonacije o gustoći emulzijskih eksploziva s dodatkom granuliranog EPS-a za promjer \varnothing 20 mm.	151
Slika 6-36. Zavisnost brzine detonacije od gustoće emulzijske matrice s dodatkom granuliranog EPS-a.	153
Slika 6-37. Prikaz brzine detonacije po segmentima za uzorke duljine 500 mm.....	155
Slika 6-38. Prikaz brzine detonacije po segmentima za uzorke duljine 1000 mm.....	155
Slika 6-39. Tlak detonacije i tlak u bušotini za pojedine eksplozive.	157
Slika 6-40. Zavisnost udubljenja i gustoće eksplozivnog punjenja.	158
Slika 6-41. Zavisnost volumena udubljenja od gustoće eksplozivnog punjenja.....	159
Slika 6-42. Zavisnost udubljenja od brzine detonacije eksplozivnog punjenja.	159

Slika 6-43. Zavisnost volumena udubljenja od brzine detonacije eksplozivnog punjenja.....	160
Slika 6-44. Zavisnost udubljenja od tlaka detonacije eksplozivnog punjenja.....	160
Slika 6-45. Zavisnost volumena udubljenja od brzine detonacije eksplozivnog punjenja.....	161
Slika 6-46. Zavisnost tlaka detonacije od gustoće eksplozivnog punjenja.	161
Slika 6-47. Međusobni odnos pojedinih mjerenih veličina.....	162
Slika 6-48. Grafički prikaz srednjih vrijednosti rezultata ispitivanja s dvostrukom cijevi – debljina stijenke ispitne cijevi 5 mm.	167
Slika 6-49. Grafički prikaz srednjih vrijednosti rezultata ispitivanja s dvostrukom cijevi – debljina stijenke ispitne cijevi 7 mm.	168
Slika 6-50. Relativna brizantnost s postotnim spljoštenjem svih mješavina.....	169
Slika 6-51. Radna sposobnost prema modificiranom Trauzlu.	170
Slika 6-52. Postav mjerenja brzine detonacije u bušotini.	175
Slika 6-53. Dijagram odnosa brzina detonacije u stijeni i u čeličnim cijevima.	176
Slika 6-54. Lijevak s najvećim odlomom (M+EPS 40:60).	180
Slika 6-55. Lijevak s najmanjim odlomom (M+EPS 20:80).....	180
Slika 6-56. Veličine zrnaca odminiranog materijala.	181
Slika 6-57. Seizmografi i trokomponentni geofon (www.instantel.com/pdf/714b0063.pdf).	183
Slika 6-58. Postav mjerenja.....	184
Slika 6-59. Karakteristični snimak brzina oscilacija (emulzijski eksploziv).	186
Slika 6-60. Zavisnost brzine detonacije u bušotini od gustoće eksplozivne tvari.....	189
Slika 6-61. Odnos specifičnog odloma i dubine lijevka $V/Q - h_L$ – grupirani podaci.	191
Slika 6-62. Granulometrijski sastav odminiranog materijala.	192
Slika 6-63. Svedena vrijednost brzina oscilacija po masi za pojedine mješavine za mjerenja u pravcu 1.	195
Slika 6-64. Svedena vrijednost brzina oscilacija po masi za pojedine mješavine za mjerenja u pravcu 2.	195

Popis priloga

Prilog 1. Vrijednosti pojedinačnih izmjerenih brzina detonacije amonij nitratno praškastih eksploziva s dodatkom EPS-a.

Prilog 1A. Procjena mjerne nesigurnosti za metodu određivanja brzine detonacije eksploziva prema normi HRN EN 13631-14: 2004.

Prilog 2. Vrijednosti pojedinačnih izmjerenih brzina detonacije ANFO-eksploziva s dodatkom EPS-a.

Prilog 3. Vrijednosti pojedinačnih izmjerenih brzina detonacije emulzijskih eksploziva s dodatkom EPS-a.

Prilog 4. Vrijednosti pojedinačnih izmjerenih brzina detonacije emulzijske matrice s dodatkom EPS-a.

Prilog 5. Vrijednosti pojedinačnih izmjerenih deformacija pri ispitivanjima s dvostrukim cijevima.

Prilog 6. Vrijednosti pojedinačnih izmjerenih brzina detonacije u bušotini emulzijske matrice s dodatkom EPS-a.

Prilog 7. Vrijednosti pojedinačnih izmjerenih brzina oscilacija.

Prilozi

Prilog 1. Vrijednosti pojedinačnih izmjerenih brzina detonacije amonij nitratno praškastih eksploziva s dodatkom EPS-a.

Permonex V19 (Ø 20 mm)				
Broj mjerenja	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{D'}$ (m/s)
1	1,010	34,45	15,7	3173
2	1,010	35,14	15,0	3323
3	1,010	35,32	14,9	3372
4	1,010	35,60	15,3	3239
5	1,010	34,70	15,2	3252
6	1,010	36,00	15,7	3184
7	1,010	34,64	16,2	3086
8	1,010	35,69	16,2	3086
9	1,010	35,66	15,4	3247
10	1,010	35,98	15,6	3205
srednja vrijednost	1,010	35,32	15,5	3217
min	1,010	34,45	14,9	3086
maks	1,010	36,00	16,2	3372
razlika maks-min	0,000	1,55	1,3	286

Permonex V19 + EPS 1,5 mm - 3,5 mm 50/50 (Ø 20 mm)				
Broj mjerenja	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{D'}$ (m/s)
1	0,486	17,77	24,6	2003
2	0,485	17,79	23,7	2089
3	0,476	17,79	23,2	2189
4	0,470	17,76	24,0	2089
5	0,475	17,78	23,7	2100
srednja vrijednost	0,478	17,78	23,8	2094
min	0,470	17,76	23,2	2003
maks	0,486	17,79	24,6	2189
razlika maks-min	0,016	0,03	1,4	186

Permonex V19 + EPS - 0,1 mm 50/50 (Ø 20 mm)				
Broj mjerjenja	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{D'}$ (m/s)
1	0,556	20,09	27,7	1823
2	0,541	20,13	27,7	1803
3	0,530	20,10	28,1	1767
4	0,554	20,09	27,1	1818
5	0,535	20,11	27,3	1852
srednja vrijednost	0,543	20,10	27,6	1813
min	0,530	20,09	27,1	1767
maks	0,556	20,13	28,1	1852
razlika maks-min	0,025	0,04	1,0	85

Permonex V19 + EPS 0,18 mm - 0,1 mm 50/50 (Ø 20 mm)				
Broj mjerjenja	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{D'}$ (m/s)
1	0,565	20,69	28,4	1815
2	0,564	20,75	29,4	1680
3	0,565	20,77	31,0	1579
4	0,565	19,97	29,0	1727
5	0,565	20,59	31,0	1601
srednja vrijednost	0,565	20,55	29,8	1680
min	0,564	19,97	28,4	1579
maks	0,565	20,77	31,0	1815
razlika maks-min	0,001	0,80	2,6	237

Permonex V19 + EPS 0,18 mm - 0,1 mm 45/55 (Ø 20 mm)				
Broj mjerjenja	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{1'}$ (m/s)
1	0,523	18,96	34,5	1462
2	0,521	19,39	33,0	1484
3	0,522	19,36	28,8	1750
4	0,521	18,49	34,5	1476
5	0,521	15,13	27,8	1441
srednja vrijednost	0,521	18,27	31,7	1523
min	0,521	15,13	27,8	1441
maks	0,523	19,39	34,5	1750
razlika maks-min	0,002	4,26	6,7	308

Permonex V19 + EPS 0,25 mm - 0,18 mm 50/50 (Ø 20 mm)				
Broj mjerjenja	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{1'}$ (m/s)
1	0,560	16,71	24,9	1592
2	0,561	16,60	22,1	1812
3	0,561	17,10	24,0	1645
4	0,561	17,02	24,1	1635
5	0,560	17,15	21,2	1839
srednja vrijednost	0,561	16,92	23,3	1705
min	0,560	16,60	21,2	1592
maks	0,561	17,15	24,9	1839
razlika maks-min	0,001	0,55	3,7	247

Permonex V19 + EPS 0,25 mm - 0,18 mm 40/60 (Ø 20 mm)				
Broj mjerjenja	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{D'}$ (m/s)
1	0,470	14,41	34,3	1150
2	0,470	14,24	29,2	1358
3	0,470	14,14	28,8	1369
4	0,470	14,31	28,4	1381
5	0,469	14,21	28,6	1391
srednja vrijednost	0,470	14,26	29,9	1330
min	0,469	14,14	28,4	1150
maks	0,470	14,41	34,3	1391
razlika maks-min	0,001	0,27	5,9	241

Permonex V19 + EPS 0,5 mm - 0,25 mm 50/50 (Ø 20 mm)				
Broj mjerjenja	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{D'}$ (m/s)
1	0,565	17,12	23,8	1665
2	0,565	17,22	20,7	1914
3	0,565	17,11	22,2	1763
4	0,565	16,87	21,1	1865
5	0,565	17,57	21,6	1828
srednja vrijednost	0,565	17,18	21,9	1807
min	0,565	16,87	20,7	1665
maks	0,565	17,57	23,8	1914
razlika maks-min	0,001	0,70	3,1	249

Permonex V19 + EPS + 0,5 mm 50/50 (Ø 20 mm)				
Broj mjerjenja	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{D'}$ (m/s)
1	0,557	20,47	14,1	2092
2	0,557	18,18	18,4	1700
3	0,557	17,76	13,6	2083
4	0,557	17,16	18,3	1559
5	0,557	18,28	15,2	1941
srednja vrijednost	0,557	18,37	15,9	1875
min	0,557	17,16	13,6	1559
maks	0,557	20,47	18,4	2092
razlika maks-min	0,001	3,31	4,8	533

Permonex V19 + EPS + 0,5 mm 40/60 (Ø 20 mm)				
Broj mjerjenja	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{D'}$ (m/s)
1	0,466	14,46	21,3	1431
2	0,466	14,36	16,9	1653
3	0,466	14,48	20,2	1500
4	0,469	14,67	19,8	1554
5	0,466	14,93	19,0	1629
srednja vrijednost	0,466	14,58	19,4	1553
min	0,466	14,36	16,9	1431
maks	0,469	14,93	21,3	1653
razlika maks-min	0,003	0,57	4,4	222

Prilog 1A. Procjena mjerne nesigurnosti za metodu određivanja brzine detonacije eksploziva prema normi HRN EN 13631-14: 2004.

1	Definiranje mjerne veličine	<p>Mjerna veličina:</p> <ul style="list-style-type: none"> - v brzina detonacije, izraženo u metrima u sekundi (m/s); <p>Na mjernu veličinu utječu:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mjerna nesigurnost elektronskog sata Explometa FO 2000, - Mjerna nesigurnost pri mjerenju duljine, - Mjerna nesigurnost pri postavljanju osjetila. 																								
2	Identificiranje sastavnica mjerne nesigurnosti	<p>Sastavnice mjerne nesigurnosti vrste A:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Nema izvora nesigurnosti vrste A <p>Sastavnice mjerne nesigurnosti vrste B:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mjerna nesigurnost elektronskog sata Explometa FO 2000. 																								
3	Kvantificiranje izvora nesigurnosti pojedinih sastavnica	<p>Sastavnice mjerne nesigurnosti vrste A:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Nema izvora nesigurnosti vrste A. <p>Sastavnice mjerne nesigurnosti vrste B:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mjerna nesigurnost elektronskog sata Explometa FO 2000 $u_{FO2000} = 0,1 \mu s$ (iz umjernice 311/2014) za vrijeme s maksimalnim odstupanjem od referentnog mjerila čime je pokriveno cijelo mjerno područje, 																								
4	Izračunavanje sastavljene mjerne nesigurnosti	<p>Sastavljena mjerna nesigurnost računa se za:</p> $u_c(v) = \sqrt{\left[\frac{1}{t}\right]^2 u_c(s) + \left[\left(\frac{-s}{t^2}\right) u_c(t)\right]^2}$ <p>Izračun sastavljene mjerne nesigurnosti: Koristi se pravokutna razdioba i za duljinu i za vrijeme.</p> <table border="1" data-bbox="555 1317 1366 1541"> <thead> <tr> <th>Veličina</th> <th>Procjena</th> <th>Granice pogrešaka</th> <th>Standardna nesigurnost</th> <th>Koeficijent osjetljivosti</th> <th>Doprinos nesigurnosti</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Duljina</td> <td>0,1 m</td> <td>± 1 mm</td> <td>0,5774 mm</td> <td>$65359,48 s^{-1}$</td> <td>37,74 m/s</td> </tr> <tr> <td>Vrijeme</td> <td>15,3 μs</td> <td>$\pm 0,1 \mu s$</td> <td>0,0577 μs</td> <td>427186124 m/s^2</td> <td>24,66 m/s</td> </tr> <tr> <td>Brzina</td> <td>6535 m/s</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>$u_c = 45,08$ m/s</td> </tr> </tbody> </table>	Veličina	Procjena	Granice pogrešaka	Standardna nesigurnost	Koeficijent osjetljivosti	Doprinos nesigurnosti	Duljina	0,1 m	± 1 mm	0,5774 mm	$65359,48 s^{-1}$	37,74 m/s	Vrijeme	15,3 μs	$\pm 0,1 \mu s$	0,0577 μs	427186124 m/s^2	24,66 m/s	Brzina	6535 m/s				$u_c = 45,08$ m/s
Veličina	Procjena	Granice pogrešaka	Standardna nesigurnost	Koeficijent osjetljivosti	Doprinos nesigurnosti																					
Duljina	0,1 m	± 1 mm	0,5774 mm	$65359,48 s^{-1}$	37,74 m/s																					
Vrijeme	15,3 μs	$\pm 0,1 \mu s$	0,0577 μs	427186124 m/s^2	24,66 m/s																					
Brzina	6535 m/s				$u_c = 45,08$ m/s																					
5	Izračunavanje proširene mjerne nesigurnosti	<p>Proširena mjerna nesigurnost računa se prema:</p> $U = u_c t_v$ <p>Izračun proširene mjerne nesigurnosti:</p> <p>Efektivni stupanj slobode v_{ef} za 10 mjerenja jednak je 9 te se očitava iz tablice t - razdiobe:</p> $U_{95} = t_v u = 1,66 \cdot 45,08 = 74,83 \text{ m/s}$ <p>Proširena mjerna nesigurnost za navedenu metodu iznosi:</p> $U_{95} = (x \pm 75) \text{ m/s}$																								

Prilog 2. Vrijednosti pojedinačnih izmjerenih brzina detonacije ANFO-eksploziva s dodatkom EPS-a.

ANFO (Ø 20 mm)						
Broj mjerenja	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{1'}$ (m/s)	Vrijeme, t_2 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{2'}$ (m/s)
1	0,834	44,93	19,8	998	20,3	1036
2	0,834	36,41	23,3	883	18,7	1074
3	0,834	43,47	20,2	976	21,2	949
4	0,834	44,56	18,6	1162	19,7	1028
5	0,834	47,73	22,8	912	26,0	837
srednja vrijednost	0,834	43,42	20,9	986	21,2	985
min	0,834	36,41	18,6	883	18,7	837
maks	0,834	47,73	23,3	1162	26,0	1074
razlika maks-min	0,000	11,32	4,7	279	7,3	237

ANFO/Matrica 90/10 (Ø 20 mm)						
Broj mjerenja	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{1'}$ (m/s)	Vrijeme, t_2 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{2'}$ (m/s)
1	0,846	44,35	13,1	1635	12,9	1520
2	0,846	45,16	12,6	1570	12,1	1637
3	0,846	44,10	12,6	1560	11,8	1648
4	0,846	43,61	11,4	1743	13,2	1538
5	0,846	42,12	11,4	1697	13,7	1518
srednja vrijednost	0,846	43,87	12,2	1641	12,7	1572
min	0,846	42,12	11,4	1560	11,8	1518
maks	0,846	45,16	13,1	1743	13,7	1648
razlika maks-min	0,000	3,04	1,7	183	1,9	131

(ANFO/Matrica 90/10) + EPS 1,5-3,5 mm 90/10 (Ø 20 mm)						
Broj mjerjenja	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{1'}$ (m/s)	Vrijeme, t_2 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{2'}$ (m/s)
1	0,801	39,72	10,4	1881	10,1	1958
2	0,801	42,58	10,2	2023	9,7	2096
3	0,801	51,02	10,1	2017	9,8	2083
4	0,801	50,32	10,2	1952	10,3	1987
srednja vrijednost	0,801	45,91	10,2	1968	10,0	2031
min	0,801	39,72	10,1	1881	9,7	1958
maks	0,801	51,02	10,4	2023	10,3	2096
razlika maks-min	0,000	11,30	0,3	142	0,6	137

(ANFO/Matrica 90/10) + EPS 1,5-3,5 mm 80/20 (Ø 20 mm)						
Broj mjerjenja	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{1'}$ (m/s)	Vrijeme, t_2 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{2'}$ (m/s)
1	0,714	36,77	11,9	1663	10,8	1844
2	0,714	39,58	10,7	1812	12,0	1714
3	0,714	46,21	11,4	1784	11,1	1821
4	0,714	37,71	11,5	1703	10,7	1899
srednja vrijednost	0,714	40,07	11,4	1740	11,2	1819
min	0,714	36,77	10,7	1663	10,7	1714
maks	0,714	46,21	11,9	1812	12,0	1899
razlika maks-min	0,000	9,44	1,2	149	1,3	185

(ANFO/Matrica 90/10) + EPS 1,5-3,5 mm 70/30 (Ø 20 mm)						
Broj mjerjenja	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{1'}$ (m/s)	Vrijeme, t_2 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{2'}$ (m/s)
1	0,628	40,15	12,7	1507	12,4	1624
2	0,628	37,22	12,0	1649	12,3	1585
3	0,628	39,86	12,8	1512	12,5	1614
4	0,628	41,67	12,1	1641	11,5	1692
srednja vrijednost	0,628	39,73	12,4	1577	12,2	1629
min	0,628	37,22	12,0	1507	11,5	1585
maks	0,628	41,67	12,8	1649	12,5	1692
razlika maks-min	0,000	4,45	0,8	142	1,0	107

(ANFO/Matrica 90/10) + EPS 1,5-3,5 mm 60/40 (Ø 20 mm)						
Broj mjerjenja	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{1'}$ (m/s)	Vrijeme, t_2 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{2'}$ (m/s)
1	0,541	31,81	13,1	1547	11,2	1758
2	0,541	33,76	12,0	1690	13,6	1413
3	0,541	34,54	13,5	1453	13,1	1555
4	0,541	35,93	13,3	1508	12,2	1612
srednja vrijednost	0,541	34,01	13,0	1550	12,5	1584
min	0,541	31,81	12,0	1453	11,2	1413
maks	0,541	35,93	13,5	1690	13,6	1758
razlika maks-min	0,000	4,12	1,5	237	2,4	346

(ANFO/Matrica 90/10) + EPS 1,5-3,5 mm 50/50 (Ø 20 mm)						
Broj mjerjenja	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{1'}$ (m/s)	Vrijeme, t_2 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{2'}$ (m/s)
1	0,454	26,67	11,5	1708	15,8	1304
2	0,454	27,68	11,6	1681	13,1	1508
3	0,454	27,10	12,8	1588	12,4	1565
4	0,454	26,59	14,2	1368	12,9	1518
srednja vrijednost	0,454	27,01	12,5	1586	13,6	1474
min	0,454	26,59	11,5	1368	12,4	1304
maks	0,454	27,68	14,2	1708	15,8	1565
razlika maks-min	0,000	1,09	2,7	340	3,4	260

(ANFO/Matrica 90/10) + EPS 1,5-3,5 mm 40/60 (Ø 20 mm)						
Broj mjerjenja	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{1'}$ (m/s)	Vrijeme, t_2 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{2'}$ (m/s)
1	0,367	18,45	17,4	1139	16,8	1190
2	0,367	20,93	17,3	1184	11,9	1482
3	0,367	21,23	16,4	1207	15,8	1296
4	0,367	21,39	15,2	1250	14,6	1391
srednja vrijednost	0,367	20,50	16,6	1195	14,8	1340
min	0,367	18,45	15,2	1139	11,9	1190
maks	0,367	21,39	17,4	1250	16,8	1482
razlika maks-min	0,000	2,94	2,2	111	4,9	292

(ANFO/Matrica 90/10) + EPS 1,5-3,5 mm 30/70 (Ø 20 mm)						
Broj mjerjenja	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{1'}$ (m/s)	Vrijeme, t_2 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{2'}$ (m/s)
1	0,280	12,85	30,8	631	22,2	923
2	0,280	13,77	28,4	718	23,3	836
3	0,280	13,22	20,9	999	24,8	794
4	0,280	13,43	21,2	929	26,3	707
srednja vrijednost	0,280	13,32	25,3	819	24,2	815
min	0,280	12,85	20,9	631	22,2	707
maks	0,280	13,77	30,8	999	26,3	923
razlika maks-min	0,000	0,92	9,9	368	4,1	215

(ANFO/Matrica 90/10) + EPS 1,5-3,5 mm 20/80 (Ø 20 mm)						
Broj mjerjenja	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{1'}$ (m/s)	Vrijeme, t_2 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{2'}$ (m/s)
1	0,193	8,67	41,6	485	37,2	538
2	0,193	8,84	39,0	488	42,6	478
3	0,193	11,23	36,9	555	33,2	581
4	0,193	11,14	37,3	565	38,4	514
srednja vrijednost	0,193	9,97	38,7	523	37,9	528
min	0,193	8,67	36,9	485	33,2	478
maks	0,193	11,23	41,6	565	42,6	581
razlika maks-min	0,000	2,56	4,7	80	9,4	103

(ANFO/Matrica 90/10) + EPS 1,5-3,5 mm 10/90 (Ø 20 mm)						
Broj mjerjenja	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{1'}$ (m/s)	Vrijeme, t_2 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{2'}$ (m/s)
1	0,106	5,32	34,3	570	-	-
2	0,106	5,19	15,1	1328	21,1	929
3	0,106	6,74	44,6	436	-	-
4	-	-	-	-	-	-
srednja vrijednost	0,106	5,75	31,3	778	21,1	929
min	0,106	5,19	15,1	436	21,1	929
maks	0,106	6,74	44,6	1328	21,1	929
razlika maks-min	0,000	1,55	29,5	892	0,0	0

Prilog 3. Vrijednosti pojedinačnih izmjerenih brzina detonacije emulzijskih eksploziva s dodatkom EPS-a.

Lambrex 1 (Ø 16 mm)						
Broj mjerena	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, v_1' (m/s)	Vrijeme, t_2 (μ s)	Brzina detonacije, v_2' (m/s)
1	1,250	23,77	8,3	3608	8,6	3464
2	1,250	23,25	8,4	3657	8,4	3605
3	1,250	22,39	7,7	3805	8,3	3682
4	1,250	22,33	9,8	3154	10,0	3088
5	1,250	21,29	9,1	3676	9,2	3204
6	1,250	22,72	8,9	3433	9,0	3307
7	1,250	22,67	8,5	3784	8,5	3299
8	1,250	22,51	8,6	3467	8,8	3402
9	1,250	23,19	9,1	3370	8,9	3390
10	1,250	23,74	9,1	3410	9,2	3224
srednja vrijednost	1,250	22,79	8,8	3536	8,890	3366
min	1,250	21,29	7,7	3154	8,300	3088
maks	1,250	23,77	9,8	3805	10,000	3682
razlika maks-min	0,000	2,48	2,1	651	1,700	594

Lambrex 1 + EPS 1,5 mm - 3,5 mm 50/50 (Ø 16 mm)						
Broj mjerena	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, v_1' (m/s)	Vrijeme, t_2 (μ s)	Brzina detonacije, v_2' (m/s)
1	0,637	9,81	12,5	2384	12,9	2363
2	0,643	9,77	13,4	2284	13,9	2150
3	0,635	10,85	12,8	2273	13,0	2301
4	0,642	11,36	13,6	2261	12,5	2430
5	0,645	9,67	12,8	2394	14,0	2130
srednja vrijednost	0,640	10,29	13,0	2319	13,260	2275
min	0,635	9,67	12,5	2261	12,500	2130
maks	0,645	11,36	13,6	2394	14,000	2430
razlika maks-min	0,011	1,69	1,1	133	1,500	300

Lambrex 1 + EPS 1,5 mm - 3,5 mm 40/60 (Ø 16 mm)						
Broj mjerena	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (µs)	Brzina detonacije, $v_{1'}$ (m/s)	Vrijeme, t_2 (µs)	Brzina detonacije, $v_{2'}$ (m/s)
1	0,517	9,43	13,5	2253	13,9	2196
2	0,528	10,18	13,0	2349	14,3	2164
3	0,522	7,84	13,1	2363	14,9	2003
4	0,521	8,90	12,8	2256	13,1	2289
5	0,518	8,75	12,4	2462	14,1	2123
srednja vrijednost	0,521	9,02	13,0	2337	14,060	2155
min	0,517	7,84	12,4	2253	13,100	2003
maks	0,528	10,18	13,5	2462	14,900	2289
razlika maks-min	0,011	2,34	1,1	209	1,800	286

Lambrex 1 + EPS 1,5 mm - 3,5 mm 30/70 (Ø 16 mm)						
Broj mjerena	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (µs)	Brzina detonacije, $v_{1'}$ (m/s)	Vrijeme, t_2 (µs)	Brzina detonacije, $v_{2'}$ (m/s)
1	0,397	8,23	11,6	2604	16,0	1898
2	0,398	7,35	11,4	2708	16,8	1796
3	0,399	7,23	13,7	2226	14,6	2048
4	0,398	7,08	11,7	2357	14,8	2097
5	0,397	7,19	14,1	2099	13,3	2273
srednja vrijednost	0,398	7,42	12,5	2399	15,100	2022
min	0,397	7,08	11,4	2099	13,300	1796
maks	0,399	8,23	14,1	2708	16,800	2273
razlika maks-min	0,002	1,15	2,7	609	3,500	477

Lambrex 1 + EPS 1,5 mm - 3,5 mm 20/80 (Ø 16 mm)						
Broj mjerena	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{1'}$ (m/s)	Vrijeme, t_2 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{2'}$ (m/s)
1	0,277	5,23	16,3	1831	15,1	1962
2	0,277	5,11	11,8	2600	15,2	1941
3	0,277	5,02	13,3	2125	15,9	1818
4	0,276	4,83	13,2	2273	16,3	1871
5	0,276	4,54	13,7	2264	15,5	1799
srednja vrijednost	0,277	4,95	13,7	2218	15,600	1878
min	0,276	4,54	11,8	1831	15,100	1799
maks	0,277	5,23	16,3	2600	16,300	1962
razlika maks-min	0,001	0,69	4,5	769	1,200	162

Lambrex 1 + EPS 1,5 mm - 3,5 mm 10/90 (Ø 16 mm)						
Broj mjerena	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{1'}$ (m/s)	Vrijeme, t_2 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{2'}$ (m/s)
1	0,155	2,61	15,0	2113	20,0	1435
2	0,154	2,40	14,6	2055	21,7	1417
3	0,155	2,68	17,0	1791	21,9	1361
4	0,154	2,86	14,7	2048	21,1	1411
5	0,154	2,58	12,6	2398	21,8	1365
srednja vrijednost	0,155	2,63	14,8	2081	21,300	1398
min	0,154	2,40	12,6	1791	20,000	1361
maks	0,155	2,86	17,0	2398	21,900	1435
razlika maks-min	0,001	0,46	4,4	607	1,900	74

Lambrex 1 + EPS - 0,1 mm 50/50 (Ø 16 mm)						
Broj mjerjenja	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{1'}$ (m/s)	Vrijeme, t_2 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{2'}$ (m/s)
1	0,766	14,26	9,2	3136	9,3	3302
2	0,769	13,86	9,1	3332	8,9	3165
3	0,772	13,68	8,6	3358	9,0	3389
4	0,769	14,38	9,9	3167	9,4	3141
5	0,769	13,99	8,9	3311	8,9	3293
srednja vrijednost	0,769	14,03	9,1	3261	9,100	3258
min	0,766	13,68	8,6	3136	8,900	3141
maks	0,772	14,38	9,9	3358	9,400	3389
razlika maks-min	0,006	0,70	1,3	222	0,500	247

Lambrex 1 + EPS - 0,1 mm 40/60 (Ø 16 mm)						
Broj mjerjenja	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{1'}$ (m/s)	Vrijeme, t_2 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{2'}$ (m/s)
1	0,674	12,29	9,2	3129	10,1	2988
2	0,675	12,55	9,1	3370	10,5	2936
3	0,675	12,83	9,4	3246	10,2	2926
4	0,675	12,93	10,6	2801	9,8	2964
5	0,674	12,60	10,6	2880	10,9	2714
srednja vrijednost	0,675	12,64	9,8	3085	10,300	2906
min	0,674	12,29	9,1	2801	9,800	2714
maks	0,675	12,93	10,6	3370	10,900	2988
razlika maks-min	0,001	0,64	1,5	569	1,100	274

Lambrex 1 + EPS - 0,1 mm 30/70 (Ø 16 mm)						
Broj mjerena	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{1'}$ (m/s)	Vrijeme, t_2 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{2'}$ (m/s)
1	0,579	10,84	13,2	2270	12,7	2338
2	0,578	10,88	15,6	1983	13,9	2114
3	0,579	11,17	12,8	2345	12,7	2315
4	0,579	11,54	13,7	2231	13,1	2280
5	0,579	11,13	14,1	2179	13,3	2302
srednja vrijednost	0,579	11,11	13,9	2202	13,140	2270
min	0,578	10,84	12,8	1983	12,700	2114
maks	0,579	11,54	15,6	2345	13,900	2338
razlika maks-min	0,001	0,70	2,8	363	1,200	224

Lambrex 1 + EPS 0,18 mm - 0,1 mm 50/50 (Ø 16 mm)						
Broj mjerena	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{1'}$ (m/s)	Vrijeme, t_2 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{2'}$ (m/s)
1	0,792	25,95	11,4	2684	9,4	3121
2	0,792	27,69	9,4	3119	9,6	2971
3	0,792	25,71	9,7	2866	10,2	2977
4	0,793	26,65	10,8	2915	9,3	3195
5	0,792	25,85	9,7	3105	9,9	3166
srednja vrijednost	0,792	26,37	10,2	2938	9,680	3086
min	0,792	25,71	9,4	2684	9,300	2971
maks	0,793	27,69	11,4	3119	10,200	3195
razlika maks-min	0,001	1,98	2,0	435	0,900	224

Lambrex 1 + EPS 0,18 mm - 0,1 mm 40/60 (Ø 16 mm)						
Broj mjerena	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{1'}$ (m/s)	Vrijeme, t_2 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{2'}$ (m/s)
1	0,701	14,54	10,4	2844	11,7	2626
2	0,700	13,93	9,7	3013	11,3	2520
3	0,701	13,22	11,1	2668	11,6	2563
4	0,702	12,98	10,9	2608	11,4	2646
5	0,700	12,85	9,9	3017	11,1	2723
srednja vrijednost	0,701	13,50	10,4	2830	11,420	2616
min	0,700	12,85	9,7	2608	11,100	2520
maks	0,702	14,54	11,1	3017	11,700	2723
razlika maks-min	0,002	1,69	1,4	409	0,600	202

Lambrex 1 + EPS 0,18 mm - 0,1 mm 30/70 (Ø 16 mm)						
Broj mjerena	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{1'}$ (m/s)	Vrijeme, t_2 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{2'}$ (m/s)
1	0,610	11,38	14,7	2048	13,8	2141
2	0,609	11,06	14,8	2021	13,9	2188
3	0,609	11,14	14,7	2086	13,1	2192
4	0,609	11,42	14,1	2167	13,8	2257
5	0,609	11,61	14,8	2110	13,2	2232
srednja vrijednost	0,609	11,32	14,6	2086	13,560	2202
min	0,609	11,06	14,1	2021	13,100	2141
maks	0,610	11,61	14,8	2167	13,900	2257
razlika maks-min	0,000	0,55	0,7	146	0,800	116

Lambrex 1 + EPS 0,25 mm - 0,18 mm 50/50 (Ø 16 mm)						
Broj mjerena	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{1'}$ (m/s)	Vrijeme, t_2 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{2'}$ (m/s)
1	0,804	16,18	11,2	2600	9,9	3107
2	0,803	16,14	12,0	2478	9,5	3149
3	0,803	15,84	9,8	2722	10,7	2871
4	0,803	14,83	10,7	2953	10,3	2909
5	0,803	15,23	10,6	2902	10,1	3076
srednja vrijednost	0,803	15,64	10,9	2731	10,100	3023
min	0,803	14,83	9,8	2478	9,500	2871
maks	0,804	16,18	12,0	2953	10,700	3149
razlika maks-min	0,001	1,35	2,2	475	1,200	278

Lambrex 1 + EPS 0,25 mm - 0,18 mm 40/60 (Ø 16 mm)						
Broj mjerena	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{1'}$ (m/s)	Vrijeme, t_2 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{2'}$ (m/s)
1	0,714	13,01	11,9	2417	11,2	2618
2	0,713	13,62	11,7	2571	10,6	2817
3	0,714	13,30	11,7	2612	10,9	2740
4	0,713	13,66	11,4	2774	10,5	2813
5	0,713	13,67	11,8	2557	11,1	2759
srednja vrijednost	0,713	13,45	11,7	2586	10,860	2750
min	0,713	13,01	11,4	2417	10,500	2618
maks	0,714	13,67	11,9	2774	11,200	2817
razlika maks-min	0,001	0,66	0,5	357	0,700	199

Lambrex 1 + EPS 0,5 mm - 0,25 mm 50/50 (Ø 16 mm)						
Broj mjerjenja	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{1'}$ (m/s)	Vrijeme, t_2 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{2'}$ (m/s)
1	0,793	14,48	11,1	2659	10,6	2931
2	0,793	15,36	10,8	2798	10,6	2924
3	0,792	14,92	10,6	2890	10,3	2881
4	0,792	15,02	11,0	2679	10,4	3012
5	0,793	14,92	10,5	3002	10,0	2876
srednja vrijednost	0,793	14,94	10,8	2805	10,380	2925
min	0,792	14,48	10,5	2659	10,000	2876
maks	0,793	15,36	11,1	3002	10,600	3012
razlika maks-min	0,001	0,88	0,6	343	0,600	136

Lambrex 1 + EPS 0,5 mm - 0,25 mm 40/60 (Ø 16 mm)						
Broj mjerjenja	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{1'}$ (m/s)	Vrijeme, t_2 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{2'}$ (m/s)
1	0,701	13,70	12,3	2404	12,3	2558
2	0,701	13,91	13,7	2182	13,4	2401
3	0,701	13,18	12,2	2473	12,1	2582
4	0,701	12,75	12,9	2316	12,3	2490
5	0,700	12,22	13,1	2316	11,3	2565
srednja vrijednost	0,701	13,15	12,8	2338	12,280	2519
min	0,700	12,22	12,2	2182	11,300	2401
maks	0,701	13,91	13,7	2473	13,400	2582
razlika maks-min	0,001	1,69	1,5	291	2,100	180

Lambrex 1 (Ø 20 mm)						
Broj mjerena	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{1'}$ (m/s)	Vrijeme, t_2 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{2'}$ (m/s)
1	1,250	41,14	8,9	3547	8,0	3630
2	1,250	41,80	10,1	2987	8,6	3434
3	1,250	40,98	9,6	3095	8,6	3565
4	1,250	42,26	8,9	3158	8,7	3452
5	1,250	41,17	9,1	3275	9,2	3312
6	1,250	42,04	8,5	3607	8,4	3693
7	1,250	41,92	8,7	3540	8,8	3480
8	1,250	41,57	8,6	3463	8,9	3496
9	1,250	41,38	8,7	3589	8,5	3504
10	1,250	41,52	9,0	3434	9,1	3342
srednja vrijednost	1,250	41,58	9,0	3370	8,680	3491
min	1,250	40,98	8,5	2987	8,000	3312
maks	1,250	42,26	10,1	3607	9,200	3693
razlika maks-min	0,000	1,28	1,6	620	1,200	381

Lambrex 1 + EPS 1,5 mm - 3,5 mm 50/50 (Ø 20 mm)						
Broj mjerena	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{1'}$ (m/s)	Vrijeme, t_2 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{2'}$ (m/s)
1	0,642	20,11	13,6	2250	11,4	2719
2	0,641	19,92	12,6	2375	11,4	2740
3	0,642	20,52	12,5	2334	11,7	2556
4	0,642	21,69	12,8	2330	11,4	2675
5	0,641	20,76	12,3	2354	12,2	2540
srednja vrijednost	0,642	20,60	12,8	2329	11,620	2646
min	0,641	19,92	12,3	2250	11,400	2540
maks	0,642	21,69	13,6	2375	12,200	2740
razlika maks-min	0,001	1,77	1,3	125	0,800	200

Lambrex 1 + EPS 1,5 mm - 3,5 mm 40/60 (Ø 20 mm)						
Broj mjerena	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (µs)	Brzina detonacije, $v_{1'}$ (m/s)	Vrijeme, t_2 (µs)	Brzina detonacije, $v_{2'}$ (m/s)
1	0,520	17,97	13,0	2336	12,9	2181
2	0,520	17,68	12,5	2347	12,7	2317
3	0,520	15,63	9,9	2900	10,9	2383
4	0,520	16,62	12,2	2544	12,6	2307
5	0,520	17,93	11,6	2505	12,6	2406
srednja vrijednost	0,520	17,17	11,8	2527	12,340	2319
min	0,520	15,63	9,9	2336	10,900	2181
maks	0,520	17,97	13,0	2900	12,900	2406
razlika maks-min	0,000	2,34	3,1	564	2,000	224

Lambrex 1 + EPS 1,5 mm - 3,5 mm 30/70 (Ø 20 mm)						
Broj mjerena	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (µs)	Brzina detonacije, $v_{1'}$ (m/s)	Vrijeme, t_2 (µs)	Brzina detonacije, $v_{2'}$ (m/s)
1	0,399	13,38	16,7	1846	13,3	2249
2	0,398	12,74	11,0	2727	15,4	1998
3	0,398	13,89	14,2	2094	13,8	2255
4	0,398	13,10	14,0	2166	13,9	2167
5	0,399	13,63	14,5	2043	13,8	2208
srednja vrijednost	0,399	13,35	14,1	2175	14,040	2175
min	0,398	12,74	11,0	1846	13,300	1998
maks	0,399	13,89	16,7	2727	15,400	2255
razlika maks-min	0,001	1,15	5,7	881	2,100	257

Lambrex 1 + EPS 1,5 mm - 3,5 mm 20/80 (Ø 20 mm)						
Broj mjerena	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (µs)	Brzina detonacije, $v_{1'}$ (m/s)	Vrijeme, t_2 (µs)	Brzina detonacije, $v_{2'}$ (m/s)
1	0,277	9,23	14,6	2020	15,3	1965
2	0,277	9,10	14,4	2083	16,2	2009
3	0,277	9,30	12,2	2564	16,2	1793
4	0,276	9,26	13,5	2190	16,5	1857
5	0,277	9,41	14,7	2052	15,1	1949
srednja vrijednost	0,277	9,26	13,9	2182	15,860	1915
min	0,276	9,10	12,2	2020	15,100	1793
maks	0,277	9,41	14,7	2564	16,500	2009
razlika maks-min	0,001	0,31	2,5	544	1,400	215

Lambrex 1 + EPS 1,5 mm - 3,5 mm 10/90 (Ø 20 mm)						
Broj mjerena	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (µs)	Brzina detonacije, $v_{1'}$ (m/s)	Vrijeme, t_2 (µs)	Brzina detonacije, $v_{2'}$ (m/s)
1	0,156	5,26	14,1	2132	22,4	1417
2	0,155	5,03	19,8	1513	21,7	1382
3	0,155	5,36	16,8	1710	20,6	1462
4	0,155	5,38	14,3	2034	22,0	1393
5	0,155	5,21	14,7	2094	20,9	1497
srednja vrijednost	0,156	5,25	15,9	1896	21,520	1430
min	0,155	5,03	14,1	1513	20,600	1382
maks	0,156	5,38	19,8	2132	22,400	1497
razlika maks-min	0,001	0,35	5,7	619	1,800	115

Lambrex 1 + EPS - 0,1 mm 50/50 (Ø 20 mm)						
Broj mjerjenja	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{1'}$ (m/s)	Vrijeme, t_2 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{2'}$ (m/s)
1	0,771	27,54	11,8	2547	9,8	3070
2	0,771	27,21	10,6	2762	9,3	3178
3	0,771	27,14	10,7	2813	9,1	3318
4	0,771	26,98	10,4	2963	8,9	3354
5	0,771	26,57	9,9	3087	9,2	3297
srednja vrijednost	0,771	27,09	10,7	2834	9,260	3243
min	0,771	26,57	9,9	2547	8,900	3070
maks	0,771	27,54	11,8	3087	9,800	3354
razlika maks-min	0,000	0,97	1,9	539	0,900	284

Lambrex 1 + EPS - 0,1 mm 40/60 (Ø 20 mm)						
Broj mjerjenja	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{1'}$ (m/s)	Vrijeme, t_2 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{2'}$ (m/s)
1	0,675	23,76	11,3	2712	11,1	2727
2	0,675	23,92	14,2	2151	10,5	2828
3	0,675	24,62	13,6	2293	9,9	3088
4	0,675	23,23	12,7	2350	10,3	2939
5	0,675	24,22	11,1	2796	9,8	2976
srednja vrijednost	0,675	23,95	12,6	2460	10,320	2911
min	0,675	23,23	11,1	2151	9,800	2727
maks	0,675	24,62	14,2	2796	11,100	3088
razlika maks-min	0,000	1,39	3,1	645	1,300	361

Lambrex 1 + EPS 0,18 mm - 0,1 mm 50/50 (Ø 20 mm)						
Broj mjerjenja	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{1'}$ (m/s)	Vrijeme, t_2 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{2'}$ (m/s)
1	0,793	15,65	12,3	2445	10,6	2847
2	0,792	15,57	11,2	2670	10,2	2952
3	0,793	14,62	11,7	2554	10,8	2830
4	0,793	14,70	11,3	2563	10,6	2857
5	0,792	14,67	10,9	2774	9,9	2976
srednja vrijednost	0,793	15,04	11,5	2601	10,420	2892
min	0,792	14,62	10,9	2445	9,900	2830
maks	0,793	15,65	12,3	2774	10,800	2976
razlika maks-min	0,001	1,03	1,4	330	0,900	146

Lambrex 1 + EPS 0,18 mm - 0,1 mm 40/60 (Ø 20 mm)						
Broj mjerjenja	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{1'}$ (m/s)	Vrijeme, t_2 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{2'}$ (m/s)
1	0,700	24,82	12,3	2385	10,1	2945
2	0,701	24,71	13,9	2174	10,7	2771
3	0,701	24,41	12,9	2260	10,4	2846
4	0,701	24,11	13,6	2229	10,8	2764
5	0,701	24,61	13,7	2188	10,9	2755
srednja vrijednost	0,701	24,53	13,3	2247	10,580	2816
min	0,700	24,11	12,3	2174	10,100	2755
maks	0,701	24,82	13,9	2385	10,900	2945
razlika maks-min	0,000	0,71	1,6	210	0,800	190

Lambrex 1 + EPS 0,25 mm - 0,18 mm 50/50 (Ø 20 mm)						
Broj mjerena	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{1'}$ (m/s)	Vrijeme, t_2 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{2'}$ (m/s)
1	0,803	27,34	11,6	2691	9,3	3133
2	0,803	26,71	11,1	2726	10,3	2994
3	0,802	27,68	10,9	2810	9,2	3360
4	0,803	27,03	9,8	3089	10,2	3045
5	0,802	26,65	10,1	2887	9,7	3177
srednja vrijednost	0,802	27,08	10,7	2841	9,740	3142
min	0,802	26,65	9,8	2691	9,200	2994
maks	0,803	27,68	11,6	3089	10,300	3360
razlika maks-min	0,001	1,03	1,8	398	1,100	366

Lambrex 1 + EPS 0,5 mm - 0,25 mm 50/50 (Ø 20 mm)						
Broj mjerena	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{1'}$ (m/s)	Vrijeme, t_2 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{2'}$ (m/s)
1	0,792	26,53	11,3	2620	9,3	3195
2	0,792	26,24	12,4	2290	10,7	2846
3	0,792	25,97	11,1	2709	9,7	3192
4	0,792	26,45	13,8	2222	10,3	2944
5	0,792	25,90	10,4	2813	9,9	3068
srednja vrijednost	0,792	26,22	11,8	2531	9,980	3049
min	0,792	25,90	10,4	2222	9,300	2846
maks	0,792	26,53	13,8	2813	10,700	3195
razlika maks-min	0,000	0,63	3,4	592	1,400	349

Lambrex 1 + EPS 0,5 mm - 0,25 mm 40/60 (Ø 20 mm)						
Broj mjerena	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{1'}$ (m/s)	Vrijeme, t_2 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{2'}$ (m/s)
1	0,700	23,63	17,8	1717	10,8	2593
2	0,701	23,90	15,7	1926	11,8	2553
3	0,700	23,60	17,3	1687	12,9	2343
4	0,701	23,57	14,3	2113	13,1	2344
5	0,700	22,86	14,9	1944	11,9	2566
srednja vrijednost	0,701	23,51	16,0	1878	12,100	2480
min	0,700	22,86	14,3	1687	10,800	2343
maks	0,701	23,90	17,8	2113	13,100	2593
razlika maks-min	0,001	1,04	3,5	426	2,300	249

Lambrex 1 + EPS + 0,5 mm 60/40 (Ø 20 mm)						
Broj mjerena	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{1'}$ (m/s)	Vrijeme, t_2 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{2'}$ (m/s)
1	0,916	33,03	11,0	2654	11,4	2785
2	0,917	31,89	11,9	2525	10,2	2999
3	0,916	34,05	10,8	2761	10,9	2852
4	0,916	32,55	11,4	2599	10,9	2783
5	0,916	31,77	12,1	2546	10,7	2749
srednja vrijednost	0,916	32,66	11,4	2617	10,820	2834
min	0,916	31,77	10,8	2525	10,200	2749
maks	0,917	34,05	12,1	2761	11,400	2999
razlika maks-min	0,001	2,28	1,3	236	1,200	250

Prilog 4. Vrijednosti pojedinačnih izmjerenih brzina detonacije emulzijske matrice s dodatkom EPS-a.

Matrica+Mikrokuglice 75/25				
Broj mjerjenja	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{D'}$ (m/s)
1	1,183	71,33	7,1	5582
2	1,173	69,98	7,2	5595
3	1,176	71,54	7,4	5465
4	1,176	71,03	7,2	5498
5	1,168	70,29	7,3	5588
6	1,169	69,77	7,3	5412
7	1,193	72,07	7,1	5663
8	1,162	69,98	7,5	5471
srednja vrijednost	1,175	70,75	7,3	5534
min	1,162	69,77	7,1	5412
maks	1,193	72,07	7,5	5663
razlika maks-min	0,031	2,30	0,4	250

M+EPS 50/50				
Broj mjerjenja	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{D'}$ (m/s)
1	0,629	40,14	12,5	3141
2	0,632	41,18	12,9	3097
3	0,622	40,74	13,1	3031
4	0,613	37,12	12,9	3113
5	0,630	38,01	13,1	3094
6	0,649	42,26	13,7	2904
7	0,636	40,79	13,5	2920
8	0,678	44,16	13,2	3051
9	0,611	15,85	6,6	3095
10	0,622	15,85	6,7	3071
11	0,608	15,85	6,8	3057
12	0,605	15,85	6,7	3063
13	0,616	15,86	6,9	3031
srednja vrijednost	0,627	31,05	10,7	3051
min	0,605	15,85	6,6	2904
maks	0,678	44,16	13,7	3141
razlika maks-min	0,073	28,31	7,1	237

M+EPS 40/60				
Broj mjerjenja	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{D'}$ (m/s)
1	0,426	27,44	16,3	2447
2	0,434	27,03	15,9	2550
3	0,437	28,69	16,1	2430
4	0,411	27,68	16,6	2395
5	0,441	28,34	15,6	2598
6	0,478	31,09	15,4	2562
7	0,497	32,67	15,7	2567
8	0,510	30,74	15,9	2486
9	0,409	15,85	12,3	2498
10	0,412	15,86	12,6	2390
11	0,410	15,86	12,4	2494
12	0,413	15,85	12,1	2506
13	0,404	15,86	12,3	2454
srednja vrijednost	0,437	24,07	14,6	2491
min	0,404	15,85	12,1	2390
maks	0,510	32,67	16,6	2598
razlika maks-min	0,106	16,82	4,5	208

M+EPS 30/70				
Broj mjerjenja	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{1'}$ (m/s)
1	0,296	18,95	18,7	2136
2	0,299	18,95	19,6	2020
3	0,308	20,25	18,9	2123
4	0,294	19,05	19,9	1994
5	0,315	19,12	19,4	2041
6	0,328	20,09	18,0	2196
7	0,344	20,88	19,2	2072
8	0,377	22,97	18,5	2168
9	0,276	15,86	19,8	2036
10	0,272	15,86	19,7	2061
11	0,272	15,86	19,4	2098
12	0,273	15,86	19,1	2117
13	0,270	15,86	19,5	2092
srednja vrijednost	0,302	18,43	19,2	2089
min	0,270	15,86	18,0	1994
maks	0,377	22,97	19,9	2196
razlika maks-min	0,107	7,11	1,9	201

M+EPS 20/80				
Broj mjerjenja	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{D'}$ (m/s)
1	0,254	16,23	24,0	1630
2	0,247	15,62	23,9	1659
3	0,249	15,69	22,5	1754
4	0,236	15,26	21,8	1820
5	0,234	14,76	22,4	1756
6	0,246	15,73	23,9	1685
7	0,247	15,86	21,7	1848
8	0,240	15,10	22,9	1735
9	0,177	15,85	30,9	1640
10	0,175	15,86	29,8	1688
11	0,178	15,86	29,6	1707
12	0,177	15,86	31,0	1622
13	0,176	15,86	30,1	1684
srednja vrijednost	0,218	15,66	25,7	1710
min	0,175	14,76	21,7	1622
maks	0,254	16,23	31,0	1848
razlika maks-min	0,079	1,47	9,3	226

Prilog 5. Vrijednosti pojedinačnih izmjerenih deformacija pri ispitivanjima s dvostrukim cijevima.

Mjerenje br.		Deformacija cijevi (očitanje uzduž cijevi) H (mm), debljina stijenke cijevi 7 mm															
		0 (mm)	10 (mm)	20 (mm)	30 (mm)	40 (mm)	50 (mm)	60 (mm)	70 (mm)	80 (mm)	90 (mm)	100 (mm)	110 (mm)	120 (mm)	130 (mm)	140 (mm)	150 (mm)
PENTRIT																	
1	Prije	51,00	51,00	51,00	51,00	51,00	51,00	51,00	51,00	51,00	51,00	51,00	51,00	51,00	51,00	51,00	51,00
	Poslije	12,50	12,50	12,50	12,50	12,50	12,50	12,50	12,50	12,50	12,50	12,50	12,50	12,50	12,50	12,50	12,50
	Razlika	38,50	38,50	38,50	38,50	38,50	38,50	38,50	38,50	38,50	38,50	38,50	38,50	38,50	38,50	38,50	38,50
EMULZIJA																	
1	Prije	26,19	26,19	26,19	26,20	26,20	26,20	26,20	26,21	26,21	26,21	26,21	26,21	26,21	26,21	26,20	26,20
	Poslije	4,77	5,57	5,35	5,29	5,30	5,13	5,11	5,12	5,08	4,76	4,86	5,00	4,62	4,43	4,18	3,69
	Razlika	21,42	20,62	20,84	20,91	20,90	21,07	21,09	21,09	21,13	21,45	21,35	21,21	21,59	21,78	22,02	22,51
M+EPS 50/50																	
1	Prije	26,35	26,35	26,34	26,33	26,32	26,31	26,29	26,28	26,27	26,26	26,25	26,25	26,25	26,24	26,23	26,22
	Poslije	22,84	22,94	22,83	22,67	22,55	22,37	22,15	22,03	21,94	21,88	21,86	21,76	21,67	21,57	21,34	20,42
	Razlika	3,51	3,41	3,51	3,66	3,77	3,94	4,14	4,25	4,33	4,38	4,39	4,49	4,58	4,67	4,89	5,80

Mjerenje br.		Deformacija cijevi (očitanje uzduž cijevi) H (mm), debljina stijenke cijevi 5 mm															
		0 (mm)	10 (mm)	20 (mm)	30 (mm)	40 (mm)	50 (mm)	60 (mm)	70 (mm)	80 (mm)	90 (mm)	100 (mm)	110 (mm)	120 (mm)	130 (mm)	140 (mm)	150 (mm)
M+EPS 50/50																	
1	Prije	24,49	24,49	24,52	24,52	24,52	24,52	24,72	24,51	24,50	24,49	24,49	24,50	24,51	24,51	24,51	24,51
	Poslije	7,60	9,82	10,44	10,77	11,07	11,44	11,50	11,13	11,04	11,30	11,60	11,83	12,10	12,09	11,89	10,55
	Razlika	16,89	14,67	14,08	13,75	13,45	13,08	13,22	13,38	13,46	13,19	12,89	12,67	12,41	12,42	12,62	13,96
2	Prije	24,38	24,38	24,38	24,38	24,38	24,39	24,39	24,39	24,39	24,38	24,38	24,38	24,38	24,38	24,38	24,39
	Poslije	8,29	10,22	10,95	11,23	11,40	11,65	12,14	12,64	13,21	13,82	13,86	13,81	13,68	13,64	14,02	13,27
	Razlika	16,09	14,16	13,43	13,15	12,98	12,74	12,25	11,75	11,18	10,56	10,52	10,57	10,70	10,74	10,36	11,12
3	Prije	24,52	24,49	24,49	24,47	24,47	24,47	24,47	24,46	24,46	24,46	24,46	24,45	24,44	24,43	24,43	24,41
	Poslije	10,96	12,36	12,60	12,58	12,62	12,55	12,42	12,27	12,24	12,33	12,26	12,13	11,98	11,89	11,77	10,51
	Razlika	13,56	12,13	11,89	11,89	11,85	11,92	12,05	12,19	12,22	12,13	12,20	12,32	12,46	12,54	12,66	13,90
M+EPS 40/60																	
1	Prije	24,39	24,39	24,39	24,39	24,40	24,40	24,39	24,39	24,39	24,40	24,40	24,40	24,40	24,39	24,39	24,39
	Poslije	18,55	19,73	19,99	20,10	20,06	20,01	19,98	19,96	19,99	19,97	20,00	20,40	20,12	20,22	20,03	19,51
	Razlika	5,84	4,66	4,40	4,29	4,34	4,39	4,41	4,43	4,40	4,43	4,40	4,00	4,28	4,17	4,36	4,88
2	Prije	24,43	24,42	24,42	24,41	24,41	24,41	24,41	24,41	24,40	24,40	24,40	24,40	24,40	24,40	24,39	24,39
	Poslije	16,80	18,43	18,77	18,98	19,28	19,40	19,45	19,50	19,70	19,79	19,96	20,10	20,20	20,19	20,05	19,26
	Razlika	7,63	5,99	5,65	5,43	5,13	5,01	4,96	4,91	4,70	4,61	4,44	4,30	4,20	4,21	4,34	5,13
M+EPS 30/70																	
1	Prije	24,42	24,43	24,43	24,44	24,45	24,45	24,46	24,47	24,49	24,51	24,54	24,55	24,55	24,55	24,56	24,57
	Poslije	20,13	21,75	21,88	21,99	22,20	22,23	22,26	22,30	22,31	22,32	22,35	22,40	22,43	22,44	22,41	22,15
	Razlika	4,29	2,68	2,55	2,45	2,25	2,22	2,20	2,17	2,18	2,19	2,19	2,15	2,12	2,11	2,15	2,42
M+EPS 20/80																	
1	Prije	24,39	24,41	24,43	24,44	24,44	24,43	24,43	24,41	24,40	24,40	24,40	24,42	24,42	24,42	24,42	24,41
	Poslije	24,17	24,28	24,33	24,33	24,34	24,34	24,34	24,32	24,32	24,32	24,32	24,33	24,33	24,34	24,33	24,29
	Razlika	0,22	0,13	0,10	0,11	0,10	0,09	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09	0,08	0,09	0,12

Prilog 6. Vrijednosti pojedinačnih izmjerenih brzina detonacije u bušotini emulzijske matrice s dodatkom EPS-a.

Matrica+Mikrokuglice 75/25				
Broj mjerenja	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{1'}$ (m/s)
1	1,160	73,65	9,2	5458
2	1,160	74,18	9,3	5352
3	1,160	75,76	9,1	5495
4	1,160	74,24	9,4	5328
5	1,160	74,84	9,2	5407
srednja vrijednost	1,160	74,53	9,2	5408
min	1,160	73,65	9,1	5328
maks	1,160	75,76	9,4	5495
razlika maks-min	0,000	2,11	0,3	167

M+EPS 50/50				
Broj mjerenja	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{1'}$ (m/s)
1	0,617	41,42	17,8	2826
2	0,617	42,40	17,5	2868
3	0,617	42,74	17,9	2789
4	0,617	42,80	17,7	2814
5	0,617	42,66	17,4	2884
srednja vrijednost	0,617	42,40	17,7	2836
min	0,617	41,42	17,4	2789
maks	0,617	42,80	17,9	2884
razlika maks-min	0,000	1,38	0,5	95

M+EPS 40/60				
Broj mjerjenja	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{1'}$ (m/s)
1	0,485	33,55	23,9	2105
2	0,485	33,20	23,2	2173
3	0,485	32,70	23,7	2116
4	0,485	32,81	23,1	2163
5	0,485	33,51	23,6	2122
srednja vrijednost	0,485	33,15	23,5	2136
min	0,485	32,70	23,1	2105
maks	0,485	33,55	23,9	2173
razlika maks-min	0,000	0,85	0,8	68

M+EPS 30/70				
Broj mjerjenja	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{1'}$ (m/s)
1	0,275	24,65	29,3	1699
2	0,275	23,72	28,6	1741
3	0,275	23,78	28,1	1786
4	0,275	23,20	29,1	1723
5	0,275	24,08	28,1	1782
srednja vrijednost	0,275	23,89	28,6	1746
min	0,275	23,20	28,1	1699
maks	0,275	24,65	29,3	1786
razlika maks-min	0,000	1,45	1,2	88

M+EPS 20/80				
Broj mjerjenja	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Vrijeme, t_1 (μ s)	Brzina detonacije, $v_{D'}$ (m/s)
1	0,179	15,64	31,8	1575
2	0,179	15,55	31,9	1560
3	0,179	15,97	31,3	1597
4	0,179	15,16	30,6	1634
5	0,179	15,10	31,4	1582
srednja vrijednost	0,179	15,48	31,4	1590
min	0,179	15,10	30,6	1560
maks	0,179	15,97	31,9	1634
razlika maks-min	0,000	0,87	1,3	75

Prilog 7. Vrijednosti pojedinačnih izmjerenih brzina oscilacija.

Pentrit							
Brzina	Pravac 1			Pravac 2			Masa eksplozivne tvari (g)
	MO1	MO2	MO3	MO4	MO5	MO6	
T (mm/s)	23,00	9,14	3,94	26,42	20,70	5,84	71,98
V (mm/s)	58,30	10,67	5,21	65,91	17,00	8,89	
L (mm/s)	41,50	9,14	6,86	100,20	30,50	5,97	
PVS (mm/s)	61,30	16,76	8,64	112,70	38,95	8,95	
Srednja vrijednost PVS (mm/s)	61,30	16,76	8,64	112,70	38,95	8,95	71,98
Svedena vrijednost ((mm/s)/g)	0,852	0,233	0,120	1,566	0,541	0,124	

ANFO eksploziv							
Brzina	Pravac 1			Pravac 2			Masa eksplozivne tvari (g)
	MO1	MO2	MO3	MO4	MO5	MO6	
T (mm/s)	7,37	3,30	1,52	13,20	1,78	1,27	66,03
V (mm/s)	22,90	3,17	2,79	24,40	3,05	2,54	
L (mm/s)	12,40	1,65	3,43	29,30	2,03	0,889	
PVS (mm/s)	27,06	4,10	3,57	38,20	3,18	2,54	
Srednja vrijednost PVS (mm/s)	27,06	4,10	3,57	38,20	3,18	2,54	66,03
Svedena vrijednost ((mm/s)/g)	0,410	0,062	0,054	0,579	0,048	0,038	

Emulzijski eksploziv							
Brzina	Pravac 1			Pravac 2			Masa eksplozivne tvari (g)
	MO1	MO2	MO3	MO4	MO5	MO6	
T (mm/s)	19,20	5,33		13,00	3,17	2,03	72,18
V (mm/s)	15,40	3,81		29,50	3,56	3,68	
L (mm/s)	36,20	9,91	-	34,50	12,60	4,44	
PVS (mm/s)	37,90	10,40		41,00	13,20	4,64	
T (mm/s)	10,70	26,30	4,57	21,20	8,25	0,762	73,24
V (mm/s)	33,30	3,05	3,56	27,30	4,57	3,05	
L (mm/s)	1,90	7,49	21,80	17,30	10,20	2,92	
PVS (mm/s)	35,00	27,00	22,20	32,70	11,00	3,19	
T (mm/s)	27,30	21,70	7,37	12,10	21,50	6,98	72,36
V (mm/s)	20,10	15,40	3,94	27,40	17,10	8,76	
L (mm/s)	4,44	16,50	8,25	13,00	34,20	2,79	
PVS (mm/s)	32,00	29,80	10,70	31,00	41,50	8,83	
T (mm/s)	17,80	18,40	6,98				73,11
V (mm/s)	39,60	12,40	4,19	-	-	-	
L (mm/s)	31,00	28,60	1,14				
PVS (mm/s)	45,60	29,60	7,34				
T (mm/s)	10,70	4,06	3,30	17,80	12,30	3,56	73,18
V (mm/s)	17,00	8,64	2,54	29,30	12,10	9,52	
L (mm/s)	44,80	13,30	6,22	3,05	7,62	4,19	
PVS (mm/s)	46,50	14,00	6,68	29,90	14,40	10,60	
Srednja vrijednost PVS (mm/s)	39,40	22,16	11,73	33,65	20,03	6,82	72,81
Svedena vrijednost ((mm/s)/g)	0,541	0,304	0,161	0,462	0,275	0,094	

Matrica : EPS 50 : 50							
Brzina	Pravac 1			Pravac 2			Masa eksplozivne tvari (g)
	MO1	MO2	MO3	MO4	MO5	MO6	
T (mm/s)	26,00	9,65		11,80	6,60	2,29	41,42
V (mm/s)	11,60	5,71		11,90	5,59	3,17	
L (mm/s)	35,70	16,60	-	28,10	9,78	2,29	
PVS (mm/s)	39,70	17,60		28,70	11,70	3,81	
T (mm/s)	10,90	2,79	4,95	9,02	5,71	2,16	42,40
V (mm/s)	7,75	7,75	2,92	36,70	3,68	3,05	
L (mm/s)	21,00	6,60	8,38	2,29	3,17	2,16	
PVS (mm/s)	22,80	10,20	8,91	36,80	6,00	3,58	
T (mm/s)	16,40	7,62		18,80	8,64	1,27	42,80
V (mm/s)	28,70	3,56		25,80	5,84	2,41	
L (mm/s)	8,51	5,84	-	26,70	4,57	0,889	
PVS (mm/s)	28,90	8,68		35,50	10,20	2,76	
T (mm/s)	15,00	6,86	2,29		2,54	5,46	42,54
V (mm/s)	12,70	12,20	6,22		7,87	1,14	
L (mm/s)	1,90	16,40	3,68		9,52	2,41	
PVS (mm/s)	15,50	18,00	6,40		12,60	5,50	
Srednja vrijednost PVS (mm/s)	26,73	13,62	7,66	33,67	10,13	3,91	42,29
Svedena vrijednost ((mm/s)/g)	0,632	0,322	0,181	0,796	0,239	0,093	

Matrica : EPS 40 : 60							
Brzina	Pravac 1			Pravac 2			Masa eksplozivne tvari (g)
	MO1	MO2	MO3	MO4	MO5	MO6	
T (mm/s)	9,52	7,49	2,54	5,46	2,16	1,52	33,79
V (mm/s)	17,90	7,75	3,94	17,50	9,52	1,65	
L (mm/s)	1,02	2,79	2,92	6,98	3,17	0,89	
PVS (mm/s)	18,90	8,14	3,96	19,20	9,81	1,99	
T (mm/s)		6,35	1,90	9,52	1,40	2,03	33,55
V (mm/s)	-	4,83	2,67	11,20	3,43	1,78	
L (mm/s)		2,54	2,92	13,80	5,84	3,43	
PVS (mm/s)		6,55	3,81	15,60	6,02	3,54	
T (mm/s)	9,40	5,21	2,41	2,41	1,65	0,76	33,70
V (mm/s)	16,80	3,94	2,03	8,25	4,57	0,89	
L (mm/s)	1,65	3,68	4,83	6,86	5,08	0,51	
PVS (mm/s)	19,10	6,67	5,08	9,85	6,67	1,05	
T (mm/s)	4,06	6,10	1,52	7,37	8,13	4,06	33,81
V (mm/s)	12,30	6,98	3,81	16,30	11,70	1,14	
L (mm/s)	0,889	3,68	2,54	18,30	10,50	1,78	
PVS (mm/s)	12,60	7,90	3,85	21,20	12,20	4,07	
T (mm/s)	7,62	2,41	2,03	3,81	4,70	1,14	33,51
V (mm/s)	15,70	1,90	4,32	8,00	4,70	1,40	
L (mm/s)	1,780	0,889	1,90	6,35	2,92	0,889	
PVS (mm/s)	15,80	3,07	4,78	9,16	6,08	1,58	
Srednja vrijednost PVS (mm/s)	16,60	6,47	4,30	15,00	8,16	2,45	33,67
Svedena vrijednost ((mm/s)/g)	0,493	0,192	0,128	0,446	0,242	0,073	

Matrica : EPS 30 : 70							
Brzina	Pravac 1			Pravac 2			Masa eksplozivne tvari (g)
	MO1	MO2	MO3	MO4	MO5	MO6	
T (mm/s)	14,70	6,73	0,635	4,06	1,40	2,54	23,64
V (mm/s)	14,20	2,03	3,30	8,76	3,68	2,67	
L (mm/s)	1,78	4,19	2,67	6,86	2,92	2,79	
PVS (mm/s)	15,30	7,28	3,50	9,51	3,70	3,95	
T (mm/s)	2,79	6,35	3,05	4,32	3,81	1,78	23,65
V (mm/s)	4,57	7,24	4,57	14,50	5,97	2,67	
L (mm/s)	2,16	1,27	3,30	15,10	5,71	1,65	
PVS (mm/s)	5,17	8,57	5,78	16,70	6,72	2,74	
T (mm/s)	7,24	2,16	1,27	8,38	0,889	0,762	23,72
V (mm/s)	18,40	3,94	2,67	6,60	4,70	3,81	
L (mm/s)	1,40	1,140	2,41	16,40	2,92	2,03	
PVS (mm/s)	18,50	4,49	2,90	17,10	4,84	3,83	
T (mm/s)		3,56	2,54		9,52	1,02	23,78
V (mm/s)		5,33	2,29		3,05	5,08	
L (mm/s)	-	4,19	1,78	-	2,16	1,27	
PVS (mm/s)		6,40	2,57		9,69	5,33	
T (mm/s)	3,43	2,03	3,81				23,20
V (mm/s)	9,65	3,05	2,79	-	-	-	
L (mm/s)	0,508	1,14	1,14				
PVS (mm/s)	10,10	3,48	4,15				
Srednja vrijednost PVS (mm/s)	12,27	6,04	3,78	14,44	6,24	3,96	23,60
Svedena vrijednost ((mm/s)/g)	0,520	0,256	0,160	0,612	0,264	0,168	

Matrica : EPS 20 : 80							
Brzina	Pravac 1			Pravac 2			Masa eksplozivne tvari (g)
	MO1	MO2	MO3	MO4	MO5	MO6	
T (mm/s)	4,70	2,92	1,40	3,68	0,889	0,635	15,23
V (mm/s)	4,70	2,79	4,32	0,508	3,17	1,40	
L (mm/s)	1,14	1,02	1,90	0,889	4,70	0,76	
PVS (mm/s)	6,24	3,79	4,50	3,77	5,18	1,43	
T (mm/s)	3,94	3,94	0,762				15,64
V (mm/s)	6,48	2,67	1,14	-	-	-	
L (mm/s)	1,65	2,41	2,54				
PVS (mm/s)	7,39	5,33	2,59				
T (mm/s)	3,30	3,30	0,635	5,97	1,02	0,635	15,84
V (mm/s)	5,59	1,78	1,40	2,41	4,57	0,889	
L (mm/s)	0,381	1,65	1,90	4,95	2,54	0,762	
PVS (mm/s)	5,65	3,40	2,02	6,63	4,64	1,02	
T (mm/s)	3,81	3,30	1,52	2,54	3,56	0,635	15,67
V (mm/s)	10,90	3,56	1,90	4,06	5,84	0,762	
L (mm/s)	0,635	2,67	1,78	5,59	2,16	1,02	
PVS (mm/s)	10,90	4,53	2,34	6,98	6,11	1,30	
T (mm/s)	4,57	1,40		1,27	0,762	0,635	15,78
V (mm/s)	6,98	2,54	-	5,21	0,762	0,635	
L (mm/s)	0,508	0,762		2,79	1,40	0,508	
PVS (mm/s)	7,03	2,76		5,27	1,67	0,883	
Srednja vrijednost PVS (mm/s)	7,44	3,96	2,86	5,66	4,40	1,16	15,63
Svedena vrijednost ((mm/s)/g)	0,476	0,253	0,183	0,362	0,281	0,074	

Popis korištenih oznaka i odgovarajućih jedinica

Oznaka	Značenje oznake	Jedinica
a	razmak između bušotina	(m),
A	eksperimentalno određena konstanta	
a_d	razmak između dokonturnih bušotina	(m),
B	eksperimentalno određena konstanta	
C	eksperimentalno određena konstanta	
c	brzina zvuka u mediju	(m/s)
c_1	brzina zvuka u beskonačno elastičnoj sredini	(m/s)
c_p	brzina zvučnog vala u stijeni	(m/s),
C_p	molni toplinski kapacitet pri stalnom tlaku	(J/K)
C_V	molni toplinski kapacitet pri stalnom volumenu	(J/K)
D	promjer bušotine	(mm),
d	promjer patrone eksploziva	(mm),
e_s	energija udarnog vala	(J/kg),
e_b	energija plinova	(J/kg),
f	omjer promjera eksplozivnog punjenja i promjera minske bušotine	
L_e	duljina eksplozivnog punjenja	(mm),
L_b	duljina minske bušotine	(mm),
m_E	masa eksploziva	(kg)
p	tlak	(bar, Pa),
P_1	početni tlak	(bar, Pa),
P_d	tlak detonacije	(bar, Pa),
P_b	tlak koji djeluje na stjenku bušotine	(bar, Pa),
P_j	kvazi-statički tlak	(bar, Pa),
Q	izmijenjena toplina	(J/kg),
q_c	koncentracija eksplozivnog punjenja	(kg/m),
q	specifična potrošnja eksploziva	(kg/m ³),
q_d	linearna koncentracija punjenja dokonturnog reda	(kg/m),
q_{ep}	linearna koncentracija eksplozivnog punjenja	(kg/m ²),
q_p	linearna koncentracija punjenja proizvodnih bušotina	(kg/m),
r_c	radijus zone drobljenja	(m),

r_b	radijus minske bušotine	(m),
R_b	radijus pukotina	(m),
R_p	radijus zone loma	(m),
R_s	radijus zone vibracija	(m),
T	temperatura	(°C, K),
t_b	vrijeme prvog kolapsa mjehura plinova detonacije	(s),
u	brzina tvari iza fronte udarnog vala	(m/s),
v	specifični volumen	(m ³ /kg),
v_l	brzina oscilacija čestica u beskonačno elastičnoj sredini	(m/s),
v_d	brzina detonacije	(m/s),
W	masa eksplozivnog punjenja	(kg),
w	izbojnica	(m),
Z	akustična impedancija medija	(kg/m ² s).

Oznaka	Značenje oznake	Jedinica
ρ	gustoća tvari	(kg/m ³),
ρ_1	gustoća beskonačno elastične sredine	(kg/m ³),
ρ_{ET}	gustoća eksplozivne tvari	(kg/m ³),
ρ_s	gustoća stijene	(kg/m ³),
γ_{CJ}	koeficijent adijabatske ekspanzije plinovitih produkata detonacije u CJ ravnini,	
σ_c	jednoosna tlačna čvrstoća stijene	(Pa),
σ_0	troosna čvrstoća stijene	(Pa),
σ_R	inducirano naprezanje tlačnim valom	(Pa),
σ_T	inducirano naprezanje refleksijom tlačnog vala	(Pa),
σ_t	vlačna čvrstoća stijene	(Pa),
σ_1	inducirano naprezanje u beskonacnoj elastičnoj sredini	(Pa),
μ	odnos između dviju impendancija	

Popis kratica

AN – amonijev nitrat,
ANFO – smjesa amonijevog nitrata i mineralnog ulja,
ANFOPS – smjesa ANFO-eksploziva i ekspaniranog polistirena,
ASCII – American standard code for information interchange,
BASF – Badische Anilin & Soda-Fabrik,
BKW – Becker, Kistiakowsky & Wilson,
CJ – Chapman & Jouguet,
DC – dvostruka cijev,
DIN – Deutsches Institut für Normung,
EN – Europäische Norm,
EPS – ekspanirani polistiren,
HRN – hrvatska norma,
ISL – Institut Saint Louis,
ISO – International Organization for Standardization,
LASL – Los Alamos scientific laboratory,
LDE – low density explosives,
LDRA – low density reactive agent,
MO – mjesto opažanja,
ND – no deck,
OSMRE – Office of Surface Mining Reclamation and Enforcement,
PANFO – smjesa ANFO-eksploziva i ekspaniranog perlita,
PDT – plate dent test,
PETN – pentrit,
PPV – peak particle velocity,
PS – polistiren,
PVC – poli(vinil – klorid),
PVDF – Polyvinylidene fluoride (polyvinylidene difluoride),
PVF – Polyvinyl fluoride,
RDX – heksogen,
R.K. 8 – rudarska kapica br. 8,
TNT – trinitrotoulen,

ULDE – ultra low density explosives,

USBM – United States Bureau of Mines,

ZND – Zeldovich, Von Neuman & Döring.

Životopis

Vinko Škrlec je rođen 12. rujna 1977. godine u Zagrebu. Od 1998.-2006. studirao na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu te stekao zvanje: Diplomirani inženjer rudarstva. Poslijediplomski studij upisao je 2008. godine na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu.

Od 01. prosinca 2008. godine zaposlen je kao znanstveni novak na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu u sklopu znanstvenog projekta „Emulzijski eksplozivi, inicijalna sredstva i djelovanje miniranja na okoliš“ pod vodstvom prof.dr.sc. Zvonimira Estera. Od 01. studenog 2010. do danas zaposlen kao asistent na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu. Održava vježbe iz predmeta: Miniranje I, Miniranje II i Rušenje objekata. Pomagao je prilikom izrade brojnih diplomskih i završni radova.

Od 2010. godine je na funkciji Voditelja ispitivanja Laboratorija za ispitivanje eksplozivnih tvari akreditiranog prema HRN EN ISO 17025.

Pohađao je seminare i stručna usavršavanja:

- seminar Umjerevanja i umjernice, 2014, Hrvatsko mjeriteljsko društvo, Zagreb,
- seminar Upravljanje ispitnom opremom, 2012, Crolab, Zagreb,
- seminar Stavljanje pirotehničkih artikala i eksploziva za civilnu uporabu na tržište, 2010, Hrvatski zavod za norme i RGN fakultet, Zagreb,
- seminar Mjerna nesigurnost za praktičare, 2009, Hrvatsko mjeriteljsko društvo, Zagreb,
- seminar Ustrojstvo laboratorija prema HRN EN ISO/IEC 17025, 2009, Hrvatska akreditacijska agencija.

Autor je i koautor znanstvenih i stručnih radova iz područja miniranja, zaštite okoline od štetnih djelovanja miniranja, ispitivanja eksplozivnih tvari te srodnih područja. Suradnik je na projektima, elaboratima i mjerenjima iz područja miniranja, zaštite okoline od štetnih djelovanja miniranja, ispitivanja eksplozivnih tvari te srodnih područja.

Član je:

- Udruge Hrvatskih rudarskih inženjera i
- Odbora za promidžbu Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta.

Aktivno se služi engleskim jezikom i posjeduje osnovno znanje iz njemačkog jezika.

Popis objavljenih radova

Znanstveni rad objavljen u časopisu citiranom u tercijarnim publikacijama (A)

1. Bohanek, V., Dobrilović, M., Škrlec, V. (2013.): *Influence of the Initiation Energy on the Velocity of Detonation of ANFO Explosive*. Central European Journal of Energetic Materials, Volume 10, Number 4, 2013. Str. 555 – 568 (BazTech; Chemical Abstracts; Chemistry Citation Index; **Current Contents/Engineering, Computing and Technology Embase**; Journal Citation Reports/Science Edition; **Materials Science Citation Index; Science Citation Index Expanded**; Scopus).
2. Bohanek, V., Dobrilović, M., Škrlec, V. (2014.): *The efficiency of linear shaped charges*. Tehnički vjesnik – Technical Gazette, Vol. 21, No. 3. Str. 525 – 531 (**Science Citation Index Expanded** ((Web of Science) and Journal Citation Reports/Science Edition).

Znanstveni rad objavljen u časopisu citiranom u sekundarnim publikacijama (B)

1. Vrkljan, D., Ester, Z., Škrlec, V. (2007.): Seizmički utjecaji miniranja na okoliš pri eksploataciji mineralnih sirovina. Tehnoeko, IV, 8, str. 30-33.
2. Škrlec, V. Bohanek, V., Deković, Z., (2012.): *Brzina detonacije emulzijskih eksploziva smanjene gustoće*. Rudarsko-geološki-naftni zbornik, Vol. 25, str. 115-122. (indeksirano u sekundarnim bazama i publikacijama navedenim pod *).
3. Bohanek, V., Dobrilović, M., Škrlec, V. (2012.): *Brzina mlaza linijskih kumulativnih rezača*. Rudarsko-geološki-naftni zbornik, Vol. 25, str. 73-80. (indeksirano u sekundarnim bazama i publikacijama navedenim pod *).
4. Bohanek, V., Dobrilović, M., Škrlec, V. (2013.): *Primjena energije eksploziva pri obradi metala*. Rudarsko-geološki-naftni zbornik, Vol. 41, str. 29-37. (indeksirano u sekundarnim bazama i publikacijama navedenim pod *).
5. Dobrilović, M., Bohanek, V., Škrlec, V. (2014.): *Increasing measurement accuracy in electro-optical method for measuring velocity of detonation*. Rudarsko-geološki-naftni zbornik, Vol. 29, str. 49-55. (indeksirano u sekundarnim bazama i publikacijama navedenim pod *).
6. Škrlec, V., Dobrilović, M., Bohanek, V. (2014.): *Teorije loma stijene eksplozivom*. Rudarsko-geološki-naftni zbornik, Vol. 29, str. 57-68. (indeksirano u sekundarnim bazama i publikacijama navedenim pod *).

(* GEOBASE, GEOREF, Geotechnical Abstracts, Engineering Info. Inc, FLUIDEX, Referativnij žurnal, ELSEVIER SCIENCE Geo. Abstracts, Compendex, SCOPUS)

Znanstveni rad recenziran, objavljen u zborniku radova s međunarodnog znanstvenog skupa (D)

1. Dobrilović, M., Škrlec, V., Bohanek, V., Stanić, N., Ester, Z. (2008.): *Disposability of the energy produced in shock tube*. Proceeding of 11th seminar on New Trends in Research of Energetic Materials, Pardubice, Češka, 9-11. 4., str. 493-499.
2. Matic, N., Kern, G., Škrlec, V., (2009.): *The impacts of solar activity on climate affect, a case study of Cave Velika Peća*. Abstract book 17th International Karstological School „Classical karst“, Cave climate., Postojna, Slovenija, 15-20. 6.
3. Kuhinek, D., Zorić, I., Škrlec, V., (2009.): *Influence of the current pulse shape to the measurement of electric detonators firing impulse*. Proceeding of 12th seminar on New Trends in Research of Energetic Materials, Pardubice, Češka, 1-3. 4., str. 689-695.
4. Dobrilović, M., Ester, Z., Bohanek, V., Škrlec, V. (2009.): *Safe Blasting Parameters and Seismic Influences during Construction Pit Excavation*. Proceedings of the Thirthy-fifth Conference on Explosives and Blasting Tehnique, Denver, USA, 8-11. 2., str. 119-130.
5. Dobrilović, M., Ester, Z., Bohanek, V., Škrlec, V. (2009.): *Linear shaped charge with emulsion explosive*. Proceeding of 12th on New Trends in Research of Energetic Materials, Pardubice, Češka, 1-3. 4., str. 487-493.
6. Dobrilović, M., Bohanek, V., Škrlec, V., Stanković, S., Dobrilović, I. (2010.): *Instructions for calibration method for measuring device of detonation velocity*. Proceedings of 11th International Carpatian Control Conference. Miškolc, Mađarska, 26-28. 5., str. 285-288.
7. Dobrilović, M., Bohanek, V., Škrlec, V. (2010.): *Program of measurements during excavation by blasting of „Katarina“tunnel*. Proceeding of 11th International Conference Underground Construction. Prag, Češka, 14-16. 6., str. 580-586.
8. Bohanek, V., Dobrilović, M., Škrlec, V. (2010.): *Jet Pressure Measurement of Linear Shaped Charge*. Proceeding of 13th seminar on New Trends in Research of Energetic Materials, Pardubice, Češka, 21-23. 4., str. 413-418.
9. Dobrilović, M., Bohanek, V., Škrlec, V. (2012): *Calibration method for velocity of detonation measuring device*. Proceeding of 15th seminar on New Trends in Research of Energetic Materials, Pardubice, Češka, 18-20. 4., str. 495-501.

10. Dobrilović, M., Bohanek, V., Škrlec, V. (2012): *Special conditions in tunnel excavation by blasting near the existing structures*. Proceedings of the Colloquium on Using Underground Space in Urban Areas in South-East Europe, Dubrovnik, Hrvatska, 12-14. 4., str. 672-684.
11. Dobrilović, M., Škrlec, V., Bohanek, V. (2013): *Velocity of Detonation of Low Density ANFO Mixture*. Proceeding of 16th seminar on New Trends in Research of Energetic Materials, Pardubice, Češka, 10-12. 4., str. 543-554.

Znanstveni rad recenziran, objavljen u zborniku radova s domaćeg znanstvenog skupa

1. Dobrilović, M., Ester, Z., Škrlec, V. (2006): *Energija udarca hidrauličkog čekića i minimalna energija aktiviranja gospodarskih eksploziva*. Istraživanje, eksploatacija i prerada čvrstih mineralnih sirovina, Dubrovnik, Hrvatska, 8-10.11. str. 68-73.

Sažeci u zbornicima skupova

1. Matić, N., Škrlec, V., Dobrilović, M., (2008.): *The impact of blasting on Cave Velika Peća*. Project SMART-KARST event 4: Karst sediments: 16th International Karstological School „Classical karst“, Karst sediments: guide book and abstracts., Postojna, Slovenija, 16-21. 6.