Utjecaj debljine čelične obloge i promjera eksploziva na rezultate ispitivanja brzine detonacije ANFO eksploziva

Marunić, Bartul

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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:169:839717

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**



Repository / Repozitorij:

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







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Preddiplomski studij rudarstva

UTJECAJ DEBLJINE ČELIČNE OBLOGE I PROMJERA EKSPLOZIVA NA REZULTATE ISPITIVANJA BRZINE DETONACIJE ANFO EKSPLOZIVA

Završni rad

Bartul Marunić

R4161

Zagreb, 2021.

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Završni rad

UTJECAJ DEBLJINE ČELIČNE OBLOGE I PROMJER EKSPLOZIVA NA REZULTATE ISPITIVANJA BRZINE DETONACIJE ANFO EKSPLOZIVA

BARTUL MARUNIĆ

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 zbog neidealne detonacije ANFO eksplozivi su predmet mnogobrojni istraživanja

U radu su sistematizirani čimbenici koji utječu na brzinu detonacije ANFO eksploziva i metode mjerenja brzine detonacije. Glavnina rada obrađuje utjecaje čelične obloge na brzinu detonacije ANFO eksploziva. Prikazani su rezultati terenskih ispitivanja mjerenja brzine detonacije ANFO eksploziva kojima je utvrđen utjecaj čelične obloge na povećanje brzine detonacije ANFO eksploziva.

Rad je izrađen u sklopu projekta HR 14/2020 “Influence of Confinement on Detonation Parameters of ANFO explosives” bilateralna suradnja RGNF-a i Montanuniversitat Leoben.

Ključne riječi: Brzina detonacije, obloga, promjer,

Završni rad sadrži: 31 stranica, 4 tablice, 27 slika, 0 priloga, i 18 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

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

Mentori: Dr.sc. Vječislav Bohanek, docent RGNF

Pomagala pri izradi: Dr.sc. Barbara Štimac Tumara, asistentica RGNF

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

Datum obrane: 17.9.2021., Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu

SADRŽAJ

POPIS TABLICA II

POPIS SLIKA II

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA III

1.UVOD 1

2. EKSPLOZIVI, EKSPOLZIJA, DETONACIJA 2

2.1 Eksplozivi 2

2.2 Eksplozija 4

2.3 Detonacija 6

2.3.1 Brzina detonacije 7

3. ANFO EKSPLOZIV 8

3.1 Čimbenici koji utječu na brzinu detonacije ANFO eksploziva 10

3.1.1 Dimenzija i poroznost amonijeva nitrata te sadržaj nafte 10

3.1.2 Promjer naboja 11

3.1.3 Način iniciranja 12

3.1.4 Temperatura eksploziva 14

3.1.5 Obloga 15

4. METODE, INSTRUMENTI I NORME POTREBNE ZA MJERENJE BRZINE DETONACIJE EKSPLOZIVA 16

4.1 Metode za mjerenje brzine detonacije eksploziva 16

4.1.1. Optičke metode 17

4.1.2 Diskontinuirane metode mjerenja brzine detonacije 18

4.1.3 Kontinuirane metode mjerenja brzine detonacije 19

4.1.4 Norma za mjerenje brzine detonacije 21

5. MJERENJE 23

5.1 Mjerenje utjecaja promjere na brzinu detonacije ANFO eksploziva bez obloge 24

5.2 Mjerenje utjecaja debljine čelične obloge na brzinu detonacije ANFO eksploziva bez obloge 25

6. REZULTATI I ANALIZA REZULTATA MJERENJA 27

7. ZAKLJUČAK 31

8.LITERATURA 32

POPIS TABLICA

Tablica 3-1. Karakteristike AN za gnojivo i AN za eksplozive (Ester, 2005.) 9
Tablica 4-1. Dimenzije čeličnih cijevi..... 21
Tablica 6-1. Tablica izmjerenih vrijednosti detonacijske brzine po segmentima eksplozivnog naboja ANFO eksploziva (Sućeska, Štimac, Dobrilović, Škrlec i Bohanek, 2020)..... 28
Tablica 6-2. Tablica izmjerenih vrijednosti detonacijske brzine po segmentima eksplozivnog naboja ANFO eksploziva (Sućeska, Štimac, Dobrilović, Škrlec i Bohanek, 2020)..... 29

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Opća podjela eksplozivnih sredstava (Bohanek, 2013.)..... 2
Slika 2-2. Eksplozija (Dobrilović, 2010.) 4
Slika 2-3. Proces sagorijevanja u eksplozivnoj tvari (Dobrilović, 2010) 5
Slika 2-4. Detonacijski proces u patroni eksploziva (Dobrilović, 2008.) 6
Slika 3-1. ANFO eksploziv (Zečić, 2015.) 8
Slika 3-2. Shematski prikaz proizvodnje ANFO eksploziva (Bohanek, 2016.)..... 9
Slika 3-3. Prikaz poprečnog presjeka 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.) 10
Slika 3-5. Utjecaj energije inicijalnog sredstva na brzinu detonacije ANFO eksploziva ... 12
Slika 3-6. Brzina detonacije u pojedinim sekcijama mjerenja za uzroke inicirane detonatorima (Bohanek i dr.,2013.)..... 13
Slika 3-7. Brzina detonacije u pojedinim sekcijama mjerenja za uzroke inicirane boosterima (Bohanek i dr.,2013.)..... 13
Slika 3-8. Ispitane brzine detonacije u ovisnosti o temperaturi (Dobrilović i dr., 2014.)... 14
Slika 3-9. Utjecaj debljine Al obloge na brzinu detonacije (Essen, 2019.) 15

Slika 4-1. Isječak iz snimke detonacijskog procesa snimljenog kamerom visoke brzine snimanja (Los Alamos National Laboratory) 17
Slika 4-2. kamere visoke brzine snimnja „The Phantom v2640“ 17
Slika 4-3. Shema mjerenja brzine detonacije pomoću ‘’Vodex-100A’’(Danntech CC,2015.) 19
Slika 4-4. Kontinuirano mjerenje brzine detonacije u minskoj bušotini..... 20
Slika 4-5. Prikaz oscilografa 20
Slika 4-6. Ispitni uzorak sastavljen za iniciranje pomoću detonatora..... 22
Slika 5-1. Explomet-fo-2000 (Žbulj,2019.) 23
Slika 5-2. Explomet 2 (Kontinitro SA, 2019.) 23
Slika 5-3. Prikaz eksplozivnog naboja u PVC cijevi i optičkim vlaknima kao senzorima. 24
Slika 5-4. Prikaz eksplozivnog naboja u čeličnoj cijevi i optičkim vlaknima kao senzorima 25
Slika 5-5. Prikaz rezultata mjerenja brzine detonacije na V.O.D meter-u..... 26
Slika 6-1. Prekid detonacije kod naboja promjera 50 mm. 27
..... 30
Slika 6-2. Grafički prikaz utjecaja debljine čelične obloge na brzinu detonacije ANFO eksploziva 30
Slika 6-3. Grafički prikaz utjecaja promjera naboja na brzinu detonacije ANFO eksploziva 30

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
p	Pa, bar	tlak
d	mm	promjer
ρ	g/cm^3	gustoća
D	m/s	brzina detonacije
T	°C, °K	temperatura
m	g	masa
t	μs,ns	vrijeme
Q	kJ/g	toplina oslobođena detonacijom

1.UVOD

Eksplozivi su kemijski spojevi ili smjesa spojeva u kojima se djelovanjem vanjskog impulsa u obliku topline, udara, trenja i sl. razvija ekstremno brza egzotermna kemijska reakcija (eksplozija). Eksplozija se u općem smislu definira kao proces vrlo brze fizičke ili kemijske pretvorbe sustava uz prijelaz njegove potencijalne energije u mehanički rad (Baum et al., 1975). Mehanički rad dobiven kao produkt u kemijskom procesu puno je veći no mehanički rad koji s može dobiti primjenom mehanizacije stoga eksplozivi imaju važnu ulogu i široku primjenu u rudarstvu, građevini te vojnoj industriji. Za sigurnu primjenu eksplozivnih tvari bitno je postići kemijsku stabilnost eksploziva, a da im pritom nije umanjen njihov eksplozivni karakter. Detonacija je trenutno oslobađanje energije i produkata reakcije pri visokom tlaku za vrijeme brze kemijske reakcije eksploziva smještenog u patroni ili minskoj bušotini, prouzrokuje nastanak tlačnih valova u eksplozivu i okolnom stijenskom materijalu (Ester, 2005). Postoje različiti uređaji i metode kojima se mjeri brzina detonacije eksploziva.

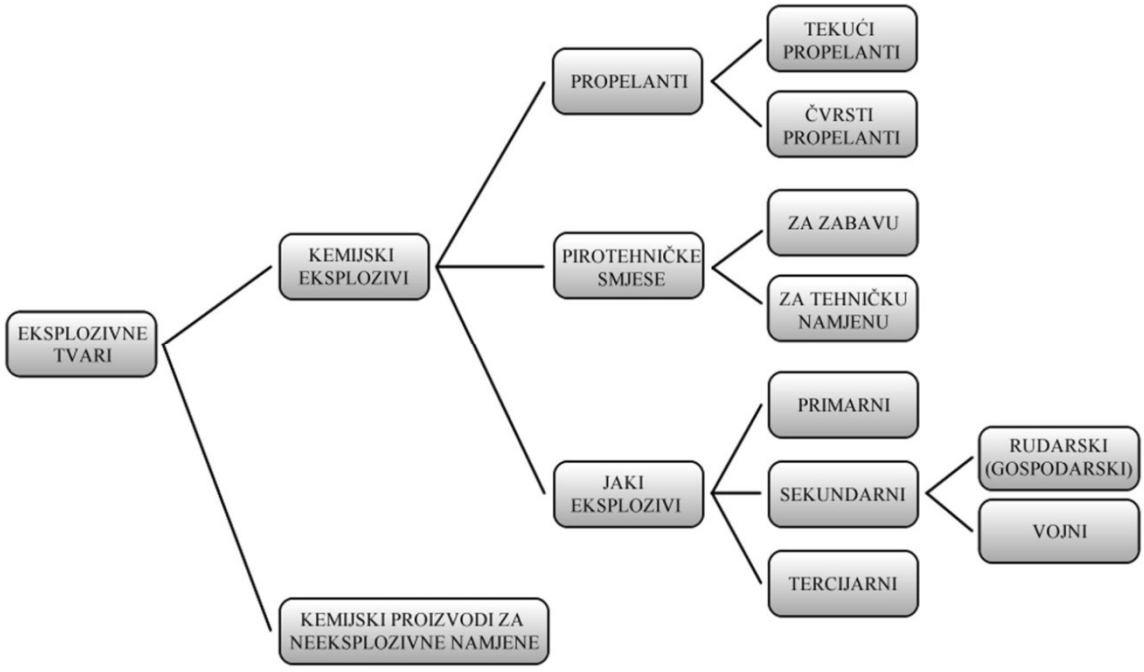
U radu je prikazan utjecaj debljine čelične obloge i promjera eksploziva na rezultate mjerenja brzine detonacije ANFO eksploziva. Rad je izrađen u sklopu projekta HR 14/2020 “Influence of Confinement on Detonation Parameters of ANFO explosives” bilateralna suradnja RGNF I Montanuniversitat Leoben.

2. EKSPLOZIVI, EKSPOLZIJA, DETONACIJA

2.1 Eksplozivi

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).

Općenito eksplozivne tvari možemo podijeliti kako je prikazano na slici 2-1.



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

U procesu pridobivanja mineralne sirovine i izvođenja ostalih rudarski radova najčešće se koriste eksplozivi iz grupe kemijskih eksploziva, podgrupe jakih eksploziva (*eng. High explosives*) kako je prikazano na slici 2-1. Skupinu jakih eksploziva dalje dijelimo na primarne (inicijalne), sekundarne (brizantne) i tercijarne eksplozive.

Primarni eksplozivi ili incijalni eksplozivi izrazito su osjetljivi na porast temparature, trenje i udar te pod djelovanjem vanjskog impulsa detoniraju. Najveću primjenu imaju kao incijalno punjenje električnih i neelektričnih detonatora te rudarskih kapica te se koriste kao senzibilatori eksplozivnih smjesa. Karakteristike incijalnih eksploziva su velika gustoća 3-4 g/cm^3,brzina detonacije 4000-5000 m/s, energija eksplozije(detonacije) 1600 kJ/kg te su izrazito osjetljivi na sve vrste inicijalnih impulsa. Primarni eksplozivi nalaze se u skupini monomolekularnih eksploziva, a neki od njih su: bakrov azid, hidrazidna kiselina, živin fulminat, olovni stifanat, olovni azid itd. (Ester, 2005.).

Sekundarni eksplozivi su svi eksplozivi koji imaju primjenu u gospodarskom miniranju i vojnoj industriji. Eksplozivi koji imaju primjenu u vojnoj industriji razvijaju veće brzine detonacije, najčešće su veće gustoće i oslobađaju više energije no eksplozivi koji se koriste u svrhu gospodarskog miniranja. Sekundarne eksplozive možemo podijeliti na monomolekularne eksplozive poput pentolita,nitroglikola, nitrometana, RDX, HMX i dr. te na smjese poput želatoniznih eksploziva, praškastih smjesa, ciklotol, ANFO, vodoplastični i emulzijskih. Mogu biti u čvrstom ili tekućem stanju. Gustoća eksploziva u tekućem stanju iznosi 1,5 g/cm^3 , energija eksplozije(detonacije) iznosi 7000 kJ/kg a brzina detonacije 7000-8000m/s (Ester, 2005.). Gustoća eksploziva u čvrstom stanju iznosi 1,7 g/cm^3 , brzina detonacije im je ista kao i kod eksploziva u tekućem stanju a energija detonacije nešto manja 6000 kJ/kg(Ester, 2005.). Tekući eksplozivi imaju širu primjenu u gospodarskom miniranju od eksploziva u čvrstom stanju zbog veće energije eksplozije (detonacije) i iz razloga što su sigurniji za rukovanje, odnosno možemo njihove komponente dopremiti na mjesto miniranja u odvojenim kamionima te dobiti eksplozivnu smjesu miješajući ih direktno u minskoj bušotini ili u specijaliziranom kamionu na radilištu. Sekundarne eksplozive dalje dijelimo na monomolekularne i eksplozivne smjese.

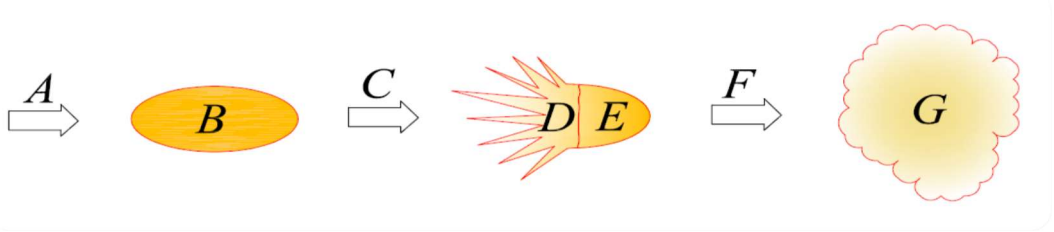
Monomolekularni eksplozivi su osjetljiviji na trenje, udar i porast temperature u odnosu na eksplozivne smjese pa se koriste za vojne svrhe, dok se u gospodarstvu upotrebljavaju za senzibilizaciju eksplozivnih smjesa i pri proizvodnji inicijalnih sredstava (Ester, 2005). Eksplozivne smjese dijelimo na one senzibliziranе nitroderivatima i senzibliziranе neeksplozivnim sastojcima u čijoj se grupi nalazi i ANFO. Eksplozivne smjese su najčešći oblik eksploziva koji se koristi u gospodarstvu.

2.2 Eksplozija

Eksplozija (latin.*Explodere*,raspasti se) je kemijski i fizikalni proces nagle ekspanzije tvari do volumena mnogo većeg od njena početnog volumena. Eksploziju također možemo definirati kao egzoterman proces pretvorbe početne krute tvari praćene ekspanzijom nastalih plinova produkata raspadanja i kao pretvorbu potencijalne energije sustava u mehanički rad. Eksplozije možemo podijeliti na fizičke, kemijske i nuklearne(Sućeska, 1995).

Pod fizičke eksplozije smatramo eksplozije na koje čovjek ne može utjecati, poput eksplozije spremnika pod visokim tlakom ili cjevovoda pod pritiskom pa sve do termonuklearnih eksplozija u svemiru.

Kemijske eksplozije uzorkovane su brzim kemijskim reakcijama pri kojoj se oslobađa velika količina plinovitih produkata(tlak plinova nekoliko stotina tisuća bara) izrazito visoke temperature(2000-5000°K). Na slici 2-2. shematski je prikazan mehanizam eksplozije.



Slika 2-2. Eksplozija (Dobrilović, 2010.)

Kazalo:

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

B - neporemećena eksplozivna tvar (T≈20 °C, v≈0,2-1,5 kg/ dm^3, p≈1 bar),

C - kemijski proces pretvorbe,

D - plinoviti produkti,

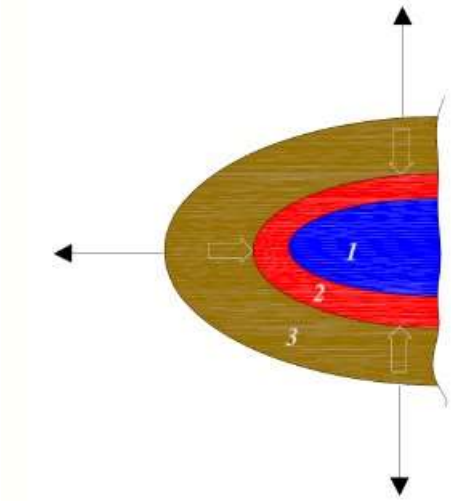
E - neporemećena eksplozivna tvar,

F - ekspanzija plinovitih produkata,

G - plinoviti produkti u ekspanziji (T≈2000-5000 ≈K, v≈1000 kg/dm^3, p≈10^5 bar, Q≈3,5-7,5 kJ/g)

Kemijska eksplozija (odnosno kemijsko razlaganje eksplozivne tvari) može biti, ovisno o načinu prijenosa energije i brzinama, karakterizirana kao deflagracija ili detonacija.

Deflagracija ili eksplozivno sagorijevanje odvija se bez reagiranja vanjskog kisika u zatvorenom prostoru brzinom manjom od brzine zvuka u eksplozivnoj tvari. Iniciranjem eksplozivne tvari inicijalnim sredstvom dolazi do stvaranja plamene fronte koja napreduje tako da se susjedni slojevi zagrijavaju plamenom i u njih difundiraju aktivne molekule koje daju poticaj reakciji. Na slici 2-3. shematski je prikazan proces deflagracije u eksplozivnoj tvari. Glavna razlika između deflagracije i detonacije je način prijenosa energije, kod deflagracije je prijenos topline konvekcijom kod detonacije je to udarni val.



Kazalo:

1 - neporemećena eksplozivna tvar,

2 - zona kemijskih reakcija,

3 - sagorjela tvar,

$\Rightarrow$ - smjer plamene fronte,

$\rightarrow$ smjer produkata sagorijevanja

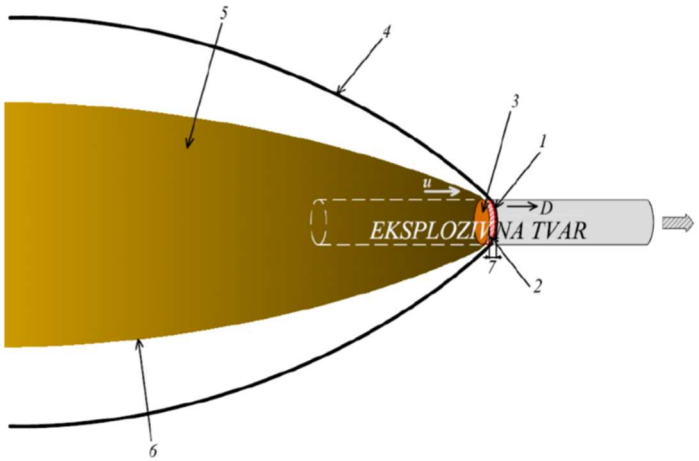
Slika 2-3. Proces sagorijevanja u eksplozivnoj tvari (Dobrilović, 2010)

2.3 Detonacija

Stabilnost sagorijevanja eksplozivne tvari, tj. prijelaz deflagracije u detonaciju, uz karakteristike eksplozivne tvari, ovisi o sljedećim čimbenicima: tlaku sagorijevanja, temperaturi eksplozivne tvari, gustoći eksplozivne tvari, veličini čestica eksplozivne tvari (Bohanek, 2012.). Detonacijski proces karakterizira vrlo brza i burna kemijska reakcija. Kemijska reakcija slojevito se prostire po eksplozivnoj tvari izrazito velikom brzinom (2500 do 9000m/s) zahvaljujući udarnom valu koji je praćen zonom kemijskih reakcija. Fronta udarnog vala je bitan za daljnje napredovanje kemijskih reakcija. Djelovanjem udarnog vala u eksplozivu dolazi do adijabatskog zagrijavanja uskog sloja eksploziva u zoni kemijskih reakcija. Adijabatski proces je proces u kojem nema izmjene topline između sustava i okoline.

Kemijske reakcije odvijaju se potom velikom brzinom i u kratkom vremenu reda nano sekundi do mikro sekundi tako da se sva toplinska energija oslobodi prije širenja plinovitih produkata. Po završetku kemijskih reakcija gustoća plinovitih produkata u zoni reakcije veća je za oko 30% od gustoće polazne tvari a volumen plinovitih produkata detonacije identičan je volumenu polazne tvari.

Zbog izrazite visoke gustoće i temperature plinovitih produkata detonacije tlak iznosi reda veličine 10^5 bara.



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 2-4. Detonacijski proces u patroni eksploziva (Dobrilović, 2008.)

2.3.1 Brzina detonacije

Brzina detonacije je brzina kojom se detonacijski udarni val širi od mjesta iniciranja do kraja eksplozivnog naboja. Brzina detonacije ovisi o gustoći, promjeru patrone eksploziva, vlazi i načinu iniciranja detonacije. S povećanjem gustoće i promjera patrone do određene granice, poveća se i detonacijska brzina eksploziva (Krsnik,1989). Definiramo još dva pojma koji uvelike utječu na brzinu detonacije, a to su kritična gustoća ili „mrtvo prešanje“ te kritični promjer odnosno donja granica promjera naboja. Kritična gustoća ili „mrtvo prešanje“ je granica gustoće eksploziva iznad koje detonacijski proces nije moguć. Ovisnost detonacijske brzine o gustoći objašnjava se promjenom mehanizma iniciranja kemijskih reakcija na čelu detonacijskog vala s promjenom gustoće eksploziva (Sućeska, 2001.). Kritični promjer ovisi o veličini smanjenjem promjera ispod cca 250 mm čestica eksploziva, gustoći, vrsti obloge eksplozivnog naboja, temperaturi eksploziva i sl. (Sućeska, 2001.). Kritični promjer može iznositi reda veličine 1mm kod npr. pentrita pa do nekoliko desetaka centimetara kod nekih gospodarskih eksploziva.

Temeljem podataka dobivenih mjerenjem brzine detonacije možemo odrediti gdje će pojedini eksploziv imati najbolju primjenu u praksi. O brzini detonacije također ovisi i njegova brizantnost, odnosno njegov radni učinak na okolinu.

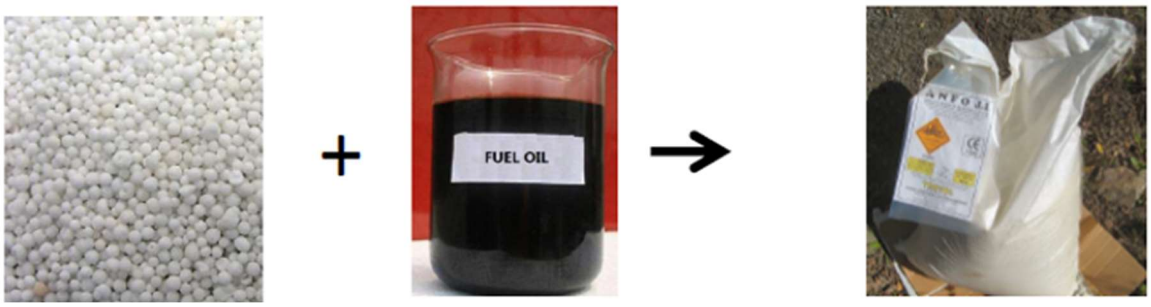
3. ANFO EKSPLOZIV

Naziv ANFO eksploziva potječe iz engleskog jezika (*eng. ammonium nitrate/fuel oil*). ANFO eksploziv ima široku primjenu u gospodarskom miniranju zbog svoje otpornosti na trenje, udar, temperaturu, jednostavnosti transporta, jednostavnosti proizvodnje (moguće ga je čak proizvoditi i na mjestu miniranja u za to predviđenom kamionu), niska cijena, efikasnost miniranja, jednostavnost i sigurnost korištenja. Njegovi nedostaci u primjeni su: neotpornost na vodu, niska gustoća i ne-idealna detonacija što znači da ponašanje eksploziva ne slijedi zakonitosti Chapman-Jouguetova-na i Zeldovich-Neumann-Döringova teorije detonacije, što rezultira ovisnošću brzine detonacije o promjeru naboja. Problem stvara i predugo skladištenje ANFO eksploziva zbog pojave vlage i isparavanja pri čemu gubi svoja eksplozivna svojstva. Vremenski period skladištenja ANFO eksploziva ne bi smio biti duži od tri mjeseca (Ester, 2005). Na slici 3-1. je prikazan ANFO eksploziv.



Slika 3-1. ANFO eksploziv (Zečić, 2015.)

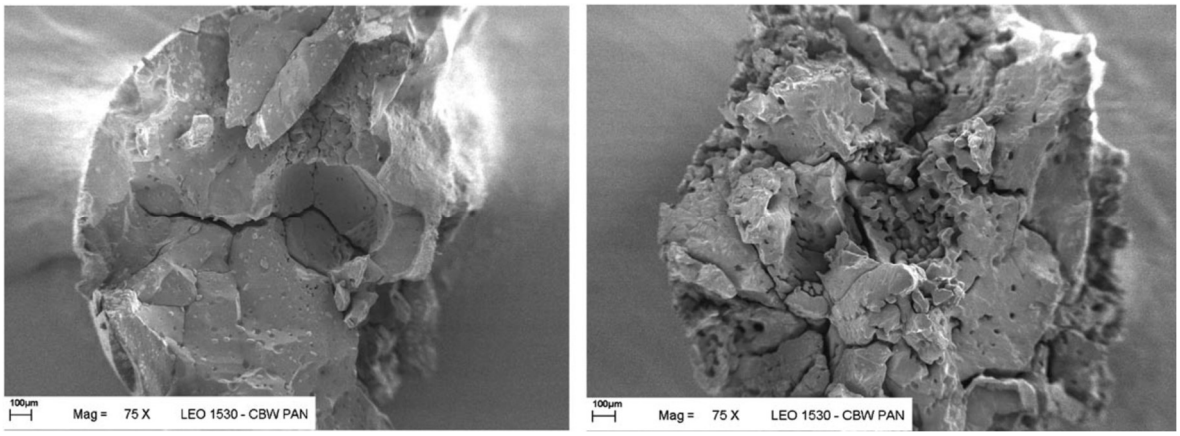
Kako bi dobili eksplozivnu smjesu, amonijev nitrat miješa se s naftom najčešće u omjeru 94,5%AN : 5,5% nafta, sadrži otprilike 4% vlage i potrebno je provesti dvostupanjsko sušenje gdje, uz hlađenje i isparavanje vlage, stvaraju porozne strukture. Omjer 94,5%AN : 5,5% nafta koristi se iz razloga što je bilanca kisika približna nuli. Bilanca kisika, odnosno uravnoteženost kisika, je razlika količine kisika koja se nalazi u sastavu eksploziva (kemijski vezanog) i količine koja je potrebna za potpunu oksidaciju. Amonijev nitrat za izradu umjetnih gnojiva sadrži vrlo malo vlage (0.3%), odlazi izravno u hladnjak gdje mu se dodaje glina (2.8-3.5%) (Ester, 2005). Osim nafte najčešće se koriste još plinska i mineralna ulja. Slika 3-2. shematski prikazuje dobivanje ANFO eksploziva.



Slika 3-2. Shematski prikaz proizvodnje ANFO eksploziva (Bohanek, 2016.)

Tablica 3-1. Karakteristike AN za gnojivo i AN za eksplozive (Ester, 2005.)

Svojstvo	AN za umjetno gnojivo	AN za eksplozive
Inertna stjenka (glina ili drugi kemijski antikoagulator)	3% - 5%	0,5% - 1%
Tvrdoća	Velika	mala
Forma	Kristalna	porozna
Distribucija goriva	po površini	kroz granule
Minimalni promjer za detonaciju na otvorenom	228 mm	64 mm
Brzina detonacije u cijevi Ø 100 mm	1,829 m/s	3,353 m/s



Slika 3-3. Prikaz poprečnog presjeka 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.)

3.1 Čimbenici koji utječu na brzinu detonacije ANFO eksploziva

Čimbenici koji najviše utječu na brzinu detonacije ANFO eksploziva su:

- Dimenzija i poroznost amonijeva nitrata te sadržaj nafte
- Promjer naboja
- Način iniciranja
- Temperatura eksploziva
- Postojanje i karakteristike obloge

U daljnjem tekstu prikazani su i navedeni primjeri kako gore navedeni čimbenici utječu na brzinu detonacije ANFO eksploziva.

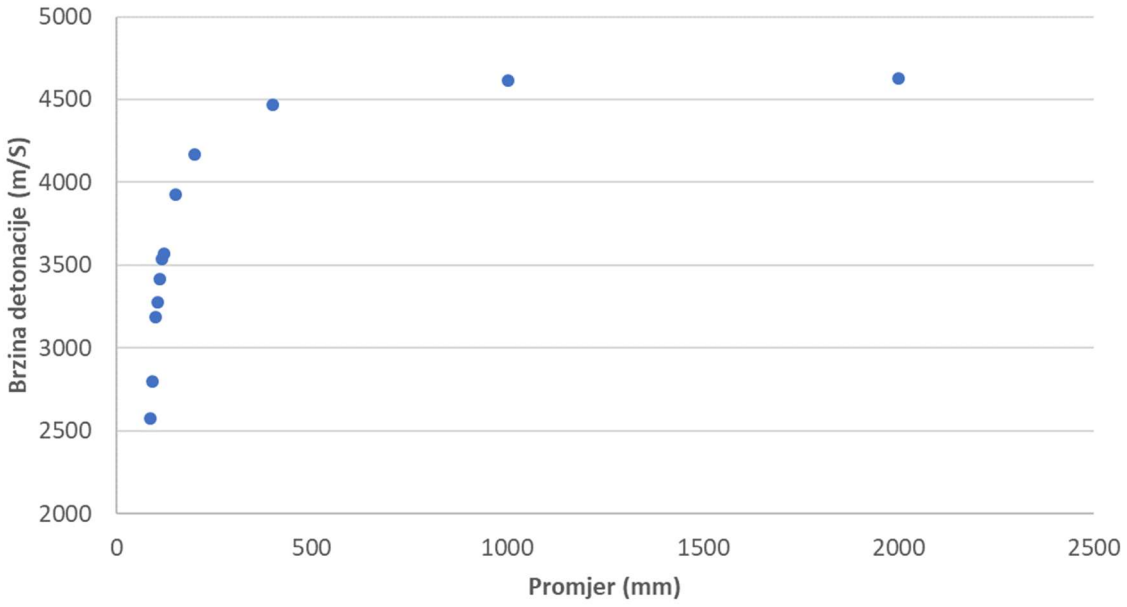
3.1.1 Dimenzija i poroznost amonijeva nitrata te sadržaj nafte

Dimenzija i poroznost amonijeva nitrata te sadržaj nafte bitni su faktori koji utječu na brzinu detonacije ANFO eksploziva koji uvelike utječe na samu sposobnost ANFO eksploziva da detonira. Tako su Zygmunt i Buczkowski (Zygmunt i Buczkowski, 2007) ispitivali utjecaj dimenzija amonij nitratnih kuglica, poroznosti i sadržaja nafte na brzinu detonacije ANFO eksploziva. U istraživanju su korištene kuglice amonijevog nitrata različitih dimenzijama i mogućnosti adsorpcije nafte. Određivanje brzine detonacije provedeno je u čeličnim cijevima promjera (Ø = 36/39 mm) iniciranim pomoću pojačnika

(14g , RDX(90%):TNT(10%)). Korištene su AN kuglice različitih poroznosti i dimenzija (otp. 1,50-2,50 mm) umiješane s naftom u omjeru 94,5-5,5%. Kuglice koje imaju najveću mogućnost apsorpcije (otp.12–15 cm^3/100g) dala su visoke vrijednosti brzine detonacije, čak i do 2700m/s, kuglice s apsorpcijskom mogućnošću (otp. 2.50 – 3.00 cm3/100g) vrijednosti brzine detonacije oko 1600-1700 m/s, a kuglice s najmanjom apsorpcijskom mogućnosti (x<2.50 cm^3/100 g) nisu detonirale. Zaključak je da se povećanjem poroznosti povećava i mogućnost apsorpcije AN, dok gustoća pada i brzina detonacije raste.

3.1.2 Promjer naboja

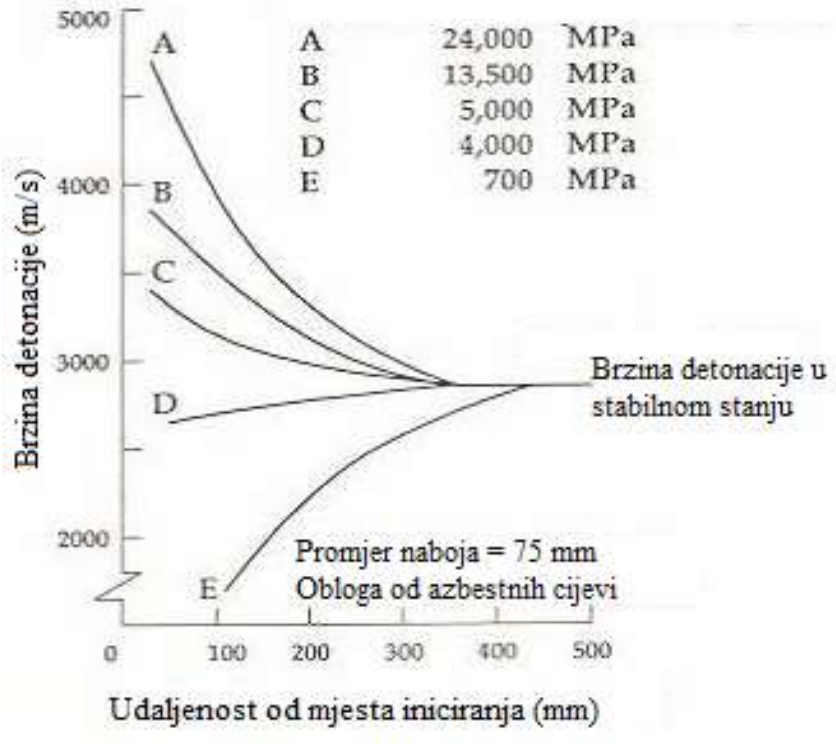
Na brzinu detonacije eksploziva uvelike utječe promjer patrone odnosno minske bušotine. Ukoliko je promjer nedovoljne veličine detonacija može izostati ili može doći do prekida detonacije. Kritični promjer definira najmanji potrebni promjer da bi se postigla stabilna deformacija za pojedinu eksplozivnu tvar ili smjesu. Na slici 3-4. prikazani su odnosi promjera minske bušotine i brzine detonacije. Iz grafa možemo isčitati nagli pad brzine detonacije s smanjenjem promjera ispod cca 250 mm i stabilizaciju brzine s daljnjim povećanjem promjera naboja.



Slika 3-4. Utjecaj promjera na proračunatu brzinu detonacije (Pinter, 2019.)

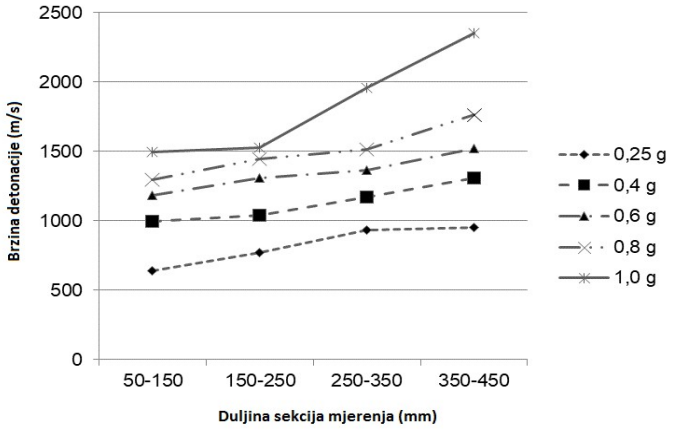
3.1.3 Način iniciranja

Na brzinu detonacije utječe količina inicijalne energije koju je inicijalno sredstvo predalo eksplozivu prilikom detonacije. Na slici 3-5. prikazan je utjecaj energije iniciranja na izmjerenu brzinu detonacija.

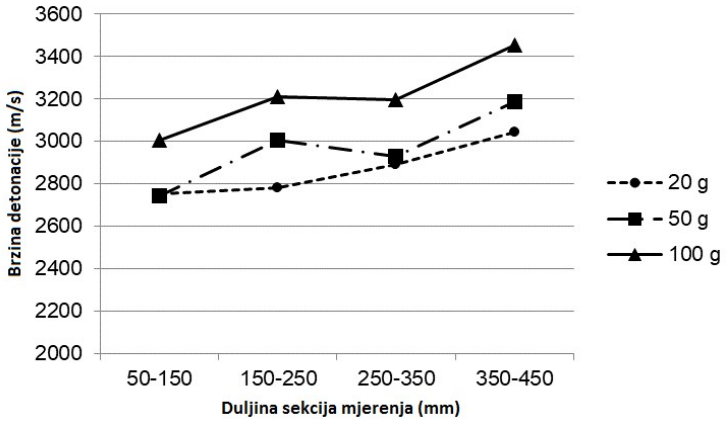


Slika 3-5. Utjecaj energije inicijalnog sredstva na brzinu detonacije ANFO eksploziva

Na slijedećim dijagramima prikazani su međusobni odnosi brzina detonacije primjenom pojačnika prilikom iniciranje eksploziva i bez korištenja pojačnika, rezultati su prikazani u sekcijama mjerenja. Na slici 3-6. prikazani su rezultati mjerenja brzine detonacije pri iniciranju detonatorom a na slici 3-7. prikazani su rezultati mjerenja brzine detonacije pri iniciranju pojačnicima.



Slika 3-6. Brzina detonacije u pojedinim sekcijama mjerenja za uzroke inicirane detonatorima (Bohanek i dr.,2013.)

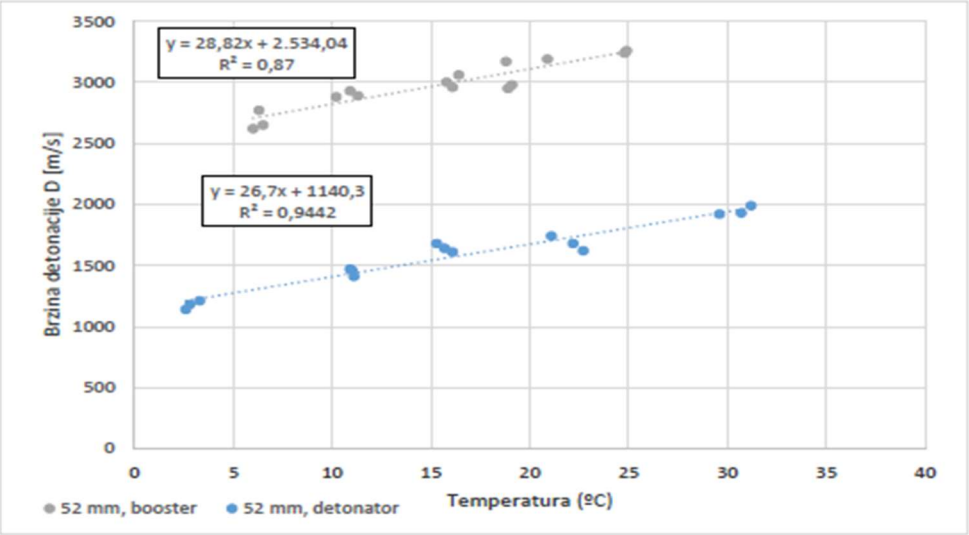


Slika 3-7. Brzina detonacije u pojedinim sekcijama mjerenja za uzroke inicirane boosterima (Bohanek i dr.,2013.)

Iz rezultata ispitivanja prikazanih na slikama vidljivo je da ANFO eksploziv 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 bez pojačnika. Maksimalna brzina detonacije iznosi 3367 m/s i izmjerena je prilikom iniciranja eksploziva PETN pojačnikom 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.

3.1.4 Temperatura eksploziva

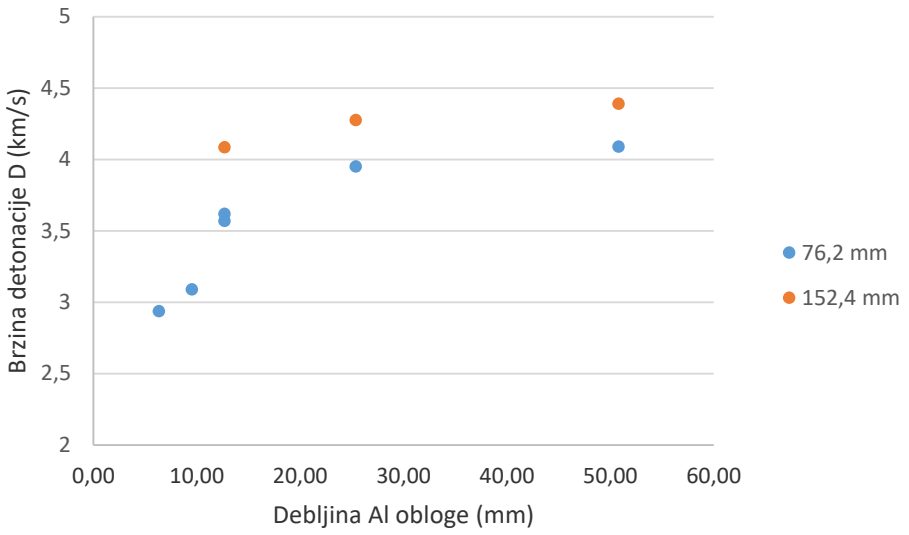
Istraživanje utjecaja same temperature na brzinu detonacije ANFO eksploziva (Dobrilović i dr., 2014). Plavi pravac na slici 3-8. iz kojega iščitavamo manje vrijednosti izmjerene brzine predstavlja iniciranje uporabom detonatora dok drugi pravac predstavlja iniciranje pri kojem je korišten pojačnik. Uzorci inicirani detonatorima s pojačnicima kondicionirani su pri temperaturama od 0ºC, 10ºC, 15ºC, 20ºC i 25ºC, a uzorci koji su inicirani bez upotrebe pojačnika na temperaturama 0ºC, 10ºC, 15ºC, 20ºC i 30ºC. Brzine detonacije eksploziva izmjerene su pomoću optičkih senzora. Na slici 3-7. vidljiv je porast brzine detonacije koji je proporcionalan s porastom temperature za iniciranje detonatorima i pojačnicima.



Slika 3-8. Ispitane brzine detonacije u ovisnosti o temperaturi (Dobrilović i dr., 2014.)

3.1.5 Obloga

Obloga eksplozivnog punjenja ima važnu ulogu kod održavanja stabilne brzine detonacije kod neidealnih eksploziva te utječe na povećanje brzine detonacije. Veća čvrstoća obloge onemogućuje radijalnu ekspanziju u zoni kemijskih reakcije. Smanjenje radijalne ekspanzije neidealnih eksploziva direktno utječe na veću količinu dostupne energije koja omogućuje propagiranje detonacijske fronte, užu zonu kemijskih reakcija i u konačnici veću brzinu detonacije. Osim što obloga može utjecati na povećanje brzine detonacije eksploziva, njezina upotreba smanjuje kritični promjer, odnosno najmanji mogući promjer patrone ili minske bušotine pri kojoj eksploziv može ostvariti stabilnu detonaciju. Iz istraživanja koje su proveli (Esen,2004.) i (Dobrilović i dr., 2014) možemo zaključiti kako su obloga minske bušotine, koja je i ujedno okolna stijena, i debljina obloge (čelične cijevi) utječu na brzinu drtonacije. Fizikalno mehanička svojstva okolne stijene uvelike utječu na brzinu detonacije a i sam detonacijski proces kompleksniji je od onoga koji se odvija u oblogama izrađenih od različitih metala zbog pojave fragmentiranja stijenske mase. Na slici 3-9. prikazan je porast brzine detonacije s povećanjem debljine aluminijske obloge za dva različita promjera.



Slika 3-9. Utjecaj debljine Al obloge na brzinu detonacije (Essen, 2019.)

4. METODE, INSTRUMENTI I NORME POTREBNE ZA MJERENJE BRZINE DETONACIJE EKSPLOZIVA

4.1 Metode za mjerenje brzine detonacije eksploziva

Postoje različite metode i uređaji za mjerenje brzine detonacije eksploziva, svaka metoda ima svoje prednosti i nedostatke ali svima je zajednički cilj osigurati dobivanje pouzdanih rezultat mjerenja. Instrumenti se koristi u mjerenju brzine detonacije eksploziva moraju nam osigurati:

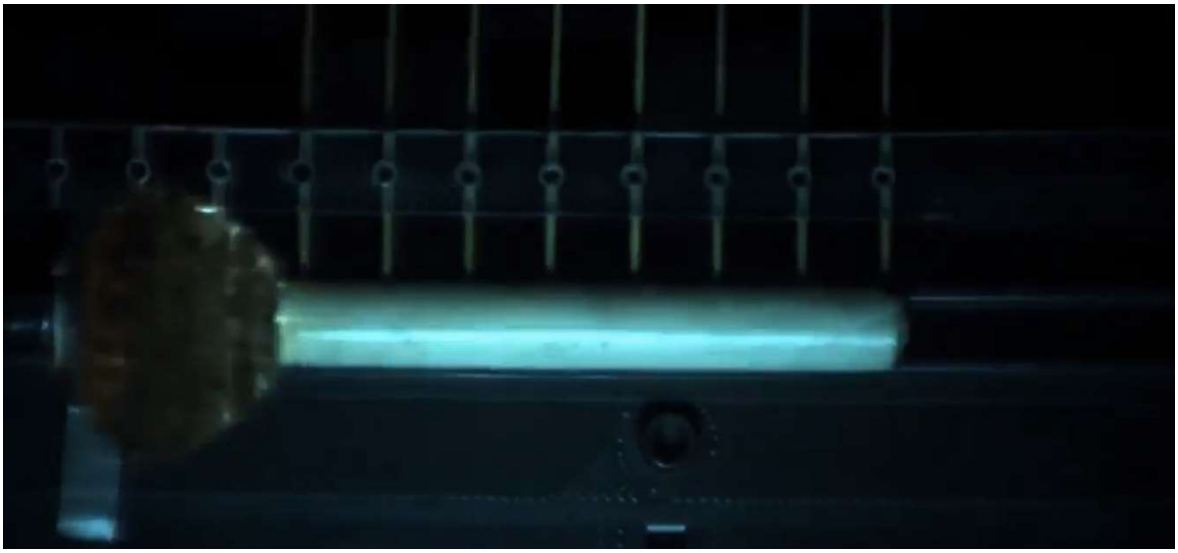
1. točno određivanje dolaska detonacijskog vala pomoću odgovarajućih osjetila za mjerenje brzine,
2. precizno mjerenje vrlo kratkih vremenskih intervala (u μs) potrebnih da detonacijski val prijeđe poznatu udaljenost

Metode za određivanje brzine detonacije možemo podijeliti na:

- optičke metode
- diskontinuirane
- kontinuirane

4.1.1. Optičke metode

Detonacijski proces odvija se, kako je već i prije spomenuto, u vrlo kratkom vremensko periodu reda veličini nano sekundi do mikro sekundi. Kako bi uspješno dokumentirali proces, primjenom optičke metode, potrebne su nam kamere koje mogu u vrlo kratkom vremenskom periodu napraviti veliki broj slika. Kamere visoke brzine snimanja mogu razviti čak 130000 slika u sekundi, ali nedostatak im je što su snimke vrlo niske rezolucije. Pomoću ovih kamera možemo pratiti vrijeme pojave i nestanka svjetlosti kao jedne od pojava u detonacijskom procesu i vrlo precizno zabilježiti vrijeme trajanja detonacije.



Slika 4-1. Isječak iz snimke detonacijskog procesa snimljenog kamerom visoke brzine snimanja (Los Alamos National Laboratory)



Slika 4-2. kamere visoke brzine snimnja „The Phantom v2640“

4.1.2 Diskontinuirane metode mjerenja brzine detonacije

U ovoj metodi mjerenja brzine detonacije koriste se elektronski satovi različitih izvedbi. Elektronski satovi imaju mogućnost vrlo precizno odrediti početak i kraj detonacijskog procesa, a to postižu primjenom sondi osjetljivih na udar detonacijskog vala. Sonde se postavljaju na određeni razmak tako da nailaskom detonacijskog vala na prvu sondu ona elektronski sat pokreće, a nailaskom detonacijskog vala na drugu sondu elektronski sat zaustavlja. Brzinu detonacije možemo izračunati iz izmjerenog vremenskog intervala i poznate, unaprijed zadane udaljenosti između dvije sonde prema formuli:

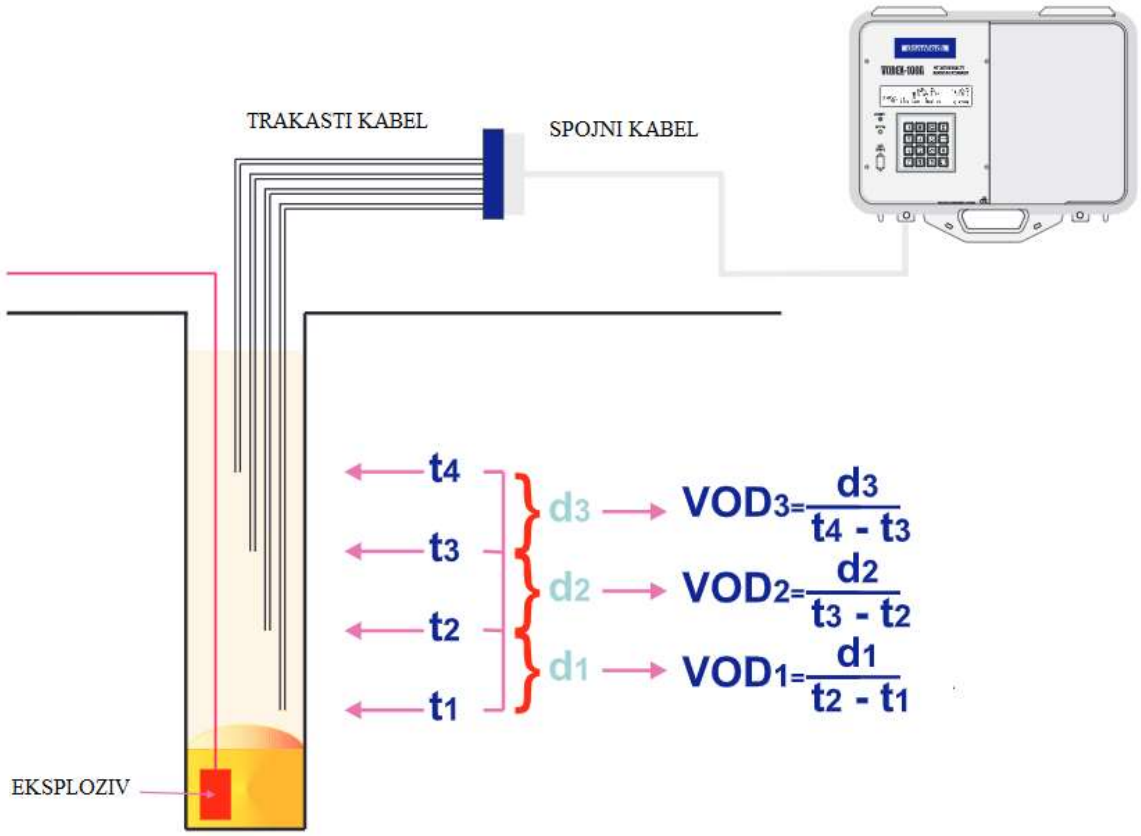
$$D = \frac{L}{t}$$

gdje su:
D – brzina detonacije (m/s),
L – razmak između sondi (m),
t – vremenski interval u kojem je detonacijski val prešao udaljenost L (s).

Prilikom provođenja testa potrebno je osigurati da:

1. udaljenost između prve i druge sonde bude dovoljno velika za postizanje stabilnog detonacijskog vala,
2. udaljenost između sondi bude dovoljna kako bi se izbjegle nepreciznosti u mjerenju udaljenosti. (Sućeska, 1995)

Minimalan broj sondi koje se koriste u mjerenju je 2 ali kako bi dobili više podataka često se koristi i veći broj sondi. Na slici 4-3. dan je primjer diskontinuiranog mjerenja brzine detonacije na više segmenata.



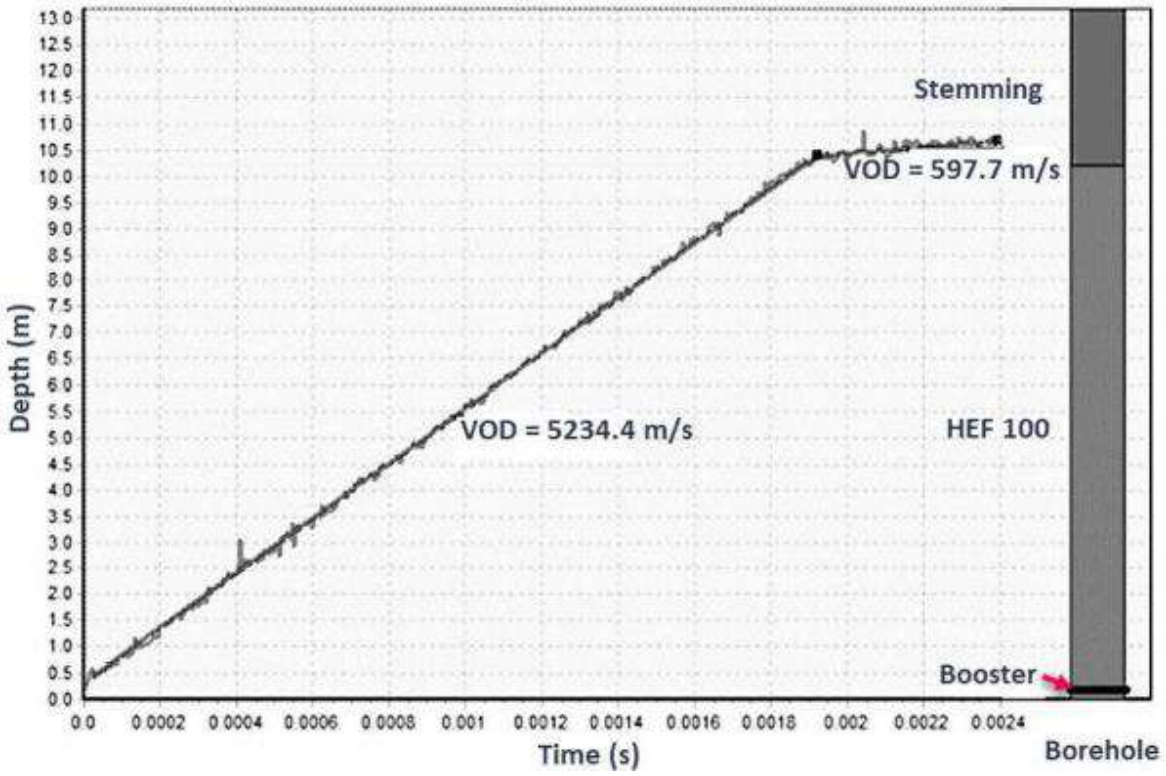
Slika 4-3. Shema mjerenja brzine detonacije pomoću ''Vodex-100A''(Danntech CC,2015.)

4.1.3 Kontinuirane metode mjerenja brzine detonacije

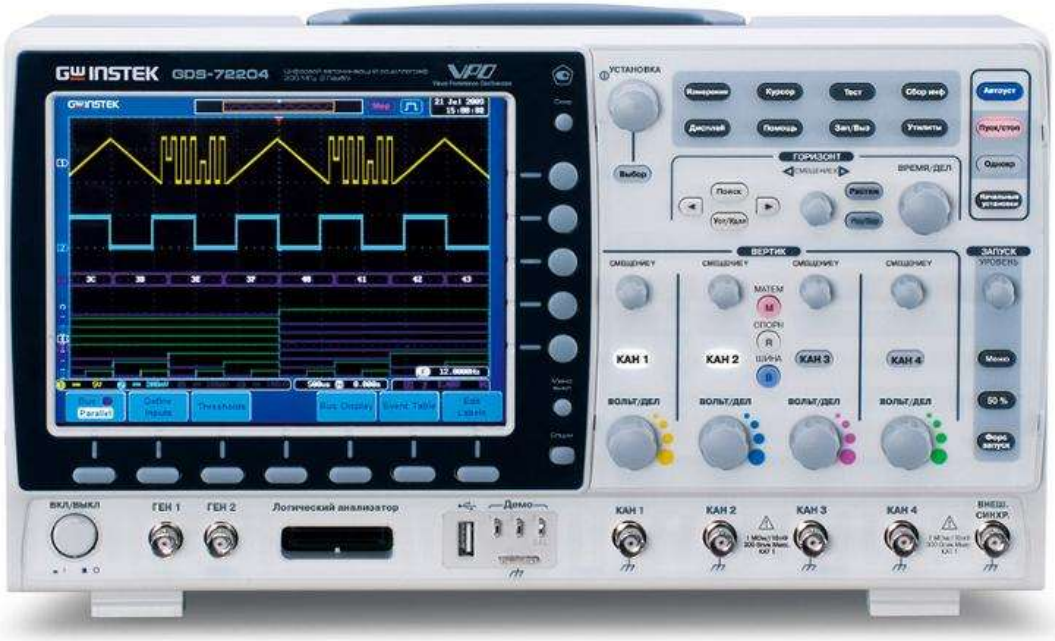
Kontinuiranim metodama mjerenja brzine detonacije eksploziva mjerimo brzinu detonacije eksploziva kontinuirano po cijeloj dužini eksplozivnog punjenja. Metode imaju veću primjenu prilikom mjerenja brzine detonacije u minskoj bušotini nego kod mjerenja brzine detonacije u patroni eksploziva. Sondu kroz koju teče stalna struja postavljamo unutar eksplozivnog punjenja paralelno s njegovom uzdužnom osi. Tijekom detonacijskog procesa kontinuirano bilježimo promjene električnog otpora koji je direktno povezan s kontinuiranim skraćivanjem sonde pod utjecajem napredovanja detonacijskog vala kroz eksplozivno punjenje.

Primjena električnog otpora uzrokuje promjenu napona u strujnom krugu, koja se bilježi na oscilogramu kao funkcija vremena. Pomoću očitanja sa oscilograma moguće je izračunati brzinu detonacije u bilo kojem dijelu eksplozivnog punjenja. (Sućeska, 1995).

Na slici 4-4. prikazan je rezultat mjerenja dobivenih primjenom kontinuirane metode.



Slika 4-4. Kontinuirano mjerenje brzine detonacije u minskoj bušotini



Slika 4-5. Prikaz oscilografa

4.1.4 Norma za mjerenje brzine detonacije

Kako bi rezulatati mjerenje brzine detonacije eksploziva bila međusobno usporediva potrebno je mjerenja izvesti pridržavajući se norme HRN EN 13631-14:2004: *Eksplozivi za civilnu uporabu. Jaki eksplozivi.14. dio: Određivanje brzine detonacije (EN 13631-14:2004).* Zahtjevi norme koje moramo ispuniti su:

1. Mjeri se vrijeme potrebno da detonacijski front prijeđe poznatu udaljenost između dvaju senzora
2. Inicijalna sredstva koja se koriste prilikom testiranja moraju odgovarat specifikacijam proizvođača a u skladu s normom prEN 13631-10
3. Dimenzije čeličnih cijevi prilikom ispitivanja ANFO eksploziva trebaju biti u skladu sa standardom ISO 4200:1991. U tablici 5-1 dani su poželjni rasponi debljine E

Tablica 4-1. Dimenzije čeličnih cijevi

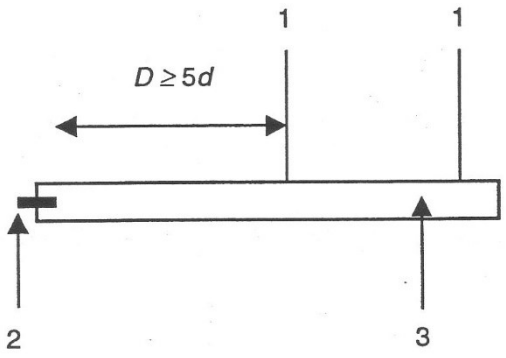
Unutarnji promjer (mm)	Debljina stijenke (mm)
17,3	2,0
22,9	2,0
29,1	2,3
37,2	2,6
43,1	2,6
54,5	2,9
70,3	2,9
82,5	3,2
107,1	3,6
131,7	4,0
159,3	4,5
206,5	6,3
260,4	6,3
309,7	7,1

4. Termometar sposoban mjeriti temperaturu okoliša koji se ispituje i temperaturu eksploziva s preciznošću ± 1ºC.
5. Mjerna oprema s dva senzora mora biti u stanju mjeriti brzinu detonacijske fronte do preciznosti od 100 m/s.
6. Ispitni uzorak sastojat će se od uloška ili stupca patrona duljine L, koji ima najmanju potrebnu duljinu za mjerenje brzine detonacije *l,* plus pet puta promjer patrone d, tj.:

$$L \geq 5\,d + l$$

Ukoliko je duljina pojedinačne patrone manja od *l*, potrebno je spojiti dvije patrone. U slučaju odrezane patrone, zadnji dio dvije patrone treba odrezati tako da tvori plosnatu površinu ne manju od promjera punjenja, a patrone treba spojiti i čvrsto ih omotati ljepljivom trakom.

7. Potrebno je ispitni uzorak s detonatorom umetnutim s jednog kraja i senzorom na drugom kraju postaviti kako je prikazano na slici 4-6.



Slika 4-6. Ispitni uzorak sastavljen za iniciranje pomoću detonatora

Kazalo

D Udaljenost između kraja detonatora i prvog senzora

d Promjer eksploziva koji se ispituje

1 Senzori

2 Detonator

3 Eksploziv koji se ispituje

5. MJERENJE

Za potrebe izrade završnog rada izvedene su dvije skupine mjerenje. Cilj prve skupine mjerenja je istražiti utjecaj promjera na brzinu detonacije ANFO eksploziva, a u drugoj skupini istražen je utjecaj debljine čelične obloge na brzinu detonacije ANFO eksploziva.



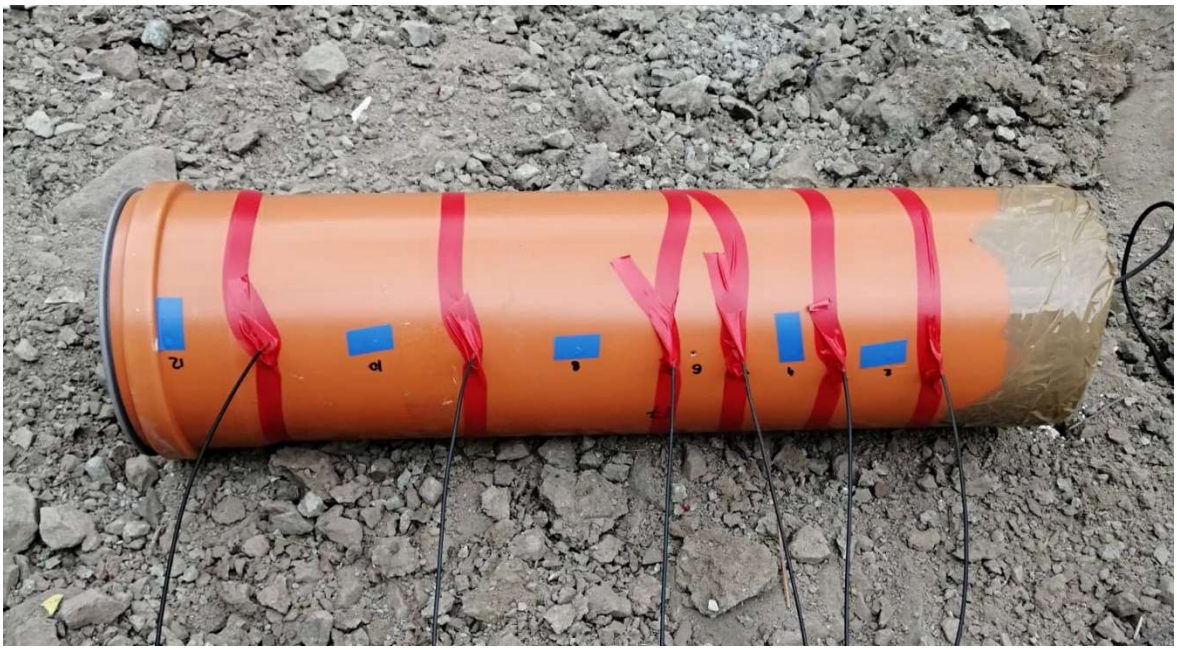
Slika 5-1. Explomet-fo-2000 (Žbulj,2019.)



Slika 5-2. Explomet 2 (Kontinitro SA, 2019.)

5.1 Mjerenje utjecaja promjere na brzinu detonacije ANFO eksploziva bez obloge

Za izmjeru utjecaj promjera na brzinu detonacije eksploziva korištena je elektrooptička metoda pomoću elektroničkog sata Explomet Fo-2000. Brzina detonacija mjerila se na 5 segmenata, u skladu s mogućnostima Explomet Fo-2000. Određena su 5 različita promjera naboja za naboje punjene ANFO eksplozivom, redom 50 mm, 75 mm, 110 mm, 125 mm i 160 mm. Na slici 5-3. prikazan je primjer mjernog postava na terenu.



Slika 5-3. Prikaz eksplozivnog naboja u PVC cijevi i optičkim vlaknima kao senzorima

Rezultate dobivene primjenom elektrooptiče metode mjerenja brzine detonacije ANFO eksploziva dani su u Tablici 6-1. Explomet Fo-2000 zabilježio je razliku vremena između prolaska detonacijskog vala između dva osjetila koja su postavljena na poznatim udaljenostima. Na temelju poznate udaljenosti i vremena instrument automatski izračunava brzinu detonacije između dva osjetila. Za svaki promjer izvršena su dva, odnosno tri, mjerenja detonacijske brzine. Izmjerene vrijednost brzine detonacije ANFO eksploziva prikazane su u Tablici 6-1.

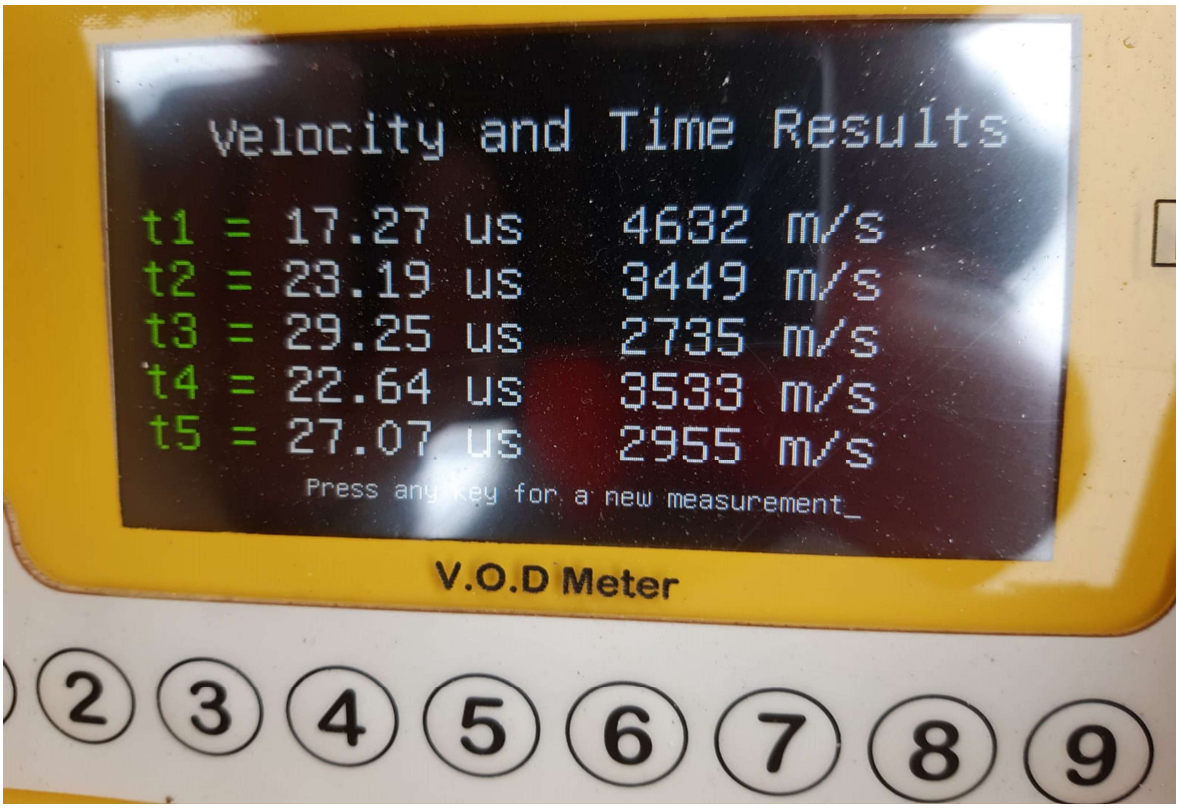
5.2 Mjerenje utjecaja debljine čelične obloge na brzinu detonacije ANFO eksploziva bez obloge

U svrhu dokazivanja utjecaja debljine čelične obloge i promjera eksploziva na brzinu detonacije ANFO eksploziva provedeno je terensko ispitivanje na poligonu Ljubeščica 2020. godine (Sućeska, Štimac, Dobrilović, Škrlec i Bohanek, 2020). Za izmjeru korištena je elektrooptička metoda pomoću elektroničkog sata Explomet 2. Brzina detonacija mjerila se na 5 segmenata, u skladu s mogućnostima Explomet 2. Određena su 3 različita promjera vanjske obloge i naboja ANFO eksplozivom redom 44,6/39 mm, 51.2/37 mm i 60,5/40 m. Na slici 5-4. prikazan je primjer mjernog postava na terenu.



Slika 5-4. Prikaz eksplozivnog naboja u čeličnoj cijevi i optičkim vlaknima kao senzorima

Obrađene rezultate dobivene primjenom elektrooptiče metode mjerenja brzine detonacije ANFO eksploziva dani su u Tablici 6-2 a na slici 5-5. prikazani su rezultati mjerenja na V.O.D metru. Explomet 2 zabilježio je razliku vremena između prolaska detonacijskog vala između dva osjetila koja su postavljena na poznatim udaljenostima. Na temelju poznate udaljenosti i vremena instrument automatski izračunava brzinu detonacije između dva osjetila. Za svaki promjer izvršena su dva, odnosno tri, mjerenja detonacijske brzine. Izmjerene vrijednost brzine detonacije ANFO eksploziva prikazane su u Tablici 6-2.



Slika 5-5. Prikaz rezultata mjerenja brzine detonacije na V.O.D meter-u

6. REZULTATI I ANALIZA REZULTATA MJERENJA

Prilikom otpucavanja naboja bez čelične obloge, promjera 50 mm, nije došlo do uspostave stabilne detonacije. Do prekida je došlo nakon ~ 20 cm, što znači da je ovaj promjer ispod kritičnog (prema literaturnim podacima kritični promjer iznosi 62-77 mm). Na slici 6-1. prikazan je prekid detonacije kod naboja promjera 50 mm.



Slika 6-1. Prekid detonacije kod naboja promjera 50 mm.

U tablici 6-1. nalaze se izmjerene vrijednosti detonacijske brzine po segmentima eksplozivnog naboja ANFO eksploziva a izmjerene srednje vrijednosti detonacijskih brzina ANFO eksploziva iznose:

- 1274 m/s za naboj promjera 71 mm (vanjski promjer cijevi 75 mm)
- 2511 m/s za naboj promjera 105 mm (vanjski promjer cijevi 110 mm)
- 2133 m/s za naboj promjera 125 mm (vanjski promjer cijevi 125 mm)
- 2477 m/s za naboj promjera 152 mm (vanjski promjer cijevi 160 mm)

Tablica 6-1. Tablica izmjerenih vrijednosti detonacijske brzine po segmentima eksplozivnog naboja ANFO eksploziva (Sućeska, Štimac, Dobrilović, Škrlec i Bohanek, 2020)

Cijev br.	Vanjski promjer cijevi, Ø (mm)	Izmjereno vrijeme između prvog i drugog osjetila, t1 (µs)	Izmjerena brzina detonacija između prvog i drugog osjetila, v1 (m/s)	Stvarna brzina detonacije između prvog i drugog osjetila, v1' (m/s)	Izmjereno vrijeme između drugog i trećeg osjetila, t2 (µs)	Izmjerena brzina detonacije između drugog i trećeg osjetila, v2 (m/s)	Stvarna brzina detonacije između drugog i trećeg osjetila, v2' (m/s)	Izmjereno vrijeme između trećeg i četvrtog osjetila, t3 (µs)	Izmjerena brzina detonacije između trećeg i četvrtog osjetila, v3 (m/s)	Stvarna brzina detonacije trećeg i četvrtog osjetila, v3' (m/s)
1	ø 110 mm	111,2	1258	1266	58,9	2376	2392	48,9	2862	2878
2		98,4	1422	1429	47,2	2947	2979	51,7	2707	2729
4		41	1707	3438	9,4	7446	14974	60,0	1166	2342
Sr. vrijednost		83,53	1462	2044	38,5	4256	2685	53,5	2245	2649
13	ø 125 mm	83,2	1682	1697	72,5	1931	1941	54,6	2197	2216
16		86,9	1611	1619	80,3	1743	1749	55,2	2173	2179
Sr. vrijednost		85,05	1646,5	1658	76,4	1837	1845	54,9	2185	2198
17	ø 160 mm	20,5	2926	2939	33,7	1780	1807	24,2	1652	1675
18		23,6	2542	2553	35,4	1694	1688	15,0	2666	2675
Sr. vrijednost		22,05	2734	2746	34,55	1737	1748	19,6	2159	2175
19	ø 75 mm	65,4	1529	1530	73,2	1366	1367	108,8	1102	1100
20		70,8	1412	1423	84,2	1187	1185	83,9	1430	1425
Sr. vrijednost		68,1	1470,5	1477	78,7	1276,5	1276	96,35	1266	1263

Cijev br.	Vanjski promjer cijevi, Ø (mm)	Izmjereno vrijeme između četvrtog i petog osjetila, t4 (µs)	Izmjerena brzina detonacije između četvrtog i petog osjetila, v4 (m/s)	Stvarna brzina detonacije između četvrtog i petog osjetila, v4' (m/s)	Izmjereno vrijeme između petog i šestog osjetila, t5 (µs)	Izmjerena brzina detonacije između petog i šestog osjetila, v5 (m/s)	Stvarna brzina detonacije između petog i šestog osjetila, v5' (m/s)	Srednja vrijednost stvarne brzine detonacije (m/s)	Inicijalno sredstvo	Temperatura eksploziva (°C)
1	ø 110 mm	65,0	2769	2775	62,9	2861	2877	2437	TED + apg20	27,1
2		64,9	2773	2773	59,9	3005	3013	2585	TED + apg20	27,2
4		54,4	1286	3317	37,4	1871	4839	5782	TED + apg20	23,6
Sr. vrijednost		61,4	2276	2955	53,4	2579	3576	3601		
13	ø 125 mm	43,2	4166	4178	10,2	17710	17706	5548	TED + apg20	22,1
16		62,1	2898	2903	57,7	3119	3127	2315	TED + apg20	20,3
Sr. vrijednost		52,65	3532	3541	34,0	10414,5	10416	3932		
17	ø 160 mm	46,9	2558	2575	34,4	3478	3510	2501	TED + apg20	22,4
18		56,6	2120	2125	37,5	3200	3219	2452	TED + apg20	20,9
Sr. vrijednost		51,75	2339	2350	35,95	3339	3364	2477		
19	ø 75 mm	118,5	1012	1019	105,2	1140	1136	1230	TED + apg20	23,1
20		98,0	1223	1231	90,6	1324	1325	1318	TED + apg20	22,6
Sr. vrijednost		108,25	1117,5	1125	97,9	1232	1231	1274		

Prilikom otpucavanja naboja s čeličnom oblogom nije došlo do prekida detonacije te su sva planirana ispitivanja provedena.

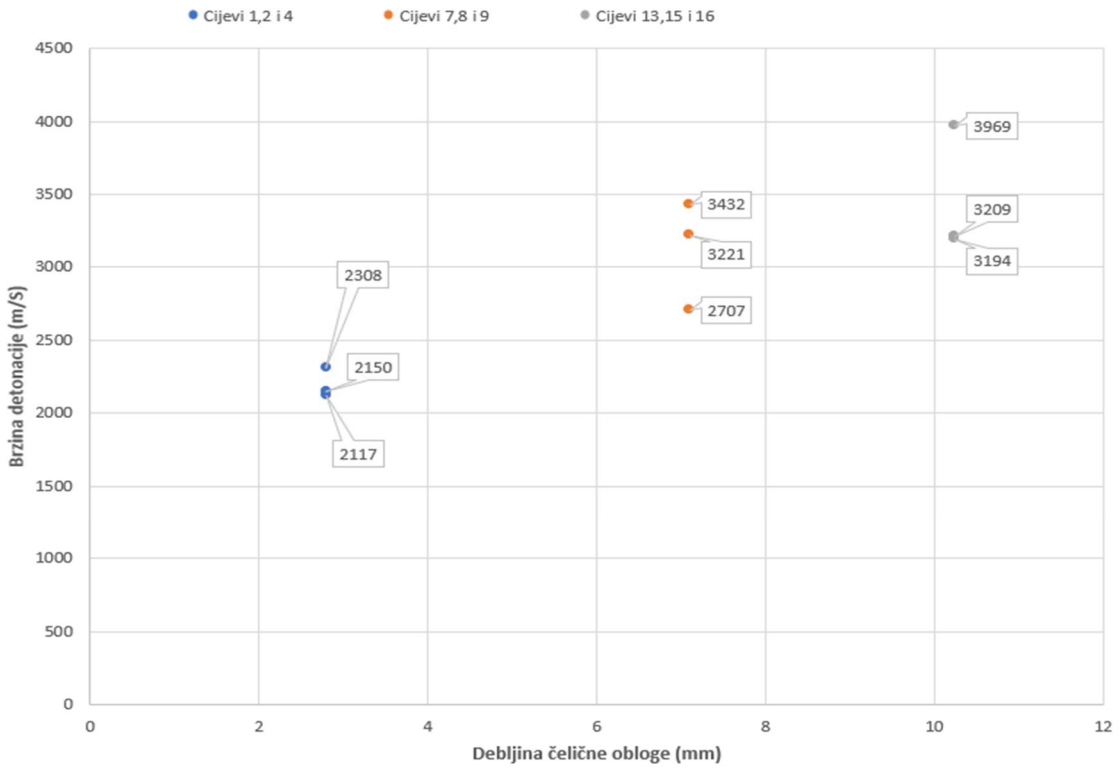
U tablici 6-2. nalaze se izmjerene vrijednosti detonacijske brzine po segmentima eksplozivnog naboja ANFO eksploziva u čeličnoj oblozi a izmjerene srednje vrijednosti detonacijskih brzina ANFO eksploziva iznose:

- 3120 m/s za naboj promjera 37/51,2 mm (debljina stijenke 7,1 mm)
- 2191 m/s za naboj promjera 39/44,6 mm (debljina stijenke 2,8 mm)
- 3457 m/s za naboj promjera 40/60,5 mm (debljina stijenke 10,25 mm)

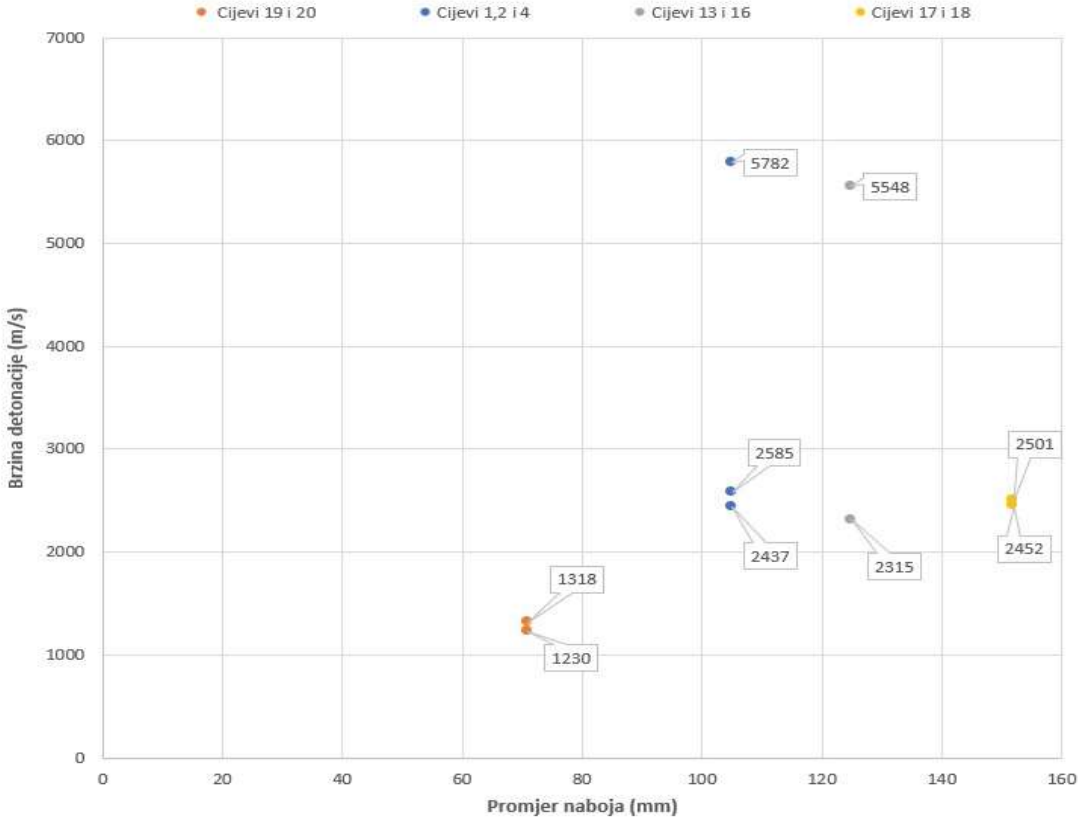
Tablica 6-2. Tablica izmjerenih vrijednosti detonacijske brzine po segmentima eksplozivnog naboja ANFO eksploziva (Sućeska, Štimac, Dobrilović, Škrlec i Bohanek, 2020)

cijev	masa cijevi	promjer v/u	masa eksploziva	udaljenost između sondi	t1	v1	t2	v2	t3	v3	t4	v4	t5	v5	vsred	temperatura
	g	mm	g	mm	µs	m/s	µs	m/s	µs	m/s	µs	m/s	µs	m/s	m/s	°C
1	1352	44,6/39	450	80	28.85	2772	27.6	2898	45.24	1768	34.61	2311	44.67	1790	2308	8.6
2	1348	44,6/39	450	80	36.52	2190	40.38	1981	29.64	2699	51.32	1558	37.11	2155	2117	8.4
4	1342	44,6/39	450	80	39.46	2027	36.43	2195	30.2	2649	44.41	1801	38.52	2076	2150	8.6
7	3829	51,2/37	450	80	34.72	2304	19.15	4177	23.85	3354	27.39	2920	23.88	3350	3221	8.3
8	3796	51,2/37	450	80	23.11	3461	35.02	2284	17.05	4692	21.36	3745	26.87	2977	3432	7.1
9	3809	51,2/37	450	80	31.65	2527	23.83	3357	38.4	2083	28.13	2843	29.33	2727	2707	7.6
13	6219	60,5/40	550	80	27.42	2917	24.36	3284	24.08	3322	10.33	7744	31.05	2576	3969	4.6
15	6141	60,5/40	600	80	29.08	2751	25.53	3154	22.08	3623	25.5	3137	23.68	3378	3209	4
16	6196	60,5/40	550	80	28.65	2792	25.53	3133	23.61	3388	24.79	3227	23.33	3429	3194	4.1

Prilikom otpucavanja uzoraka promjera naboja 71 mm, 105mm, 125mm i 152 mm s PVC oblogom, koja se zbog svojih mehaničkih karakteristika, smatra kao laka obloga ili naboj bez obloge debljine postignuta je najveća srednja brzina detonacije ANFO eksploziva prilikom otpucavanja naboja promjera 105 mm te debljine PVC obloge 5 mm a iznosila je 2511 m/s. Prilikom otpucavanja uzoraka promjera naboja 37 mm, 39 mm i 40 mm te debljine čelične obloge 2,8 mm, 7,1 mm i 10,25 mm postignuta je najveća srednja brzina detonacije ANFO eksploziva prilikom otpucavanja naboja promjera 40 mm te debljine čelične obloge 10,25 mm a iznosila je 3457 m/s. Na slikama 6-2. i 6-3. grafički je prikazano kako debljine čelične i PVC obloge utječu na brzinu detonacije ANFO eksploziva.



Slika 6-2. Grafički prikaz utjecaja debljine čelične obloge na brzinu detonacije ANFO eksploziva



Slika 6-3. Grafički prikaz utjecaja promjera naboja na brzinu detonacije ANFO eksploziva

7. ZAKLJUČAK

Na temelju podataka dobivenih iz terenskih isptivanja mjerenja brzine detonacije ANFO eksploziva, prilikom kojih su ispitivane različite debljine čelične obloge i promjeri eksploziva, možemo zaključiti kako debljina obloge i promjer eksplozivnog punjenja uvelike utječu na brzinu detonacije, a samim time i na radnu sposobnost eksploziva koja se povećava sa povećanjem debljine čelične obloge i promjera eksplozivnog punjenja. Usporedbom rezultata dobivenog mjerenjem brzine detonacije prilikom korištenja PVC obloge i promjera naboja 105 mm te čelične obloge debljine 10,25 mm te promjera naboja 40 mm srednja brzina detonacije eksploziva u čeličnoj oblozi veća je za 946 m/s. Osim veće srednje brzine detonacije prilikom korištenja čelične obloge potrebno je i manja količina ANFO eksploziva što umanjuje ukupne troškove miniranja i negativne utjecaja na okoliš. Potrebno je napomenuti da je stijena kao obloga eksploziva znatno kompleksniji medij od čeličnih cijevi te je potrebno napraviti dodatna ispitivanja u stijenskom masivu kako bi se u potpunosti kvantificirao utjecaj obloge pri minininiranju.

8.LITERATURA

BOHANEK, V. 2013. *Model nastajanja i analiza djelovanja kumulativnoga procesa linerarnih eksplozivnih naboja*, Doktorski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu.

DOBRILOVIĆ, M. 2008. *Raspoloživa energija tlačnog udarnog vala udarne cjevčice i njezina primjena u iniciranju električnog detonatora*, doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.

ESTER, Z., 2005. *Miniranje I.: eksplozivne tvari, svojstva i metode ispitivanja*. Zagreb: Rudarsko–geološko–naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu.

HR EN-13631-14 Eksplozivi za civilnu uporabu – Visokobrizantni eksplozivi –Dio 14: Određivanje brzine detonacije.

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

KONTINITRO, SA 2019. *Velocity Of Detonation Measuring Instrument Guide & Manual*, https://www.kontinitro.com/wp-content/uploads/2021/01/Guide-and-Manual-Explomet-2-2019.pdf(4.4.2021.)

PINTER, J. 2019. *Brzina detonacije ANFO eksploziva*, Diplomski rad. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu.

ŠTIMAC, B., BOHANEK, V., 2020. *Poboljšani model neidealne detonacije gospodarskih eksploziva (NEIDEMO).* Izvještaj. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu. Broj izvještaja D1.3.

SUĆESKA, M. 2001. *Eksplozije i eksplozivi njihova mirnodopska primjena.* Rudarsko geološko naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu.

ZEČIĆ, L. 2015. *Emulzijski i ANFO eksplozivi s dodatkom organskog otpada.* Diplomski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu.

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.

ŽBULJ, M., 2019. *Eksplozivi s mikročesticama*, Diplomski rad. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu.HR EN-13631-14 Eksplozivi za civilnu uporabu – Visokobrizantni eksplozivi –Dio 14: Određivanje brzine detonacije

KLASA: 602-04/21-01/141
URBROJ: 251-70-11-21-2
U Zagrebu, 13.09.2021.

Bartul Marunić, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/21-01/141, URBROJ: 251-70-11-21-1 od 28.04.2021. priopćujemo vam temu završnog rada koja glasi:

UTJECAJ DEBLJINE ČELIČNE OBLOGE I PROMJERA EKSPLOZIVA NA REZULTATE ISPITIVANJA BRZINE DETONACIJE ANFO EKSPLOZIVA

Za voditelja ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i ocjeni završnog rada Izv.prof.dr.sc. Vječislav Bohanek nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu

Voditelj

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Vječislav Bohanek

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za završne i diplomske ispite:

(potpis)

Doc.dr.sc. Dubravko Domitrović

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Dalibor Kuhinek

(titula, ime i prezime)