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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:419197

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

BRZINA DETONACIJE ANFO EKSPLOZIVA

Diplomski rad

Jurica Pinter

R131

Zagreb, 2019.

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Diplomski rad

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 profersor 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, izvanredeni profesor RGNF
Dr. sc. Vinko Škrlec, docent RGNF

Datum obrane: 21.2.2019., Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu

University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Master's Thesis

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 comonly 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 papers 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 empiric data paper uses data obtained with detonation modelling.

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

Thesis contains: 40 pages, 17 tables, 33 figures, 0 appendixes, i 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 Surename, PhD

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

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

Defence date: February 21, 2019, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

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 *HEAVY* ANFO EKSPLOZIVI 7
4. ČIBENICI KOJI UTJEČU NA BRZINU DETONACIJE ANFO I *HEAVY* 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 proizvodnej 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 cm^3/100 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 Ø 52 mm (Dobrilović i dr., 2014) 30
Slika 4- 19. Shema mjerenja brzine detonacije u čeličnoj cijevi promjera Ø 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 *Heavy* 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 *Heavy* ANFO eksploziva sa 10 % emulzije (Žganec i dr,2016) 27
Tablica 4- 10. Izmjerena brzina detonacije *Heavy* ANFO eksploziva sa 15 % emulzije (Žganec i dr,2016) 27
Tablica 4- 11. Izmjerena brzina detonacije *Heavy* ANFO eksploziva sa 20 % emulzije (Žganec i dr,2016) 28
Tablica 4- 12. Izmjerena brzina detonacije *Heavy* 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/μs	brzina detonacije
T	°C, °K	temperatura
m	mg, g, kg	masa
t	μs	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

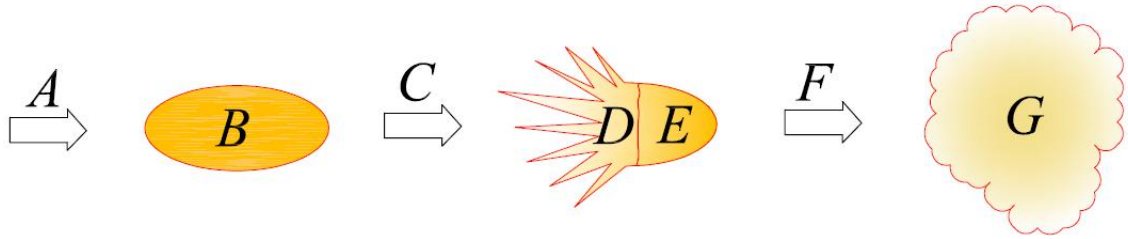
Eksplozivi su kemijski spojevi ili smjese koje imaju sposobnost da pod utjecajem vanjskog energetskog impulsa detoniraju, odnosno kemijski se razlažu u vrlo kratkom vremenskom periodu oslobađajući znatnu količinu plinova i topline (Krsnik 1989).

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

C - kemijski proces pretvorbe,

D - plinoviti produkti,

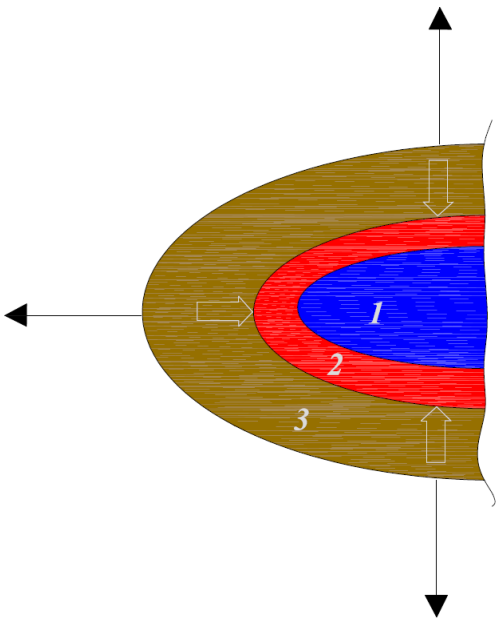
E - neporemećena eksplozivna tvar,

F - ekspanzija plinovitih produkata,

G - plinoviti produkti u ekspanziji ($T \approx 2000\text{-}5000$ °K, $v \approx 1000$ kg/dm^3, $p \approx 10^5$ bar, $Q \approx 3{,}5\text{-}7{,}5$ 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 deflargacija odvija se bez sudjelovanja vanjskog kisika u reakciji, brzinom manjom od brzine zvuka. Slika 2-2. prikazuje proces deflargacije.



Kazalo:
1 - neporemećena eksplozivna tvar,
2 - zona kemijskih reakcija,
3 - sagorjela tvar,
⇒ - smjer plamene fronte,
→ - smjer produkata sagorijevanja.

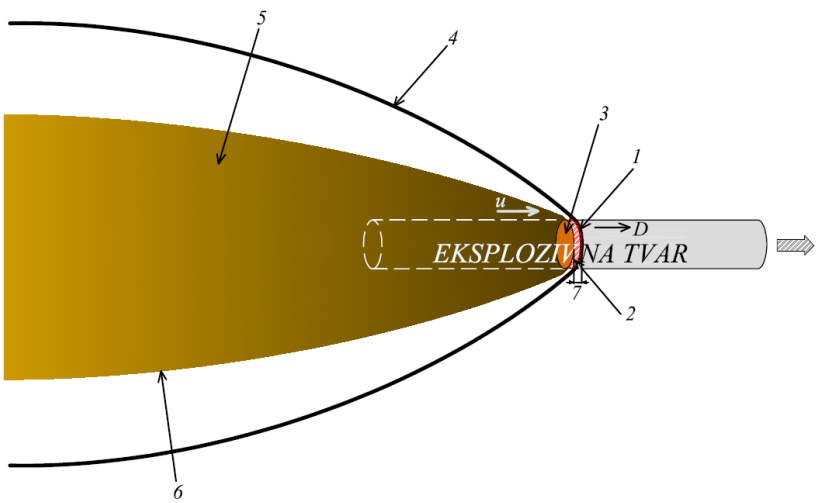
Slika 2- 2. Proces sagorijevanja u eksplozivnoj tvari (Dobrilović, 2010)

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.).

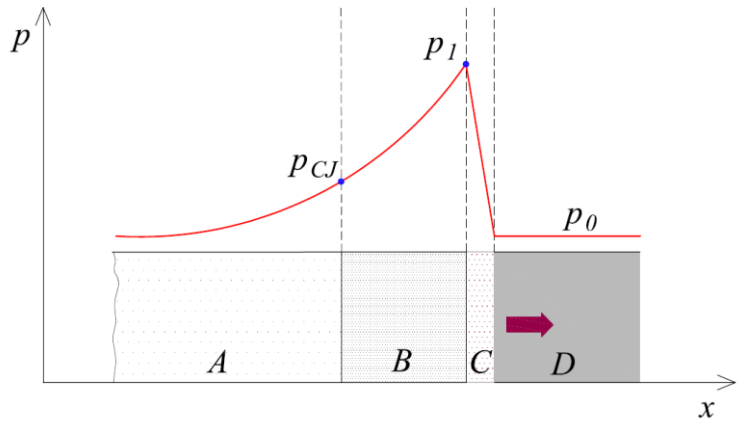
U praksi detonacija je inicirana: dovođenjem toplinskog impulsa eksplozivnom materijalu, prelaskom deflargacije u detonaciju, što vrijedi samo za inicijalne eksplozive, djelovanjem udarnog impulsa i toplim točkama, što vrijedi za sekundarne eksplozive. Kako bi se razvila stabilna detonacija, energija 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 rekacija prethodi fronta udarnog vala, cijeli proces se odvije u redu ns do µs. 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.



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

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



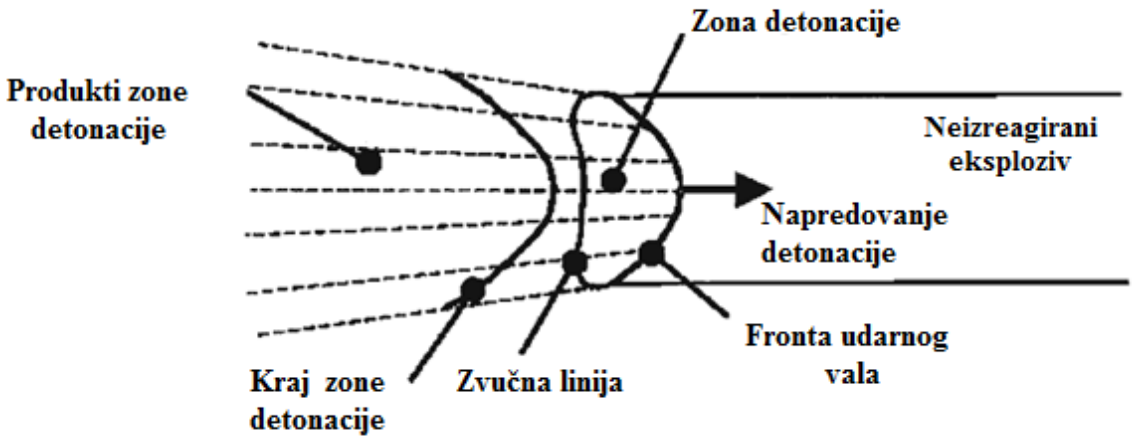
Kazalo:
A - produkti detonacije,
B - zona kemijskih reakcija,
C - fronta udarnog vala
D - neporemećeni eksploziv,
P - tlak (bar, Pa),
x - duljina,
p_{CJ} - tlak u CJ točki,
p_1 - vršni tlak udarne adijabate (von Neumanov vrh),
p_0 - tlak okoline (bar, Pa).

Slika 2- 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 oslobađena 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.

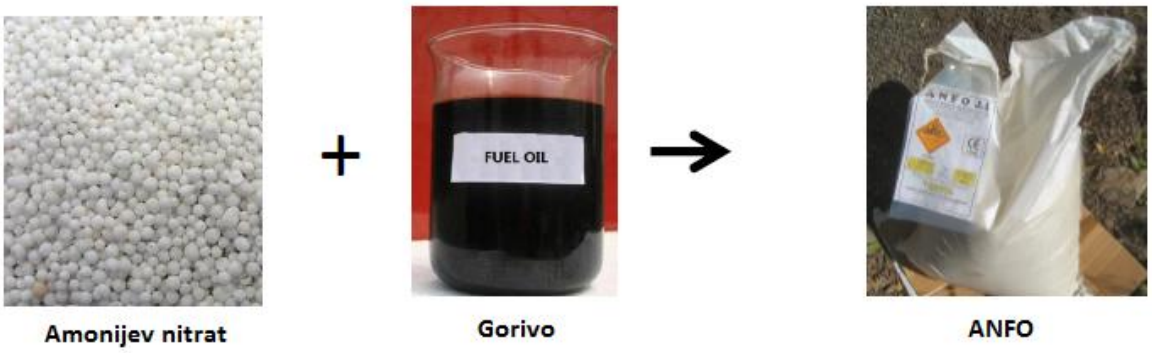
Poboljšanja modela detonacijskih procesa uključuju promatranje detonacijskih valova u prostoru. Modeli trebaju uzeti u obzir postupno reagiranje eksplozivne tvari pod djelovanjem tlaka i odrediti veličine politropskog (adijabatskog) eksponenta za realne tvari u području izuzetno visokih tlakova i temperatura. 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 deflargaciju 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. mikrobaloni) 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		
Emulzijski eksploziv	ANFO	
20	80	↓ Vodootpornost
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

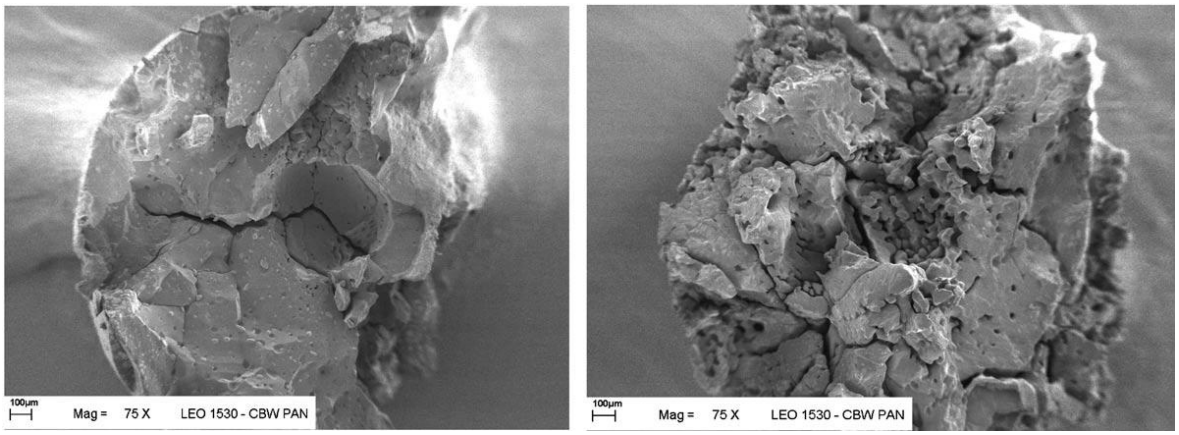
Pregledom literature i recentnih istraživanja ustanovljeno je više čimbenika koji imaju utjecaj na brzinu detonacije ANFO i Heavy ANFO eksploziva. Utjecajni čimbenici su:

- Dimenzije i proroznost 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 proroznost amonijeva nitrata te sadržaj nafte**

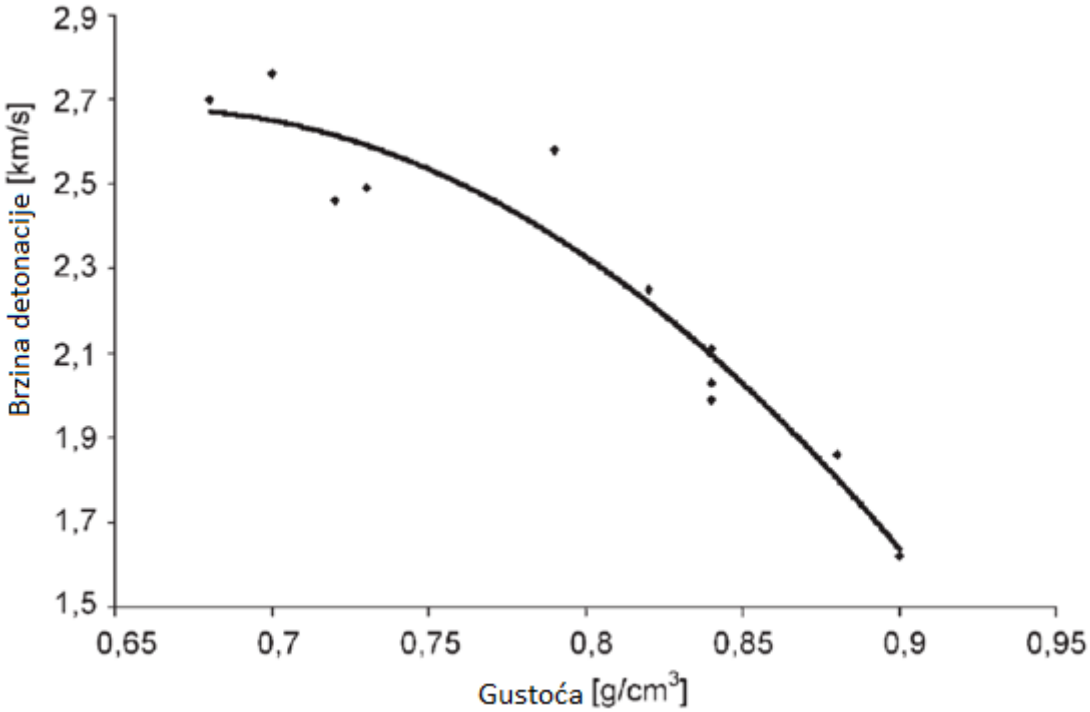
Zygmunt i Buczkowski (Zygmunt i Buczkowski, 2007) ispitivali su utjecaj dimenzija amonij nitratnih kuglica, poroznosti i sadržaja nafte na brzinu detonacije ANFO eksploziva. Istraživanje je izvedeno na kuglicama amonijevog nitrata s različitim dimenzijama i mogućnosti adsorpcije nafte. Prikaz kuglica 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 cm^3/100 g u nekoliko termalnih ciklusa (desno) (Zygmunt i Buczkowski, 2007)

AN kuglice različite poroznosti dimenzija 1,5 mm-2,5 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% RDX : 10% TNT. Granule s mogućnosti apsorpcije manjom od 2.5 cm^3/100 g nisu detonirale. Izmjerena brzina detonacije kod granula s

mogućnosti upijanja od 2.5 – 3.0 cm^3/100 g iznosila je između 1600 m/s i 1700 m/s. Kod granula s mogućnošću upijanja 12 – 15 cm^3/100 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.



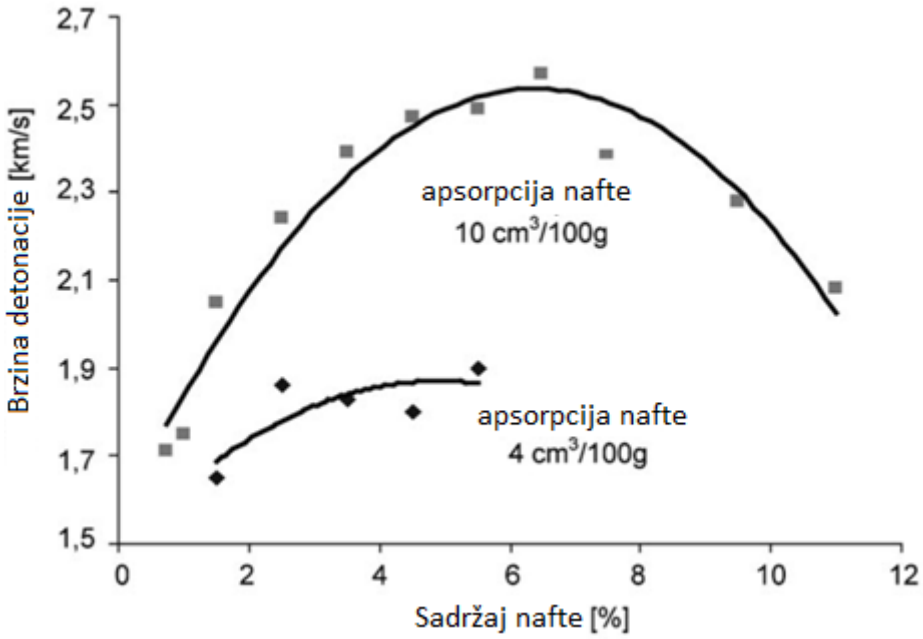
Slika 4- 2. Utjecaj dimenzija granula ispitan je na granulama dimenzija manjim od 0,50 mm do 1,2 mm (Zygmunt i Buczkowski, 2007)

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 (4cm^3/100g i 10cm^3/100g) , 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.

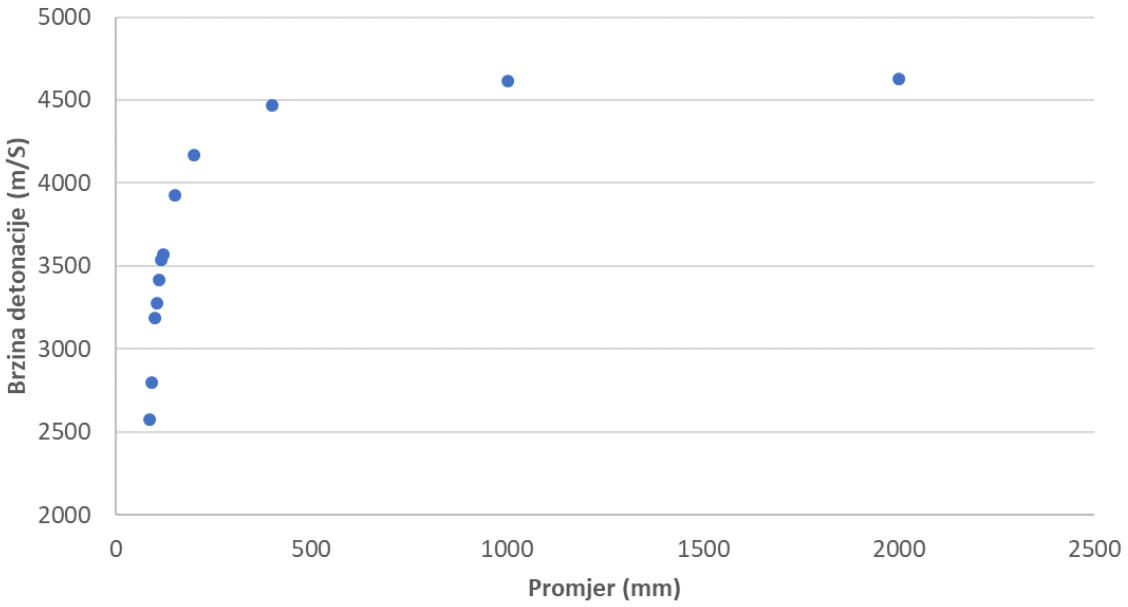
4.2. **Promjer i oblik poprečnog presjeka**

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 brzine 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 sondi 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 naboje 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.

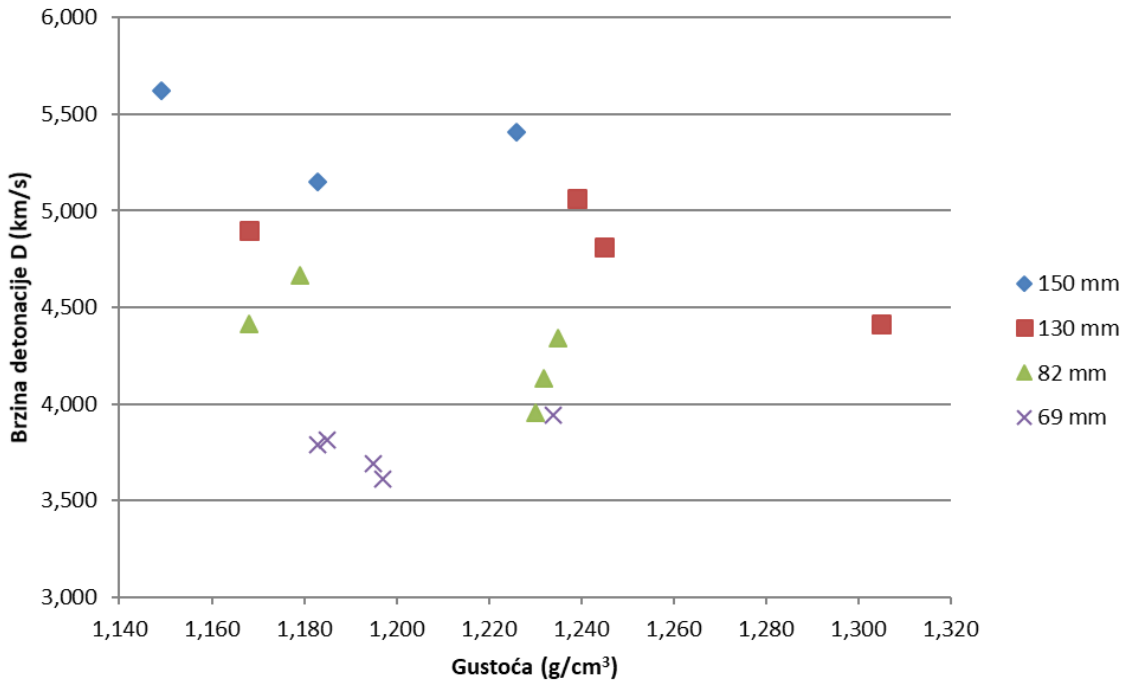
Heavy ANFO 1 i ANFO 1: Promjer cijevi varira od 63 mm do 241 mm. Eksploziv je zamiješan u kamionu, cijevi većeg promjera su punjene direktno iz kamiona, dok su cijevi manjeg promjera punjene iz kanti. Cijevi su napunjene, zatvorene i izvagane. Svi pripremljeni naboji otpucani su istog dana.

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.

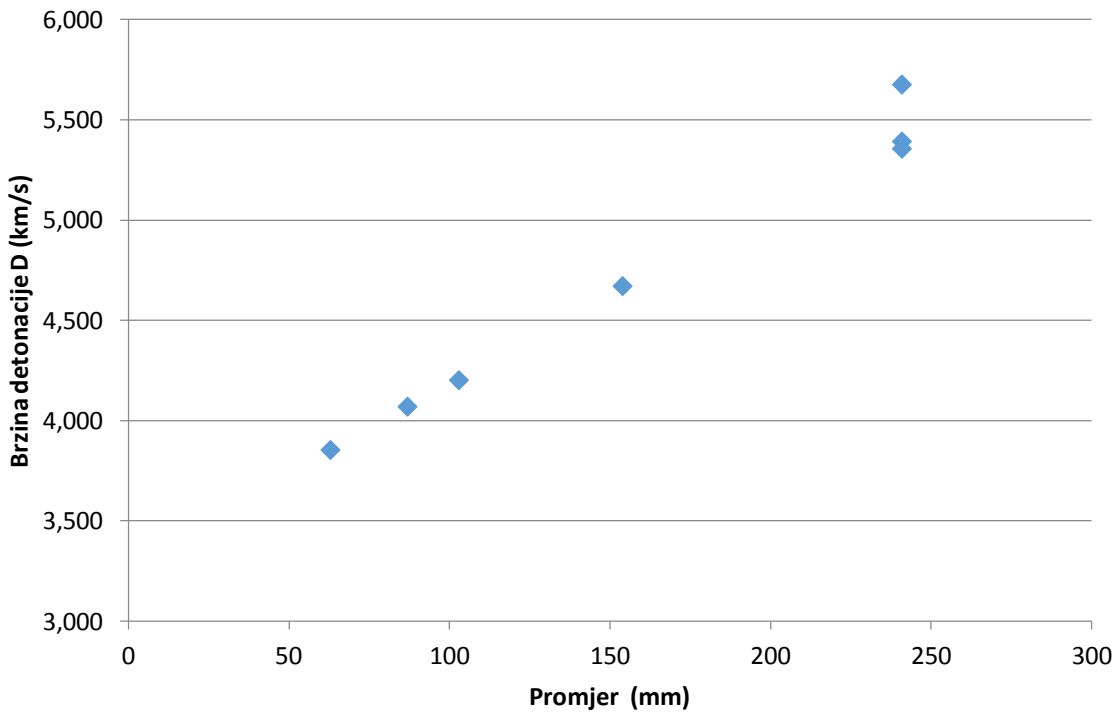


Slika 4- 5. Odnos gustoće eksploziva i brzine detonacije za Blend 1 (Esen,2004)

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 podatcima 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.

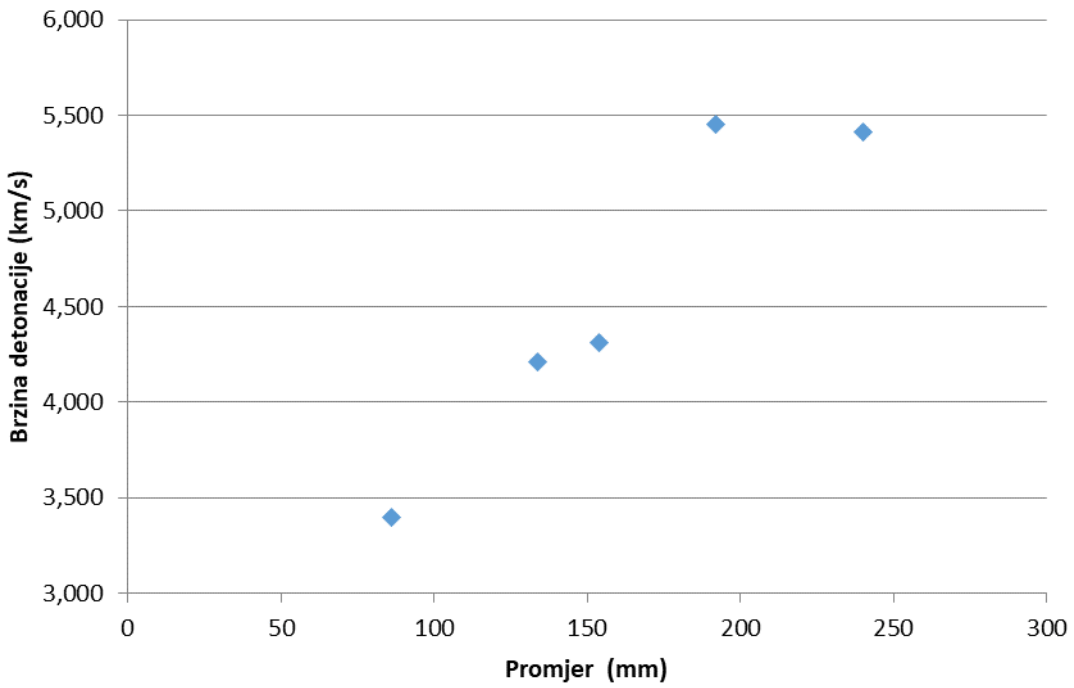


Slika 4- 6. Odnos promjera naboja i brzine detonacije za Blend 2 (Esen, 2004)

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.

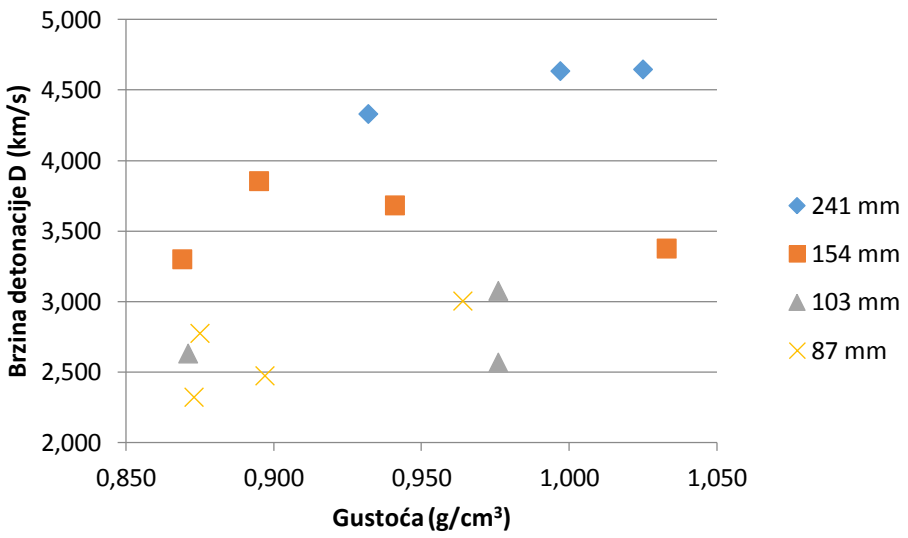


Slika 4- 7. Odnos promjera naboja i brzine detonacije za Blend 3 (Esen,2004)

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.

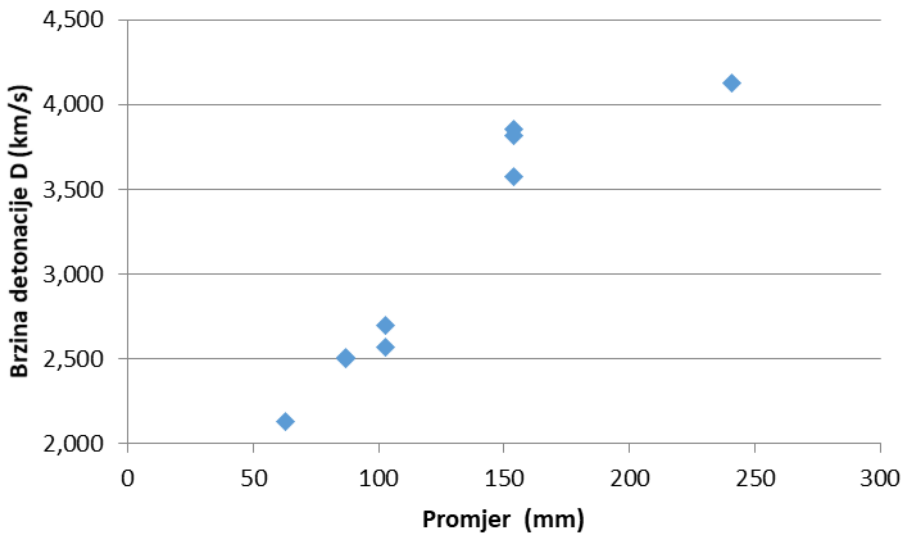


Slika 4- 8. Odnos gustoće i brzine detonacije za Heavy ANFO 1 (Esen, 2004)

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 dijgaram potvrđuje činjencu 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.

ANFO1 (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.

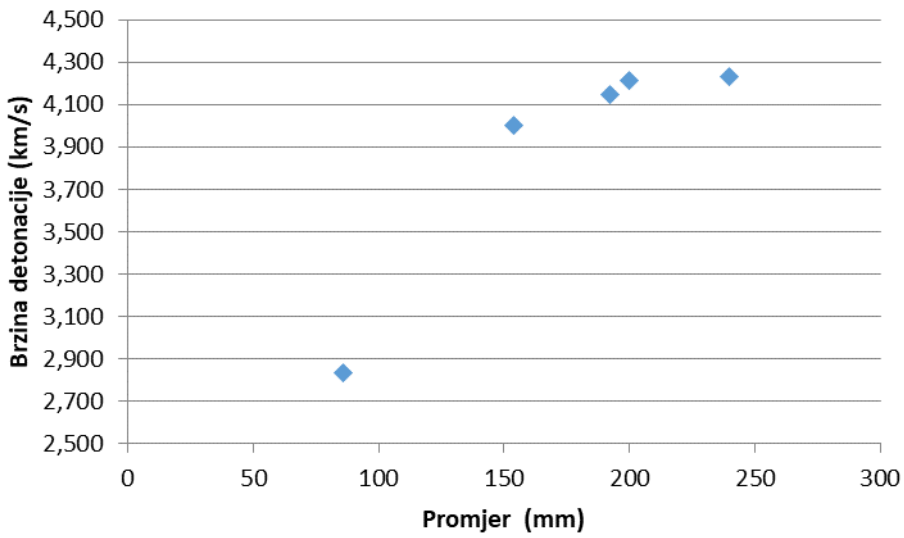


Slika 4- 9. Odnos promjera naboja i brzine detonacije za ANFO 1 (Esen, 2004)

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.

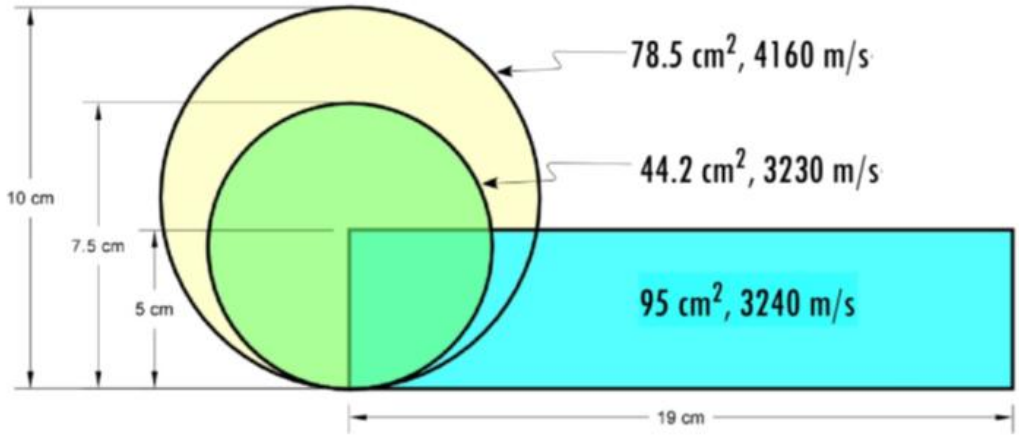
ANFO2 (ANFO)

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)

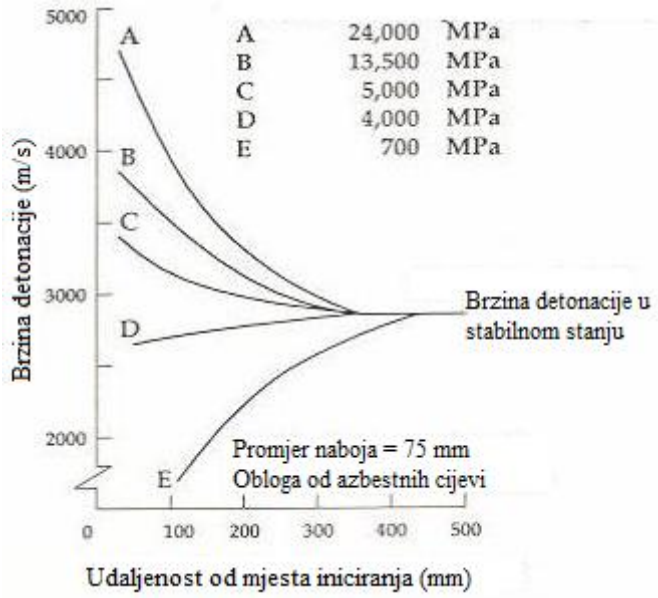
Pri miniranju se ANFO eksploziv direktno sipa u bušotine ili se stavlja u patrone i u oba slučaja ima kružni poprečni presjek. Pri zavarivanju metala eksplozivom ili u nekim drugim postupcima koriste se eksplozivni naboji s različitim oblicima poprečnog presjeka. Primjećeno je da osnik poprečnog presjeka ima znatan utjecaj na izmjrenu 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 inciranja na izmjerenu brzinu detonacija ANFO eksploziva dan je slikom 4-12.



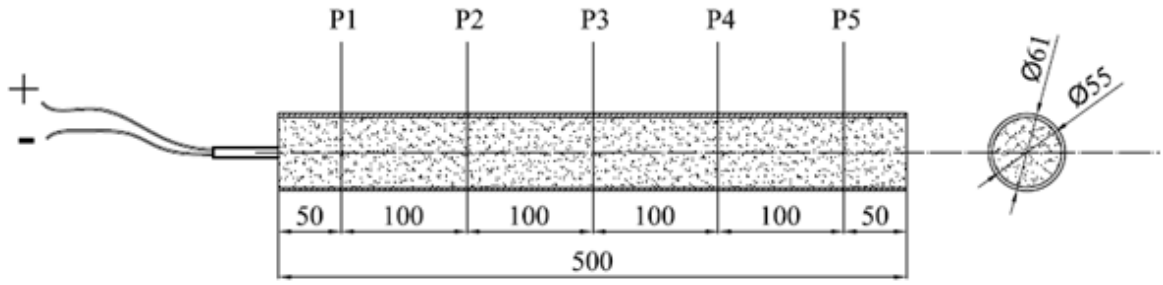
Slika 4- 12. Utjecaj energije inicijalnog sredstva na brzinu detonacije ANFO eksploziva

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 izmjerenoga vremena i poznate udaljenosti izračunava se brzina. Točnost mjerenja vremena iznosi ± 0,1 μs na ukupno trajanje do 10 000 μs. ANFO eksploziv je postavljen u čelične cijevi promjera Ø 61/55 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 boostera različitih masa. Mase PETN boostera 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.

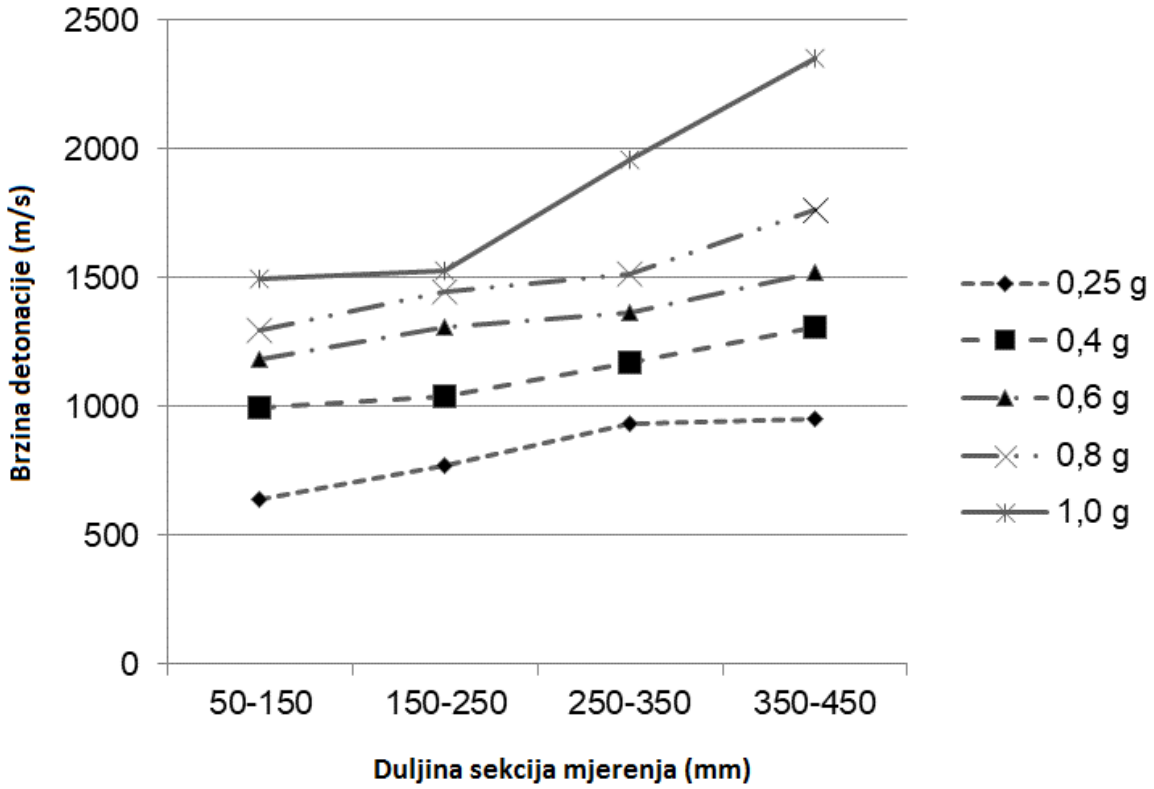
Tablica 4- 5. Rezultati mjerenja brzine detonacije uzoraka iniciranih detonatorima (Bohanek i dr.,2013)

	Inicijalno sredstvo	Masa ekspl. [g]	Vrije-me, P1-P2 (μs)	D, P1-P2 (m/s)	Vrije-me, P2-P3 (μs)	D, P2-P3 (m/s)	Vrije-me, P3-P4 (μs)	D, P3-P4 (m/s)	Vrije-me, P4-P5 (μs)	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

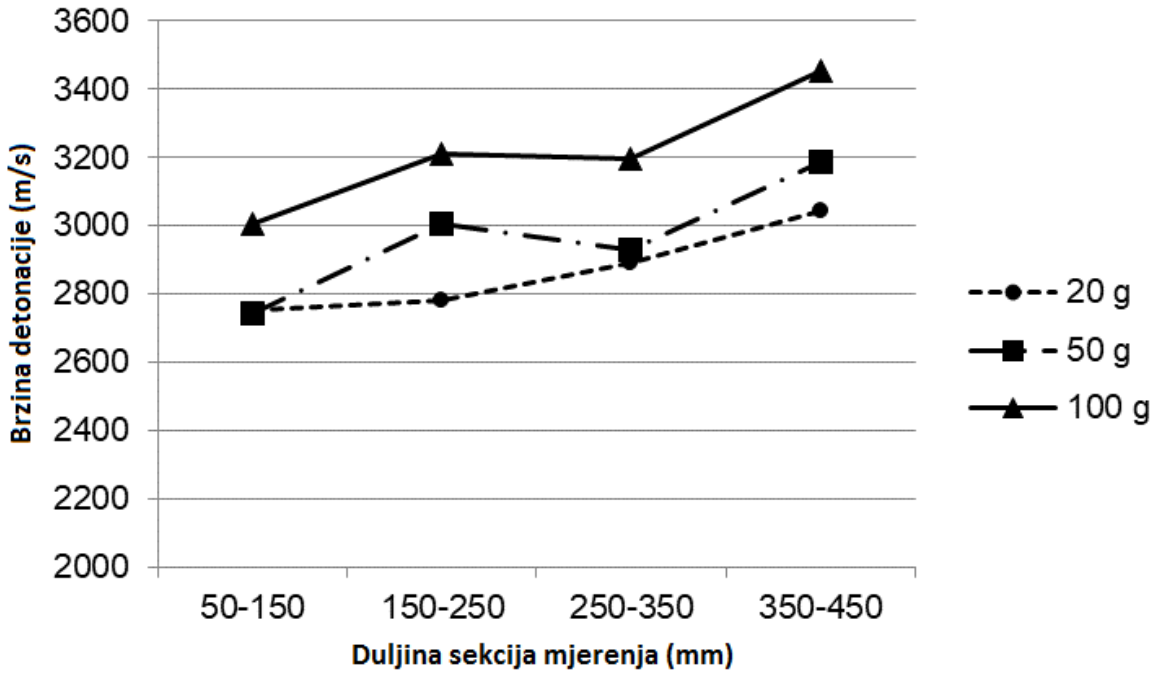
Tablica 4- 6. Rezultati mjerenja brzine detonacije uzoraka iniciranih boosterima (Bohanek i dr.,2013)

	Inicijalno sredstvo	Vrije-me, P1-P2 (μs)	D, P1-P2 (m/s)	Vrije-me, P2-P3 (μs)	D, P2-P3 (m/s)	Vrije-me, P3-P4 (μs)	D, P3-P4 (m/s)	Vrije-me, P4-P5 (μs)	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 uzroke inicirane detonatorima (Bohanek i dr.,2013)

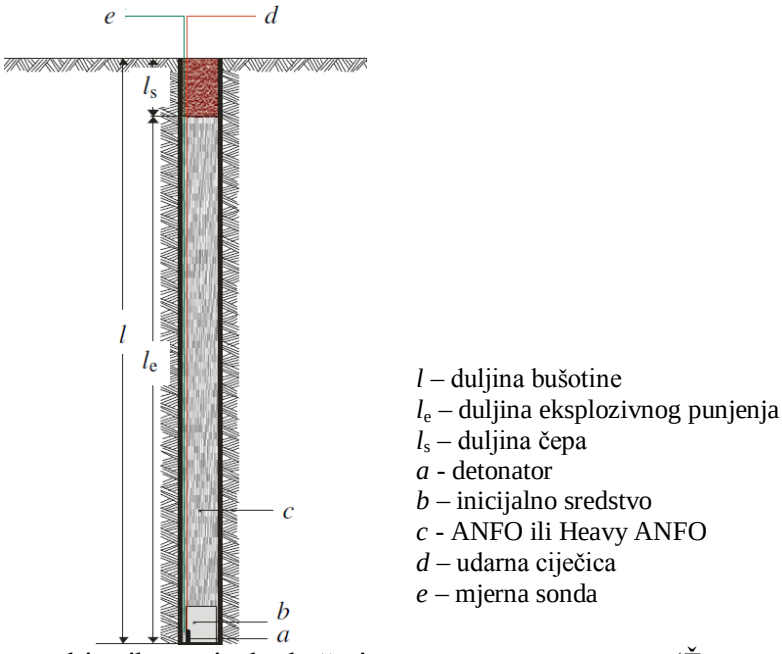


Slika 4- 15. Brzina detonacije u pojedinim sekcijama mjerenja za uzroke inicirane boosterima (Bohanek i dr.,2013)

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. Minimalma 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 sredtvima 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 [kg]	D [m/s]	Inicijalno sredstvo	Težina eksploziva [m/s]	D [kg]	Inicijalno sredstvo	Težina eksploziva [kg]	D [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 [kg]	D [m/s]	Inicijalno sredstvo	Težina eksploziva [kg]	D [m/s]	Inicijalno sredstvo	Težina eksploziva [kg]	D [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 [kg]	D [m/s]	Inicijalno sredstvo	Težina eksploziva [m/s]	D [kg]	Inicijalno sredstvo	Težina eksploziva [kg]	D [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

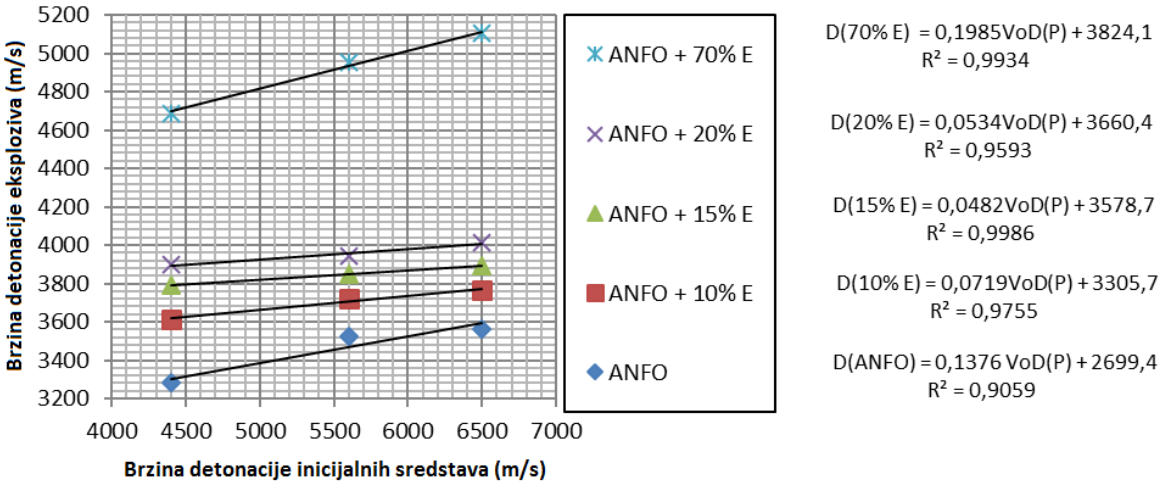
Tablica 4- 11. Izmjerena brzina detonacije *Heavy* ANFO eksploziva sa 20 % emulzije (Žganec i dr,2016)

Inicijalno sredstvo	Težina eksploziva [kg]	D [m/s]	Inicijalno sredstvo	Težina eksploziva [m/s]	D [kg]	Inicijalno sredstvo	Težina eksploziva [kg]	D [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 [kg]	D [m/s]	Inicijalno sredstvo	Težina eksploziva [m/s]	D [kg]	Inicijalno sredstvo	Težina eksploziva [kg]	D [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)

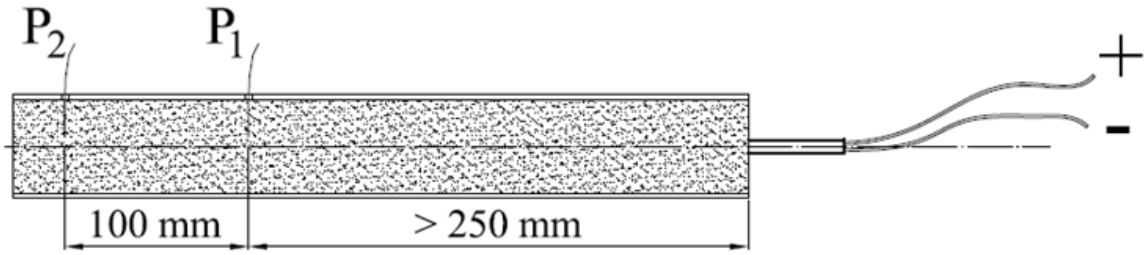
Temeljem analize podataka dobivenih mjerenjem brzine detonacije, možemo zaključiti da eksploziv identičnih svojstava u bušotini istog promjera može pokazati različite performanse odnosno više iznosa stabilne brzine detonacije, razlog za to mogu biti različiti uvjeti u pojedinim bušotinama. Brzina detonacije 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 sitraživanje 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.

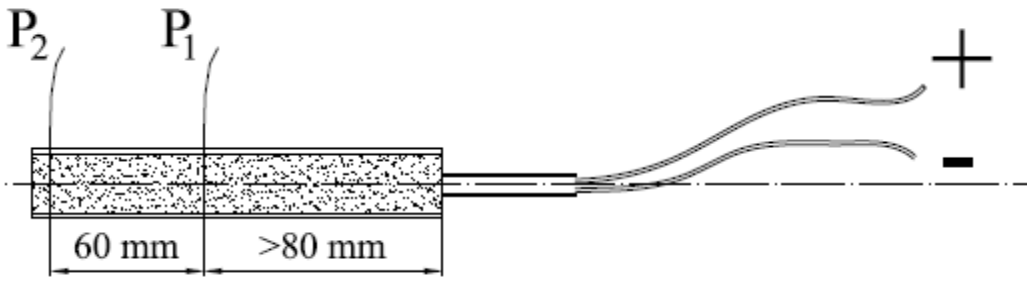
Prilikom ispitivanja na poligonu mjerena je brzina detonacije na uzorcima smještenim u čelične cijevi promjera Ø 52/57 mm i približne duljine 400mm. Optic probe (P1 i P2) su postavljene na razmaku od 100 mm. Prvi senzor P1 je postavljen na udaljenosti većoj od 250 mm od točke iniciranja. Uzorci su inicirani 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 Ø 52 mm (Dobrilović i dr., 2014)

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

Prilikom mjerenja brzine detonacije eksploziva u laboratoriju korištene su čelične cijevi promjera Ø 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 Ø 23,5 mm (Dobrilović i dr., 2014)

Uzorci su kondicionirani na temperaturama od 0ºC do 30ºC, razlika između pojedinih temperatura je iznosila 5ºC. 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 postave 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 (ºC)**	**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

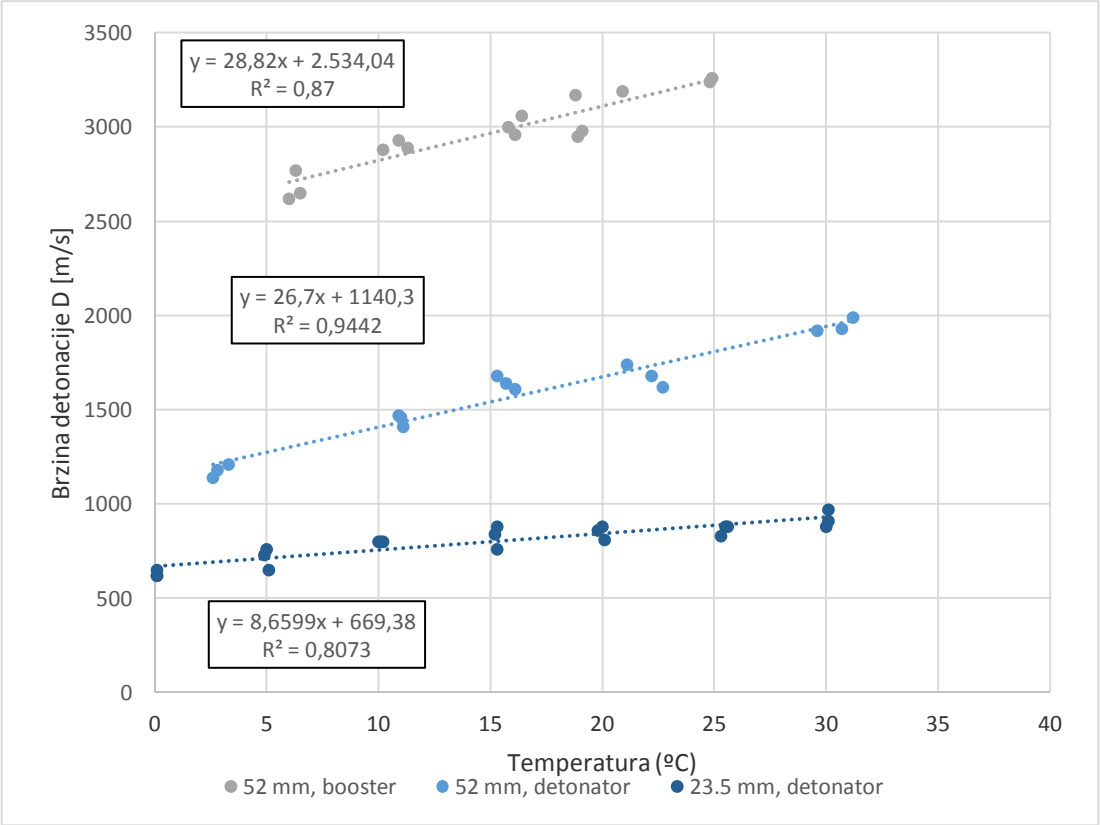
Tablica 4- 14. Izmjerene brzine detonacije (D) ANFO-a iniciranog detonatorima, Ø 52 mm (Dobrilović i dr., 2014)

	Duljina (mm)	**Unutarnji promjer (mm)**	**Temperatura (ºC)**	**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 (ºC)**	**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 0ºC, 10ºC, 15ºC, 20ºC, 25ºC i 30ºC. 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 oblege, 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 ekploziv uspješno detonirao i u promjeru od 52 mm (tablica 4-13. i 4-14.). U recentnim istraživanjima (Jackson, 2017) istraživan 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/cm3)	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

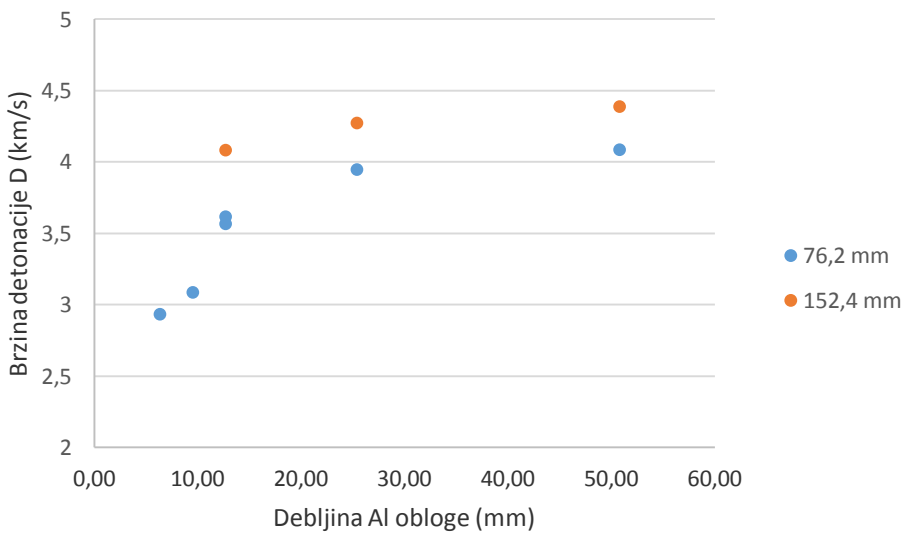
DO – debljina obloge

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 prikzan 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:

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

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:

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

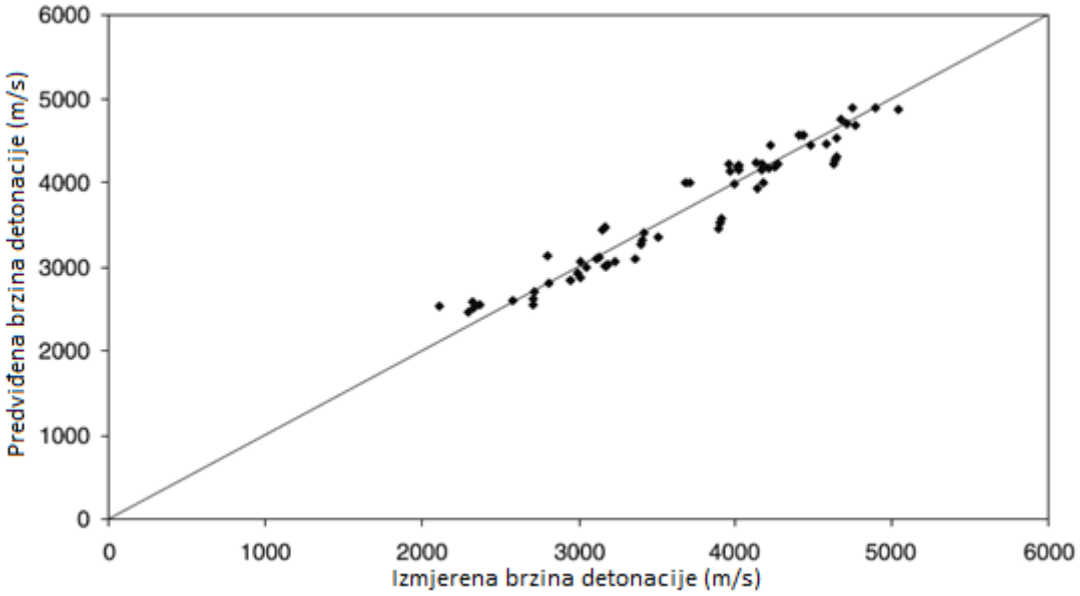
gdje su:

E_d - youngov modul elastičnosti [GPa]

ν_d - poissonov koeficijent

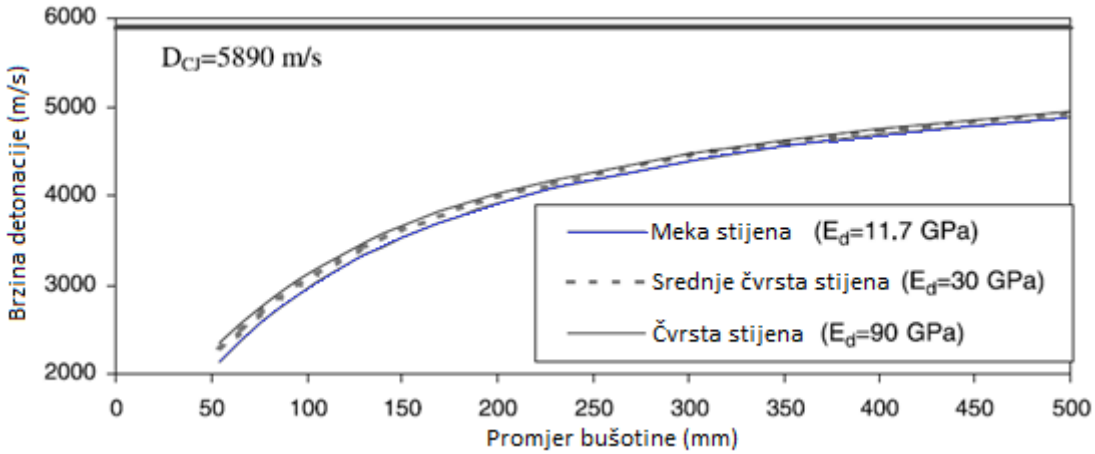
Analiza podataka ne linearnom regresijom pokazala je da se obloga može opisati kao funkcija ovisna o svojstvima eksploziva i stijene. Svojstva stijene opisana su kao funkcija ovisna njihovoj gustoći, brzini P valova i brzini S valova u intaknoj stijeni. Brzina idealne detonacije određena je VIXEN – I 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 povečanjem 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 povečava opseg gorenja, odnosno zona rekacije 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 naviše 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 eksplozovnih 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, Tenesee, 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.