Teoretski parametri detonacije eksploziva smanjene gustoće

Šimunović, Katija

Master's thesis / Diplomski rad

2017

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:169:654666

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb







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

TEORETSKI PARAMETRI DETONACIJE EKSPLOZIVA SMANJENE GUSTOĆE

Diplomski rad

Katija Šimunović
R 150

Zagreb, 2017.

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Diplomski rad

TEORETSKI PARAMETRI DETONACIJE EKSPLOZIVA SMANJENE GUSTOĆE

KATIJA ŠIMUNOVIĆ

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

Sažetak

U radu su prikazani teoretski, proračunati rezultati parametara detonacije eksploziva smanjene gustoće. Detonacijski parametri su određeni računalnim programom EXPLO 5. Obrađene su različite smjese eksploziva smanjene gustoće, a proračunate i mjerene brzine detonacije su uspoređene za dio smjesa.

Ključne riječi: detonacijski parametri, brzina detonacije, eksplozivi smanjene gustoće.

Diplomski rad sadrži: 35 stranica, 2 tablice, 19 slika i 13 referenci.

Jezik izvornika: hrvatski

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

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

Pomagao pri izradi: Dr.sc. Siniša Stanković, stručni suradnik RGNF

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

Datum obrane: 27. rujna 2017. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology
and Petroleum Engineering

Master'sThesis

DETONATION STABILITY OF EMULSION BASED LOW DENSITY EXPLOSIVES

KATIJA ŠIMUNOVIĆ

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

Abstract

In the thesis is presented theoretical, calculated results parameters of the detonation of low density explosives. Detonation parameters were determined by the EXPLO 5 computer program. Using the program it is processed various mixtures of reduced density explosives. Calculated and measured detonation velocity are compared for the part od the mixture.

Keywords: detonation parameters, velocity of detonation, low-density explosives.

Thesis contains: 35 pages, 2 tables, 19 figures and 13 references.

Original in: Croatian

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

Supervisor: PhD Mario Dobrilović, Associate Professor

Tech. assistance: PhD Siniša Stanković, Research Associate

Reviewers: PhD Mario Dobrilović, Associate Professor
PhD Vinko Škrlec, Assistant Professor
PhD Vječislav Bohanek, Assistant Professor

Date of defense: September 27nd, 2017

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS TABLICA III
POPIS SLIKA IV
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I SI JEDINICA V
1. UVOD 1
1.1. EKSPLOZIVI I EKSPLOZIVNE PRETVORBE 1
2. VRSTE EKSPLOZIVA 3
2.1. PODJELA EKSPLOZIVA 3
2.1.1. Podjela eksploziva prema karakteru eksplozije 4
2.1.2. Podjela eksploziva prema agregatnom stanju 4
2.1.3. Podjela eksploziva prema konzistenciji 5
2.1.4. Podjela eksploziva prema obliku 5
2.1.5. Podjela eksploziva prema namjeni 6
2.1.6. Podjela eksploziva na primarne i sekundarne 6
3. DETONACIJSKE ZNAČAJKE EKSPLOZIVA 8
3.1. GUSTOĆA 8
3.2. BRZINA DETONACIJE 9
3.3. MOGUĆNOSTI INICIRANJA 9
3.4. TEMPERATURA PALJENJA 9
3.5. OSJETLJIVOST NA UDAR 10
3.6. OSJETLJIVOST NA TRENJE 12
3.7. BRIZANTNOST I RADNA SPOSOBNOST 13
4. RAČUNALNI PROGRAM EXPLO 5 15
4.1. TEORIJSKE OSNOVE PROGRAMA EXPLO 5 15
4.1.1. Detonacija 15
4.1.2. Opis modela detonacije koji se koristi u programu EXPLO 5 18
4.1.3. Izračun ravnotežnog sastava produkata detonacije 19
4.1.4. Izračun tlaka 20
4.1.5. Izračun temperature produkata detonacije uzduž udarne adijabate 21
4.1.6. Određivanje C-J točke i izračun parametara detonacije 21

5. PRINCIP KORIŠTENJA EXPLO 5 PROGRAMA I PRIMJERI IZRAČUNA DETONACIJSKIH PARAMETARA 23
5.1. PRIMJERI IZRAČUNA DETONACIJSKIH PARAMETARA 25
5.2. ANALIZA IZRAČUNA DETONACIJSKIH PARAMETARA 31
6. ZAKLJUČAK 33
7. LITERATURA 34

POPIS TABLICA

Tablica 5-1. Vrijednosti konstanti i kovolumena u BKW jednadžbi stanja (Sućeska, 2008.) 20
Tablica 5-2. Prikaz izračunatih parametara za odabrane smjese eksplozivnih tvari u određenim omjerima 26

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Opća podjela eksplozivnih tvari (Bohanek 2013). 3
Slika 3-1. Uređaj za ispitivanje eksploziva na udar (HRN EN 13631-4, 2004). 11
Slika 3-2. Uređaj za ispitivanje eksploziva na trenje (HRN EN 13631-3, 2007). 12
Slika 4-1. Shematski prikaz procesa detonacije (Sućeska, 2008.). 16
Slika 4-2. Udarna adijabata eksploziva i produkata detonacije u slučaju stalnih detonacija (Sućeska, 2008.) 17
Slika 4-3. Određivanje C-J točke na udarnoj adijabati produkata detonacije (Sućeska, 2008.). 19
Slika 4-4. Promjena brzine detonacije pri specifičnom volumenu produkata detonacije (Sućeska, 2008.) 22
Slika 5-1. Odabir parametara 23
Slika 5-2. Podaci prije proračuna 24
Slika 5-3. Vrijednosti proračunatih parametara 25
Slika 5-4. Usporedba izmjerenih i proračunatih brzina detonacije za eksplozivnu smjesu Matrica/EPS. 27
Slika 5-5. Prikaz izračunatih tlakova za pojedine omjere eksplozivnih smjesa Matrica/EPS. 27
Slika 5-6. Prikaz izračunatih specifičnih volumena plinova za pojedine omjere eksplozivnih smjesa Matrica/EPS. 28
Slika 5-7. Zavisnost specifičnog volumena plinova od tlaka detonacije eksplozivnih smjesa Matrica/EPS. 28
Slika 5-8. Usporedba izmjerenih i proračunatih brzina detonacije za eksplozivnu smjesu (AN14/Matrica)/EPS. 29
Slika 5-9. Prikaz izračunatih tlakova za pojedine omjere eksplozivnih smjesa (AN14/Matrica)/EPS. 29
Slika 5-10. Prikaz izračunatih specifičnih volumena plinova za pojedine omjere eksplozivnih smjesa (AN14/Matrica)/EPS. 30
Slika 5-11. Zavisnost specifičnog volumena plinova od tlaka detonacije eksplozivnih smjesa (AN14/Matrica)/EPS. 30

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I SI JEDINICA

Simbol	Značenje	Jedinica
R	plinska konstanta	
V	volumen eksploziva	cm^3
ρ	gustoća eksploziva	g/cm^3
D	brzina detonacije	m/s
E	energija produkata	kJ/kg
P_d	tlak detonacije	Pa
v_d	brzina detonacije	m/s
ρ	gustoća eksplozivne tvari	kg/m^3
U_p	brzina čestica	m/s
ρ_0	specifična gustoća eksploziva	g/cm^3
E_0	energija detonacije	kgJ/kg
γ	politropni eksponent	
V_o	specifični volumen eksploziva	cm^3/kg
n	broj molova	
T	apsolutna temperatura	°K
P	tlak	Pa
κ	inverzni obujamski modul	
θ	konstanta	
α	volumni koeficijent toplinskog rastezanja	°C
G	Gibbs-ova slobodna energija	J
Q_v	toplina reakcija pod konstantnim uvjetima	kJ/kg
Q_p	toplina izobarnog sagorijevanja	kJ/kg
ρ	gustoća eksplozivne tvari	kg/m^3
$\Delta H_{o\varphi}$	standardna entalpija stvaranja pri 298,15 °K	
ΔE	promjena unutarnje energije	kgJ/kg

1. UVOD

Eksplozivi smanjene gustoće se koriste kod miniranja kada je potrebna ujednačena granulacija odminiranog materijala uz što mani udio vrlo sitnih frakcija, za miniranja s minimalnim oštećenjima stijene iza minskih bušotina, a njihovom upotrebom moguće je smanjiti specifičnu potrošnju eksploziva a u konačnici i troškove miniranja. Gustoća eksploziva smanjene gustoće je ispod 0,80 g/cm^3 uz dostatne minersko-tehničke karakteristike (brzina detonacije, temperatura eksplozije, energija eksploziva, volumen i specifični tlak plinova eksplozije i sl.). Eksplozivi smanjene gustoće se dobivaju na način da se postojećim eksplozivima, odnosno eksplozivnim smjesama smanji gustoća dodavanjem inertnog ili eksplozivnog materijala značajno manje gustoće. Upotrebom računalnog programa EXPLO proračunati su detonacijski parametri eksploziva smanjene gustoće te je brzina detonacije uspoređena s mjerenim vrijednostima pojedinih smjesa.

Za napomenuti je da je računalni program EXPLO 5 izveden na bazi teorije detonacije idealnih eksploziva, odnosno na postavkama idealne detonacije. Eksplozivi smanjene gustoće su neidealni eksplozivi koji ne slijede postavke modela idealne detonacije. Stoga, i rezultati dobiveni proračunom nisu u potpunosti točni, već u usporedbi rezultata za različite smjese daju relativne vrijednosti kao mjeru željenih svojstava pojedine smjese.

1.1. EKSPLOZIVI I EKSPLOZIVNE PRETVORBE

Eksplozivi su kemijski spojevi ili smjese koji imaju sposobnost da pod utjecajem određenog vanjskog impulsa detoniraju, tj. kemijski se razlažu, razvijajući pritom znatnu količinu plinova i topline (Krsnik, 1989).

Kemijska pretvorba eksplozivne tvari se može događati kao detonacija ili eksplozivno sagorijevanje. Da bi došlo do detonacije potreban je početni impuls, tj potrebno je dovesti određenu količinu energije u obliku toplinskog, mehaničkog ili eksplozivnog impulsa.

Detonacija je vrlo brza kemijska reakcija kod koje eksplozivna tvar prelazi iz čvrstog agregatnog stanja u plinovito. Pritom se oslobađa potencijalna energija eksploziva koja se kod obavljanja miniranja koristi za drobljenje i frakturiranje stijena, a određenim dijelom se pretvara u kinetičku energiju seizmičkih i zračnih valova.

Zbog velike brzine kemijske reakcije se u kratkom vremenu oslobađa velika količina energije. Produkti detonacije su plinovi čiji volumen i tlak predstavljaju važne energetske karakteristike eksploziva koje utječu na snagu, odnosno učinak detonacije. Detonacijski tlak ovisi o početnom volumenu produkata eksplozije i temperaturi eksplozije. Količina oslobođene energije je mjerilo radne sposobnosti eksploziva, jer se ona većim dijelom pretvara u mehanički rad na frakturiranju i drobljenju stijena (Krsnik, 1989).

Da bi se detonacija dogodila potrebno je u bilo kojoj točki eksplozivnog punjenja izazvati kemijsku reakciju. To se postiže energijom početnog impulsa koja izaziva pucanje unutarnjih molekularnih veza i započinje kemijska reakcija razlaganja eksploziva. Proces kojim će doći do detonacije se zove iniciranje, a u sekundarnim eksplozivima izvodi se inicijalnim eksplozivima koji su osjetljivi na udar, trenje i plamen. Detonacijom uzrokovanom inicijalnim eksplozivom dolazi do razvijanja plinova pod visokim tlakom i visokom temperaturom. Pod utjecajem visokog tlaka stvara se detonacijski udarni val koji napreduje kroz inicijalno punjenje inicijalnog sredstva i dovodi do detonacije glavno punjenje izrađeno od brizantnog odnosno sekundarnog eksploziva.

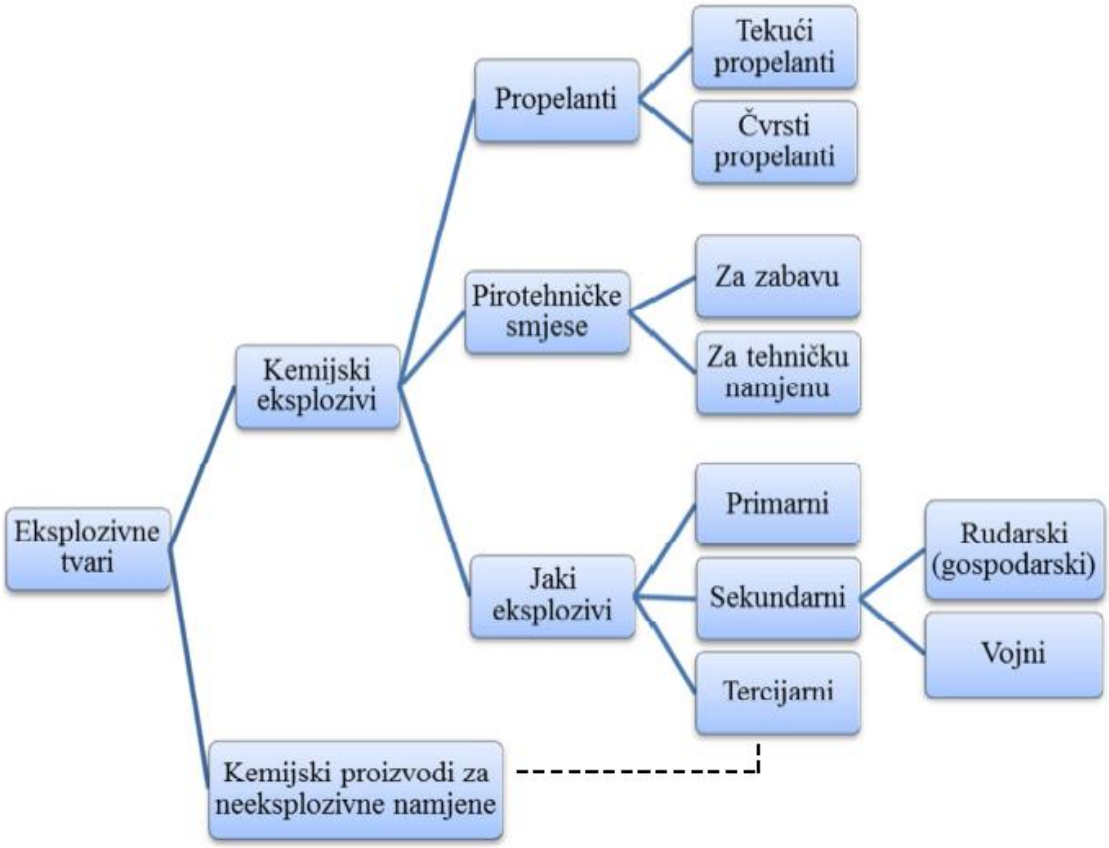
Osjetljivost na početni impuls ovisi o kemijskom sastavu i fizikalnim svojstvima eksploziva. Kod postojanijeg kemijskog sastava i čvršćih unutarnjih veza osjetljivost na početni impuls je manja jer je potrebna veća energija za raskidanje tih veza. Osjetljivost na početni impuls se smanjuje s povećanjem gustoće i vlažnosti eksploziva (Krsnik, 1989).

2. VRSTE EKSPLOZIVA

Eksplozivne tvari mogu se razvrstati prema namjeni (gospodarske, vojne, pirotehničke), kemijskom sastavu (eksplozivi senzibilirani nitroderivatima, eksplozivi senzibilirani neeksplozivnim sastojcima, itd.), konzistenciji (praškasti, smjese u rasutom stanju, lijevani, vodoplastični, plastični, emulzije i dr.), brizantnosti, osjetljivosti i dr. (Ester, 2005).

2.1. PODJELA EKSPLOZIVA

Eksplozivne tvari različite su po kemijskom sastavu, konzistenciji, agregatnom stanju, fizikalnim osobinama i eksplozivnim karakteristikama te je moguće na različite načine prikazati njihovu podjelu. Na slici 2-1. je prikazana opća podjela eksplozivnih tvari.



Slika 2-1. Opća podjela eksplozivnih tvari (Bohanek, 2013).

2.1.1. Podjela eksploziva prema karakteru eksplozije

Ovisno o kemijskim i fizikalnim značajkama eksplozivne tvari eksplodiraju ili detonacijom ili eksplozivnim sagorijevanjem. Prema tome eksplozivi se mogu podijeliti na:

- jake (engl. high explosives),
- slabe (engl. low explosives) i
- pirotehničke smjese.

Jaki eksplozivi su sve vrste eksploziva koje u normalnoj upotrebi detoniraju. 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.

Slabi eksplozivi su 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 pirotehničke smjese 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 dijele na:

- pirotehničke smjese za tehničku namjenu i
- pirotehničke smjese za zabavu.

2.1.2. Podjela eksploziva prema agregatnom stanju

Agregatna stanja eksploziva ovise o njegovoj primjeni a eksplozivi se dijele na:

- čvrste,
- plinovite i
- tekuće.

2.1.3. Podjela eksploziva prema konzistenciji

Podjela čvrstih eksploziva prema konzistenciji:

- granulirani eksplozivi,
- kompaktni eksplozivi,
- mljeveni eksplozivi,
- emulzije i gelovi i
- plastični eksplozivi.

Granulirani eksplozivi sastoje se od zrna ili kristala određene granulacije. Zrnati granulirani eksploziv je ANFO eksploziv dok su kristalični granulirani eksplozivi obično u grupi monomolekularnih eksploziva kao što su oktogen, heksogen, pentrit. Veličina zrna granulata ili kristala ovisi o fizikalnim svojstvima eksploziva i tehnološkom postupku proizvodnje (Persson et al., 1994).

Kompaktni eksplozivi su čvrste konzistencije. Tehnološkim postupkom oblikuje se oblik potreban za primjenu, oblikuju se lijevanjem, a najčešći eksploziv koji se koristi je pentolit. Mljeveni eksplozivi se dobivaju usitnjavanjem ili granuliranih ili čvrstih eksploziva. Poznata je upotreba mljevenog amonijevog nitrata i mljevenog TNT. Emulzijski eksplozivi i gelovi kašaste su konzistencije i u svome sastavu sadrže vodu. Plastični eksplozivi u svome sastavu sadrže plastifikatore koji im daju konzistenciju podobnu za upotrebu.

2.1.4. Podjela eksploziva prema obliku

Osnovna podjela eksploziva prema obliku:

- tekući eksplozivi,
- eksplozivi u rasutom stanju i
- patronirani eksplozivi.

Tekući eksplozivi se u bušotinu upumpavaju s mobilnih postrojenja. Eksplozivi u rasutom stanju pakiraju se u vreće ili se usipavaju u bušotinu iz mobilnih spremnika. Patronirani eksplozivi pakiraju se u patrone koje su promjera od Ø 25 mm do Ø 90 mm i

duljine do 1 m, a ovisno o vrsti eksploziva i mjestu primjene ovitak patrona se izrađuje od parafinskog papira, plastičnih folija ili tvrde plastike.

2.1.5. Podjela eksploziva prema namjeni

Prema namjeni eksplozivi se dijele na:

- eksplozivi za vojne namjene,
- eksplozivi i pirotehničke smjese za gospodarske (civilne) namjene i
- pirotehničke smjese.

Primjena eksplozivnih tvari u nabrojene svrhe uvjetovana je njihovim karakteristikama koje uključuju i sigurnost, postojanost i cijenu koštanja (Persson et al., 1994).

2.1.6. Podjela eksploziva na primarne i sekundarne

Glavna osobina primarnih eksploziva je vrlo velika osjetljivost na trenje, udar i porast temperature. Pod djelovanjem određenih vanjskih impulsa detoniraju, pa se zbog toga rabe za inicijalno punjenje rudarskih kapica te električnih i neelektričnih detonatora (Ester, 2005). Glavni primarni eksplozivi su olovni azid, živin fulminat, srebrni azid, olovni stifnat. Najviše se koristi olovni azid upravo zbog sigurnosnih razloga(ostali su preosjetljivi na udar i trenje).

Sekundarni eksplozivi se djele na monomolekularne eksplozive i eksplozivne smjese. Monomolekularni eksplozivi su TNT, pentrit, heksogen, oktogen, nitroglicerin, nitroglikol. Jednomolekularni eksplozivi rabe se u gospodarstvu kao senzibilizatori pri proizvodnji smjesa: želatiniziranih praškastih i vodoplastičnih eksploziva, za glavno (brizantno) punjenje rudarskih kapica i detonatora, kao osnovno punjenje detonirajućih štapina i neelektričnih cjevčica neelektričnog sustava za iniciranje. Eksplozivne smjese su najčešći oblik korištenja eksploziva u gospodarstvu, a dijele se na one senzibilizirane nitroderivatima i one bez nitroderivata (80%). Praškaste, vodoplastične, gel i želatinozne

smjese su senzibilizirane nitroderivatima. Eksplozivne smjese senzibilizirane neeksplozivnim sastojcima su tipa ANFO i emulzijski eksplozivi.

3. DETONACIJSKE ZNAČAJKE EKSPLOZIVA

Detonacijske 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. Detonacijske značajke opisuju navedenu sposobnost pojedinih gospodarskih eksploziva (Persson et al., 1994).

U detonacijske značajke eksploziva spadaju:

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

3.1. GUSTOĆA

Gustoća je fizikalno svojstvo same 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 g/cm^3 do 1,60 g/cm^3 (Krsnik, 1989). Eksplozivi smanjene gustoće imaju gustoću manju od 0,80 g/cm^3, a eksplozivi kojima je gustoća manja od 0,20 g/cm^3 nazivaju se eksplozivi jako smanjene gustoće (Baranov et al., 1996).

Gustoća se određuje eksperimentalno prema zahtjevima norme *HRN EN 13631-13:2003: Eksplozivi za civilnu uporabu. Jaki eksplozivi. 14. dio: Određivanje gustoće (EN 13631-13:2003).*

3.2. BRZINA DETONACIJE

Brzina detonacije je brzina napredovanja detonacijskog udarnog vala od mjesta nastanka (iniciranja). Na brzinu detonacije utječu gustoća i promjer patrone eksploziva, vlaga i način iniciranja detonacije. Brzina detonacije za pojedinu eksplozivnu tvar ne ovisi o vanjskim čimbenicima (tlak temperatura, itd.). Brzina detonacije eksploziva ovisi o (Dobrilović, 2008):

- kemijskom sastavu eksplozivne tvari,
- gustoći i promjeru punjenja,
- snazi i brzini inicijalnog impulsa dovedenog eksplozivnoj tvari.

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

3.3. MOGUĆNOSTI INICIRANJA

Mogućnosti iniciranja ili potvrđivanje deklariranih sustava iniciranja se određuju prema zahtjevima norme HRN EN 13631-10: 2004: *Eksplozivi za civilnu uporabu. Jaki eksplozivi. 10. dio: Metoda za potvrđivanje načina iniciranja (EN 13631-10:2003).* Primjenjuje se za jake eksplozive, patronirane ili u rasutom stanju te izvan ili unutar zatvorenog prostora.

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

3.4. TEMPERATURA PALJENJA

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

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

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

Epruvete se uranjaju u posudu toliko da se površina eksploziva nalazi do 20 mm ispod nivoa rastopljene Woodove legure.

Posuda se zagrijava s porastom temperature od 5 °C u jednoj minuti sve do maksimalne temperature od 360 °C ili dok ne dođe do reakcije.

3.5. OSJETLJIVOST NA UDAR

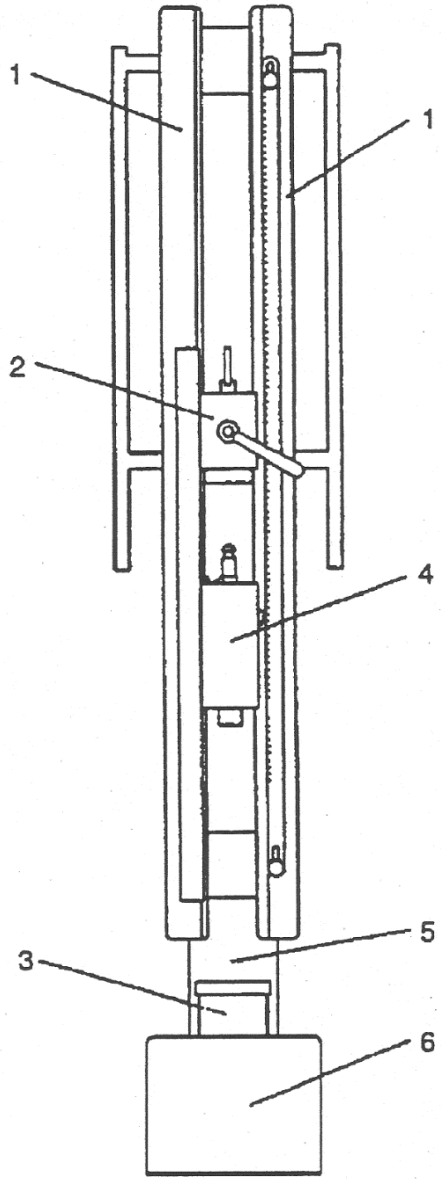
Određivanje osjetljivosti eksploziva na udar i udarne energije pri kojoj dolazi do reakcije važan je podatak pri transportu eksploziva i općenito pri izvođenju minerskih radova.

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“. Uređaj za ispitivanje eksploziva na udar je prikazan na slici 3-1.

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 (HRN EN 13631-4, 2004.).

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



Kazalo:

1 vodilice,

2 mehanizam za otpuštanje,

3 nakovanj,

4 uteg,

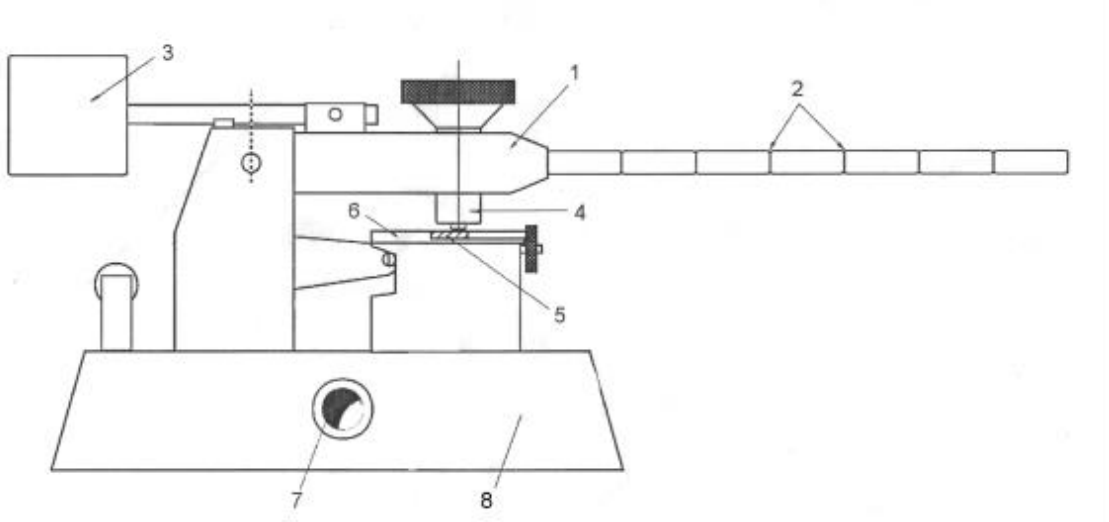
5 stupac i

6 čelični blok

Slika 3-1. Uređaj za ispitivanje eksploziva na udar (HRN EN 13631-4, 2004).

3.6. OSJETLJIVOST NA TRENJE

Osjetljivost eksploziva na trenje se određuje pomoću uređaja za ispitivanje eksploziva na trenje. Uređaj za ispitivanje eksploziva na trenje je prikazan na slici 3-2.



Kazalo:

1 poluga s nosačem keramičkog valjčića,
2 utor za postavljenje utega,
3 podesivi protuuteg,
4 držač keramičkog valjčića,
5 keramička pločica,
6 pomični držač keramičke pločice,
7 sklopka za uključivanje,
8 kućište.

Slika 3-2. Uređaj za ispitivanje eksploziva na trenje (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.

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

3.7. BRIZANTNOST I RADNA SPOSOBNOST

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):

$$W_{max} = \int c_v \mathrm{d}T \tag{3-1}$$

gdje je:

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

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

dT – promjena temperature (K).

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

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

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

smanjenja tlaka udarnog vala ispod tlačne čvrstoće stijene, on prelazi u elastični val koji napreduje dalje u sredinu. Budući da je stijenka bušotine prepreka udarnom valu ekspanzije nekoliko

Tlak na stijenku bušotine može se uz ograničenja približno opisati kao polovica tlaka detonacije što za idealno ponašanje plinova detonacije i potpuno ispunjenju bušotinu daje (Persson et al., 1994):

$$p_{\mathrm{d}} = \frac{\rho v_{\mathrm{d}}^2}{8} \tag{3-2}$$

gdje je:

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

v_{d} – brzina detonacije (m/s) i

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 njenoj gustoći.

Za eksperimentalno određivanje brizantnosti i radne sposobnosti eksploziva, osmišljeno je više različitih metoda. Kod svih metoda rezultati su izraženi kao relativno određene vrijednosti u odnosu na referentni eksploziv ili kao usporedba učinka više različitih eksploziva.

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,
- ljevkasti pokusi, itd.

4. RAČUNALNI PROGRAM EXPLO 5

Prva verzija računalnog programa EXPLO 5 je napravljena 1990. godine. Od tada se radi na programu da bi bio lakši za korištenje i da bi mu se povećale mogućnosti. Današnja verzija programa omogućava računanje parametara detonacije eksplozivnih materijala (brzina detonacije, energija, tlak i sl.), parametre izobarnog i izohornog izgaranja (Sućeska, 2008).

Izračun parametara detonacije u programu EXPLO 5 je temeljena na kemijskoj ravnoteži statičkog modela detonacije. Primjenom White, Johnson i Dantigove metode minimalizacije slobodne energije se izračunava ravnotežni sastav produkata detonacije i sagorijevanja. Sustav jednadžbe koji opisuje matematičko stanje ravnoteže je riješen primjenom modificirane Newton-Raphson metode (Sućeska, 2008).

Program koristi Becker-Kistiakowsky-Wilson-ovu jednadžbu stanja za plinovite produkte detonacije, a Cowan-Fickett-ova jednadžba stanja se koristi za čvrste produkte. Program je osmišljen je tako da omogućava izračun sastava produkata u kemijskoj ravnoteži i termodinamičkih parametara stanja uzduž udarne adijabate produkata detonacije, C-J stanja i detonacijske parametre C-J stanja, kao i parametre stanja uzduž izotrope ekspanzije produkata. Program sadrži potprogram nelinearnog podešavanja krivulje relativnih odnosa volumena i tlaka uzduž izotrope ekspanzije prema Jones-Wilkins-Lee-ovu modelu, što omogućava izračun energije detonacije raspoložive za mehanički rad (Sućeska, 2008).

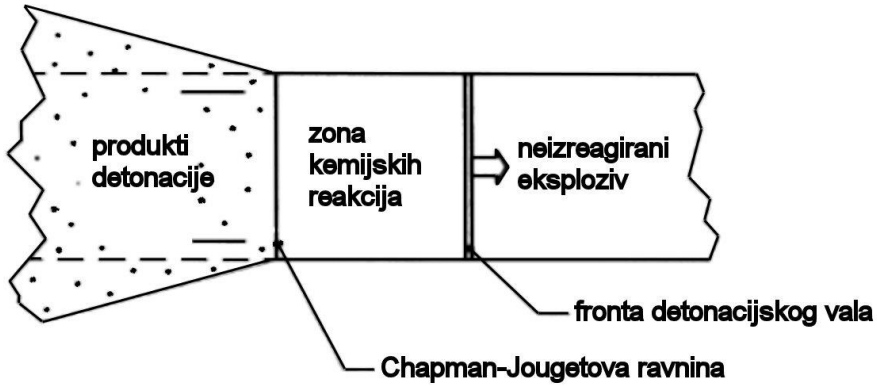
4.1. TEORIJSKE OSNOVE PROGRAMA EXPLO 5

Explo 5 omogućava izračun parametara detonacije eksploziva, kao i parametre izgaranja u izobarnim i izohornim uvjetima (Sućeska, 2008).

4.1.1. Detonacija

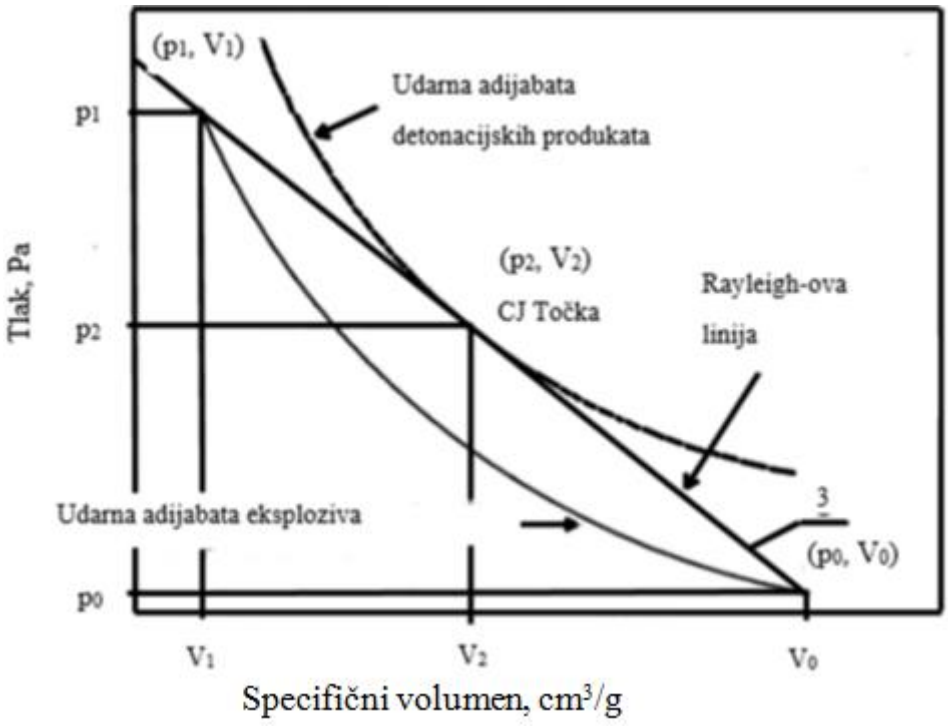
Detonacija je proces koji se odvija slojevito, ultrazvučnim širenjem kemijskih reakcija kroz eksploziv. Prema prihvaćenom Zeldovich-von Neumann-Doering (ZND) modelu detonacije, kemijske reakcije se odvijaju u određenoj zoni, tj. zoni kemijske reakcije, pod djelovanjem udarnog vala što je prikazano na slici 4-1. (Sućeska, 2008)

Pod utjecajem dinamičkog djelovanja udarnog vala, tanki sloj eksploziva je stlačen iz početnog specifičnog volumena V_0 (cm^3/g) ($V_0=1/\rho_0$-ρ_0 je početna gustoća eksploziva) u volumen V_1 (cm^3) u skladu sa udarnom (ili Hugoniotovom) adijabatom za određeni eksploziv što je prikazano na slici 4-2. Jednadžba definira odnos između gustoće (ili obujma) i tlaka tijekom udarne kompresije eksploziva. Kao posljedica udarnog vala dolazi komprimiranog eksploziva, gdje se inicira kemijska reakcija. Kada su kemijske reakcije pri kraju, volumen i tlak produkata reakcije dostižu vrijednost V_2 i p_2. Ovo stanje odgovara točci koja leži na udarnoj adijabati produkata detonacije. Od te točke produkti se šire izentropno (Taylorov val) u okolni medij. (Sućeska, 2008)



Slika 4-1. Shematski prikaz procesa detonacije (Sućeska, 2008).

Prema statičkom modelu detonacije, točke (V_0, ρ_0), (V_1, ρ_1) i (V_2, ρ_2) v, p leže na jednoj ravnoj liniji. Ta linija se zove Rayleigheva linija. Nagib Rayleigheove je određen brzinom detonacije određenog eksploziva. Prema Chapman i Jouguet hipotezi, Ryleigheova linija je tangenta udarne adijabate produkata detonacije u točci koja odgovara završetku kemijskihe reakcije. Ta točka se zove Chapman.Jouguet točka (C-J točka) (Sućeska, 2008).



Slika 4-2. Udarna adijabata eksploziva i produkata detonacije u slučaju stalnih detonacija (Sućeska, 2008)

Detonacijski proces može biti opisan matematički primjenom termodinamičkih i hidrodinamičkih zakona. Stanje i gibanje materije u detonacijskom valu može biti izraženo pomoću zakona o očuvanju mase, količine gibanja i energije. Ti zakoni mogu biti zapisani u obliku (Sućeska, 2008):

$$\rho_0 D = \rho(D - U_p) \tag{4-1}$$

$$p - p = \rho_0 D U_p \tag{4-2}$$

$$E - E_0 = (\tfrac{1}{2})(p + p_0)(V_0 - V) \tag{4-3}$$

gdje je:

D – brzina detonacije, (m/s),

U_p – brzina čestica, (cm/s),

E – unutarnja energija produkata detonacije, (kJ/kg),

v – specifični volumen (indeks "0" se odnosi na neizreagirani eksploziv).

Kombinirajući gornje jednadžbe i uzimajući u obzir jednadžbe iz Chapman-Jouguet-ove hipoteze dobiva se:

$$\gamma = -\left(\frac{\partial lnp}{\partial lnV}\right)_s = -\frac{V}{p}\left(\frac{\partial p}{\partial V}\right)_s = -\frac{V}{p}\left(\frac{p - p_0}{V - V_0}\right) \tag{4-4}$$

gdje je:

γ – politropni eksponent.

Iz jednadžbe 4-4 je moguće pronaći odnos između drugih detonacijskih parametara (Sućeska, 2008.).

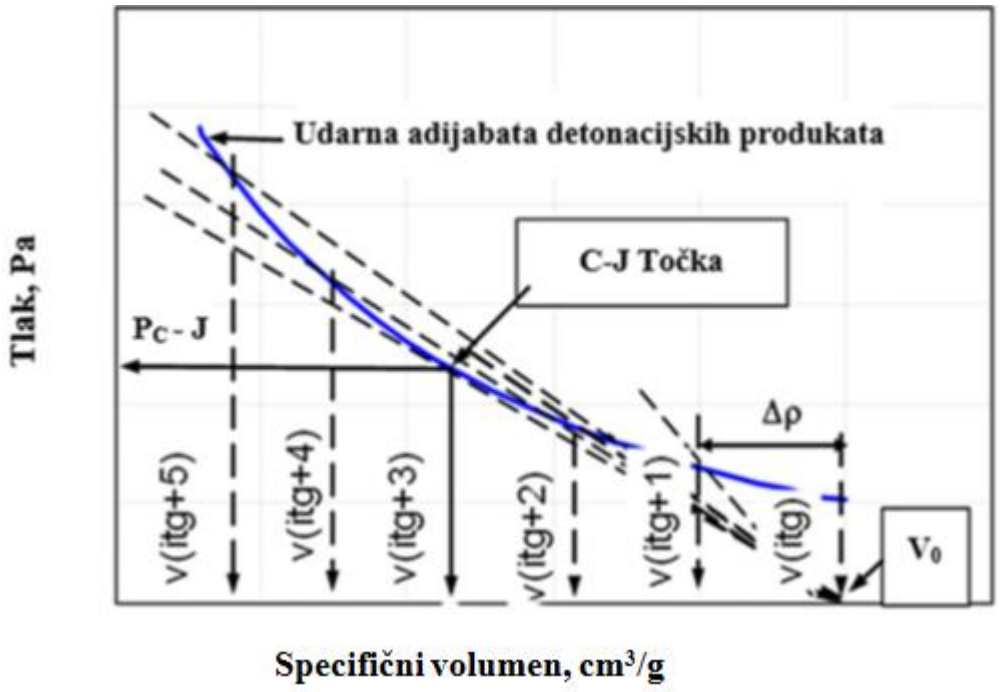
4.1.2. Opis modela detonacije koji se koristi u programu EXPLO 5

Računalni program EXPLO 5 se temelji na kemijskoj ravnoteži statičkog modela detonacije. Model se temelji na slijedećem (Sućeska, 2008):

- Stanje plinovitih plinova detonacije je opisano Becker-Kistiakowsky-Wilson-ovom (BKW EOS) jednadžbom stanja,
- Stanje čvrstog ugljika je opisano Cowan-Fickett-ova jednadžbom stanja,
- Termodinamičke funkcije plinovitih produkata (kao pravih plinova) su izvedene pomoću BKW EOS,
- Termodinamičke funkcije čvrstog ugljika su izvedene koristeći Cowan-Fickett EOS,
- Termodinamičke funkcije detonacije produkata u standardnom stanju su izračunati iz entalpije (koja je izražena u obliku polinom četvrtog stupnja kao funkcija temperature),
- Kemijska ravnoteža produkata detonacije je matematički izražena koristeći metodu minimiziranja slobodne energije razvijeno od White-Johnson-Dantzinga,
- Sustav jednadžbi koji opisuje kemijsku ravnotežu produkata detonacije je riješen primjenom modificirane Newton metode,
- C-J točka je određena kao točka na udarnoj adijabati produkata detonacije na kojoj brzina detonacije (*D*) ima svoju minimalnu vrijednost (4-5) (Sućeska, 2008):

$$D = V_0\sqrt{\frac{p-p_0}{V_0-V}} \qquad (4\text{-}5)$$

C-J točka se može odrediti pronalaženjem minimuma funkcije ili tako da se odabere vrijednost maksimalnog tlaka na udarnoj adijabati i pomoću gustoće povećati korak/omjer te zatim pronaći minimum funkcije (Slika 4-3).



Slika 4-3. Određivanje C-J točke na udarnoj adijabati produkata detonacije (Sućeska, 2008).

4.1.3. Izračun ravnotežnog sastava produkata detonacije

Transformacija CHNO eksploziva u detonaciji produkata može biti izražena slijedećom formulom:

$$C_cH_hN_nO_o \rightarrow n_1H_2O + n_2H_2 + N_3O_2 + n_4CO_2 + n_5CO + n_6CH_4 + n_7NH_3 + n_8N_2 + n_9NO + n_{10}C + \cdots \quad (4\text{-}6)$$

gdje su:

n_1- n_n mol iznosi za *r* ili zasebni produkti.

Prvi korak u izračunu parametara detonacije je određivanje ravnotežnog sastava produkata detonacije za dane *p, V, T* uvjete, tj. određivanje molova pojedinih produkata (n_1) (Sućeska, 2008).

Jednadžba stanja produkata detonacije je matematički opisana primjenom metode minimiziranja slobodne energije. Metoda je izvorno razvijena od strane White, Johnson i Dantzing, a kasnije je C.Mader prilagodio za kompjuterskoj primjeni. Metoda se temelji na činjenici da je u kemijskoj ravnoteži kemijski potencijal produkata reakcije jednak kemijskom potencijalu reaktanata, na činjenici da u ravnotežnom stanju slobodne energije produkata ima svoju minimalnu vrijednost (Sućeska, 2008).

Gibbs-ova slobodna energija (G) smjese se sastoji od N različitih kemijskih vrsta i n1 molova od i-te komponente, može biti izraženo kao suma kemijskih potencijala individualnih komponenti (μ_i):

$$G = \sum_{i=1}^{N} n_{i\mu_i} \quad (4\text{-}7)$$

4.1.4. Izračun tlaka

Tlak uzduž udarne adijabate produkata detonacije se izračunava primjenom Becker-Kistiakowsky-Wilson EOS za plinovite produkte, a Coean i Fickett EOS se koristi za čvrste ugljene.

BKW jednadžba stanja se primjenjuje u obliku (Sućeska, 2008):

$$\frac{pV}{RT} = 1 + xe^{\beta x} = f(x) \quad (4\text{-}8)$$

gdje je:

V – volumen koji zauzimaju plinoviti produkti (molarni volumen plinova), (cm^3)

$$x = \frac{K}{[V(T+\theta)^{\alpha}]} \quad (4\text{-}9)$$

gdje je:

k_i – kovolumen i-tih produkata detonacije

$$K = \kappa \sum_{i=1}^{N} x_i k_i, \quad (4\text{-}10)$$

$x_i = n_i / n_T$, (mol frakcija i-tog produkta detonacije),

$\alpha, \beta, \kappa, \theta$- konstante

EXPLO 5 omogućuje korištenje različitih vrijednosti konstanti u BKW EOS (Tablica 5-1).

Tablica 5-1. Vrijednosti konstanti i kovolumena u BKW jednadžbi stanja (Sućeska, 2008)

Tip konstante	β	κ	α	θ	Koovolumen (A^3*10,46)									
					H_2O	H_2	O_2	CO_2	CO	NH_3	CH_4	NO	N_2	Al_2O
RDX	0,160	10,91	1	400	250	180	350	600	390	476	528	386	380	1300
TNT	0,1	12,68	1	400										
BKWR	0,18	11,80	1	1850										
BKWN	0,18	14,71	1	6620										

Da bi se dobio volumen plinovitih produkata detonacije, ukupni volumen svih produkata detonacije mora biti popravljen volumenom stlačenog čvrstog ugljena (i drugih čvrstih produkata, ako su prisutni). (Sućeska, 2008)

Volumen čvrstog ugljena za dano *p, V, T* stanje je izračunato prema Cowan i Fickett EOS (Sućeska, 2008.):

$$p = p_1(V) + \alpha(V)T + b(V)T^2 \tag{4-11}$$

Ili Murnaghan EOS:

$$V = V_0\{\eta\kappa_0 p + exp[-\alpha(T - T_0)]\}\eta^{-1/\eta} \tag{4-12}$$

gdje je:

V_0 – molarni volumen produkta kad je p=0 i T=T_0 (T_0 se obično uzima 298.15 K)

α – volumetrijski koeficijent toplinske ekspanzije

κ – obrnuto od glavnog modula

η – derivacija od $[dB(p,T)/dp]$

4.1.5. Izračun temperature produkata detonacije uzduž udarne adijabate

Temperatura produkata detonacije za dano *p, V, T* stanje na udarnoj adijabati se računa pomoću iterativnog procesa u skladu sa jednadžbom udarne adijabate (ili Hugoniot jednadžbe) u obliku (Sućeska, 2008):

$$E - E_0 - Q_v - \left(\frac{1}{2}\right)(p + p_0)(V_0 - V) < EPS \tag{4-13}$$

gdje je:

EPS – odabrana točnost,

E – unutarnja energija produkata detonacije za dano *p, V, T* stanje na udarnoj adijabati

E_0- unutarnja energija produkata detonacije za p_0, V_o stanje

Q_v- toplina reakcije pod konstantnim volumnim uvjetima

4.1.6. Određivanje C-J točke i izračun parametara detonacije

C-J točka se određuje na udarnoj adijabati produkata detonacije kao točka pri kojoj se brzina detonacije određuje prema formuli:

$$D = {}^{V_0}\sqrt{\frac{p-p_0}{V_0-V}} \tag{4-14}$$

ima svoj minimum (V_0 = 1/ ρ_0 – specifični volumen eksploziva, ρ_0 – ambijentni tlak, p i V su vrijednosti tlaka i specifičnog volumena na udarnoj adijabati).

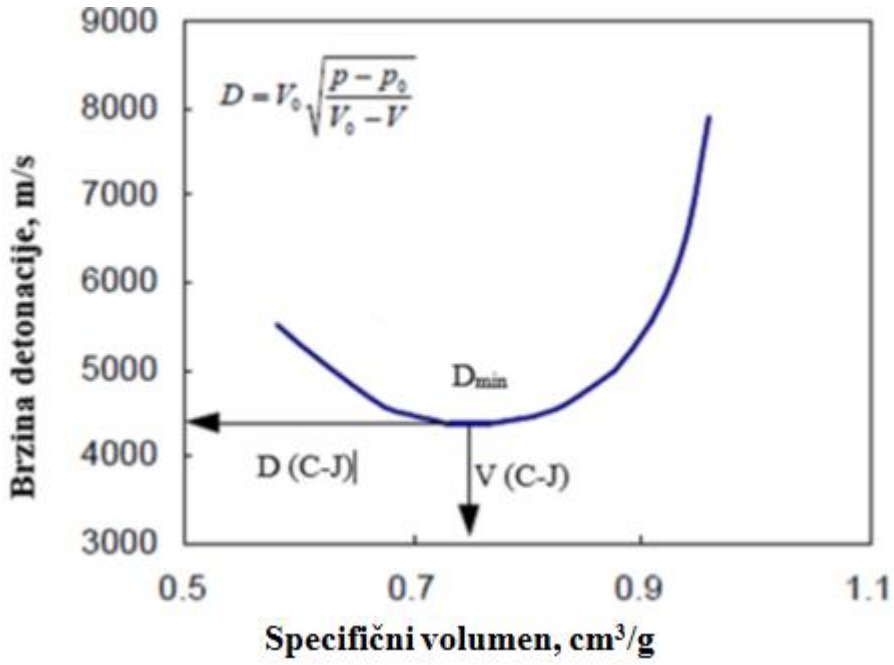
Ostali parametri detonacije u C – J točki su izračunati primjenom slijedeće jednadžbe:

- brzina čestice (U_p):

$$U_p = \sqrt{(p-p_0)(V_0-V)} \tag{4-15}$$

- politropni eksponent(γ):

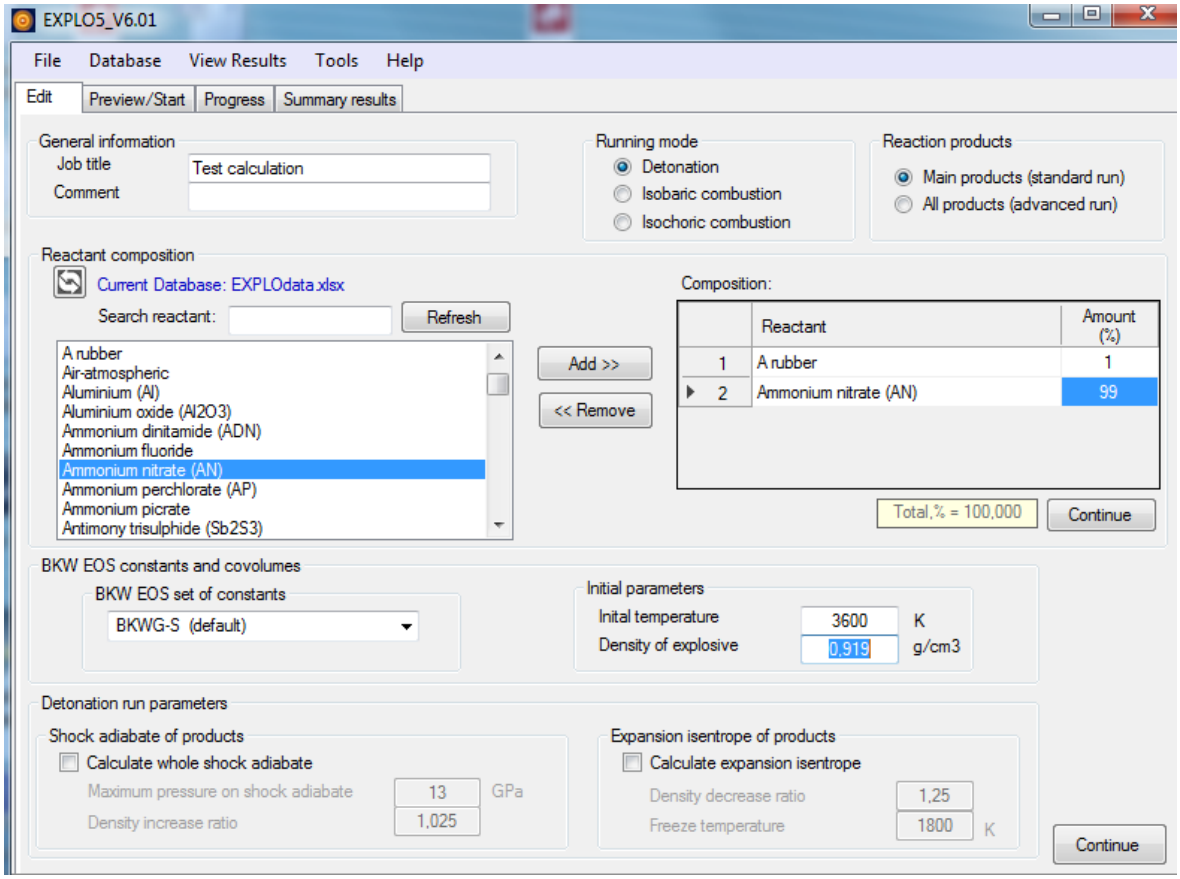
$$\gamma = \frac{\rho_0 D^2}{p}\text{-}1 \tag{4-16}$$



Slika 4-4. Promjena brzine detonacije pri specifičnom volumenu produkata detonacije (Sućeska, 2008)

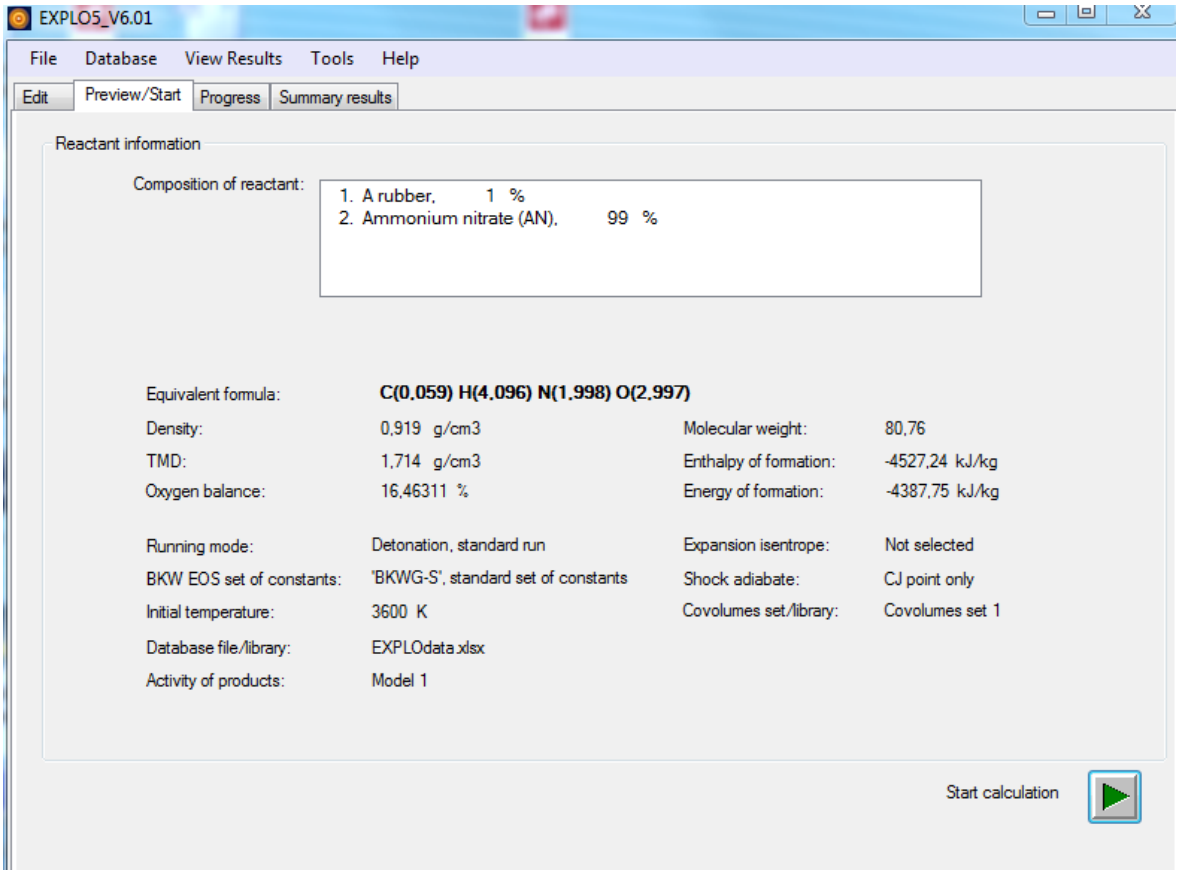
5. PRINCIP KORIŠTENJA EXPLO 5 PROGRAMA I PRIMJERI IZRAČUNA DETONACIJSKIH PARAMETARA

Explo 5 je program koji je veoma jednostavan za uporabu. U program se unose eksplozivne tvari (reaktanti) u određenim postocima i sa zadanom gustoćom, zatim se odabere model proračuna koji je u ovom slučaj detonacijski model kojim će se odredit glavni produkti detonacije i parametri udarne adijabate i stanje u CJ točki (Slika 5-1).



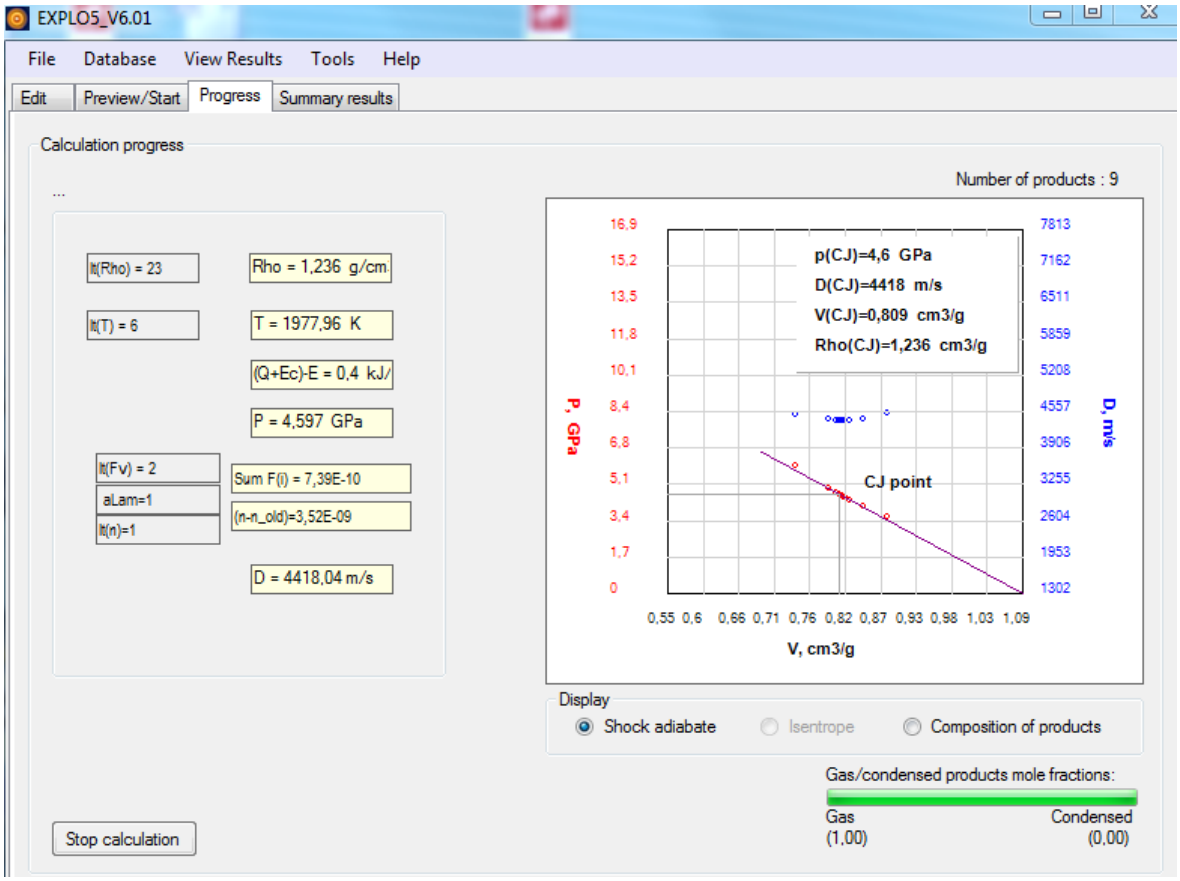
Slika 5-1. Odabir parametara

Nakon odabira svih parametara programa u slijedećem koraku se prikazuju podaci za odabranu eksplozivnu tvar, što se može vidjet na slici 5-2.



Slika 5-2. Podaci prije proračuna

Neki od podataka su gustoća, početna temperatura, energija i entalpija formacije, molekularna težina, i dr. Te se nakon odabira svih parametara pokreče izračun i dobivaju se parametri: detonacijska brzina (*D*), tlak detonacije (*p*), volumen plinova (*V*) i gustoća plinovitih plinova (*Rho*) za jednu od eksplozivnih smjesa, a u ovom slučaju je to primjer amonijeva nitrata (AN) i gume što je vidljivo na slici 5-3.



Slika 5-3. Vrijednosti proračunatih parametara

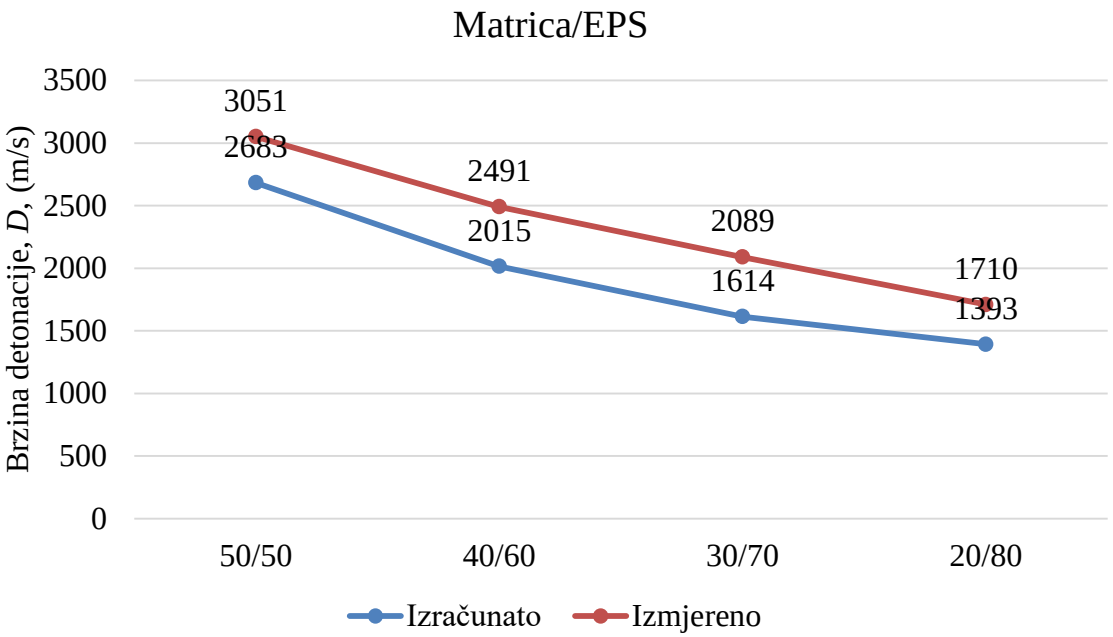
5.1. PRIMJERI IZRAČUNA DETONACIJSKIH PARAMETARA

Primjeri eksplozivnih tvari sa zadanim gustoćama i u određenim omjerima sa dobivenim parametrima su prikazani u tablici 5-2. Eksplozivne tvari koje su korištene za izračun parametara su: matrica, mikrokuglice, polistiren (EPS), amonijev nitrat (AN) i guma. Sastav matrice je 25,5 % dušika i 74,5 % parafina. Amonijev nitrat je osnovna sirovina za proizvodnju ANFO eksploziva. U tablici 5-2 nisu prikazani izračunati podaci za eksplozivne smjese kod kojih je korištena guma iz razloga što ih nije bilo moguće usporediti s mjerenim podacima koji u trenutku proračuna nisu bili dostupni.

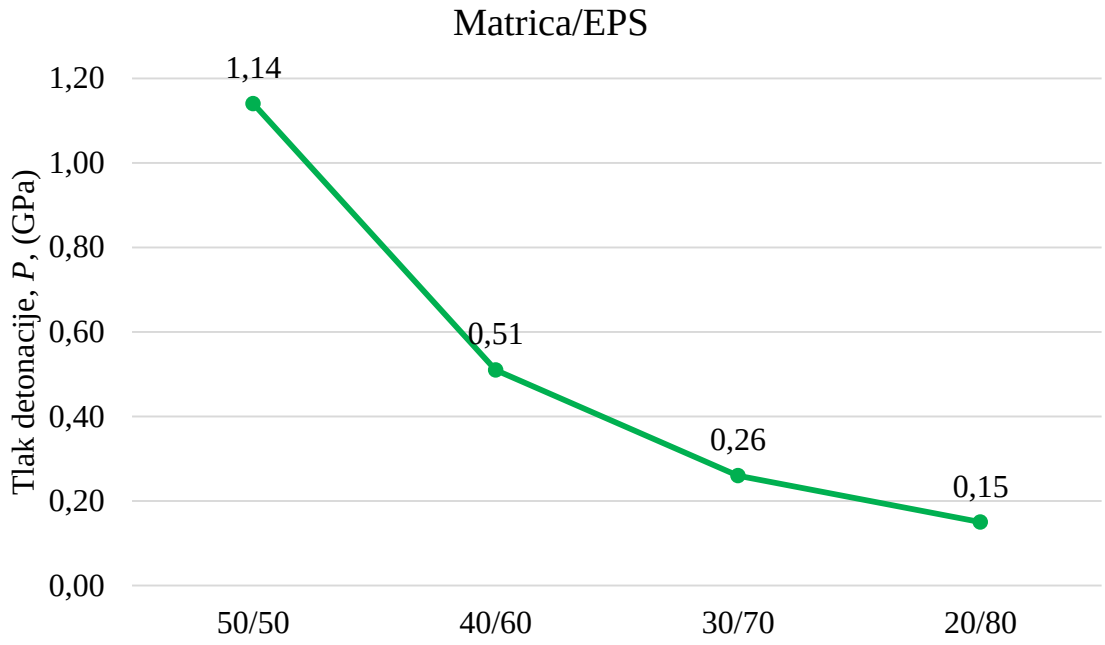
Tablica 5-2. Prikaz izračunatih parametara za odabrane smjese eksplozivnih tvari u određenim omjerima

Redni broj	Vrsta eksplozivne tvari	Omjer	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm^3)	Izračunata brzina detonacije, D (m/s)	Izmjerena brzina detonacije, D (m/s)	Izračunati tlak detonacije, P (GPa)	Specifični volumen plinova, v (cm^3/g)
1	Matrica / Mikrokuglice	100/0	1,175	4474	5534	4,11	0,703
2	Matrica / EPS	50/50	0,627	2683	3051	1,14	1,193
3	Matrica / EPS	40/60	0,437	2015	2491	0,51	1,631
4	Matrica / EPS	30/70	0,302	1614	2089	0,26	2,225
5	Matrica / EPS	20/80	0,218	1393	1710	0,15	2,935
6	AN14 / Matrica	90/10	0,846	4931	1572	5,59	0,861
7	(AN14/Matrica) / EPS	90/10	0,801	4594	2031	5,59	0,909
8	(AN14/Matrica) / EPS	80/20	0,714	4063	1819	3,32	1,007
9	(AN14/Matrica) / EPS	70/30	0,628	3568	1629	2,29	1,135
10	(AN14/Matrica) / EPS	60/40	0,541	3100	1584	1,55	1,296
11	(AN14/Matrica) / EPS	50/50	0,454	2662	1474	1,00	1,521
12	(AN14/Matrica) / EPS	40/60	0,367	2252	1340	0,61	1,838
13	(AN14/Matrica) / EPS	30/70	0,280	1877	815	0,34	2,337
14	(AN14/Matrica) / EPS	20/80	0,193	1542	528	0,18	3,164

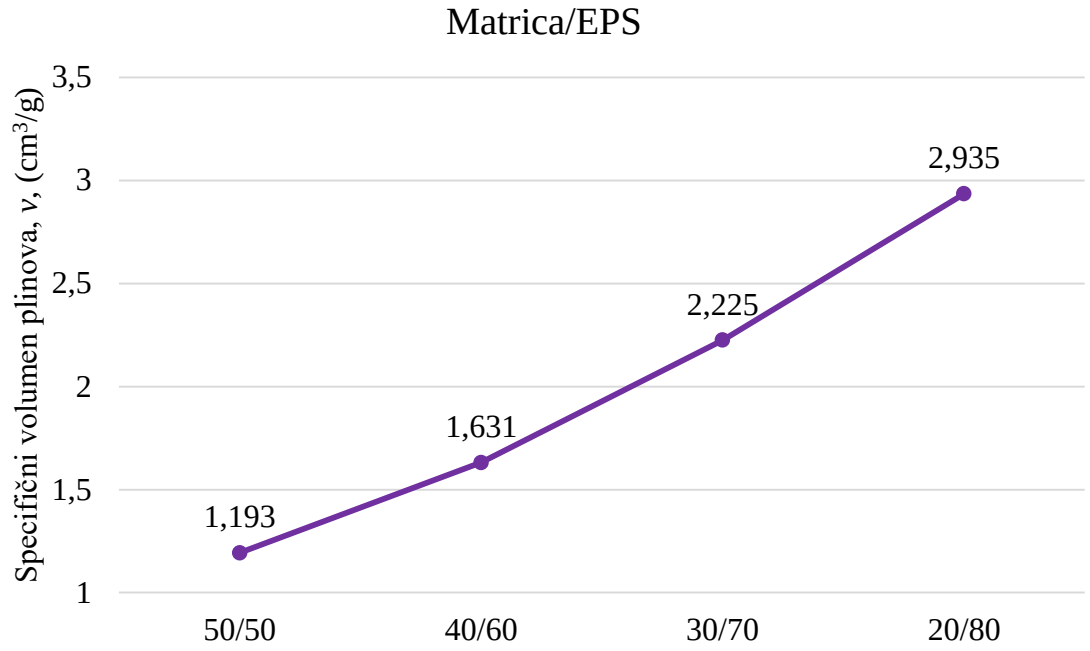
Na temelju dobivenih rezultata (tablica 5-2) parametara detonacije na slikama od 5-5 do 5-11 će biti prikazani dijagrami brzine detonacije, tlaka detonacije i specifičnih volumena plinova za pojedine smjese eksplozivnih tvari.



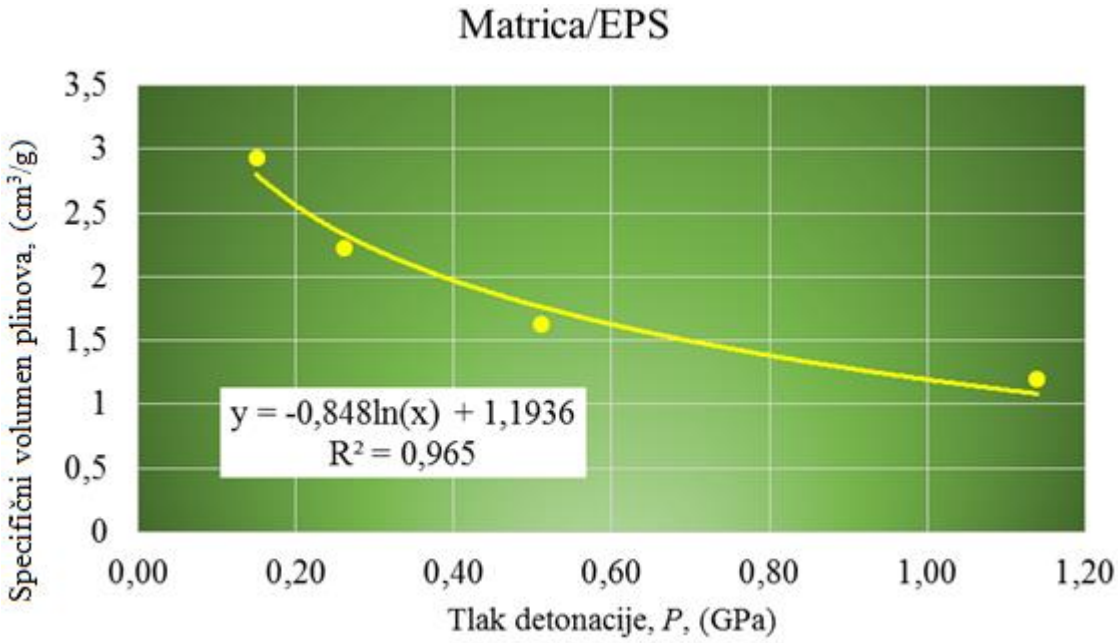
Slika 5-4. Usporedba izmjerenih i proračunatih brzina detonacije za eksplozivnu smjesu Matrica/EPS.



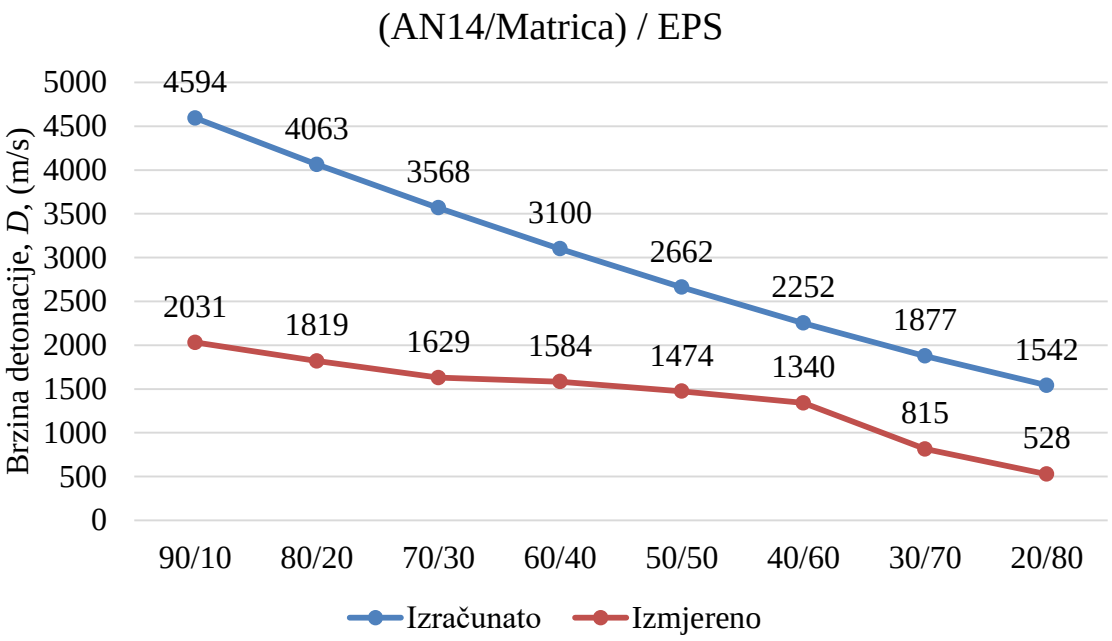
Slika 5-5. Prikaz izračunatih tlakova za pojedine omjere eksplozivnih smjesa Matrica/EPS.



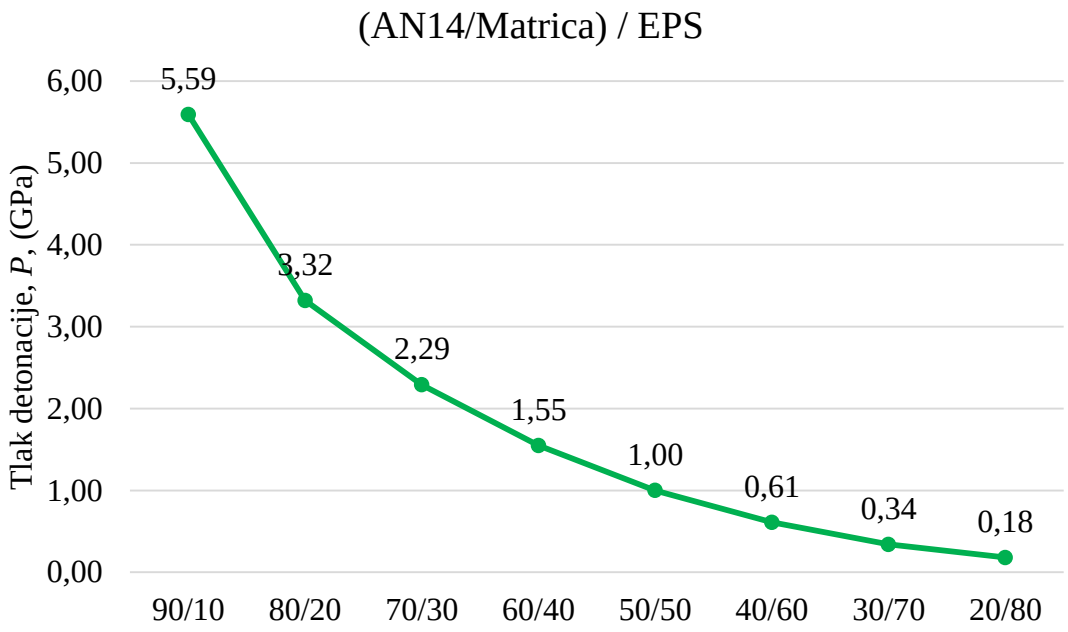
Slika 5-6. Prikaz izračunatih specifičnih volumena plinova za pojedine omjere eksplozivnih smjesa Matrica/EPS.



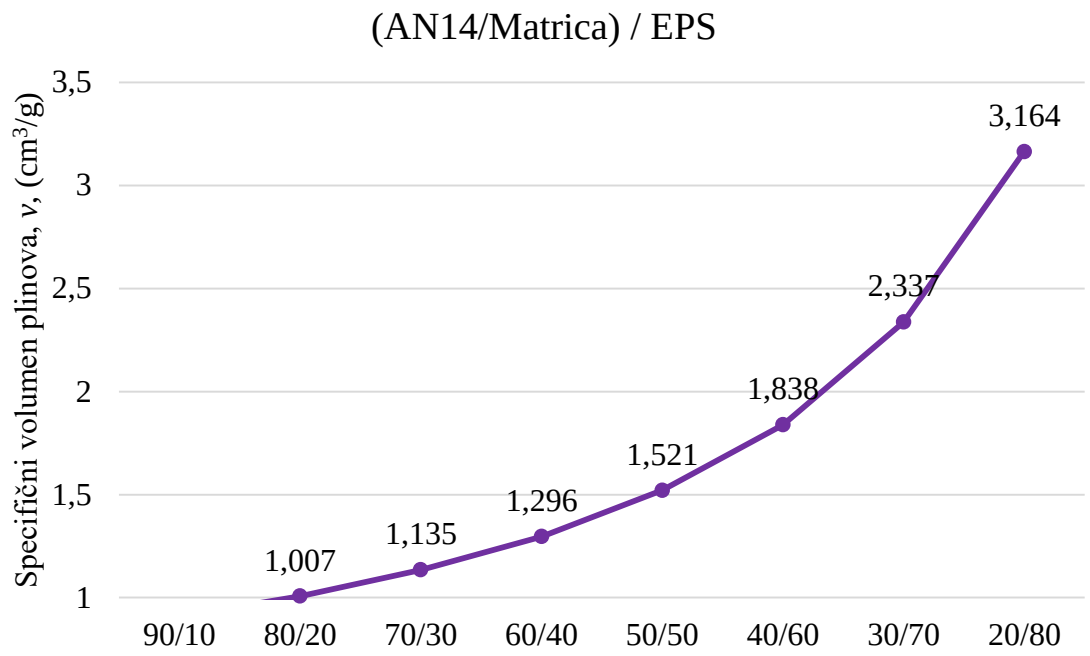
Slika 5-7. Zavisnost specifičnog volumena plinova od tlaka detonacije eksplozivnih smjesa Matrica/EPS.



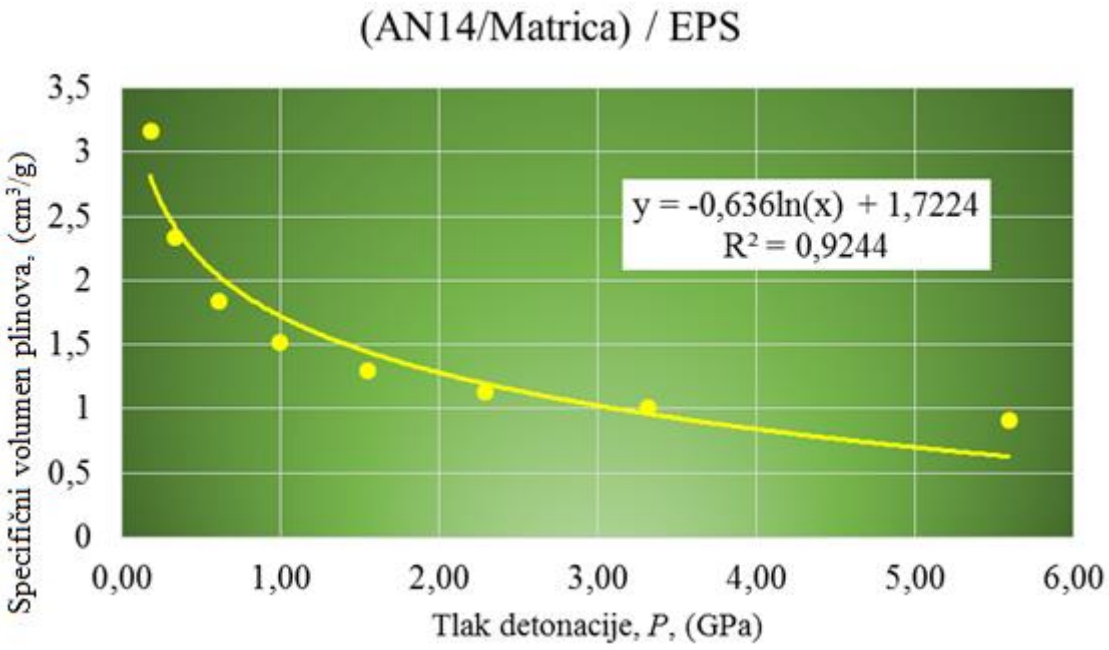
Slika 5-8. Usporedba izmjerenih i proračunatih brzina detonacije za eksplozivnu smjesu (AN14/Matrica)/EPS.



Slika 5-9. Prikaz izračunatih tlakova za pojedine omjere eksplozivnih smjesa (AN14/Matrica)/EPS.



Slika 5-10. Prikaz izračunatih specifičnih volumena plinova za pojedine omjere eksplozivnih smjesa (AN14/Matrica)/EPS.



Slika 5-11. Zavisnost specifičnog volumena plinova od tlaka detonacije eksplozivnih smjesa (AN14/Matrica)/EPS.

5.2. ANALIZA IZRAČUNA DETONACIJSKIH PARAMETARA

Za rezultate proračuna napravljena je usporedba s mjerenjima brzine detonacije za sve eksplozivne mješavine (slike 5-4 i 5-8).

Iz tablice 5-2 i sa slike 5-4 za mješavinu emulzijske matrice i ekspandiranog polistirena (EPS-a) vidljivo je da je izmjerena brzina detonacije nešto veća, prosječno oko 400 m/s, u odnosu na proračunatu. S obzirom da EPS ima i ulogu senzibilizatora u obliku toplih točaka i da se, s obzirom da je po kemijskom sastavu ugljikovodik, ponaša kao gorivo veća izmjerena brzina detonacije od proračunate je očekivana.

Iz tablice 5-2 i sa slike 5-8 za mješavinu ANFO-eksploziva s dodatkom emulzijske matrice i ekspandiranog polistirena (EPS-a) vidljivo je da izmjerena brzina detonacije dosta odstupa od proračunate, manja je za iznose u rasponu od 1000 m/s do 2500 m/s. To se može objasniti neidealnom detonacijom koja je karakteristična za ANFO-eksploziv, a proračun u programu EKPLO5 daje vrijednosti proračuna za idealnu detonaciju.

Iz tablice 5-2 i sa slika 5-5 i 5-6 je vidljivo da s većim udjelom EPS-a u smjesama s emulzijskom matricom dolazi do sniženja tlaka detonacije i do povećanja specifičnog volumena plinova. Napravljena je regresijska analiza tlaka detonacije pojedinih eksplozivnih smjesa s specifičnim volumenom plinova. Za regresijsku analizu korištena je logaritamska regresija (slika 5-7) uz koeficijent determinacije R^2 koji iznosi 0,965 odnosno 96,5 %. Iz dijagrama na slici 5-7 je vidljivo da se zavisnost tlaka detonacije od specifičnog volumena plinova za pojedine eksplozivne smjese na bazi emulzijske matrice i EPS-a može izračunati prema izrazu 5-1 uz koeficijent determinacije R^2 = 0,965 odnosno 96,5 %:

$$v = -841 \ln P + 1{,}1936 \qquad (5\text{-}1)$$

gdje je:

v – specifični volumen plinova (cm^3/g) i

P – tlak detonacije (Pa).

Iz tablice 5-2 i sa slika 5-9 i 5-10 je vidljivo da s većim udjelom EPS-a u smjesama s ANFO-eksplozivom s dodatkom emulzijske matrice dolazi do sniženja tlaka detonacije i do povećanja specifičnog volumena plinova. Napravljena je regresijska analiza tlaka detonacije pojedinih eksplozivnih smjesa s specifičnim volumenom plinova. Za regresijsku

analizu korištena je logaritamska regresija (slika 5-11) uz koeficijent determinacije R^2 koji iznosi 0,9244 odnosno 92,44 %. Iz dijagrama na slici 5-11 je vidljivo da se zavisnost tlaka detonacije od specifičnog volumena plinova za pojedine eksplozivne smjese na bazi ANFO-eksploziva uz dodatak emulzijske matrice i EPS-a može izračunati prema izrazu 5-2 uz koeficijent determinacije R^2 = 0,9244 odnosno 92,44 %:

$$v = -0{,}636 \ln P + 1{,}7224 \qquad (5\text{-}2)$$

6. ZAKLJUČAK

Za rezultate proračuna napravljena je usporedba s mjerenjima brzine detonacije za sve eksplozivne mješavine.

Mješavinu emulzijske matrice i ekspandiranog polistirena (EPS-a) ima izmjerenu brzinu detonacije nešto veću, prosječno oko 400 m/s, u odnosu na proračunatu. S obzirom da EPS ima i ulogu senzibilizatora u obliku toplih točaka i da se, s obzirom da je po kemijskom sastavu ugljikovodik, ponaša kao gorivo veća izmjerena brzina detonacije od proračunate je očekivana.

Mješavina ANFO-eksploziva s dodatkom emulzijske matrice i ekspandiranog polistirena (EPS-a) ima izmjerenu brzinu detonacije koja dosta odstupa od proračunate, manja je za iznose u rasponu od 1000 m/s do 2500 m/s. To se može objasniti neidealnom detonacijom koja je karakteristična za ANFO-eksploziv, a proračun u programu EKPLO 5 daje vrijednosti proračuna za idealnu detonaciju.

Veći udio EPS-a u smjesama s emulzijskom matricom doprinosi sniženju tlaka detonacije i povećanju specifičnog volumena plinova.

Veći udio EPS-a u smjesama s ANFO-eksplozivom s dodatkom emulzijske matrice doprinosi sniženju tlaka detonacije i povećanju specifičnog volumena plinova.

7. LITERATURA

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

BOHANEK, V. 2013. *Model nastajanja i analiza djelovanja kumulativnog procesa linearnih eksplozivnih naboja*. Doktorska disertacija. Zagreb: Rudarsko–geološko–naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu.

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.

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

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

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

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

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

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

PERSSON, P.A., HOLMBERG. R., LEE, J., (1994): *Rock blasting and explosives engineering,* Boca Raton, London, New York, Washington D.C.: CRC Press.

SUĆESKA, M. (1995): *Test methods for explosives*, New York: Springer – Verlag.

SUĆESKA, M., EXPLO 5 Version 5.03/2008. USER'S GUIDE

UN, 1995.: Recommendations on the TRANSPORT OF DANGEROUS GOODS Manual of tests and criteria. New York and Geneva: United Nations Publications.