

Brzina detonacije ANFO eksploziva

Pinter, Jurica

Master's thesis / Diplomski rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:419197>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-24**



Repository / Repozitorij:

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



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

BRZINA DETONACIJE ANFO EKSPLOZIVA

Diplomski rad

Jurica Pinter

R131

Zagreb, 2019.

BRZINE DETONACIJE ANFO EKSPLOZIVA

JURICA PINTER

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

Sažetak

ANFO eksplozivi se zbog svojih zadovoljavajućih minersko tehničkih i detonacijskih svojstava te relativno niske cijene najviše koriste za gospodarska miniranja u rudarstvu i graditeljstvu. Uz ekonomski čimbenik, sigurnost prilikom miniranja, jednostavnost proizvodnje na mjestu upotrebe i mogućnosti mehaniziranog punjenja bušotina dodatni su razlozi učestalosti upotrebe. Premda su minerska svojstva ANFO eksploziva dobro poznata, često se prilikom izvođenja miniranja ne vodi računa o uvjetima postizanja optimalnih detonacijskih parametara.

U radu su sistematizirani čimbenici koji utječu na brzinu detonacije ANFO (ANFO i Heavy ANFO) eksploziva te se daje pregled istraživanja u području ANFO eksploziva izvedenih posljednjih godina. Pored empirijskih podataka u radu se koriste i podaci dobiveni računalnim modeliranjem

Ključne riječi: Brzina detonacije, obloga, promjer, temperatura, modeliranje detonacije

Završni rad sadrži: 40 stranica, 17 tablica, 29 slika, 0 priloga, i 15 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski/Engleski

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

Mentori: Dr.sc. Vječislav Bohanek, docent
Dr. sc. Ime Prezime, izvanredni profesor RGNF

Pomagao pri izradi: Dr. sc. Ime Prezime, docent RGNF
Ime Prezime, asistent RGNF

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

VELOCITY OF DETONATION OF ANFO EXPLOSIVES
JURICA PINTER

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

Abstract

ANFO explosives are most commonly used explosives in mining and civil engineering due to their satisfactory technical and detonation properties as well as for their low price. Along with their low price, they are safe to use, they can be easily produced on site, also possibility of mechanized charging of boreholes are all reasons for their common usage. Though blasting properties of ANFO explosives are well known, often at blasting sites achieving of optimal detonation parameters is not taken into account.

In this paper factors which affect velocity of detonation of ANFO (ANFO and Heavy ANFO) explosives are systematized. Also it gives overview of research on ANFO explosives in recent years. Along with empirical data paper uses data obtained with detonation modelling.

Keywords: Velocity of detonation, confinement, diameter, temperature, detonation modeling

Thesis contains: 40 pages, 17 tables, 33 figures, 0 appendixes, 22 references.

Original in: Croatian/English

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

Supervisors: Vječislav Bohanek, PhD
Associate Professor Name Surname, PhD

Tech. assistance: Senior Assistant Name Surname, PhD
Assistant Name Surname

Reviewers: Vječislav Bohanek, PhD
Mario Dobrilović, PhD
Vinko Škrlec, PhD

SADRŽAJ

| | |
|---|----|
| 1. UVOD | 1 |
| 2. EKSPLOZIVI, EKSPLOZIJA, DETONACIJA I BRZINA DETONACIJE | 2 |
| 2.1. Eksplozivi i eksplozija | 2 |
| 2.2. Detonacija i brzina detonacije | 4 |
| 3. ANFO I <i>HEAVY</i> ANFO EKSPLOZIVI | 7 |
| 4. ČIBENICI KOJI UTJEČU NA BRZINU DETONACIJE ANFO I <i>HEAVY</i> ANFO EKSPLOZIVA..... | 9 |
| 4.1. Dimenzije i proroznost amonijeva nitrata te sadržaj nafte | 9 |
| 4.2. Promjer i oblik poprečnog presjeka..... | 11 |
| 4.3. Način iniciranja | 21 |
| 4.4. Temperatura | 29 |
| 4.5. Obloga..... | 34 |
| 5. ZAKLJUČAK..... | 39 |
| 6. LITERATURA | 41 |

POPIS SLIKA

| | |
|--|----|
| Slika 2- 1. Eksplozija (Dobrilović, 2010) | 3 |
| Slika 2- 2. Proces sagorijevanja u eksplozivnoj tvari (Dobrilović, 2010) | 4 |
| Slika 2- 3. Detonacijski proces u patroni eksploziva (Dobrilović, 2010)..... | 5 |
| Slika 2- 4. Raspored tlakova prilikom detonacije u eksplozivu (Dobrilović, 2010) | 5 |
| Slika 2- 5. Ne-idealna dvodimenzionalna detonacija (Byers Brown, 2002) | 6 |
| | |
| Slika 3- 1. Shematski prikaz proizvodnje ANFO eksploziva (Bohanek, 2016) | 7 |
| | |
| Slika 4- 1. Poprečni presjek neporozne kuglice amonijevog nitrata, korištene u poljoprivredi (lijevo) i porozne kuglice nakon apsorpcije nafte $15 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$ u nekoliko termalnih ciklusa (desno) (Zygmunt i Buczkowski, 2007) | 9 |
| Slika 4- 2. Utjecaj dimenzija granula ispitan je na granulama dimenzija manjim od 0,50 mm do 1,2 mm (Zygmunt i Buczkowski, 2007)..... | 10 |
| Slika 4- 3. Ovisnost brzine detonacije ANFO-a o apsorbiranoj nafti | 11 |
| Slika 4- 4. Utjecaj promjera na proračunatu brzinu detonacije | 12 |
| Slika 4- 5. Odnos gustoće eksploziva i brzine detonacije za Blend 1 (Esen,2004)..... | 15 |
| Slika 4- 6. Odnos promjera naboja i brzine detonacije za Blend 2 (Esen, 2004) | 16 |
| Slika 4- 7. Odnos promjera naboja i brzine detonacije za Blend 3 (Esen,2004)..... | 17 |
| Slika 4- 8. Odnos gustoće i brzine detonacije za Heavy ANFO 1 (Esen, 2004)..... | 18 |
| Slika 4- 9. Odnos promjera naboja i brzine detonacije za ANFO 1 (Esen, 2004)..... | 19 |
| Slika 4- 10. Odnos promjera naboja i brzine detonacije za ANFO 2 (Esen, 2004)..... | 20 |
| Slika 4- 11. Usporedba odnosa poprečnih presjeka naboja i brzine detonacije za tri primjera naboja (Hurley, 2013) | 20 |
| Slika 4- 12. Utjecaj energije inicijalnog sredstva na brzinu detonacije ANFO eksploziva . | 21 |
| Slika 4- 13. Shematski prikaz postave mjerenja (Bohanek i dr.,201)..... | 22 |
| Slika 4- 14. Brzina detonacije u pojedinim sekcijama mjerenja za uzroke inicirane detonatorima (Bohanek i dr.,2013) | 24 |
| Slika 4- 15. Brzina detonacije u pojedinim sekcijama mjerenja za uzroke inicirane boosterima (Bohanek i dr.,2013) | 24 |
| Slika 4- 16. Shematski prikaz minske bušotine sa mjernim sustavom (Žganec i dr,2016) . | 26 |
| Slika 4- 17. Analiza izmjerenih brzina detonacije u odnosu na brzinu detonacije inicijalnih sredstava (Žganec i dr,2016) | 29 |

| | |
|---|----|
| Slika 4- 18. Shema mjerenja brzine detonacije u čeličnoj cijevi promjera \varnothing 52 mm (Dobrilović i dr., 2014) | 30 |
| Slika 4- 19. Shema mjerenja brzine detonacije u čeličnoj cijevi promjera \varnothing 23,5 mm (Dobrilović i dr., 2014) | 30 |
| Slika 4- 20. Ispitane brzine detonacije u ovisnosti o temperaturi (Dobrilović i dr., 2014).. | 34 |
| Slika 4- 21. Utjecaj debljine Al obloge na brzinu detonacije | 36 |
| Slika 4- 22. Izmjerene i predviđene brzine detonacije prema jednadžbi 3.3. (Esen, 2004).. | 37 |
| Slika 4- 23. Predviđen utjecaj obloge i promjera minske bušotine na performansu eksploziva Blend 1 prema jednadžbi 4.1..... | 38 |

POPIS TABLICA

| | |
|--|----|
| Tablica 3- 1. Ovisnost omjera ANFO-a i emulzijskog eksploziva na vodootpornost <i>Heavy</i> ANFO-a (Bohanek, 2016) | 8 |
| Tablica 4- 1. Brzina detonacija ANFO-a ovisno o veličini AN granula (Zygmunt i Buczkowski, 2007) | 10 |
| Tablica 4- 2. Rezultati proračunate brzine detonacije programom EXPLO V6.04.02 | 12 |
| Tablica 4- 3. Popis komercijalnih eksploziva korištenih u radu (Esen, 2004) | 13 |
| Tablica 4- 4. Masa glavnog punjenja dimenzije referentnih detonatora (Bohanek i dr.,2013) | 22 |
| Tablica 4- 5. Rezultati mjerenja brzine detonacije uzoraka iniciranih detonatorima (Bohanek i dr.,2013) | 23 |
| Tablica 4- 6. Rezultati mjerenja brzine detonacije uzoraka iniciranih boosterima (Bohanek i dr.,2013) | 23 |
| Tablica 4- 7. Svojstva korištenih inicijalnih sredstava (Žganec i dr,2016) | 26 |
| Tablica 4- 8. Izmjerena brzina detonacije ANFO eksploziva (Žganec i dr,2016) | 26 |
| Tablica 4- 9. Izmjerena brzina detonacije <i>Heavy</i> ANFO eksploziva sa 10 % emulzije (Žganec i dr,2016) | 27 |
| Tablica 4- 10. Izmjerena brzina detonacije <i>Heavy</i> ANFO eksploziva sa 15 % emulzije (Žganec i dr,2016) | 27 |
| Tablica 4- 11. Izmjerena brzina detonacije <i>Heavy</i> ANFO eksploziva sa 20 % emulzije (Žganec i dr,2016) | 28 |
| Tablica 4- 12. Izmjerena brzina detonacije <i>Heavy</i> ANFO eksploziva sa 70 % emulzije (Žganec i dr,2016) | 28 |
| Tablica 4- 13. Izmjerene brzine detonacije (D) ANFO-a iniciranog boosterima, Ø 52 mm (Dobrilović i dr., 2014) | 31 |
| Tablica 4- 14. Izmjerene brzine detonacije (D) ANFO-a iniciranog detonatorima, Ø 52 mm (Dobrilović i dr., 2014) | 32 |
| Tablica 4- 15. Izmjerene brzine detonacije (D) ANFO-a iniciranog detonatorima, Ø 23,5 mm (Dobrilović i dr., 2014) | 33 |
| Tablica 4- 16. Rezultati ispitivanja brzin detonacije ANFO-a u Cu i Al oblozi (Jackson, 2017) | 35 |

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|--------|--|--------------------------------|
| p | Pa, MPa, GPa, bar | tlak |
| d | mm | promjer |
| ρ | kg/dm ³ , g/cm ³ , kg/m ³ | gustoća |
| D | m/s, km/s, mm/ μ s | brzina detonacije |
| T | °C, °K | temperatura |
| m | mg, g, kg | masa |
| t | μ s | vrijeme |
| U | V | napon |
| Q | kJ/g | toplina oslobođena detonacijom |

1. UVOD

Eksplozivi se u rudarstvu koriste duže od stoljeća, kao najjeftinija energija pridobivanja mineralne sirovine. Učinak eksploziva u stijeni ovisi o njegovim detonacijskim svojstvima, rasporedu i nagibu minskih bušotine i fizičko mehaničkim značajkama stijene. Metode za određivanje detonacijskih parametara eksploziva variraju od terenskih, empirijskih ispitivanja i proračuna pa sve do vrlo složenih računalnih modeliranja koja kao svoju bazu koriste stečene teoretske osnove vezane uz detonaciju eksploziva.

Obzirom na karakteristike detonacijskog procesa, eksplozive je moguće podijeliti u dvije skupine; eksplozive s idealnom detonacijom i eksplozive s neidealnom detonacijom. U usporedbi s eksplozivima koji imaju gotovo idealnu detonaciju, neidealni eksplozivi imaju značajno nižu brzinu detonacije, što znači da je njihova zona reakcije značajno veća u odnosu na idealne eksplozive. Karakterističan predstavnik eksploziva s neidealnom detonacijom je ANFO eksploziv. U radu su prikazana svojstva ANFO eksploziva te su analizirana i sistematizirana recentna istraživanja koja se odnose na čimbenike koje utječu na detonacijske parametre. ANFO eksploziv je izabran zbog svoje rasprostranjenosti upotrebe u rudarskoj i građevinskoj industriji, a kao najznačajniji detonacijski parametar za kvantificiranje utjecaja pojedinih čimbenika izabrana je brzina detonacije. Pored klasičnih ANFO eksploziva, pojedina istraživanja vezana su uz *Heavy* ANFO odnosno mješavinu ANFO eksploziva s emulzijskim eksplozivom.

2. EKSPLOZIVI, EKSPLOZIJA, DETONACIJA I BRZINA DETONACIJE

2.1. Eksplozivi i eksplozija

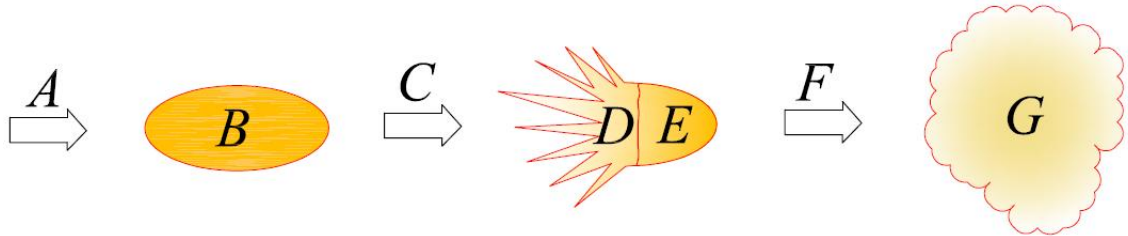
Eksplozivi su kemijski spojevi ili smjese koje imaju sposobnost da pod utjecajem vanjskog energetskog impulsa detoniraju, odnosno kemijski se razlažu u vrlo kratkom vremenskom periodu oslobađajući znatnu količinu plinova i topline (Krsnik 1989).

Za pridobivanje mineralne sirovine i ostale rudarske radove uglavnom se koriste eksplozivi iz skupine jakih eksploziva (eng. High explosives). Oni se dijele na primarne (inicijalne) i sekundarne (brizantne), za ove eksplozive je detonacija karakteristični oblik eksplozivne kemijske pretvorbe. Sekundarni eksplozivi u određenim uvjetima mogu stabilno sagorijevati. Primarni eksplozivi su znatno osjetljiviji na inicijalni impuls te se zbog toga koriste kao inicijalni eksplozivi. Najčešće korišteni inicirajući eksplozivi u praksi su: živin fulminat, olovni azid, srebro azid, olovni stifnat, tetracen, diazodinitrofenol. Sekundarni eksplozivi su manje osjetljivi na inicijalne impulse te trebaju znatno veću energiju za postizanje stabilne detonacije, zbog toga se iniciraju primarnim eksplozivima. ANFO možemo svrstati u sekundarne gospodarske eksplozive.

Obzirom na kemijski sastav eksplozive još možemo podijeliti na monomolekularne eksplozive i eksplozivne smjese.

Riječ eksplozija potječe iz latinskog (latin. *explodere* znači raspasti se). Prva asocijacija na eksploziju je prasak, buka, plamen, oblaci dima i razbacivanje krhotina sredine u kojoj je došlo do eksplozije, odnosno izvanjska obilježja eksplozije. Ako pogledamo na eksploziju na molekularnoj razini, ona je kemijski i fizikalan proces. Možemo je definirati kao egzoterman proces vrlo brze pretvorbe početne krute tvari uz ekspanziju nastalih plinova i pretvorbu potencijalne energije sustava u mehanički rad. Rad izvršen eksplozijom je posljedica naglog širenja plinova. Pri samom procesu eksplozije tlak naglo raste u sredini oko eksplozije, što je uzrok razornog djelovanja na okolinu. Eksplozija je nagla ekspanzija tvari do volumena mnogo većeg od njena početnog volumena. Pojam eksplozija tako uključuje efekte koji prate, ili uključuju, brzo sagorijevanje i detonaciju, kao sasvim fizičke procese (Johnsson i Person, 1970). Eksplozija može biti uzrokovana fizičkim, kemijskim ili nuklearnim promjenama pa tako razlikujemo fizičke, kemijske i nuklearne eksplozije. Najčešći oblik eksplozije pri izvođenju rudarskih radova bi bila kemijska eksplozija, odnosno eksplozija kemijske eksplozivne tvari uzrokovana eksplozivnim kemijskim reakcijama u toj tvari.

Svi eksplozivni procesi, neovisno o izvoru energije i jakosti, imaju dva stadija: pretvorbu nekog oblika energije u energiju jako sabijene tvari i naglo širenje tako sabijene tvari. Slika 2-1. prikazuje mehanizam eksplozije.



Kazalo:

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

B - neporemećena eksplozivna tvar ($T \approx 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $v \approx 0,2-1,5 \text{ dm}^3/\text{kg}$, $p \approx 1 \text{ bar}$),

C - kemijski proces pretvorbe,

D - plinoviti produkti,

E - neporemećena eksplozivna tvar,

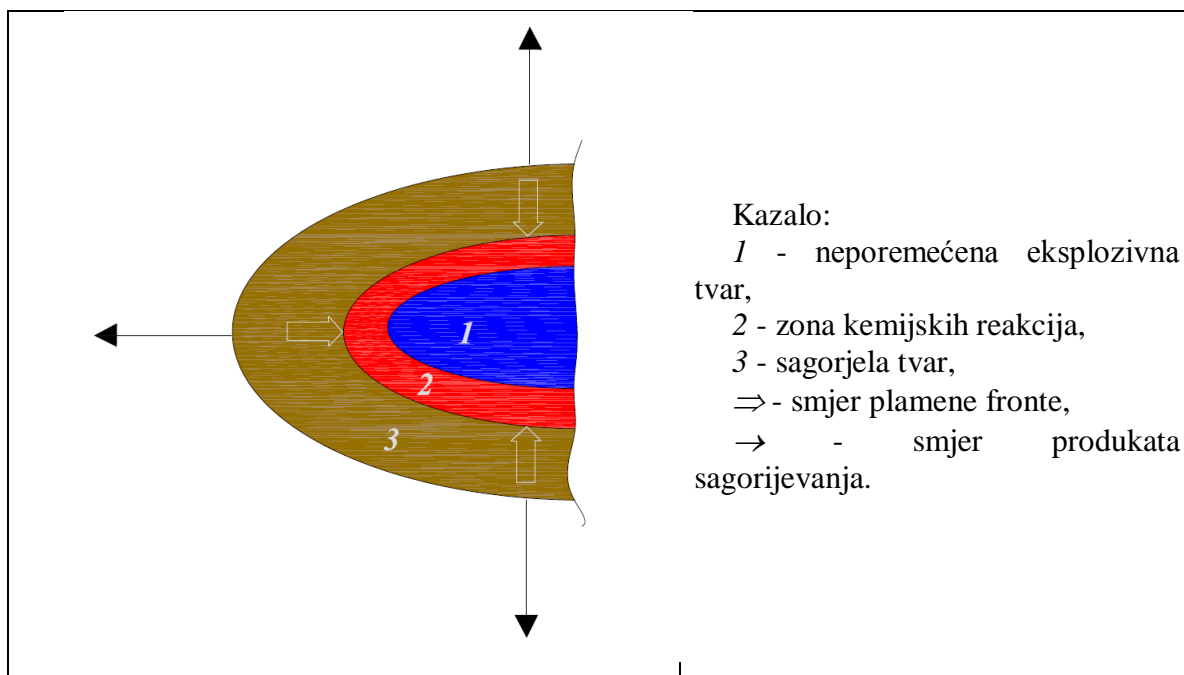
F - ekspanzija plinovitih produkata,

G - plinoviti produkti u ekspanziji ($T \approx 2000-5000 \text{ }^\circ\text{K}$, $v \approx 1000 \text{ kg/dm}^3$, $p \approx 10^5 \text{ bar}$,

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

Slika 2- 1. Eksplozija (Dobrilović, 2010)

Eksplozivne reakcije se u eksplozivnoj tvari mogu odvijati u dva režima odvijanja procesa: sagorijevanje ili detonacija. Detonacija je nadzvučni proces u odnosu na brzinu zvuka u eksplozivnoj tvari. Sagorijevanje ili deflagacija odvija se bez sudjelovanja vanjskog kisika u reakciji, brzinom manjom od brzine zvuka. Slika 2-2. prikazuje proces deflagacije.



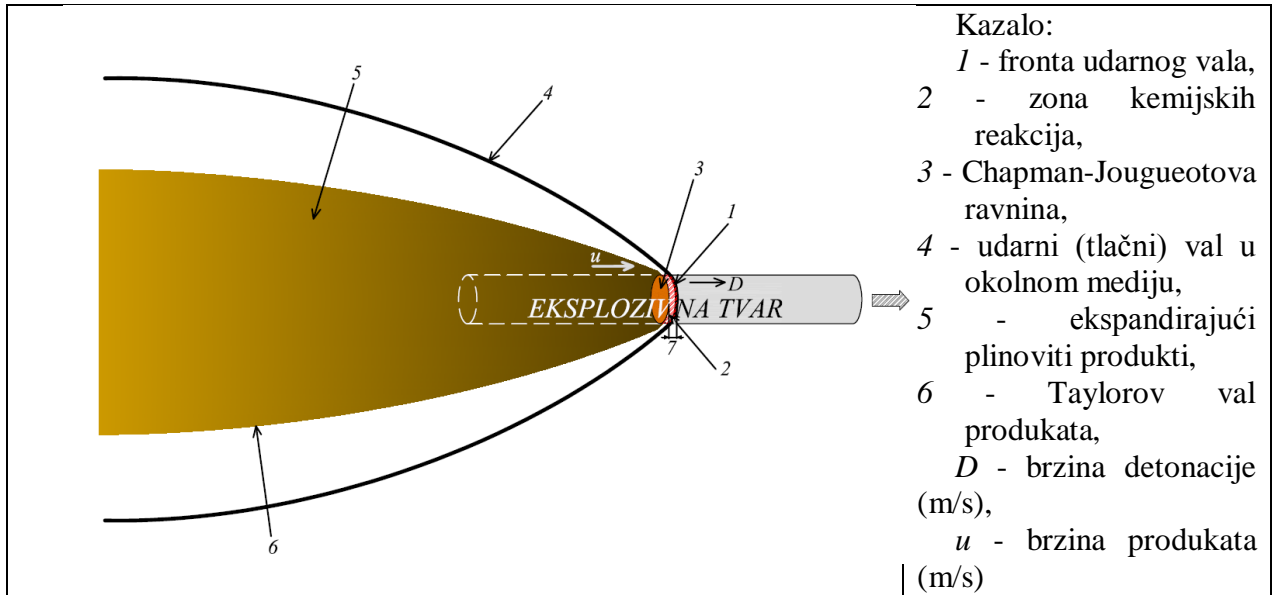
Slika 2- 2. Proces sagorijevanja u eksplozivnoj tvari (Dobrilović, 2010)

2.2. Detonacija i brzina detonacije

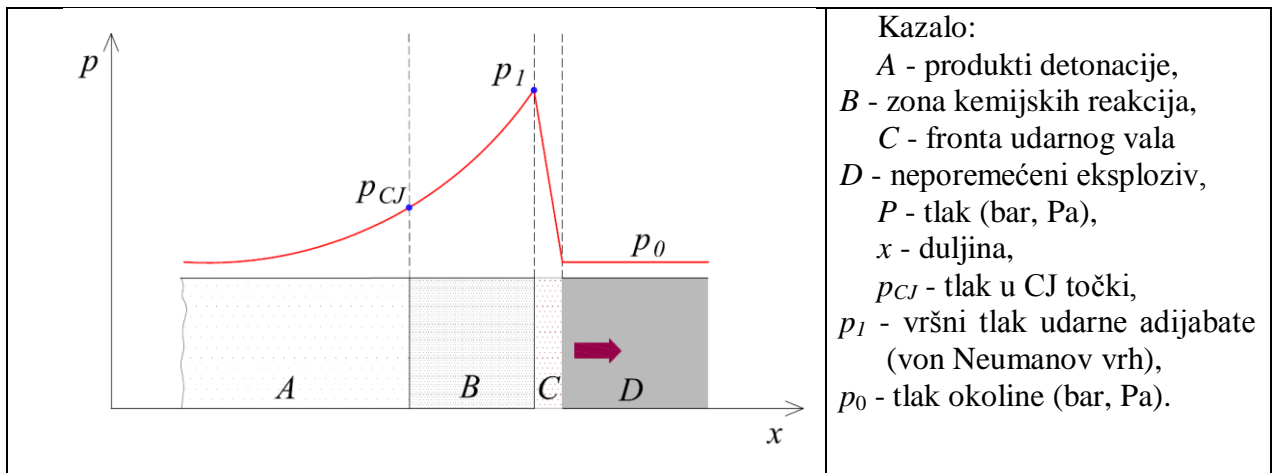
Stabilnost sagorijevanja eksplozivne tvari, tj. prijelaz sagorijevanja u detonaciju, uz karakteristike eksplozivne tvari, ovisi o sljedećim čimbenicima: tlaku sagorijevanja, temperaturi eksplozivne tvari, gustoći eksplozivne tvari, veličini čestica eksplozivne tvari (Bohanek, 2012.).

U praksi detonacija je inicirana: dovođenjem toplinskog impulsa eksplozivnom materijalu, prelaskom deflagacije u detonaciju, što vrijedi samo za inicijalne eksplozive, djelovanjem udarnog impulsa i toplim točkama, što vrijedi za sekundarne eksplozive. Kako bi se razvila stabilna detonacija, energija dovedena u obliku inicijalnog impulsa mora biti dovoljne veličine. Za razliku od ostalih eksplozivnih procesa, detonacija je nadzvučni proces u odnosu na brzinu zvuka u eksplozivnoj tvari. Visoki tlakovi koji se razvijaju u procesu su uzrok ne reagiranja eksplozivne materije kao cjeline, reakcija se odvija u malim segmentima. Detonacija se širi mehanizmom toplih točaka, defekata ili uključaka u eksplozivnoj tvari koji postaju centri za daljnje širenje reakcije (Bohanek, 2012.). Fronti kemijskih reakcija prethodi fronta udarnog vala, cijeli proces se odvija u redu ns do μ s. Volumen produkata detonacije je praktički identičan volumenu polazne tvari. Toplina oslobođena procesom zagrijava produkte visokom temperaturom, te se automatski nalaze i pod visokim tlakom.

Slika 2-3. prikazuje detonacijski proces u patroni eksploziva. Slika 2-4. prikazuje raspored tlakova prilikom detonacije u eksplozivu.



Slika 2- 3. Detonacijski proces u patroni eksploziva (Dobrilović, 2010)

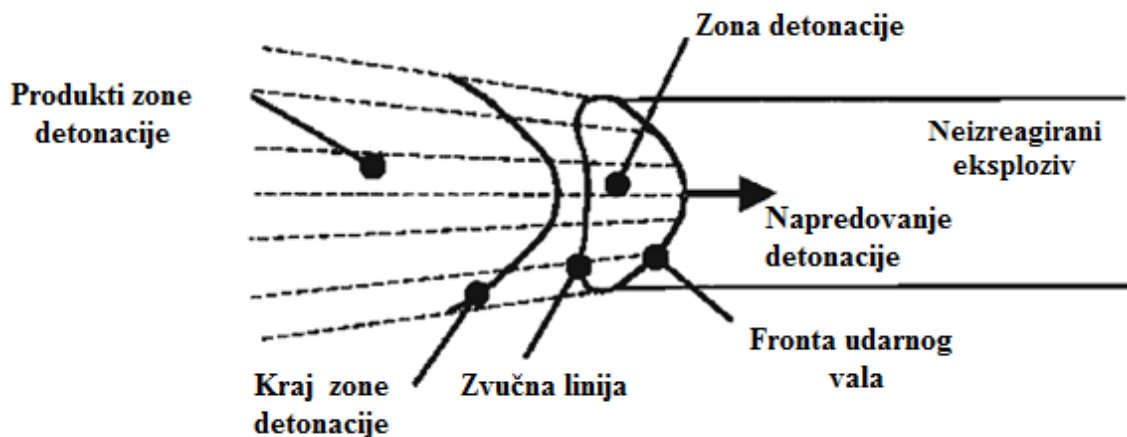


Slika 2- 4. Raspored tlakova prilikom detonacije u eksplozivu (Dobrilović, 2010)

Tijekom 19. i 20. stoljeća razvijene su se teorije koje opisuju detonacijske procese, kako bi ih se bolje shvatilo. Takozvana CJ teorija koju je postavio Chapman 1899., a Jouguet dopunio 1905. je jednodimenziona teorija detonacijskog procesa, ona pretpostavlja da je detonacija idealna. To znači da pretpostavlja da se udarni val koji inicira reakciju kreće u ravnini te da kroz eksplozivnu materiju putuje ne promijenjen, a reakcija se odvija odmah i sva eksplozivna materija izreagira u potpunosti. Pojednostavljeno pretpostavlja odvijanje kemijskih reakcija u zoni udarnog vala, a sva energija je trenutno oslobođena u toj zoni.

ZND teorija (Zeldovich, Von Neuman, Döring) nadopunjuje CJ teoriju mijenjajući neke pretpostavke. Reakcija se ne odvija u zoni udarnog vala, već se zona reakcija nalazi iza zone tlačnog udarnog vala i te dvije zone čine detonacijski val. Iako ova teorija idealizira detonaciju u manjoj mjeri, još uvijek pretpostavlja kretanje udarnog vala u ravnini, što je prevelika simplifikacija u odnosu na realan proces detonacije odnosno ne-idealnu detonaciju.

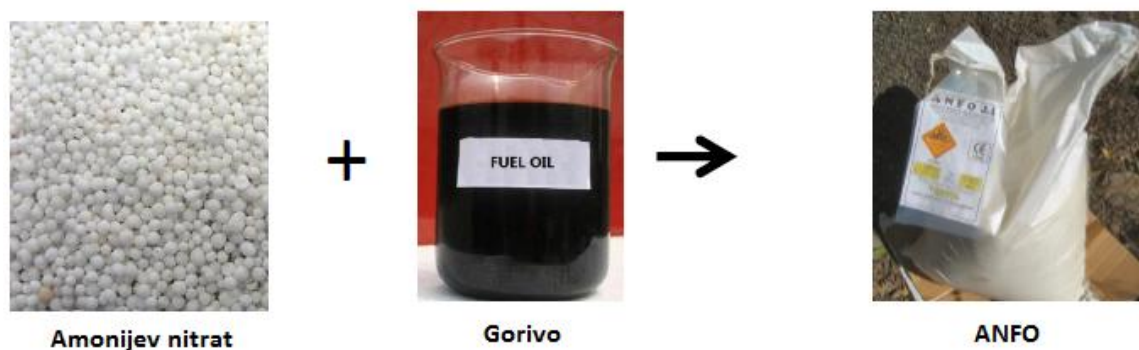
Poboljšanja modela detonacijskih procesa uključuju promatranje detonacijskih valova u prostoru. Modeli trebaju uzeti u obzir postupno reagiranje eksplozivne tvari pod djelovanjem tlaka i odrediti veličine politropskog (adijabatskog) eksponenta za realne tvari u području izuzetno visokih tlakova i temperatura. Za proces detonacije to konkretno znači da sam tok reakcije odstupa od idealiziranih modela. Reakcija u detonacijskoj zoni nikad nije završena, brzina detonacije je smanjena i ako poprečni presjek eksplozivnog naboja postane premali (kritični promjer) proces će preći u deflagaciju ili se zaustaviti. Dakle, ako se kemijska reakcija odvija iza CJ ravnine eksploziv detonira ne-idealno. Slika 2-5. prikazuje ne-idealnu dvodimenzionalnu detonaciju.



Slika 2- 5. Ne-idealna dvodimenzionalna detonacija (Byers Brown, 2002)

3. ANFO I HEAVY ANFO EKSPLOZIVI

Naziv ANFO eksploziva potječe iz engleskog jezika (eng. *ammonium nitrate fuel oil*). Osnovna baza eksploziva je amonijev nitrat, kako bi se dobio eksploziv, on se miješa s gorivom. Amonijev nitrat se proizvodi u granulama. Najvažnije svojstvo amonijevog nitrata koje u konačnici utječe na performansu eksploziva je poroznost amonijsko nitratnih kuglica, također bitna je i dimenzija kuglica. Iz tog razloga amonijev nitrat se proizvodi posebno u poljoprivredne svrhe i posebno u svrhu proizvodnje eksploziva. Amonijev nitrat može se mljeti i koristiti u prahu, ali sam za sebe korištenjem standardnih detonatora ne može postići stabilnu detonaciju. Zbog visoke neosjetljivosti na bilo kakav inicijalni impuls amonijev nitrat je siguran za transport. Obzirom na svojstvo poroznosti, amonijev nitrat lako upija vlagu, što može biti problem pri skladištenju. Amonijev nitrat miješa se s gorivom najčešće u omjeru 94,5% : 5,5%, razlog je što je pri ovom omjeru bilanca kisika približna nuli. Kao gorivo najčešće se koriste naftni derivati, te plinska i mineralna ulja. Kao senzibilizator se može koristiti aluminijski prah, no to podiže cijenu eksploziva. ANFO se proizvodi kao patronirani eksploziv ili u vrećama iz kojih se usipava izravno u minske bušotine. Predugim skladištenjem ANFO otpušta gorivo i gubi eksplozivna svojstva, nepovoljan čimbenik može biti i vlažno okruženje pri skladištenju. Vremenski period skladištenja ANFO eksploziva ne bi smio biti duži od tri mjeseca (Ester, 2005). Prednosti ANFO eksploziva su: jednostavna proizvodnja (moguće ga je proizvoditi na mjestu miniranja u za to predviđenom kamionu), niska cijena, efikasnost miniranja, jednostavnost i sigurnost korištenja. Nedostaci su: neotporan na vodu, niska gustoća, ne-idealna detonacija, mora biti iniciran pojačnikom pošto iniciranjem detonatorom ne proizvodi stabilnu detonaciju. Slika 3-1. shematski prikazuje dobivanje ANFO eksploziva.




Slika 3- 1. Shematski prikaz proizvodnje ANFO eksploziva (Bohanek, 2016)

Heavy ANFO je mješavina ANFO eksploziva s emulzijskim eksplozivima. Emulzijski eksplozivi sastoje se od kapljica otopine oksidansa koje su dispergirane u kontinuiranoj fazi, koja je ulje. Ovi eksplozivi su stabilizirani emulgatorima, pošto je emulzija mješavina dviju tvari koje se ne miješaju, u ovom slučaju voda u ulju. Povećanje osjetljivosti emulzijskih eksploziva postiže se sitnim mjehurićima zraka ili umjetnim mjehurićima od stakla, smole ili plastike (tzv. mikrobalozi) te miješanjem s ANFO eksplozivima. Budući da su emulzijski eksplozivi emulzija tipa voda u ulju otporni su na utjecaj vode. *Heavy* ANFO eksplozivi koriste svojstva emulzijskih eksploziva kao što su: vodootpornost, idealnija detonacija, veća gustoća, niska emisija plinova, manji kritični promjer, bolja performansa pri miniranju, kraće vrijeme punjenja te osjetljivost na detonatore. S druge strane ANFO je jeftiniji eksploziv koji miješanjem s emulzijskim eksplozivima postiže bolje performanse, pa su troškovi miniranja su manji. Zbog bolje performanse krajnji troškovi oko sekundarnog usitnjavanja sirovine su također manji.

Teretni kamioni se također koriste na terenu za miješanje i upumpavanje *Heavy* ANFO eksploziva izravno u bušotine. Ovi kamioni omogućavaju upumpavanje ANFO-a ili emulzije zasebno ili unaprijed pripremljene mješavine u raznim omjerima, zavisno o potrebi. Tablica 3-1. prikazuje utjecaj omjera ANFO-a i emulzijskog eksploziva u *Heavy* ANFO-u na vodootpornost.

Tablica 3- 1. Ovisnost omjera ANFO-a i emulzijskog eksploziva na vodootpornost *Heavy* ANFO-a (Bohanek, 2016)

| Postotak | |  Vodootpornost |
|----------------------|------|--|
| Emulzijski eksploziv | ANFO | |
| 20 | 80 | |
| 40 | 60 | |
| 50 | 50 | |
| 60 | 40 | |
| 80 | 20 | |

Tablica jasno pokazuje da vodootpornost *Heavy* ANFO eksploziva raste s povećanjem udjela emulzije, odnosno opada s povećanim udjelom ANFO-a.

4. ČIMBENICI KOJI UTJEČU NA BRZINU DETONACIJE ANFO I HEAVY ANFO EKSPLOZIVA

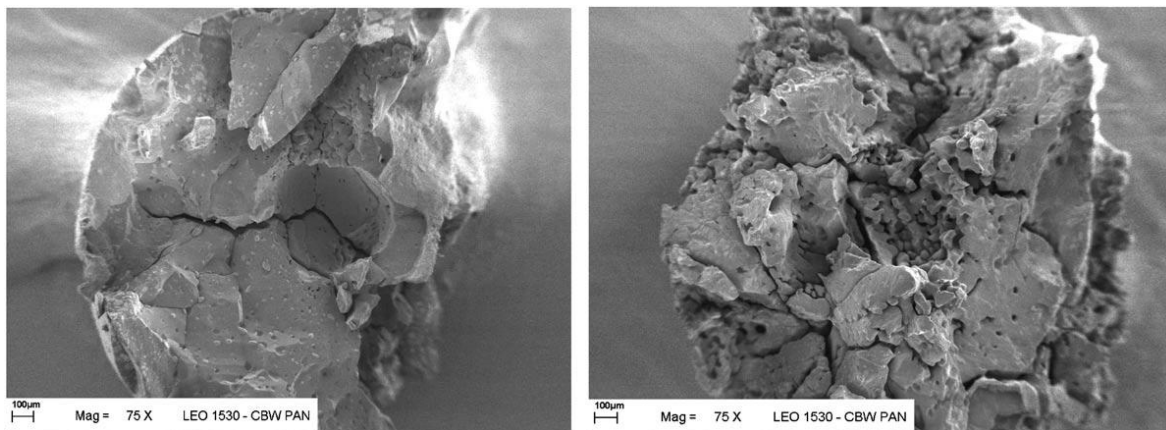
Pregledom literature i recentnih istraživanja ustanovljeno je više čimbenika koji imaju utjecaj na brzinu detonacije ANFO i Heavy ANFO eksploziva. Utjecajni čimbenici su:

- Dimenzije i poroznost amonijeva nitrata te sadržaj nafte
- Promjer i oblik poprečnog presjeka
- Način iniciranja
- Temperatura i
- Obloga

U daljnjem tekstu je naveden utjecaj pojedinog čimbenika s primjerima iz dostupne literature.

4.1. Dimenzije i poroznost amonijeva nitrata te sadržaj nafte

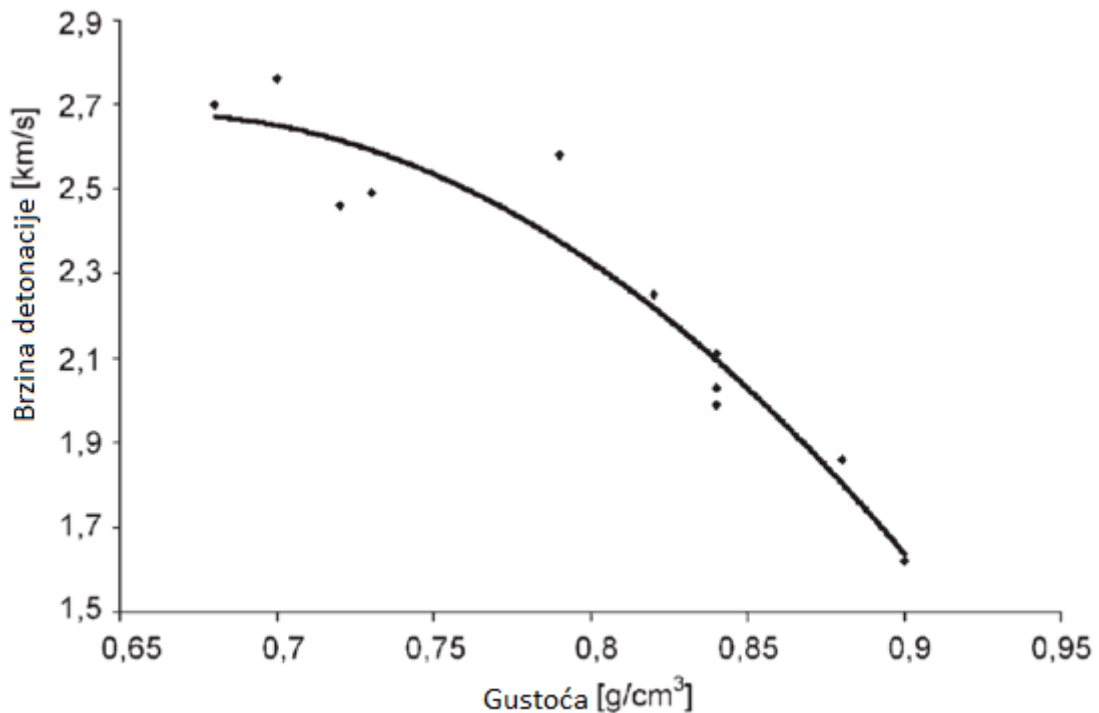
Zygmunt i Buczkowski (Zygmunt i Buczkowski, 2007) ispitivali su utjecaj dimenzija amonij nitratnih kuglica, poroznosti i sadržaja nafte na brzinu detonacije ANFO eksploziva. Istraživanje je izvedeno na kuglicama amonijevog nitrata s različitim dimenzijama i mogućnosti adsorpcije nafte. Prikaz kuglica amonijevog nitrata korištenih pri istraživanju na slici 4-1.



Slika 4- 1. Poprečni presjek neporozne kuglice amonijevog nitrata, korištene u poljoprivredi (lijevo) i porozne kuglice nakon apsorpcije nafte $15 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$ u nekoliko termalnih ciklusa (desno) (Zygmunt i Buczkowski, 2007)

AN kuglice različite poroznosti dimenzija $1,5 \text{ mm}-2,5 \text{ mm}$ mješane su s naftom u omjeru $94,5\% : 5,5\%$. Brzina detonacije je mjerena u čeličnim cijevima unutarnjeg promjera 36 mm i debljine stijenke od 3 mm . Uzorak je iniciran pojačnikom. Masa pojačnika je 14 g , a sastav $90\% \text{ RDX} : 10\% \text{ TNT}$. Granule s mogućnosti apsorpcije manjom od $2.5 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$ nisu detonirale. Izmjerena brzina detonacije kod granula s

moгуćnosti upijanja od 2.5 – 3.0 cm³/100 g iznosila je između 1600 m/s i 1700 m/s. Kod granula s mogućnošću upijanja 12 – 15 cm³/100 g maksimalna izmjerena brzina detonacije iznosila je oko 2700 m/s. S povećanjem poroznosti raste i mogućnost apsorpcije, a opada gustoća te raste izmjerena brzina detonacije kao što je to prikazano slikom 4-2.



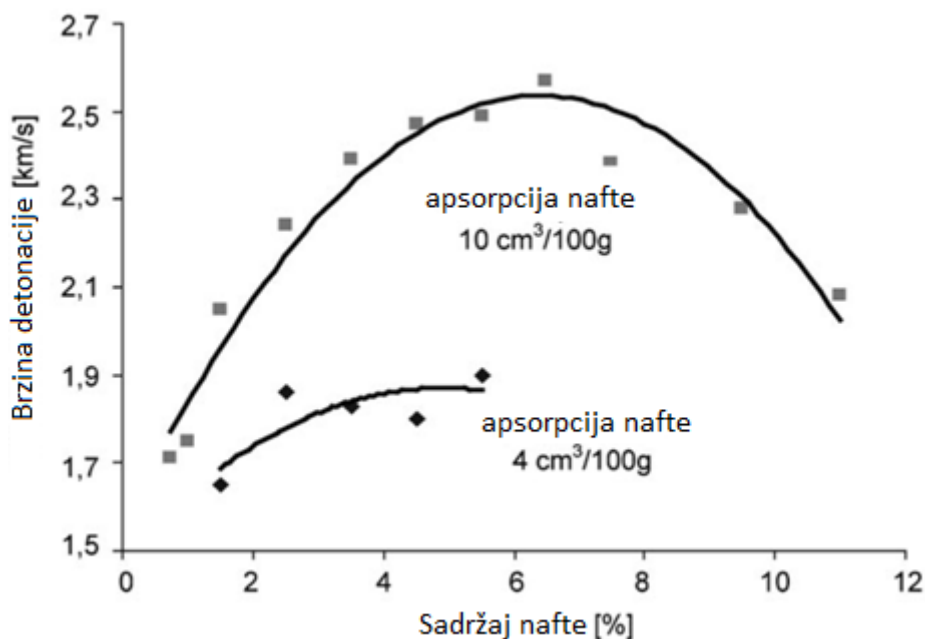
Slika 4- 2. Utjecaj dimenzija granula ispitan je na granulama dimenzija manjim od 0,50 mm do 1,2 mm (Zygmunt i Buczkowski, 2007)

Rezultati ispitivanja su prikazani u tablici 4-1.

Tablica 4- 1. Brzina detonacija ANFO-a ovisno o veličini AN granula (Zygmunt i Buczkowski, 2007)

| Veličina granula (mm) | Gustoća ANFO-a (g/cm ³) | Brzina detonacije (km/s) |
|-----------------------|-------------------------------------|--------------------------|
| 1,00 – 1,20 | 1,02 | 2,33 |
| 0,63 – 1,00 | 1,01 | 2,50 |
| 0,50 – 0,63 | 1,02 | 2,96 |
| 0,20 – 0,50 | 0,98 | 3,44 |

Iz tablice je vidljivo da je brzina detonacije obrnuto proporcionalna veličini granula i gustoći ANFO eksploziva. Autori su u svom radu također ispitali utjecaj sadržaja nafte na brzinu detonacije. Utjecaj postotnog udijela nafte je ispitan na granulama s različitom mogućnosti apsorpcije (4cm³/100g i 10cm³/100g), rezultati su prikazani na slici 4-3.



Slika 4- 3. Ovisnost brzine detonacije ANFO-a o apsorbiranoj nafti

Iz rezultata je vidljivo da su granice detonabilnosti kao i utjecaj sadržaja nafte znatno izraženije kod granula s većom poroznosti.

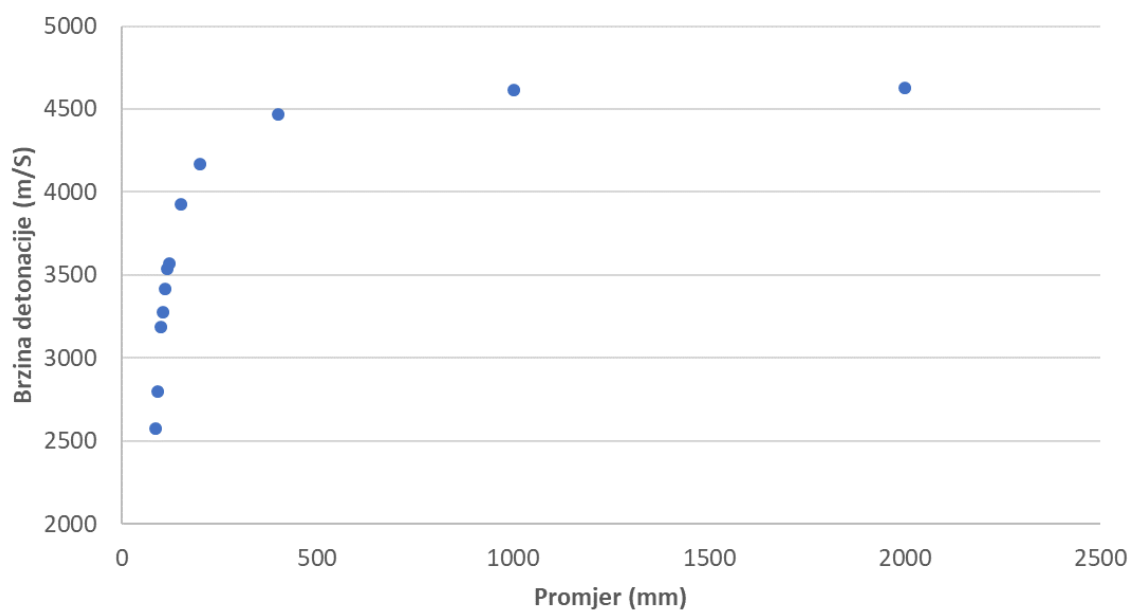
4.2. Promjer i oblik poprečnog presjeka

Brzina detonacija eksploziva direktno je povezana s promjerom patrone ili minske bušotine u kojoj eksploziv detonira. Ukoliko je promjer premali može se dogoditi izostanak ili prekid detonacije. Minimalni promjer potreban za postizanje stabilne detonacije za pojedini eksploziv naziva se kritični promjer. U literaturi se može pronaći više radova u kojima je prikazana funkcijska veza između promjera ANFO eksploziva i brzine detonacije eksploziva. Podaci prikazani u radovima dobiveni su mjerenjem brzine detonacije na poligonu ili upotrebom različitih računalnih programa. Za razliku od utjecaja promjera na brzinu detonacije, utjecaj oblika poprečnog presjeka na brzinu detonacije je slabije istražen.

Za potrebe rada izveden je proračun brzine detonacije ANFO eksploziva u otvorenim uvjetima. Za proračun je korišten program EXPLO V6.04.02 i Wood and Kirkwood model detonacije za detonaciju ANFO eksploziva u otvorenim uvjetima. Rezultati proračuna prikazani su u tablici 4-2., a utjecaj promjera na proračunatu brzinu detonacije slikom 4-4.

Tablica 4- 2. Rezultati proračunate brzine detonacije programom EXPLO V6.04.02

| d (mm) | D (m/s) |
|--------|---------|
| 2000 | 4629 |
| 1000 | 4614 |
| 400 | 4469 |
| 200 | 4169 |
| 150 | 3926 |
| 120 | 3572 |
| 116 | 3535 |
| 110 | 3414 |
| 104 | 3276 |
| 100 | 3188 |
| 90 | 2795 |
| 87 | 2575 |



Slika 4- 4. Utjecaj promjera na proračunatu brzinu detonacije

Iz dijagrama prikazanom na slici 4-4. vidljivo je da su rezultati iskazani samo za promjere veće od 87 mm. Razlog tome je što točnost kalkulacije programa opada u području koje je blizu kritičnih promjera za ANFO eksplozive. Istraživanja s područja određivanja kritičnog promjera i utjecaja promjera izveo je Esen za potrebe svoje doktorske disertacije u ispitivanjima bez obloge. Korišteno je šest vrsta eksploziva koji se često koriste u površinskim miniranjima. Također, uzeti su u obzir zbog različitih stupnjeva ne-idealnosti koje pokazuju. U tablici 4-3. navedeni su svi eksplozivi i njihova značajna svojstva.

Tablica 4- 3. Popis komercijalnih eksploziva korištenih u radu (Esen, 2004)

| Naziv eksploziva | Tip eksploziva | Opis eksploziva | Gustoća eksploziva, g/cm ³ |
|------------------|----------------|---|---------------------------------------|
| Blend 1 | Blend | 65 % emulzija, 35 % ANFO – senzibiliziran plinom | 1,050 |
| Blend 2 | Blend | 65 % emulzija, 35 % ANFO – senzibiliziran plinom | 1,120 |
| Blend 3 | Blend | 80 % emulzija, 20 % ANFO – senzibiliziran mikrobalonima | 1,290 |
| Heavy ANFO 1 | Heavy ANFO | 30 % emulzija i 70 % ANFO | 1,050 |
| ANFO 1 | ANFO | 94% amonijev nitrat i 6 % dizelsko gorivo | 0,828 |
| ANFO 2 | ANFO | 94% amonijev nitrat i 6 % dizelsko gorivo | 0,750 |

Ispitivanja bez obloge vršila su se u PVC cijevima, a brzina detonacije mjerena sistemom Microtrap koji se proizvodi u tu svrhu. Uzorci su inicirani boosterima s jedne strane cijevi, dok se s druge strane sonda na kraju optičkog kabla zabija aksijalno u naboj što točnije, jer i najmanji otklon od osi može dovesti mjerenje u pitanje. PVC cijevi su rezane na duljinu od 1,5 metra, kako bi razmak između boostera i sonde bio dovoljan, a samim tim se teži da utjecaj boostera bude što manji na mjernu sondu.

Zbog različitih tipova eksploziva, samim tim i različitih uvjeta pripreme, priprema uzoraka svakog eksploziva opisana je zasebno.

Blend 1: Korištene su cijevi promjera od 58 do 236 mm. Eksploziv je pripremljen u kamionu na licu mjesta, a sve cijevi napunjene su direktno iz kamiona. Tijekom punjenja cijevi su trešene kako bi se eksploziv što ravnomjernije rasporedio u cijevi. Nakon što su cijevi napunjene eksploziv je tretiran plinom (zbog povećanja osjetljivosti). Potom su cijevi zatvorene najlonom i trakom te vagane. Sve cijevi su otpucane u roku od dva dana nakon punjenja.

Blend 2: Promjer korištenih cijevi varira od 63 mm do 241 mm. Ovaj eksploziv je također pripremljen u kamionu. Cijevi velikog promjera punjene su direktno iz kamiona, dok su cijevi manjih promjera punjene iz kanti. Potrebna količina eksploziva unaprijed je izračunata za svaki promjer cijevi. Cijev je zatvorena također najlonom i trakom, eksploziv je tretiran plinom oko četrdeset minuta. Sve napunjene cijevi otpucane su istog dana.

Blend 3: Kod ovog eksploziva cijevi za naboj su rezane na duljinu od 1,7 m, a promjer se kretao od 63 do 250 mm. Cijevi su punjene iz paketa koji su taj dan zamiješani u tvornici eksploziva. Osjetljivost ovog eksploziva povećana je mikrobalonima.

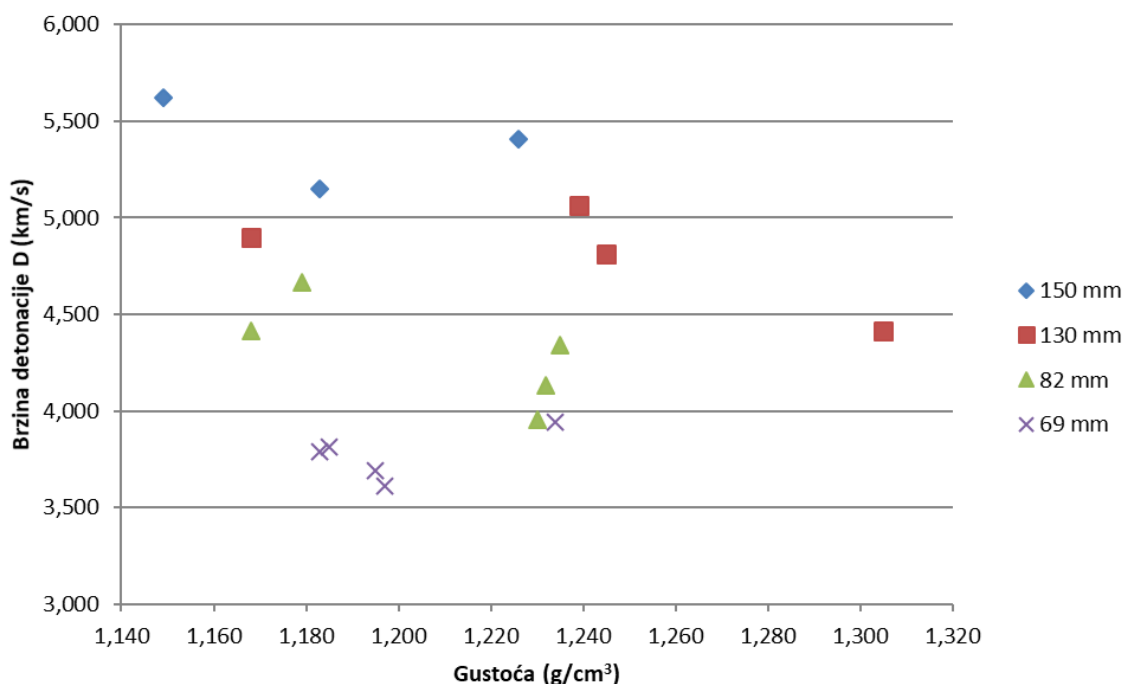
Heavy ANFO 1 i ANFO 1: Promjer cijevi varira od 63 mm do 241 mm. Eksploziv je zamiješan u kamionu, cijevi većeg promjera su punjene direktno iz kamiona, dok su cijevi manjeg promjera punjene iz kanti. Cijevi su napunjene, zatvorene i izvagane. Svi pripremljeni naboji otpucani su istog dana.

ANFO 2: Promjer cijevi za ovaj eksploziv se kreće od 63 mm do 250 mm, a rezane su na duljinu od 1,7 m. Cijevi su punjene iz paketa eksploziva koji su isti dan zamiješani u tvornici.

Provedeno je 72 mjerenja brzine detonacije bez obloge. Nakon mjerenja, dobiveni podatci iz mjernog sistema moraju se filtrirati kako bi se otklonile bilo kakve smetnje u signalu.

Blend1 (65% emulzija i 35% ANFO - senzibiliziran plinom)

Za ovaj eksploziv provedeno je 32 mjerenja brzine detonacije bez obloge. Od toga, 22 rezultata su iskoristiva. Ispitivanja za promjere u rasponu od 69 mm do 236 mm provedena su pet puta za svaki pojedini promjer. Ispitivanja u cijevima unutarnjeg promjera od 58 mm do 82 mm bila su namijenjena određivanju kritičnog promjera eksploziva, no svi uzorci su otpucali uspješno, na temelju čega možemo zaključiti da je kritični promjer manji od 58 mm. Slika 4-5. prikazuje dijagram u odnosu gustoće i brzine detonacije za dati eksploziv.

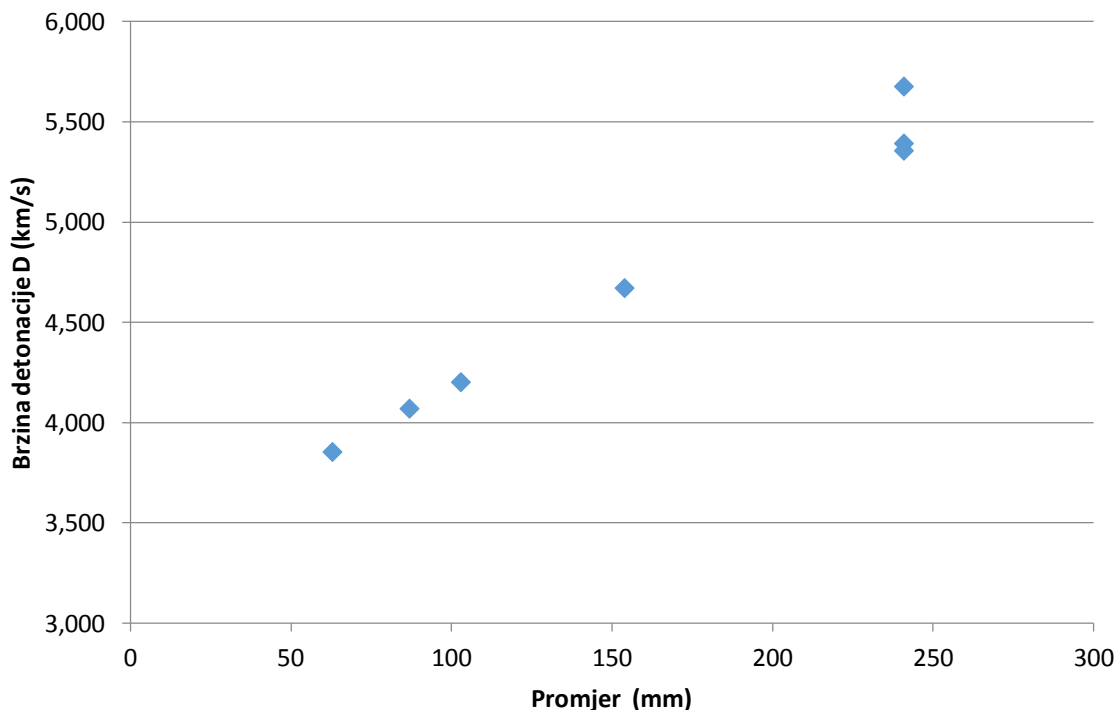


Slika 4- 5. Odnos gustoće eksploziva i brzine detonacije za Blend 1 (Esen,2004)

Iz dijagrama se jasno može očitati da s promjerom raste i brzina detonacije. Prosječna brzina detonacije za najmanji promjer iznosi 3,77 km/s, a za najveći promjer od 236 mm koji nije naveden u ovom dijagramu 5,648 km/s. Za promjer od 150 mm je nešto manja i iznosi 5,392 km/s. Najveće odstupanje u podacima dogodilo se kod promjera od 82 i 130 mm a iznosi 273 m/s. Varijacije u brzini detonacije se mogu pripisati sljedećim faktorima: razlici u zamiješanosti eksploziva što automatski utječe na gustoću eksploziva u pojedinom naboju, činjenica da neki uzorci nisu otpucani isti dan kada su napunjeni, temperaturne amplitude između dana i noći, mogućnost nestabilnog ponašanja u manjim promjerima zbog približavanja kritičnom promjeru.

Blend2 (65% emulzija i 35% ANFO - senzibiliziran plinom)

Kod ovog eksploziva jedino su ispitivanja za promjer od 241 mm uspješno izvršena. Za ostale promjere nije detonirano dovoljno uzoraka. Cijevi u rasponu promjera od 63 do 87 mm su bile namijenjene određivanju kritičnog promjera, no sve su detonirale, na temelju čega se može zaključiti da je kritični promjer manji od 63 mm. Slika 4-6. prikazuje odnos promjera naboja i brzine detonacije za dati eksploziv.

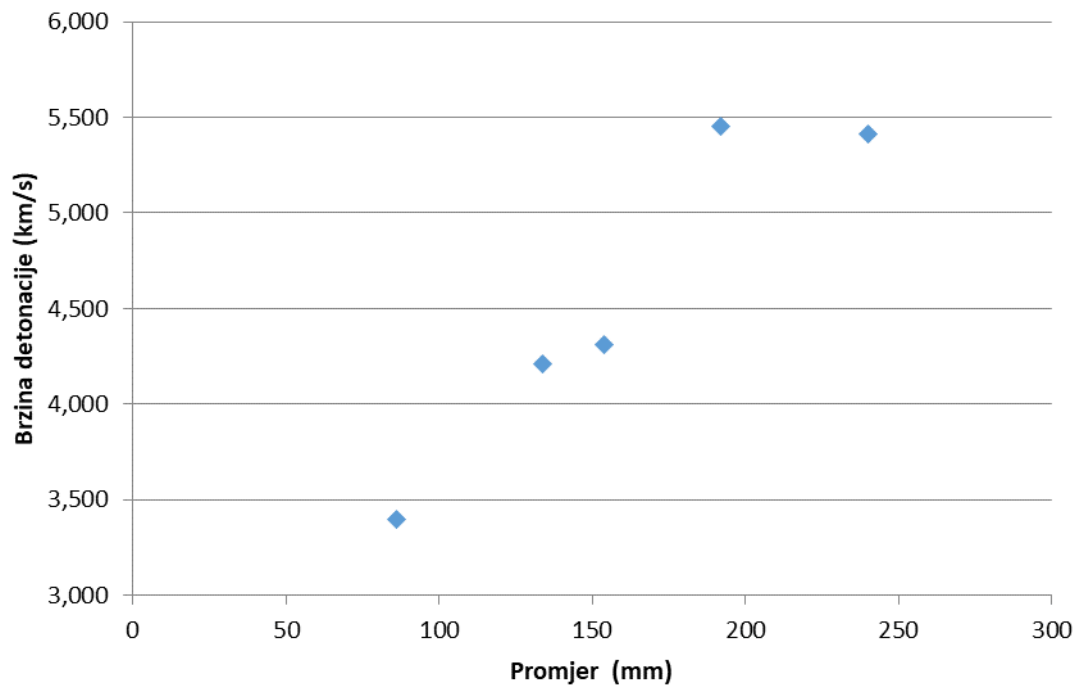


Slika 4- 6. Odnos promjera naboja i brzine detonacije za Blend 2 (Esen, 2004)

Na temelju ovog dijagrama također možemo zaključiti da brzina detonacije raste s promjerom. Tri provedena mjerenja za promjer od 241 mm daju prosječnu brzinu detonacije ovog eksploziva od 5,476 km/s, a standardno odstupanje iznosi 175 m/s. Ove varijacije su moguće zbog: razlika u zamiješanosti sirovine, što utječe i na gustoću, te također razlike u temperaturi.

Blend3 (80% emulzija i 20% ANFO – senzibiliziran mikrobalonima)

Svi uzorci detonirali su uspješno do promjera od 63 mm, pošto je zadnji uspješno otpucani promjer bio 86,4 mm možemo zaključiti da je kritični promjer ovog eksploziva između te dvije vrijednosti. Slika 4-7. prikazuje odnos promjera naboja i brzine detonacije za dati eksploziv.

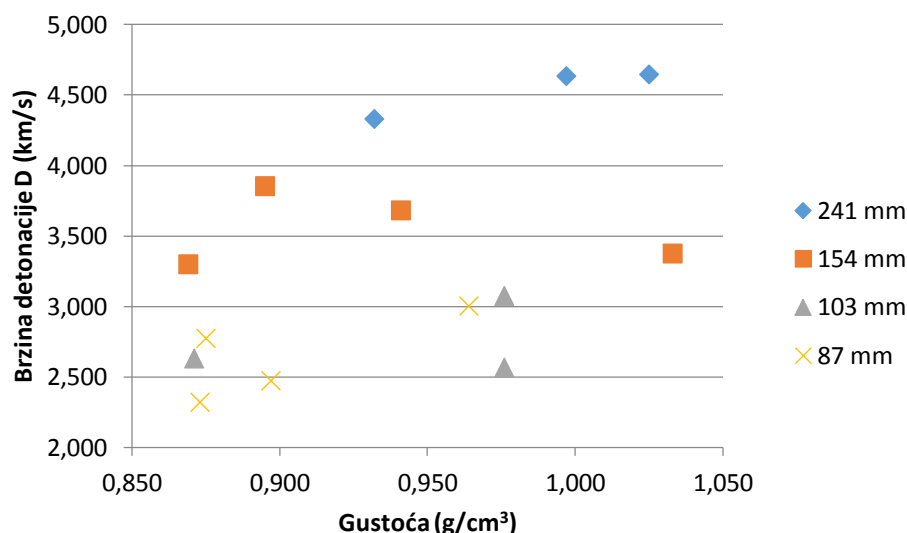


Slika 4- 7. Odnos promjera naboja i brzine detonacije za Blend 3 (Esen,2004)

Pošto je za svaki promjer vršeno po jedno ispitivanje, podatci o odstupanju brzine detonacije ne postoje.

Heavy ANFO 1 (30% emulzija i 70% ANFO)

Od 17 provedenih ispitivanja 15 je provedeno uspješno, te je dobiven podatak o brzini detonacije. Za svaki promjer od 87 do 241 mm ispitivanje je ponovljeno četiri puta osim za promjer od 63 mm koji je otpucan jednom, uspješno, na temelju čega se može zaključiti da je kritični promjer za ovaj eksploziv manji od 63 mm. Slika 4-8. prikazuje dijagram u odnosu gustoće i brzine detonacije.

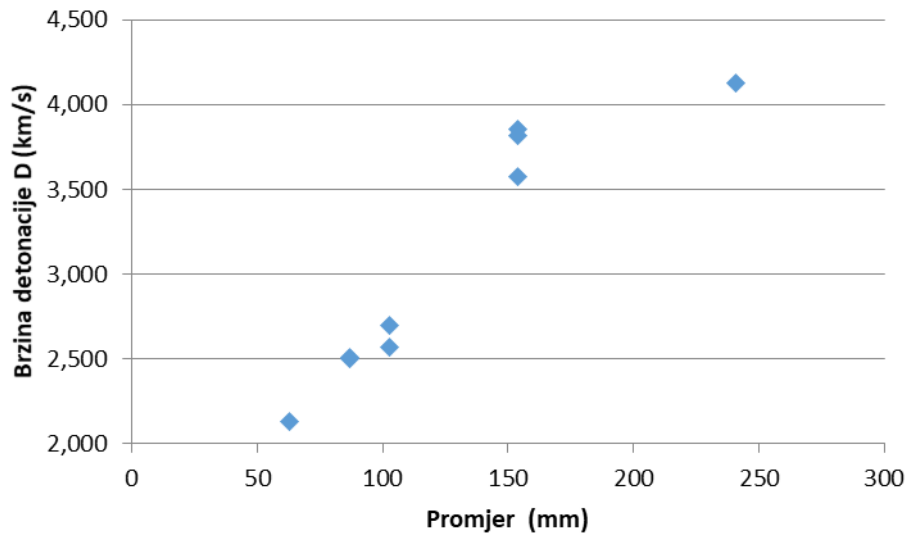


Slika 4- 8. Odnos gustoće i brzine detonacije za Heavy ANFO 1 (Esen, 2004)

Na temelju dijagrama možemo zaključiti da se ovdje javljaju najveća odstupanja u gustoći eksploziva, samim tim i u brzini detonacije, što se posebno odnosi na promjere od 87 i 154 mm, ali dijagram potvrđuje činjenicu da brzina detonacije raste s promjerom. Odstupanja u brzini detonacije se kreću od 173 m/s do 305 m/s. Gornja vrijednost se odnosi na promjer od 87 mm. Odstupanja u brzini detonacije možemo pripisati: Nejednolikoj zamiješanosti sirovine (što ovdje posebno dolazi do izražaja u odnosu na ostale do sad spomenute eksplozive pošto je sadržaj ANFO-a visok, te je automatski teže postići homogeniju smjesu), mogućnost nestabilnosti detonacije kod manjih promjera zbog približavanja kritičnom promjeru te naravno temperaturnih amplituda.

ANFOI (ANFO)

Kod ovog eksploziva provedeno je deset ispitivanja od kojih je devet dalo podatke o brzini detonacije. Ispitivanja nekih promjera su vršena 2 ili 3 puta, jedino je promjer od 63 mm otpucan jednom, uspješno, što upućuje na kritični promjer manji od 63 mm. Slika 4-9. prikazuje dijagram u ovisnosti promjera i brzine detonacije.

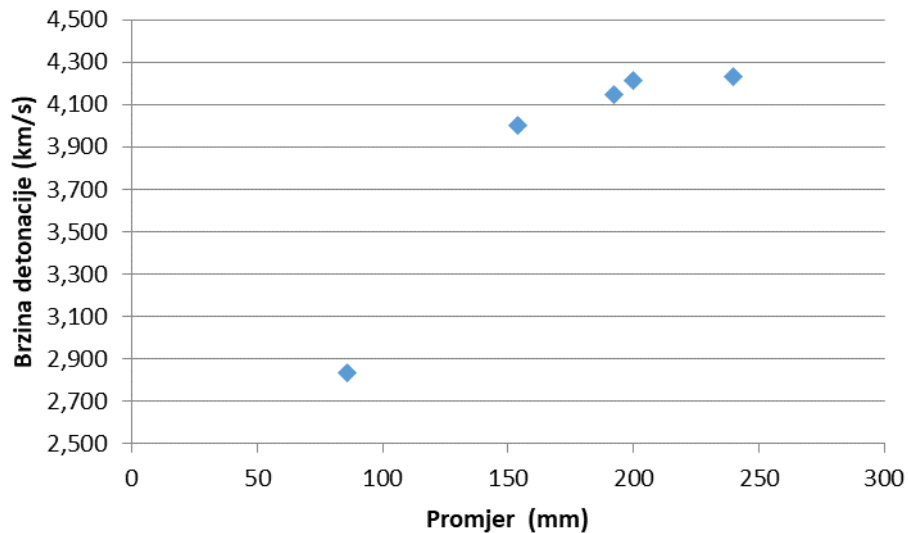


Slika 4- 9. Odnos promjera naboja i brzine detonacije za ANFO 1 (Esen, 2004)

Dijagram potvrđuje da brzina detonacije raste s promjerom, veća odstupanja u brzini detonacije za pojedine promjere uzrokovana su razlikama u gustoći. Također ovdje odstupanja rastu s povećanjem promjera. Promjer od 87 mm ima odstupanje od svega 7 m/s, dok promjer od 154 mm ima odstupanje od 150 m/s. Varijacije možemo pripisati: nejednolikoj zamiješanosti eksploziva (što se odrazilo na gustoću) te razlikama u temperaturi.

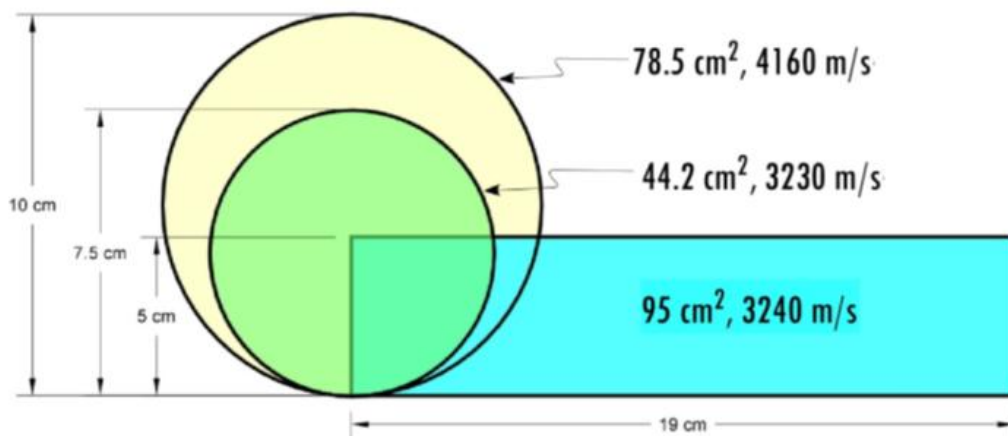
ANFO2 (ANFO)

Provedeno je 6 ispitivanja od kojih jedno nije otpucalo. Zadnji uspješno otpucan promjer bio je 86,4 mm, pošto pri promjeru od 63 mm nije došlo do detonacije, možemo zaključiti da je kritični promjer između tih vrijednosti. U odnosu na ANFO 1 možemo pretpostaviti da je kritični promjer ANFO 2 veći zbog manje gustoće. Slika 4-10. prikazuje odnos promjera i brzine detonacije za dati eksploziv.



Slika 4- 10. Odnos promjera naboja i brzine detonacije za ANFO 2 (Esen, 2004)

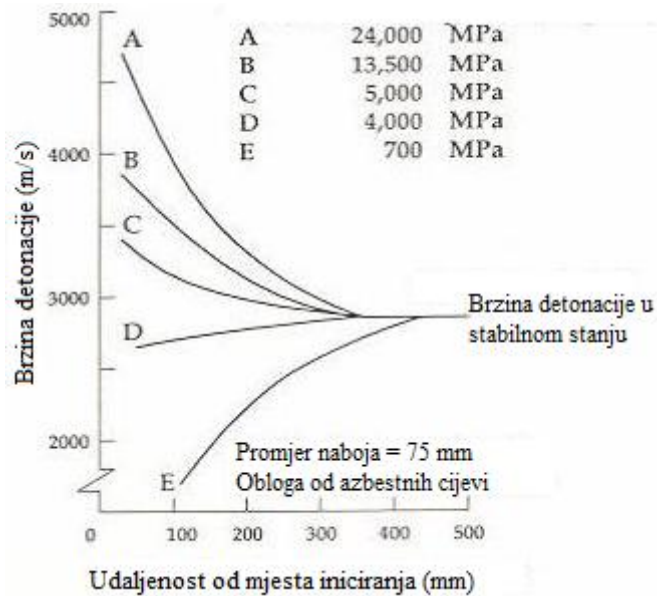
Pri miniranju se ANFO eksploziv direktno sipa u bušotine ili se stavlja u patrone i u oba slučaja ima kružni poprečni presjek. Pri zavarivanju metala eksplozivom ili u nekim drugim postupcima koriste se eksplozivni naboji s različitim oblicima poprečnog presjeka. Primjećeno je da osnik poprečnog presjeka ima znatan utjecaj na izmjerenu brzinu detonacije ANFO eksploziva. Primjer utjecaja oblika poprečnog presjeka na brzinu detonacije dan je slikom 4-11.



Slika 4- 11. Usporedba odnosa poprečnih presjeka naboja i brzine detonacije za tri primjera naboja (Hurley, 2013)

4.3. Način iniciranja

U postojećoj literaturi mogu se naći podaci o brzini detonacije ANFO eksploziva u ovisnosti o inicijalnim sredstvima manje ili veće energije iniciranja. Utjecaj energije iniciranja na izmjerenu brzinu detonacija ANFO eksploziva dan je slikom 4-12.



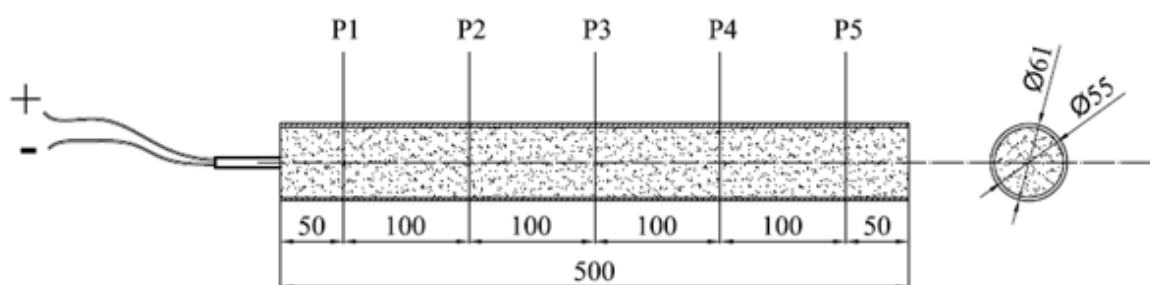
Slika 4- 12. Utjecaj energije inicijalnog sredstva na brzinu detonacije ANFO eksploziva

Utjecaj energije inicijalnog sredstva na brzinu detonacije ANFO i *Heavy* ANFO eksploziva prikazan je i u novijim istraživanjima na RGN Fakultetu. U istraživanju provedenom 2013. godine (Bohanek i dr.,2013) ispitan je utjecaj različitih inicijalnih sredstava na brzinu detonacije ANFO eksploziva. Brzina detonacije mjerena je elektrooptičkom metodom elektroničkim satom Explomet-Fo-2000. Metodom se mjeri vrijeme između dvije točke koje je potrebno fronti detonacijskoga vala da prijeđe udaljenost između njih. Na osnovi izmjerena vremena i poznate udaljenosti izračunava se brzina. Točnost mjerenja vremena iznosi $\pm 0,1 \mu\text{s}$ na ukupno trajanje do 10 000 μs . ANFO eksploziv je postavljen u čelične cijevi promjera $\text{Ø } 61/55 \text{ mm}$ i duljine 500 mm. Brzina detonacije mjerena je na 4 segmenta. Osjetila (P1-P5) su bila na međusobnoj udaljenosti od 100 mm. Udaljenost između točke iniciranja i prvog osjetila (P1) iznosila je 50 mm.

Mjerenje brzine detonacije je podijeljeno u dvije grupe ispitivanja. U prvoj grupi ispitivanja uzorci su inicirani primjenom referentnih detonatora od broja 1 do broja 5, a u drugoj grupi ispitivanja uzorci su inicirani pomoću detonatora i PETN booster različitih masa. Mase PETN booster iznosile su 20 g 50 g i 100 g. U tablici broj 4-4. dane su mase eksplozivnog punjenja detonatora Shematski prikaz postava mjerenja prikazan je na slici 4-13.

Tablica 4- 4. Masa glavnog punjenja dimenzije referentnih detonatora (Bohanek i dr.,2013)

| Detonator | Glavno punjenje (g) | A (mm) | B (mm) |
|------------|---------------------|--------|--------|
| REF. DET 1 | 0.25 | 53 | 41.6 |
| REF. DET 2 | 0.4 | 53 | 38.8 |
| REF. DET 3 | 0.6 | 53 | 34.8 |
| REF. DET 4 | 0.8 | 65.5 | 43 |
| REF. DET 5 | 1.0 | 65.5 | 39 |
| REF. DET 6 | 1.2 | 65.5 | 35 |



Slika 4- 13. Shematski prikaz postave mjerenja (Bohanek i dr.,2013)

Rezultati izmjerene brzine detonacije pri iniciranju detonatorom prikazane su tablicom 4-5. a pri iniciranju boosterom i u tablici 4-6.

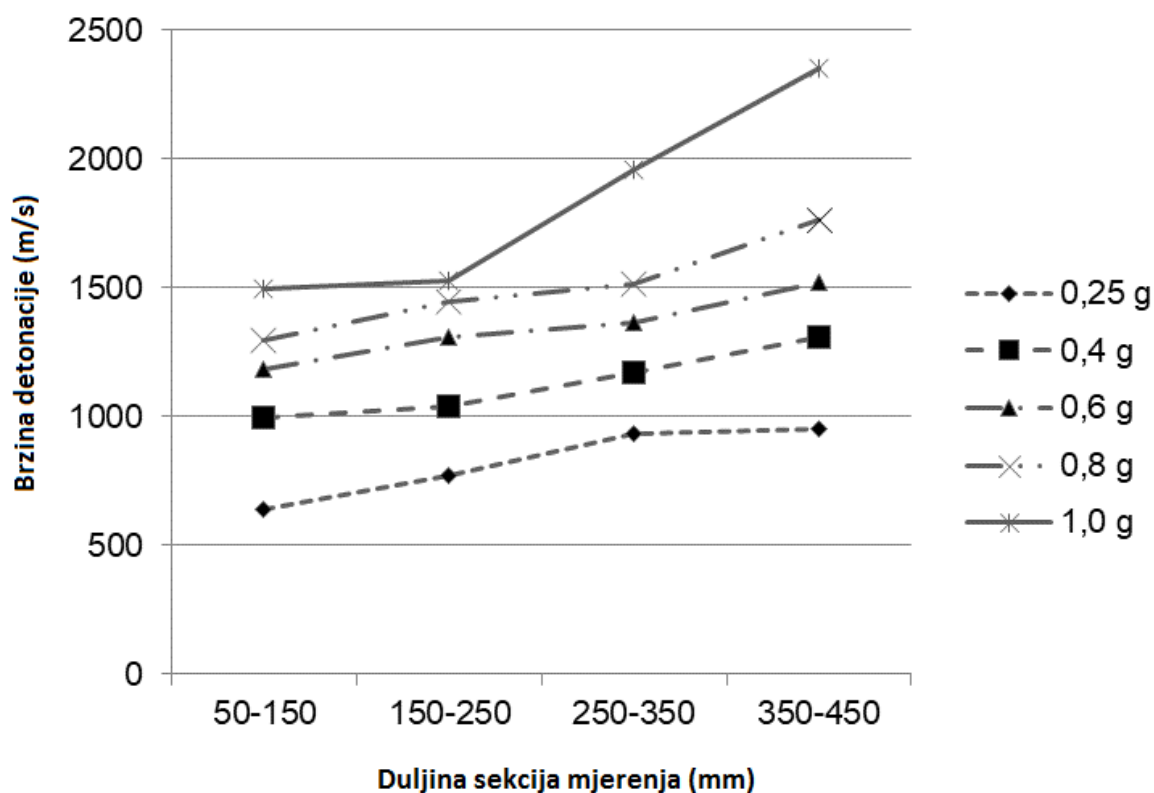
Tablica 4- 5. Rezultati mjerenja brzine detonacije uzoraka iniciranih detonatorima (Bohanek i dr.,2013)

| | Inicijalno sredstvo | Masa ekspl. [g] | Vrijeme, P1-P2 (μ s) | D, P1-P2 (m/s) | Vrijeme, P2-P3 (μ s) | D, P2-P3 (m/s) | Vrijeme, P3-P4 (μ s) | D, P3-P4 (m/s) | Vrijeme, P4-P5 (μ s) | D, P4-P5 (m/s) |
|--------------------|---------------------|-----------------|---------------------------|----------------|---------------------------|----------------|---------------------------|----------------|---------------------------|----------------|
| 1 | Ref 1 | 0,25 | 145,8 | 685 | - | - | - | - | - | - |
| 2 | Ref 1 | 0,25 | 169,4 | 590 | 127,4 | 785 | 112,1 | 892 | 100,3 | 997 |
| 3 | Ref 1 | 0,25 | - | - | 130,9 | 763 | 102,0 | 980 | 109,4 | 914 |
| Srednja vrijednost | | | 157,6 | 638 | 129,2 | 774 | 107,1 | 936 | 104,9 | 956 |
| 1 | Ref 2 | 0,4 | - | - | - | - | 85,6 | 1168 | 75,6 | 1322 |
| 2 | Ref 2 | 0,4 | 107,0 | 934 | 89,7 | 1115 | 83,3 | 1200 | 73,7 | 1356 |
| 3 | Ref 2 | 0,4 | 94,3 | 1060 | 103,6 | 965 | 87,0 | 1149 | 80,6 | 1241 |
| Srednja vrijednost | | | 100,7 | 997 | 96,7 | 1040 | 85,3 | 1172 | 76,6 | 1306 |
| 1 | Ref 3 | 0,6 | 73,9 | 1353 | 65,0 | 1538 | 73,3 | 1364 | 64,6 | 1547 |
| 2 | Ref 3 | 0,6 | 93,3 | 1064 | 87,0 | 1149 | 76,0 | 1315 | 67,2 | 1488 |
| 3 | Ref 3 | 0,6 | 88,1 | 1135 | 81,3 | 1230 | 70,9 | 1410 | 65,4 | 1529 |
| Srednja vrijednost | | | 85,1 | 1184 | 77,8 | 1306 | 73,4 | 1363 | 65,7 | 1521 |
| 1 | Ref 4 | 0,8 | 75,3 | 1328 | 69,2 | 1445 | 64,7 | 1546 | 53,5 | 1869 |
| 2 | Ref 4 | 0,8 | 84,6 | 1182 | 74,8 | 1337 | 61,1 | 1637 | 54,9 | 1821 |
| 3 | Ref 4 | 0,8 | 72,6 | 1377 | 64,6 | 1548 | 73,9 | 1353 | 62,4 | 1603 |
| Srednja vrijednost | | | 77,5 | 1296 | 69,5 | 1443 | 66,6 | 1512 | 56,9 | 1764 |
| 1 | Ref 5 | 1,0 | 61,0 | 1639 | 67,5 | 1481 | 42,9 | 2331 | 37,6 | 2659 |
| 2 | Ref 5 | 1,0 | 80,3 | 1245 | 68,9 | 1451 | 57,3 | 1745 | 47,8 | 2092 |
| 3 | Ref 5 | 10 | 62,2 | 1608 | 60,8 | 1645 | 55,7 | 1795 | 43,3 | 2309 |
| Srednja vrijednost | | | 67,8 | 1497 | 65,7 | 1526 | 52,0 | 1957 | 42,9 | 2353 |

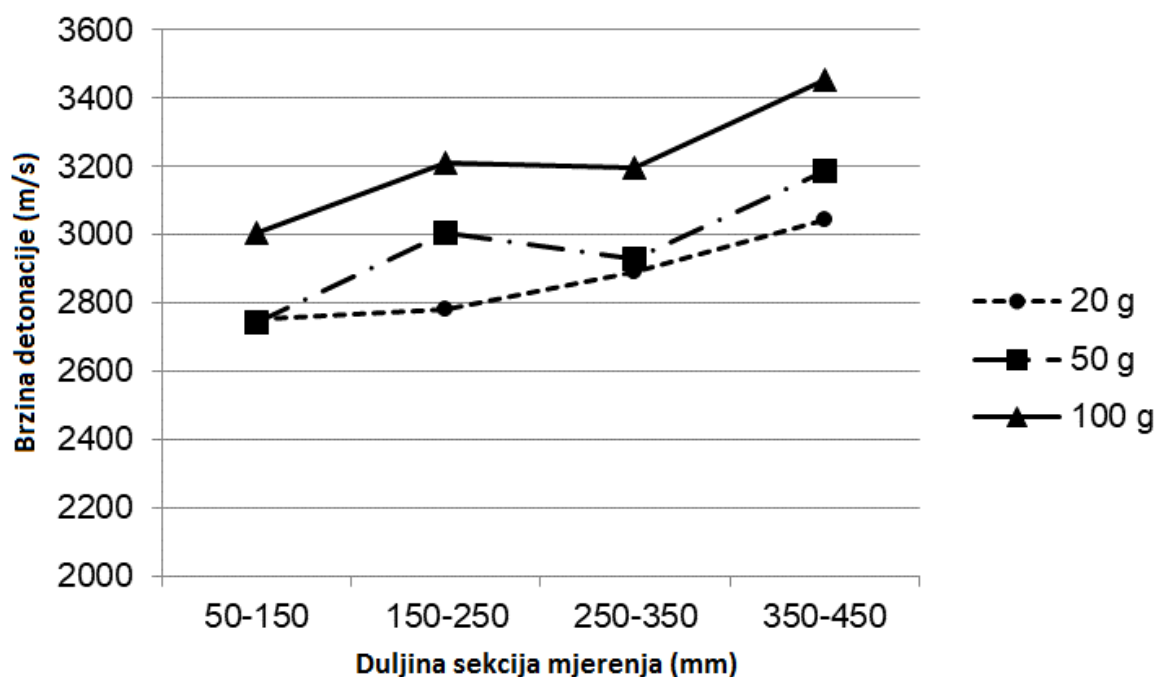
Tablica 4- 6. Rezultati mjerenja brzine detonacije uzoraka iniciranih boosterima (Bohanek i dr.,2013)

| | Inicijalno sredstvo | Vrijeme, P1-P2 (μ s) | D, P1-P2 (m/s) | Vrijeme, P2-P3 (μ s) | D, P2-P3 (m/s) | Vrijeme, P3-P4 (μ s) | D, P3-P4 (m/s) | Vrijeme, P4-P5 (μ s) | D, P4-P5 (m/s) |
|--------------------|---------------------|---------------------------|----------------|---------------------------|----------------|---------------------------|----------------|---------------------------|----------------|
| 1 | PETN 20 | 32,4 | 3086 | 36,2 | 2762 | 33,9 | 2949 | 33,3 | 3003 |
| 2 | PETN 20 | 39,8 | 2512 | 33,8 | 2958 | 33,7 | 2967 | 32,2 | 3105 |
| 3 | PETN 20 | 37,6 | 2659 | 38,1 | 2624 | 36,2 | 2762 | 33,1 | 3021 |
| Srednja vrijednost | | 36,6 | 2752 | 36,0 | 2781 | 34,6 | 2893 | 32,9 | 3043 |
| 1 | PETN 50 | 35,4 | 2825 | 33,6 | 2976 | 33,2 | 3012 | 32,1 | 3115 |
| 2 | PETN 50 | 35,9 | 2786 | 33,9 | 2950 | 32,4 | 3086 | 30,8 | 3247 |
| 3 | PETN 50 | 38,1 | 2625 | 32,3 | 3096 | 37,1 | 2695 | 31,2 | 3205 |
| Srednja vrijednost | | 36,5 | 2745 | 33,3 | 3007 | 34,2 | 2931 | 31,4 | 3189 |
| 1 | PETN 100 | 32,0 | 3125 | 30,5 | 3279 | 29,7 | 3367 | 29,2 | 3425 |
| 2 | PETN 100 | 34,5 | 2898 | 31,0 | 3225 | 34,3 | 2915 | 28,9 | 3460 |
| 3 | PETN 100 | 33,4 | 2994 | 31,9 | 3135 | 30,2 | 3311 | 28,7 | 3484 |
| Srednja vrijednost | | 33,3 | 3006 | 31,1 | 3213 | 31,4 | 3198 | 28,9 | 3456 |

Na slici 4-14. prikazan je dijagram u ovisnosti duljine pojedinih sekcija mjerenja i brzine detonacije za uzorke inicirane detonatorima. Na slici 4-15. prikazan je dijagram s istim parametrima za uzorke inicirane boosterima.



Slika 4- 14. Brzina detonacije u pojedinim sekcijama mjerenja za uzorke inicirane detonatorima (Bohanek i dr.,2013)

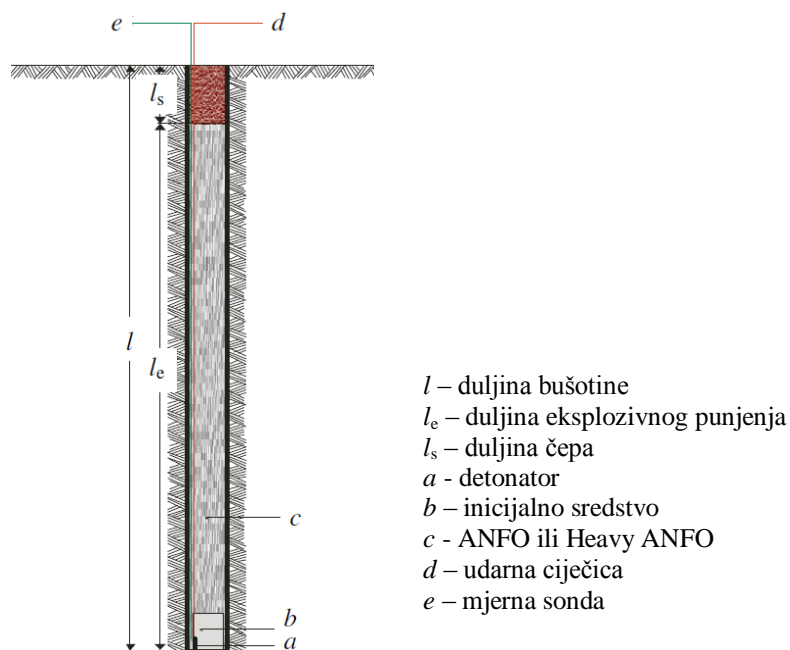


Slika 4- 15. Brzina detonacije u pojedinim sekcijama mjerenja za uzorke inicirane boosterima (Bohanek i dr.,2013)

Na osnovu analize rezultata istraživanja izvedeni su sljedeći zaključci:

- ANFO eksploziv je moguće inicirati u čeličnim cijevima detonatorima s minimalnom količinom eksplozivnog punjenja od 0,25 g.
- Brzina detonacije ANFO eksploziva raste s porastom mase eksploziva inicirajućeg sredstva. Minimalna izmjerena brzina detonacije iznosila je 590 m/s i izmjerena je prilikom iniciranja referentnim detonatorom broj 1. Maksimalna brzina detonacije iznosi 3367 m/s i izmjerena je prilikom iniciranja eksploziva PETN boosterom mase 100 g.
- Brzina detonacije raste od točke iniciranja prema kraju ispitne cijevi duljine 500 mm za sva inicirajuća sredstva. U svim slučajevima najmanje brzine su izmjerena na prvom segmentu od 50mm do 150 mm, a najveće brzine detonacije su izmjerene na zadnjem segmentu od 350 mm do 450 mm.

Istraživanje je prošireno i na iniciranje s drugim inicijalnim sredstvima u stvarnim uvjetima u minskoj bušotini. Pored ANFO eksploziva testirane su i različite mješavine ojačanog ANFO eksploziva. U ovom radu brzina detonacije eksploziva je mjerena kontinuiranom metodom u minskim bušotinama u stvarnim uvjetima (Žganec i dr., 2016). Za mjerenje je korišten Microtrap mjerni sustav s odgovarajućom mjernom sondom. Microtrap koristi dokazanu tehnologiju mjerenja kontinuiranog otpora žice za mjerenje brzine detonacije. Mjerenja su izvršena u bušotinama promjera 84 mm različitih duljina. Kao inicijalna sredstva su korištene tri različite vrste komercijalnih eksploziva. Mjerna sonda je postavljena na inicijalni naboj koji je stavljen u dno bušotine, potom je bušotina napunjena potrebnom količinom ANFO-a ili *Heavy* ANFO-a. Sve vrste eksploziva su inicirane sa svakom vrstom inicijalnog sredstva. Slika 4-16. Prikazuje poprečni presjek minske bušotine i postavljanja mjernog sustava.



Slika 4- 16. Shematski prikaz minske bušotine s mjernim sustavom (Žganec i dr,2016)

Tablica 4-7. prikazuje svojstva korištenih inicijalnih sredstava, a u tablicama od 4-8. do 4-12. prikazani su rezultati mjerenja.

Tablica 4- 7. Svojstva korištenih inicijalnih sredstava (Žganec i dr,2016)

| Primer | Tip I | Tip II | Tip III |
|-----------------------------|-------|--------|---------|
| Gustoća [kg/m^3] | 1060 | 1020 | 1360 |
| Brzina detonacije [m/s] | 4500 | 5600 | 6500 |
| Težina [kg/m^3] | 1.5 | 2.25 | 2.5 |

Tablica 4- 8. Izmjerena brzina detonacije ANFO eksploziva (Žganec i dr,2016)

| Inicijalno sredstvo | Težina eksploziva | D | Inicijalno sredstvo | Težina eksploziva | D | Inicijalno sredstvo | Težina eksploziva | D |
|---------------------|-------------------|-------|---------------------|-------------------|------|---------------------|-------------------|-------|
| | [kg] | [m/s] | | [m/s] | [kg] | | [kg] | [m/s] |
| Tip I | 33 | 3480 | Tip II | 95 | 3520 | Tip III | 46 | 3510 |
| | 25 | 3160 | | 45 | 3580 | | 45 | 3510 |
| | 28 | 3510 | | 44 | 3580 | | 35 | 3520 |
| | 25 | 3080 | | 55 | 3480 | | 28 | 3670 |
| | 15 | 3340 | | 32 | 3500 | | 20 | 3600 |
| | 27 | 2990 | | 35 | 3490 | | 45 | 3550 |
| | 27 | 3150 | | 90 | 3400 | | 25 | 3580 |
| | 45 | 3300 | | 52 | 3600 | | 25 | 3560 |
| | 27 | 3400 | | 47 | 3540 | | 30 | 3570 |
| 17 | 3410 | 52 | 3550 | | | | | |
| Srednja vrijednost | | 3280 | Srednja vrijednost | | 3520 | Srednja vrijednost | | 3560 |

Tablica 4- 9. Izmjerena brzina detonacije *Heavy* ANFO eksploziva sa 10 % emulzije (Žganec i dr,2016)

| Inicijalno sredstvo | Težina eksploziva | D | Inicijalno sredstvo | Težina eksploziva | D | Inicijalno sredstvo | Težina eksploziva | D |
|---------------------|-------------------|-------|---------------------|-------------------|-------|---------------------|-------------------|-------|
| | [kg] | [m/s] | | [kg] | [m/s] | | [kg] | [m/s] |
| Tip I | 25 | 3590 | Tip II | 35 | 3740 | Tip III | 50 | 3790 |
| | 28 | 3610 | | 35 | 3740 | | 30 | 3770 |
| | 35 | 3590 | | 55 | 3670 | | 75 | 3790 |
| | 30 | 3600 | | 45 | 3710 | | 75 | 3770 |
| | 30 | 3620 | | 40 | 3760 | | 72 | 3790 |
| | 27 | 3570 | | 37 | 3690 | | 65 | 3770 |
| | 71 | 3610 | | 35 | 3650 | | 43 | 3790 |
| | 44 | 3700 | | 40 | 3760 | | 48 | 3710 |
| | 53 | 3630 | | 45 | 3740 | | 35 | 3740 |
| | 50 | 3640 | | 29 | 3760 | | 8 | 3730 |
| Srednja vrijednost | | 3620 | Srednja vrijednost | | 3720 | Srednja vrijednost | | 3770 |

Tablica 4- 10. Izmjerena brzina detonacije *Heavy* ANFO eksploziva sa 15 % emulzije (Žganec i dr,2016)

| Inicijalno sredstvo | Težina eksploziva | D | Inicijalno sredstvo | Težina eksploziva | D | Inicijalno sredstvo | Težina eksploziva | D |
|---------------------|-------------------|-------|---------------------|-------------------|------|---------------------|-------------------|-------|
| | [kg] | [m/s] | | [m/s] | [kg] | | [kg] | [m/s] |
| Tip I | 68 | 3770 | Tip II | 58 | 3850 | Tip III | 35 | 3880 |
| | 60 | 3800 | | 50 | 3850 | | 40 | 3860 |
| | 55 | 3800 | | 50 | 3820 | | 110 | 3900 |
| | 80 | 3780 | | 70 | 3840 | | 25 | 3910 |
| | 40 | 3780 | | 50 | 3840 | | 120 | 3900 |
| | 50 | 3820 | | 85 | 3850 | | 43 | 3900 |
| | 20 | 3780 | | 55 | 3840 | | 45 | 3910 |
| | 50 | 3800 | | 82 | 3830 | | 95 | 3910 |
| | 30 | 3770 | | 50 | 3940 | | 26 | 3830 |
| | 41 | 3800 | | 40 | 3850 | | 65 | 3910 |
| Srednja vrijednost | | 3790 | Srednja vrijednost | | 3850 | Srednjav rijednost | | 3890 |

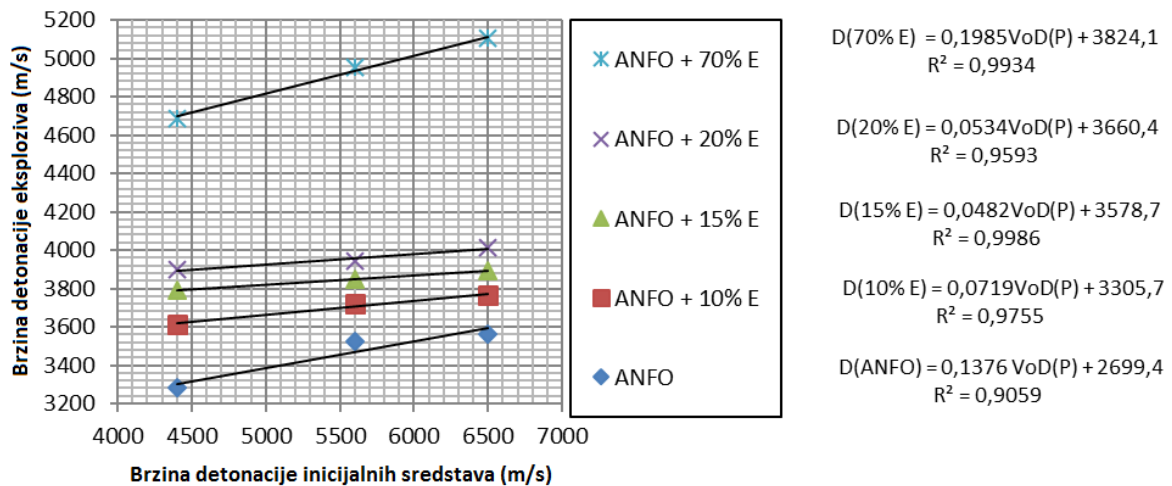
Tablica 4- 11. Izmjerena brzina detonacije *Heavy* ANFO eksploziva sa 20 % emulzije (Žganec i dr,2016)

| Inicijalno sredstvo | Težina eksploziva | D | Inicijalno sredstvo | Težina eksploziva | D | Inicijalno sredstvo | Težina eksploziva | D |
|---------------------|-------------------|-------|---------------------|-------------------|------|---------------------|-------------------|-------|
| | [kg] | [m/s] | | [m/s] | [kg] | | [kg] | [m/s] |
| Tip I | 45 | 3910 | Tip II | 55 | 3960 | Tip III | 50 | 3980 |
| | 35 | 3900 | | 45 | 3950 | | 47 | 4010 |
| | 45 | 3910 | | 40 | 3940 | | 67 | 4010 |
| | 40 | 3910 | | 40 | 3950 | | 32 | 3980 |
| | 42 | 3880 | | 37 | 3950 | | 35 | 4030 |
| | 60 | 3910 | | 45 | 3920 | | 75 | 4020 |
| | 45 | 3870 | | 40 | 3940 | | 40 | 4090 |
| | 105 | 3920 | | 45 | 3930 | | 40 | 4040 |
| | 60 | 3900 | | 50 | 3940 | | 5 | 3990 |
| 105 | 3900 | 55 | 3980 | 55 | 4000 | | | |
| Srednja vrijednost | | 3900 | Srednja vrijednost | | 3950 | Srednja vrijednost | | 4020 |

Tablica 4- 12. Izmjerena brzina detonacije *Heavy* ANFO eksploziva sa 70 % emulzije (Žganec i dr,2016)

| Inicijalno sredstvo | Težina eksploziva | D | Inicijalno sredstvo | Težina eksploziva | D | Inicijalno sredstvo | Težina eksploziva | D |
|---------------------|-------------------|-------|---------------------|-------------------|------|---------------------|-------------------|-------|
| | [kg] | [m/s] | | [m/s] | [kg] | | [kg] | [m/s] |
| Tip I | 120 | 4740 | Tip II | 120 | 5020 | Tip III | 125 | 5160 |
| | 130 | 4650 | | 130 | 4970 | | 135 | 5100 |
| | 140 | 4690 | | 135 | 4880 | | 140 | 5080 |
| | 135 | 4690 | | 35 | 4970 | | 137 | 5060 |
| | 46 | 4700 | | 40 | 5010 | | 50 | 5070 |
| | 60 | 4690 | | 93 | 4880 | | 40 | 5130 |
| | 35 | 4750 | | | | | 50 | 5120 |
| | 60 | 4630 | | | | | | |
| | 97 | 4660 | | | | | | |
| Srednja vrijednost | | 4690 | Srednja vrijednost | | 4960 | Srednja vrijednost | | 5100 |

Slika 4-17. prikazuje analizu izmjerenih brzina detonacije u odnosu na brzinu detonacije inicijalnih sredstava



Slika 4- 17. Analiza izmjerenih brzina detonacije u odnosu na brzinu detonacije inicijalnih sredstava (Žganec i dr,2016)

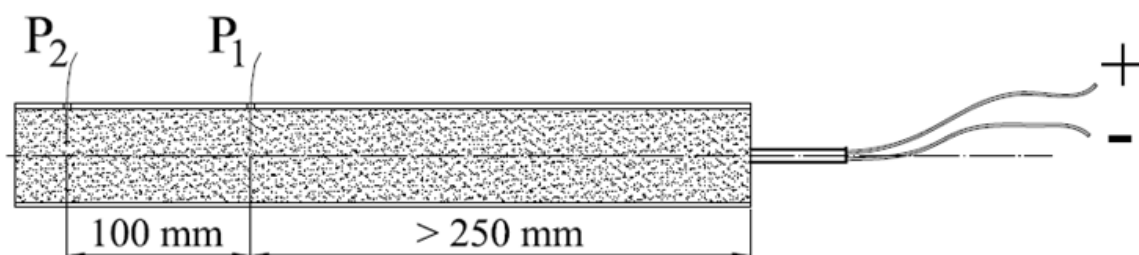
Temeljem analize podataka dobivenih mjerenjem brzine detonacije, možemo zaključiti da eksploziv identičnih svojstava u bušotini istog promjera može pokazati različite performanse odnosno više iznosa stabilne brzine detonacije, razlog za to mogu biti različiti uvjeti u pojedinim bušotinama. Brzina detonacije ovisi o svojstvima korištenog inicijalnog sredstva, jednadžbe na slici 4-17. pokazuju utjecaj brzine detonacije inicijalnih sredstava na brzinu detonacije ANFO i *Heavy* ANFO eksploziva. Povećanjem brzine detonacije inicijalnog sredstva raste i brzina detonacije ANFO i *Heavy* ANFO eksploziva. Težnja ovog istraživanja bila je bolje shvaćanje ne-idealne detonacije ANFO eksploziva.

4.4. Temperatura

Na RGN Fakultetu izvedeno je istraživanje utjecaja temperature na brzinu detonacije ANFO eksploziva (Dobrilović i dr., 2014). Testirani ANFO je miješan u AAMCOR-LLC kamionu za miješanje. Gustoća korištenih amonijsko nitratnih kuglica iznosi 822 kg/m^3 , a promjer većine kuglica iznosi između 1 i 2,38 mm. Gustoća korištenog ulja na 15°C iznosi 842 kg/m^3 . ANFO je uvijek miješan u omjeru 94,5/5,5. Za iniciranje su korišteni detonatori ili detonatori i boosteri. Korišteni električni detonatori sadrže 720 mg pentrita. A korišteni su APG 20 „Mini Booster.“

Mjerenje brzine detonacije eksploziva izvedeno je na poligonu i u Laboratoriju za ispitivanja eksplozivnih tvari. Na poligonu su ispitani uzorci veće mase, a u laboratoriju uzorci manje mase.

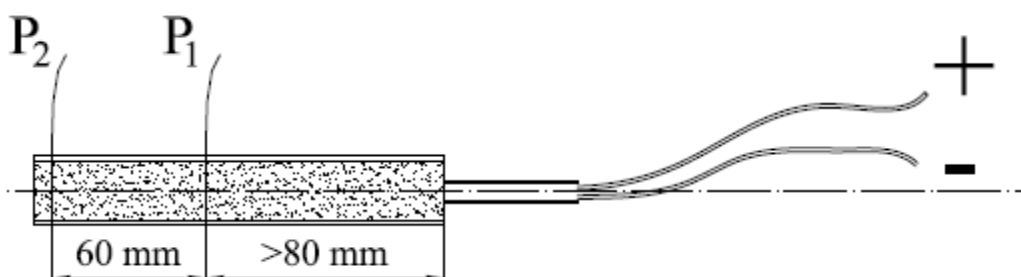
Prilikom ispitivanja na poligonu mjerena je brzina detonacije na uzorcima smještenim u čelične cijevi promjera $\text{\O} 52/57$ mm i približne duljine 400mm. Optic probe (P1 i P2) su postavljene na razmaku od 100 mm. Prvi senzor P1 je postavljen na udaljenosti većoj od 250 mm od točke iniciranja. Uzorci su inicirani primjenom detonatora ili detonatora i pojačnika. Postav mjerenja prikazan je na slici 4-18.



Slika 4- 18. Shema mjerenja brzine detonacije u čeličnoj cijevi promjera $\text{\O} 52$ mm (Dobrilović i dr., 2014)

Uzorci inicirani boosterima kondicionirani su na temperaturama od 0°C , 10°C , 15°C , 20°C i 25°C , a uzorci inicirani detonatorima na temperaturama 0°C , 10°C , 15°C , 20°C i 30°C . Neposredno prije otpucavanja uzoraka, izmjerena je i zabilježena temperatura svakog pojedinačnog uzorka.

Prilikom mjerenja brzine detonacije eksploziva u laboratoriju korištene su čelične cijevi promjera $\text{\O} 23,5/27,5$ mm i približne duljine od 160 mm. Optic probe (P1 i P2) su postavljene na razmaku od 60 mm. Prvi senzor P1 je postavljen na udaljenosti većoj od 80 mm od točke iniciranja. Uzorci su inicirani primjenom detonatora. Postav mjerenja prikazan je na slici 4-19.



Slika 4- 19. Shema mjerenja brzine detonacije u čeličnoj cijevi promjera $\text{\O} 23,5$ mm (Dobrilović i dr., 2014)

Uzorci su kondicionirani na temperaturama od 0°C do 30°C, razlika između pojedinih temperatura je iznosila 5°C. Prije otpucavanja je izmjerena i zabilježena temperatura svakog uzorka.

Izmjerena je brzina detonacije eksploziva na ukupno 53 različita uzorka, 32 uzorka u čeličnim cijevima unutarnjeg promjera Ø 52 i 21 uzorak u čeličnim cjevima unutarnjeg promjera Ø 23,5 mm. Pojedine izmjerene brzine detonacije pri različitim temperaturama prikazane su tablicama od 4-13. do 4-15. Grafički prikaz utjecaja brzine detonacije za sve mjerene postavke dana je slikom 4-20.

Tablica 4- 13. Izmjerene brzine detonacije (D) ANFO-a iniciranog boosterima, Ø 52 mm (Dobrilović i dr., 2014)

| | Duljina (mm) | Unutarnji promjer (mm) | Temperatura (°C) | D (m/s) |
|-----------|-------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|--------------------|
| 1 | 399 | 52 | 6,00 | 2624 |
| 2 | 399 | 52 | 6,30 | 2770 |
| 3 | 402 | 52 | 6,50 | 2653 |
| 5 | 401 | 52 | 10,20 | 2881 |
| 6 | 400 | 52 | 10,90 | 2933 |
| 7 | 400 | 52 | 11,30 | 2890 |
| 8 | 400 | 52 | 15,80 | 3003 |
| 9 | 402 | 52 | 16,10 | 2959 |
| 10 | 399 | 52 | 16,40 | 3067 |
| 11 | 399 | 52 | 18,80 | 3174 |
| 12 | 401 | 52 | 19,10 | 2976 |
| 13 | 398 | 52 | 18,90 | 2949 |
| 14 | 400 | 52 | 20,90 | 3185 |
| 15 | 402 | 52 | 24,90 | 3257 |
| 16 | 399 | 52 | 24,80 | 3236 |

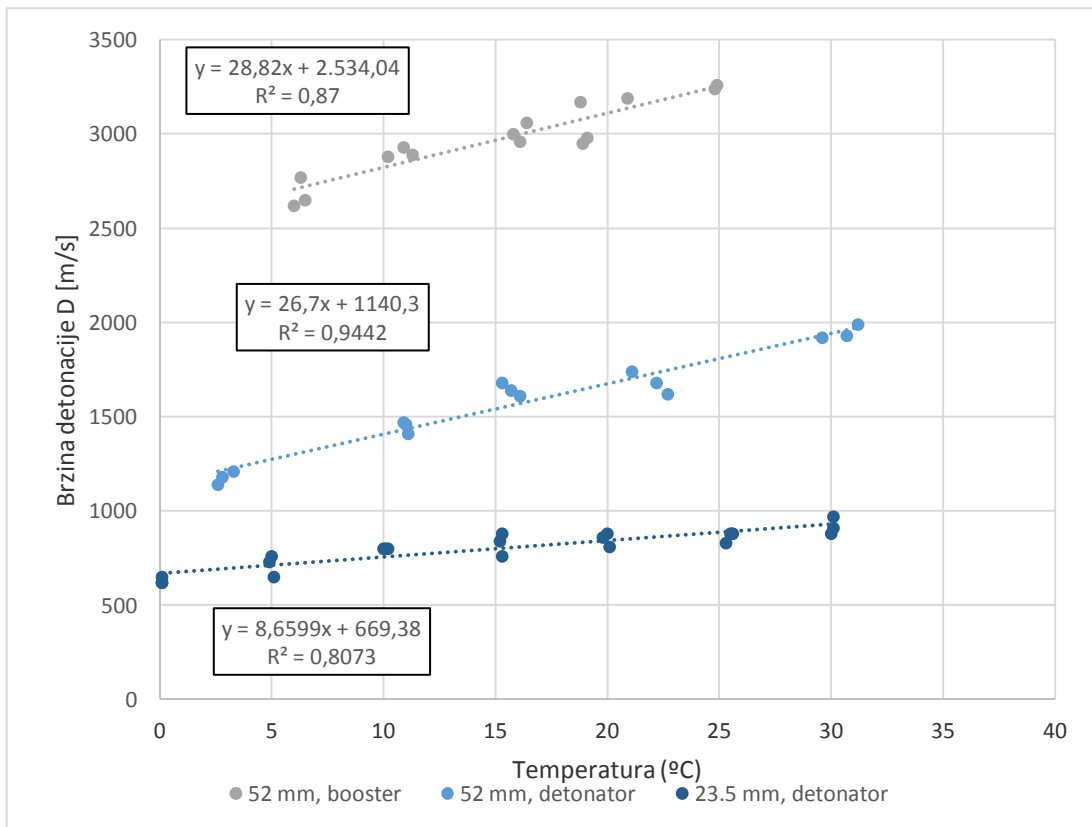
Tablica 4- 14. Izmjerene brzine detonacije (D) ANFO-a iniciranog detonatorima, Ø 52 mm (Dobrilović i dr., 2014)

| | Duljina (mm) | Unutarnji promjer (mm) | Temperatura (°C) | D (m/s) |
|-----------|-------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|--------------------|
| 1 | 402 | 52 | 2,78 | 1182 |
| 2 | 399 | 52 | 3,26 | 1212 |
| 3 | 400 | 52 | 2,61 | 1137 |
| 5 | 398 | 52 | 10,96 | 1459 |
| 6 | 401 | 52 | 11,13 | 1414 |
| 7 | 400 | 52 | 10,87 | 1472 |
| 8 | 402 | 52 | 15,29 | 1675 |
| 9 | 404 | 52 | 15,69 | 1644 |
| 10 | 398 | 52 | 16,09 | 1605 |
| 11 | 401 | 52 | 21,12 | 1742 |
| 12 | 400 | 52 | 22,69 | 1623 |
| 13 | 403 | 52 | 22,17 | 1684 |
| 14 | 399 | 52 | 29,63 | 1919 |
| 15 | 402 | 52 | 30,71 | 1931 |
| 16 | 400 | 52 | 31,16 | 1992 |

Tablica 4- 15. Izmjerene brzine detonacije (D) ANFO-a iniciranog detonatorima, Ø 23,5 mm (Dobrilović i dr., 2014)

| | Duljina (mm) | Unutarnji promjer (mm) | Temperatura (°C) | D (m/s) |
|-----------|-------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|--------------------|
| 1 | 160 | 23,5 | 0,06 | 650 |
| 2 | 156 | 23,5 | 0,09 | 619 |
| 3 | 157 | 23,5 | 0,08 | 621 |
| 4 | 158 | 23,5 | 5,01 | 763 |
| 5 | 158 | 23,5 | 5,07 | 654 |
| 6 | 163 | 23,5 | 4,92 | 725 |
| 7 | 155 | 23,5 | 9,97 | 796 |
| 8 | 155 | 23,5 | 10,08 | 806 |
| 9 | 158 | 23,5 | 10,19 | 795 |
| 10 | 156 | 23,5 | 15,27 | 879 |
| 11 | 166 | 23,5 | 15,16 | 841 |
| 12 | 160 | 23,5 | 15,31 | 761 |
| 13 | 158 | 23,5 | 19,84 | 856 |
| 14 | 160 | 23,5 | 20,01 | 887 |
| 15 | 156 | 23,5 | 20,07 | 805 |
| 16 | 156 | 23,5 | 25,26 | 833 |
| 17 | 156 | 23,5 | 25,63 | 875 |
| 18 | 159 | 23,5 | 25,47 | 881 |
| 19 | 159 | 23,5 | 30,02 | 877 |
| 20 | 153 | 23,5 | 30,08 | 910 |
| 21 | 158 | 23,5 | 30,12 | 971 |

Za vrijeme ispitivanja na terenu bilo je nemoguće postići točne ciljane temperature od 0°C, 10°C, 15°C, 20°C, 25°C i 30°C. Premda su uzorci kondicionirani na točno tražene temperature, za vrijeme postavljanja uzoraka uzorcima se temperatura promijenila zbog okolne temperature i vremena koje je potrebno da se uzorci pripreme za otpucavanje. Zbog toga je ispitivanje ponovljeno u laboratorijskim uvjetima gdje su temperature uzoraka imale željenu točnost. Slika 4.21. prikazuje odnose brzina detonacije u ovisnosti o temperaturi.



Slika 4- 20. Ispitane brzine detonacije u ovisnosti o temperaturi (Dobrilović i dr., 2014)

4.5. Obloga

Kod neidealnih eksploziva obloga može biti vrlo značajna za održavanje stabilne brzine detonacije odnosno u povećanju brzine detonacije. Što je obloga čvršća, bočna ekspanzija u primarnoj zoni je spriječena, zbog toga tlak i temperatura ne opadaju i tako povećavaju opseg gorenja u primarnoj zoni reakcije. Utjecaj obloge se pored povećanja brzine detonacije manifestira i smanjenjem kritičnog promjera za dani eksploziv. Primjerice, kod ispitivanja brzine detonacije ANFO eksploziva bez obloge, Esen je dobio minimalni kritični promjer od 63 mm (slika 4-9.) dok je pri ispitivanju eksploziva u čeličnim cijevima u laboratoriju za ispitivanje eksploziva RGN fakulteta eksploziv uspješno detonirao i u promjeru od 52 mm (tablica 4-13. i 4-14.). U recentnim istraživanjima (Jackson, 2017) istraživao je utjecaj debljine obloge za dva različita materijala, bakar i aluminij, na brzinu detonacije ANFO eksploziva. ANFO je za sva ispitivanja pripremljen na identičan način omjeru 94 % amonijev nitrat i 6 % dizelsko gorivo, unatoč tome gustoća eksploziva varira od mjerenja do mjerenja. Svi uzorci inicirani su boosterom promjera koji je jednak

unutarnjem promjeru obloge uzorka. Booster je bio 25,4 mm debel disk pentrita u plastici
Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 4-16.

Tablica 4- 16. Rezultati ispitivanja brzin detonacije ANFO-a u Cu i Al oblozi (Jackson, 2017)

| Obloga | UP (mm) | DO (mm) | L /UP | M | Gustoća (g/cm ³) | D (km/s) |
|--------|------------|------------|-------|-------|---------------------------------|-------------|
| Cu | 50,8 | 5,08 | 12,0 | 4,56 | 0,864 | 3,224 |
| Al | 76,2 | 6,35 | 12,0 | 1,14 | 0,855 | 2,936 |
| Al | 76,2 | 9,53 | 12,0 | 1,85 | 0,822 | 3,089 |
| Al | 76,2 | 12,70 | 12,0 | 2,35 | 0,895 | 3,569 |
| Al | 76,2 | 12,70 | 12,0 | 2,35 | 0,895 | 3,619 |
| Al | 76,2 | 25,40 | 12,0 | 5,52 | 0,870 | 3,949 |
| Al | 76,2 | 50,80 | 12,0 | 13,80 | 0,870 | 4,088 |
| Cu | 101,6 | 10,16 | 12,0 | 4,60 | 0,876 | 3,865 |
| Al | 101,6 | 12,70 | 16,0 | 1,73 | 0,857 | 4,114 |
| Al | 152,4 | 12,70 | 16,0 | 1,12 | 0,873 | 4,085 |
| Al | 152,4 | 25,40 | 16,0 | 2,43 | 0,865 | 4,275 |
| Al | 152,4 | 50,80 | 16,0 | 5,54 | 0,866 | 4,39 |

Gdje je:

UP – unutarnji promjer cijevi

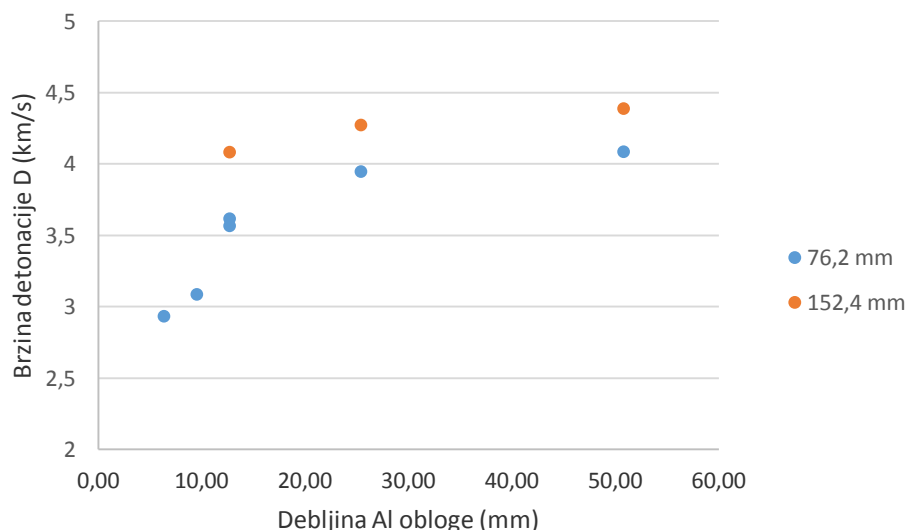
DO – debljina obloge

L/UP – omjer duljine i unutarnjeg promjera obloge

M – omjer mase obloge i eksploziva

D – brzina detonacije

Prema podacima u tablici 4-16. izrađem je dijagrama prikazan slikom 4-21. Na dijagramu je prikazan utjecaj debljine aluminijske obloge na brzinu detonacije ANFO eksploziva za dva različita promjera cijevi.



Slika 4- 21. Utjecaj debljine Al obloge na brzinu detonacije

Utjecaj obloge ima i praktičnu primjenu pri miniranju u rudarstvu. Miniranje se izvodi u različitim stijenama koje imaju i različita fizičko mehanička svojstva. Stijena u ovom slučaju predstavlja oblogu. A sam proces je znatno složeniji jer uključuje i fragmentaciju stijenske mase. Pri istraživanju utjecaja stijene kao obloge izvedena su šezdeset četiri mjerenja brzine detonacije u nekoliko rudnika u Turskoj uz ispitivanja bez obloge (Bilgin i drugi, 1999). Podatke o brzini detonacije s oblogom su iznjeli Bilgin i Esen (1999 i 2000). Ispitano je devet komercijalnih eksploziva u raznim uvjetima stijene (jednoosne tlačne čvrstoće 15,3 - 108,0 MPa; Youngovog modula elastičnosti 9,1 - 91,7 GPa) i promjera minske bušotine 32 - 241 mm. Brzine detonacije s oblogom protezale su se od 2116 do 5041 m/s.

Na temelju mjerenja razvijen je sljedeći empirijski model:

$$D_{confined} = D_{unconfined} + a * \left[\frac{D_{CJ} - D_{unconfined}}{D_{CJ}} * \frac{K}{1 + b * K} \right] \quad (4-1)$$

gdje su:

$D_{confined}$ - brzina detonacije s oblogom

$D_{unconfined}$ - brzina detonacije bez obloge

a i b - konstante s vrijednostima 112,819 i 0,132

K - čvrstoća stijene [GPa]

Čvrstoća stijene K računata je prema sljedećoj fomruli:

$$K = \frac{E_d}{1 + \nu_d}, \quad (4-2)$$

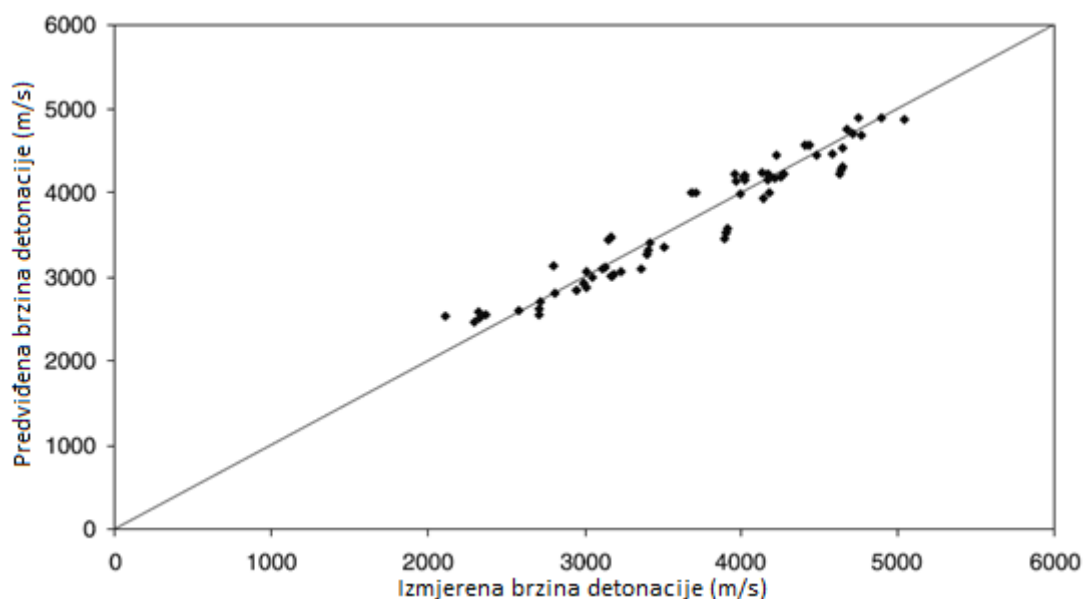
gdje su:

E_d - youngov modul elastičnosti [GPa]

ν_d - poissonov koeficijent

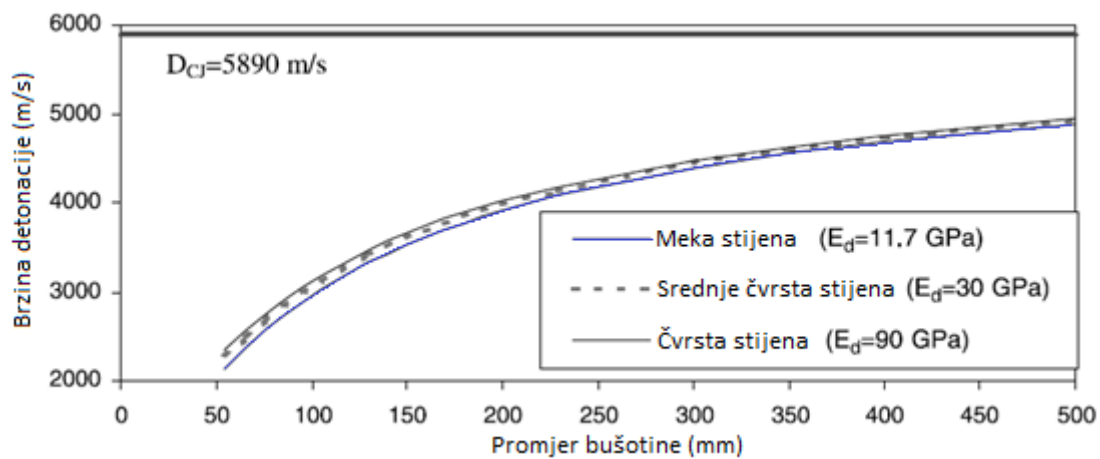
Analiza podataka ne linearnom regresijom pokazala je da se obloga može opisati kao funkcija ovisna o svojstvima eksploziva i stijene. Svojstva stijene opisana su kao funkcija ovisna njihovoj gustoći, brzini P valova i brzini S valova u intaknoj stijeni. Brzina idealne detonacije određena je VIXEN – I računalnim modelom (Esen, 2004).

Konstruirani model vrijedi za stijene s youngovim modulom elstičnosti manjim od 92 GPa, iako može vrijediti i za veće vrijednosti u nekim slučajevima. Model predviđa izmjerenu brzinu detonacije s popriličnom točnošću, također uzima u obzir da je eksploziv pripremljen i detoniran prema uputama proizvođača. Slika 4-22. prikazuje izmjerene i predviđene brzine detonacije s oblogom.



Slika 4- 22. Izmjerene i predviđene brzine detonacije prema jednadžbi 3.3. (Esen, 2004)

Slika 4-23. prikazuje predviđanja modela za performansu eksploziva Blend 1 u raznim stijenama (oblozi) i promjerima minske bušotine.



Slika 4- 23. Predviđen utjecaj obloge i promjera minske bušotine za eksploziv Blend 1 prema jednadžbi 4.1.

5. ZAKLJUČAK

Proces detonacije eksploziva je vrlo kompleksan i još uvijek nije shvaćen do željene mjere. Ova činjenica se naročito odnosi na eksplozive s ne-idealnom detonacijom. Međutim eksplozivi ne-idealne detonacije poput ANFO-a češće nalaze svoju primjenu u rudarskim i srodnim gospodarskim radovima, zbog čega je bitno znati činjenice koje će pomoći pri postizanju optimalnih detonacijskih parametara. Pošto je ANFO jedan od najčešće korištenih eksploziva koji daje zadovoljavajuće rezultate detaljnije je opisano djelovanje različitih faktora na brzinu detonacije.

Ako ga promotrimo bez utjecaja vanjskih faktora, brzina detonacije ANFO eksploziva značajno ovisi o svojstvima granula amonijevog nitrata. Brzina detonacije ANFO eksploziva je obrnuto proporcionalna veličini kuglica amonijevog nitrata, a njihova veća poroznost ima znatno veći utjecaj na granice detonabilnosti, jer o poroznosti ovisi apsorpcija nafte.

Heavy ANFO eksplozivi kombiniraju svojstva ANFO eksploziva sa svojstvima emulzijskih eksploziva. S jedne strane ANFO eksplozivi su jeftiniji, a s druge strane emulzijski eksplozivi pružaju vodootpornost, idealniju i stabilniju detonaciju, manju emisiju plinova, manji kritični promjer te povećanu osjetljivost na iniciranje.

Brzina detonacije značajno ovisi o promjeru bušotine ili o promjeru samog naboja. Svi eksplozivi prikazani u radu pokazali su da brzina detonacije raste s promjerom. Oblik poprečnog presjeka u kojem detonira eksploziv uglavnom je radijalan, podatci o brzini detonacije u drugim oblicima nedovoljno su istraženi.

Istraživanja izvedena na području utjecaja energije inicijalnog sredstva pokazala su da se stabilnija detonacija i veća brzina detonacije postiže inicijalnim sredstvima veće energije. Sam ANFO eksploziv iniciran detonatorom uglavnom ne detonira, već eksplozivno sagorjeva brzinom manjom od 1000 m/s. Zbog toga ANFO eksploziv se u praksi uglavnom inicira boosterom ili patronom drugog eksploziva veće brzine detonacije. *Heavy* ANFO eksplozivi pokazuju veću brzinu detonacije s većim sadržajem emulzije te sa korištenjem jačeg inicirajućeg sredstva.

Proučavanje utjecaja temperature na brzinu detonacije eksploziva pokazalo je da brzina detonacije ANFO eksploziva raste sa povećanjem temperature. U slučaju većih izmjerenih brzina detonacije zbog većeg promjera ili jačeg inicijalnog impulsa pravac koji opisuje točke mjerenja ima veći nagib. Što dovodi do zaključka da bi se u stvarnim uvjetima miniranja u bušotini moglo očekivati veće smanjenje brzine detonacije s manjim

promjenama u temperaturi naboja. Dobiveni rezultati bi se trebali dokazati u stvarnim uvjetima minske bušotine (Dobrilović i drugi 2014).

Utjecaj obloge kod eksploziva ne-idealne detonacije može biti vrlo značajan, pošto čvršća obloga smanjuje opadanje tlaka i temperatura u zoni reakcije, što povećava opseg gorenja, odnosno zona reakcije se skraćuje, a detonacija postaje brža i stabilnija. Utjecaj obloge na brzinu detonacije je modeliran empirijski temeljen na terenskim mjerenjima brzine detonacije.

U radu su opisani glavni čimbenici koji utječu na brzinu detonacije ANFO I *HEAVY* ANFO eksploziva. Premda u literaturi postoje brojni radovi o ovom području, ostalo je još dosta prostora za istraživanje i potpuno shvaćanje neidealne detonacije. U postojećim radovima navise se koriste računalni modeli i empirijski podaci. Računalni modeli ne mogu funkcionirati samostalno bez unošenja vanjskih podataka dobivenih empirijskim istraživanjima. Prema tome ova dva načina predviđanja i opisivanja procesa detonacije su usko vezana.

6. LITERATURA

BOHANEK, V., 2011. *Model nastajanja i analiza djelovanja kumulativnog procesa linearnih eksplozivnih naboja*. Zagreb, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

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

KRSNIK, J., 1989. *Miniranje*. Zagreb, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

ESEN, S. 2004. *A statistical approach to predict the effect of confinement on the detonation velocity of commercial explosives*. Rock mechanics and rock engineering, 37(4), str. 317-330.

ESEN, S. 2004. *A non-ideal detonation model for commercial explosives*. Brisbane, Julius Kruttschnitt mineral research centre, Department of mining, minerals and materials engineering, University of Queensland.

DOBRILOVIĆ, M., BOHANEK, V., ŽGANEC, S., 2014. *Influence of explosive charge temperature on the velocity of detonation of ANFO explosives*. Central european journal of energetic materials, 11 (2), str. 191-197.

HURLEY, C., 2013. *Development of ammonium nitrate based explosives to optimize explosive properties and explosive welding parameters used during explosion cladding*. Colorado, Mountain scholar home, Colorado school of mines.

ŽGANEC, S., BOHANEK, V., DOBRILOVIĆ, M. *Influence of a primer on the velocity of detonation of ANFO and Heavy ANFO blends*. Central european journal of energetic materials 13 (3), str. 701-711.

JACKSON, S.I., 2017. *The dependence of ANFO detonation on confinement*. Proc. Of the comb. Inst., vol. 36

BYERS BROWN, W., 2002. *Critical review of theories of steady non-ideal two-dimensional detonation of condensed explosives*. Velika Britanija, Mass Action.

SMITH, G., 2000. *ShotTrack VoD system evaluation*. Australia, internal report, Matrix consultants.

BILGIN, H.A., ESEN, S. 1999. *Assessment of ideality of some commercial explosives*. 25th conference on explosives and blasting technique, Nashville, Tennessee, SAD, vol. 1, str. 35-44.

BILGIN, H.A., ESEN, S. 2000. *Results and impact of in-situ continuous velocity of detonation measurements*. Ninth international symposium on mine planning and equipment selection, Atena, str. 21-26.

BILGIN, H.A., ESEN, S., KILIC, M. 1999. *Patarge project*. Ankara, Internal report, Bartusan A.S., Elmadag.

JOHANSSON, C.H., PERSSON, P.A., 1970. *Detonic of High Explosives*. Stockholm, Swedish Detonic Research Foundation.

