

Prijenos detonacije ANFO eksploziva

Žugec, David

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:860486>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-23**



Repository / Repozitorij:

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



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

PRIJENOS DETONACIJE ANFO EKSPLOZIVA

Diplomski rad

David Žugec

R320

Zagreb, 2023.



KLASA: 602-01/23-01/78
URBROJ: 251-70-11-23-2
U Zagrebu, 14.09.2023.

David Žugec, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/23-01/78, URBROJ: 251-70-11-23-1 od 06.06.2023. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

PRIJENOS DETONACIJE ANFO EKSPLOZIVA

Za voditelja ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada izv.prof.dr.sc. Vinko Škrlec nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i suvoditelja Prof.dr.sc. Mario Dobrilović.

Voditelj

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Vinko Škrlec

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Mario Klanfar

(titula, ime i prezime)

Suvoditelj

(potpis)

Prof.dr.sc. Mario Dobrilović

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje
Pašić

(titula, ime i prezime)

PRIJENOS DETONACIJE ANFO EKSPLOZIVA

David Žugec

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

Sažetak

ANFO eksplozivi u najvećoj se mjeri koriste za površinska miniranja u Republici Hrvatskoj. Razlog tomu je relativno niska nabavna cijena, jednostavnost proizvodnje, sigurnost pri rukovanju, zadovoljavajući učinci miniranja te mogućnost mehaničkog punjenja bušotina. Unatoč čestoj uporabi, postoji nedostatak znanja u postizanju optimalnih parametara detonacije. U ovom radu provedeno je istraživanje s ciljem određivanja prijenosa detonacije ANFO eksploziva kao jednog od važnih detonacijskih parametara eksploziva. Kako bi se odredio prijenos detonacije ANFO eksploziva provedena su terenska ispitivanja na poligonu za ispitivanje eksplozivnih tvari. Ispitivanje je provedeno prema zahtjevima norme *HRN EN 13631-11:2004: Eksplozivi za civilnu uporabu. Jaki eksplozivi. 11. dio: Određivanje prijenosa detonacije (EN 13631-11:2003)*.

Ključne riječi: ANFO, detonacija, prijenos detonacije, brzina detonacije
Završni rad sadrži: 31 stranice, 4 tablica, 24 slika, 0 priloga, i 13 reference.
Jezik izvornika: Hrvatski
Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb
Mentori: Dr. sc. Vinko Škrlec, izvanredni profesor RGNF
Komentor: Dr. sc. Mario Dobrilović, profesor RGNF
Ocjenjivači: Dr. sc. Vinko Škrlec, izvanredni profesor RGNF
Dr. sc. Mario Dobrilović, profesor RGNF
Dr. sc. Siniša Stanković, docent RGNF
Dr. sc. Vječislav Bohanek, izvanredni profesor RGNF
Dr. sc. Tomislav Korman, izvanredni profesor RGNF

THE TRANSMISSION OF DETONATION OF ANFO EXPLOSIVES

David Žugec

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

Abstract

ANFO explosives are mostly used for surface blasting in the Republic of Croatia. The reason for this is the relatively low purchase price, ease of production, safe handling, satisfactory blasting effects and the possibility of mechanical filling of boreholes. Despite frequent use, there is a lack of knowledge in achieving optimal detonation parameters. In this paper, research was conducted with the aim of determination of transmission of detonation of ANFO explosives as one of the important detonation parameters of explosives. To determine the transmission of detonation of ANFO explosives, field tests were conducted at the testing ground for explosive substances. The test was carried out according to the requirements of HRN EN 13631-11:2004: Explosives for civil uses. High explosives. Part 11: Determination of transmission of detonation (EN 13631-11:2003).

Keywords: ANFO, detonation, transmission of detonation, velocity of detonation

Thesis contains: 31 pages, 4 tables, 24 figures, 0 appendixes, i 13 references.

Original in: Croatian

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

Supervisors: Associate Professor Vinko Škrlec, PhD

Tech. assistance: Full Professor Mario Dobrilović, PhD

Reviewers: Associate Professor Vinko Škrlec, PhD
Full Professor Mario Dobrilović, PhD
Assistant Professor Siniša Stanković, PhD
Associate Professor Vječislav Bohanek, PhD
Associate Professor Tomislav Korman, PhD

Defence date: September 18, 2023, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. EKSPLOZIJA, EKSPLOZIVNE TVARI, DETONACIJA I BRZINA DETONACIJE	2
2.1. Eksplozija	2
2.2. Eksplozivne tvari	3
2.3. Detonacija	4
2.4. Brzina detonacije	6
3. ANFO EKSPLOZIVI.....	8
4. ODREĐIVANJE PRIJENOSA DETONACIJE ANFO EKSPLOZIVA	10
4.1. Određivanje prijenosa detonacije eksploziva	10
4.2. Određivanje brzine detonacije eksploziva.....	16
4.3. Određivanje prijenosa detonacije ANFO eksploziva u praksi	17
5. ANALIZA REZULTATA MJERENJA.....	24
6. ZAKLJUČAK.....	29
7. LITERATURA	30

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Eksplozija (Dobrilović 2008)	3
Slika 2-2. Opća podjela eksplozivnih tvari (Dobrilović 2008)	4
Slika 2-3. Detonacijski proces u patroni eksploziva (Dobrilović 2008)	5
Slika 2-4. Patrona eksploziva pri detonaciji (Škrlec 2015).....	7
Slika 3-1. Shematski prikaz proizvodnje ANFO eksploziva (Bohanek 2016).....	8
Slika 4-1. Razmak patrone ravnih krajeva (HRN EN 13631-11: 2004)	12
Slika 4-2. Razmak za patrone zaobljenih krajeva (HRN EN 13631-11: 2004)	12
Slika 4-3. Postavljanje ispitnog uzorka na otvoreno za eksplozive koji nisu osjetljivi na inicijalni impuls detonatora (zaobljene patrone) (HRN EN 13631-11: 2004)	13
Slika 4-4. Postavljanje ispitnog uzorka na otvoreno za eksplozive koji su osjetljivi na inicijalni impuls detonatora (HRN EN 13631-11: 2004)	13
Slika 4-5. Postavljanje ispitnog uzorka u cijevi za eksplozive koji nisu osjetljivi na inicijalni impuls detonatora (HRN EN 13631-11: 2004)	14
Slika 4-6. Postavljanje ispitnog uzorka u cijevi za eksplozive koji su osjetljivi na inicijalni impuls detonatora (HRN EN 13631-11: 2004)	15
Slika 4-7. Postavljanje detonatora u pojačnik (HRN EN 13631-11: 2004)	15
Slika 4-8. Granule korištenog ANFO eksploziva	18
Slika 4-9. Udio uljne faze u uzorku ANFO eksploziva	19
Slika 4-10. Cijev za smještaj eksploziva.....	19
Slika 4-11. Postavljanje ispitnog uzorka.....	20
Slika 4-12. Ispitni uzorak postavljen za ispitivanje s razmakom patrona 2 cm	21
Slika 4-13. Ispitni uzorak postavljen za ispitivanje s razmakom patrona 45 cm	21
Slika 4-14. Ispitni uzorak kod kojega nije došlo do prijenosa detonacije.....	22
Slika 4-15. Kontinitro AS Explomet 2 (Kontinitro, 2019).....	23
Slika 5-1. Brzina detonacije davatelja.....	26
Slika 5-2. Brzina detonacije primatelja.....	27
Slika 5-3. Brzina detonacije primatelja na ukupnoj udaljenosti između osjetila broj 1 i broj 4	27
Slika 5-4. Brzina detonacije primatelja u zraku između Davatelja i Primatelja	28

POPIS TABLICA

Tablica 3-1. Ovisnost omjera ANFO-a i emulzijskog eksploziva na vodootpornost Heavy ANFO-a	9
Tablica 4-1. Preporučene dimenzije cijevi (HRN ISO 4200:1991).....	11
Tablica 4-2. Podaci o ANFO eksplozivu Pakaex dobiveni ispitivanjem.....	18
Tablica 5-1. Rezultati određivanja prijenosa detonacije ANFO eksploziva	25

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
p	bar	tlak
ρ	$\text{g/cm}^3, \text{kg/dm}^3$	gustoća
T	$^{\circ}\text{C}, ^{\circ}\text{K}$	temperatura
Q	kJ/g	toplina oslobođena detonacijom
D	m/s	brzina detonacije
d	mm	promjer
D	mm, cm	razmak
L	mm	udaljenost
t	s	vrijeme

1. UVOD

Eksplozivi su energetska materijala koji se stoljećima razvijaju i na siguran način primjenjuju u civilne i vojne svrhe. Civilna primjena eksploziva vrlo je široka, a najčešća je u rudarstvu jer su dokazano najjeftiniji energetska materijala za pridobivanje mineralnih sirovina.

Učinkovitost miniranja, odnosno korištenja eksploziva za pridobivanje mineralne sirovine ovisi o detonacijskim parametrima eksploziva, rasporedu i nagibu minskih bušotina te o fizičko mehaničkim značajkama stijene. Ovaj rad usredotočen je na detonacijske parametre eksploziva. Detonacijske parametre eksploziva moguće je odrediti terenskim ili laboratorijskim ispitivanjima, proračunima te složenim računalnim modeliranjem.

Za potrebe ovog rada provedena su terenska ispitivanja prijenosa detonacije ANFO eksploziva, najrasprostranjenijeg eksploziva u rudarstvu. ANFO eksploziv mješavina je amonijeva nitrata i dizel ulja, odnosno goriva. Neotporan je na vlagu pa se u vlažnim uvjetima primjenjuje u patronama.

Prilikom spuštanja patrona u bušotinu potrebno je ostvariti kontakt pojedinih patrona kako bi se osigurao siguran prijenos detonacije. Ponekad taj kontakt nije moguće ostvariti, zbog mogućeg zarušavanja minske bušotine. Zbog toga je važno odrediti točnu maksimalnu udaljenost na kojoj dolazi do prijenosa detonacije za svaku pojedinu vrstu eksploziva. U ovom radu je određen prijenos detonacije za ANFO eksploziv.

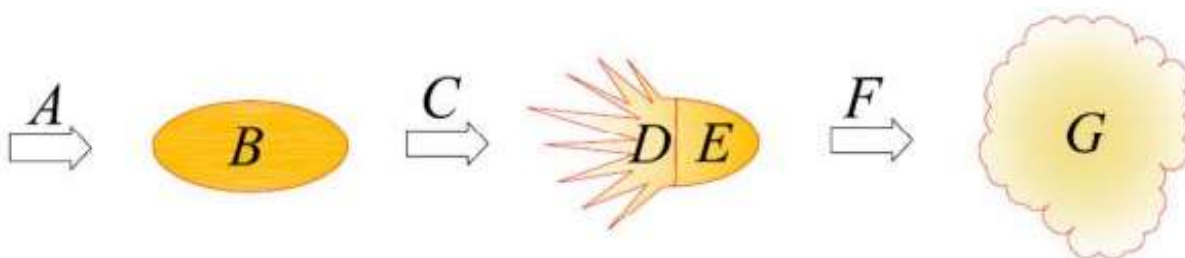
2. EKSPLOZIJA, EKSPLOZIVNE TVARI, DETONACIJA I BRZINA DETONACIJE

U daljnjem tekstu će biti objašnjeni pojmovi eksplozija, eksplozivne tvari, detonacije te brzine detonacije.

2.1. Eksplozija

Pojam eksplozija dolazi od latinske riječi *explodere* što znači raspasti se. To 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). Može se definirati kao izrazito brz egzoterman proces transformacije početne krute tvari, koji prati naglo širenje nastalih plinova i pretvorbu potencijalne energije sustava u mehanički rad. Efekt eksplozije nastaje uslijed brze ekspanzije plinova. U samom procesu eksplozije dolazi do iznenadnog porasta tlaka u okolini eksplozije, što je uzrok destruktivnog djelovanja na okolni prostor. Eksplozije mogu biti rezultat fizičkih, kemijskih ili nuklearnih promjena, te se stoga razlikuju fizičke, kemijske i nuklearne eksplozije. U kontekstu rudarskih radova, najuobičajeniji oblik eksplozije je kemijska eksplozija. To je proces koji se odvija u eksplozivnim tvarima i čija se energija koristi za dobivanje energije, odnosno mehaničkoga rada (Dobrilović 2008).

Shematski prikaz eksplozije vidljiv je na slici 2-1.



Kazalo:

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

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

C - kemijski proces pretvorbe,

D - plinoviti produkti,

E - neporemećena eksplozivna tvar,

F - ekspanzija plinovitih produkata,

G - plinoviti produkti u ekspanziji ($T \approx 2000-5000 \text{ }^\circ\text{K}$, $v \approx 1000 \text{ kg/dm}^3$, $p \approx 105 \text{ bar}$, $Q \approx 3,5-7,5 \text{ kJ/g}$).

Slika 2-1. Eksplozija (Dobrilović 2008)

Eksplozija se može odvijati na dva načina: kao sagorijevanje i kao detonacija. Ovisno o željenoj namjeni i karakteristikama korištenih tvari, obje reakcije se koriste za dobivanje korisnog rada (Bohanek 2013).

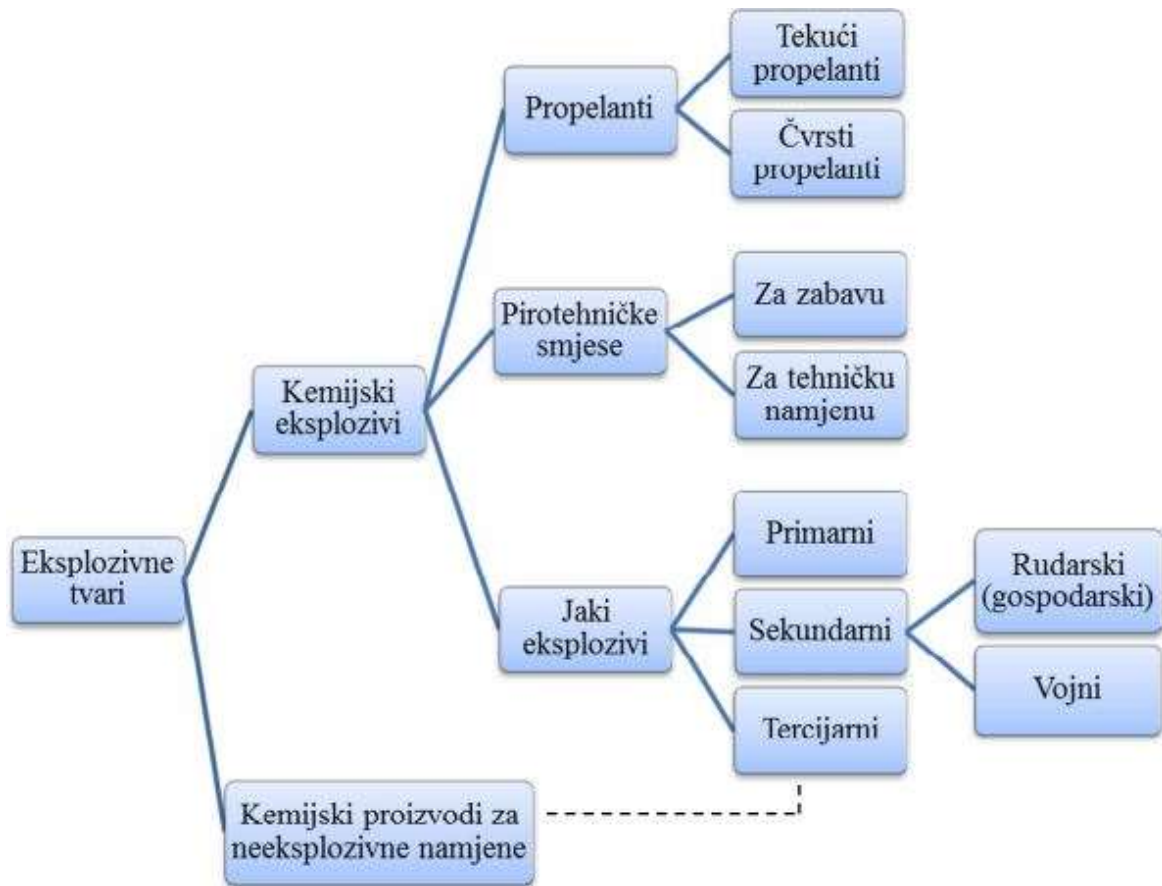
2.2. Eksplozivne tvari

Eksplozivne tvari ili eksplozivi su kemijski spojevi ili smjese koje imaju sposobnost da pod utjecajem vanjskog energetskog impulsa detoniraju, odnosno da se kemijski razlažu u vrlo kratkom vremenskom razdoblju i pritom oslobađaju znatnu količinu plinova i topline (Krsnik 1989).

U rudarstvu se najčešće koriste eksplozivi iz kategorije jakih eksploziva (*engl. High explosives*). Ovi eksplozivi se dijele na primarne (inicijalne), sekundarne (brizantne) i tercijarne eksplozive.

Primarni ili inicirajući eksplozivi, kako se još nazivaju, koriste se za iniciranje detonacije drugih eksploziva i na prvom su mjestu u lancu iniciranja (Bohanek 2013). Njihova su osnovna svojstva iznimna osjetljivost na vanjske impulse te sposobnost razvijanja maksimalne brzine detonacije u jako kratkom vremenu. Zbog tih se svojstava koriste u različitim vrstama detonatora. Najčešće korišteni inicijalni eksplozivi u praksi su: živin fulminat, olovni azid, srebrni azid, olovni stifemat, tetracen i diazodinitrofenol.

Sekundarni eksplozivi su manje osjetljivi na početne impulse te za postizanje stabilne detonacije zahtijevaju znatno veću energiju. Iz navedenog razloga iniciraju se inicijalnim sredstvima koja sadrže primarne eksplozive. Slika 2-2 prikazuje opću podjelu eksplozivnih tvari.



Slika 2-2. Opća podjela eksplozivnih tvari (Dobrilović 2008)

Temeljem kemijskog sastava, eksplozivi se mogu dodatno podijeliti na monomolekularne eksplozive i na eksplozivne smjese.

2.3. Detonacija

„Detonacija ima nekoliko karakteristika koji je razlikuju od sagorijevanja eksplozivne tvari i ostalih eksplozija. Detonacija je redovito nadzvučni proces u odnosu na brzinu zvuka u eksplozivnoj tvari. Širi se mehanizmom toplih točaka, defekata ili uključaka u eksplozivnoj tvari koji postaju centri za daljnje širenje reakcije“ (Bohanek 2013, p. 4).

Kako bi se ostvarila detonacija nekog energetskog materijala, on mora imati eksplozivna svojstva, a inicijalni impuls mora imati dovoljnu energiju za poticanje stabilne detonacije u eksplozivu.

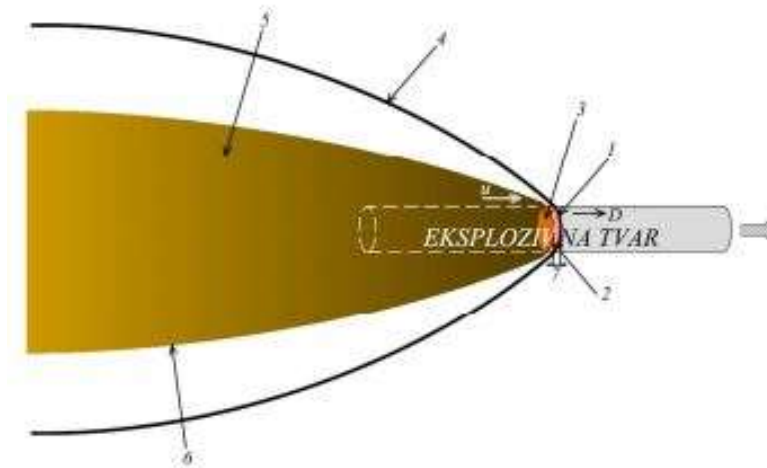
U praktičnim uvjetima, detonacija se može potaknuti na sljedeće načine:

- dovođenjem toplinskog impulsa eksplozivnoj tvari,
- pretvaranjem deflagracije u detonaciju, što vrijedi samo za primarne eksplozive,

- djelovanjem udarnog impulsa i toplim točkama, što se odnosi na sekundarne eksplozive.

Za razvoj stabilne detonacije, inicijalni impuls mora posjedovati dovoljno energije.

Fronta udarnog vala napreduje brže od fronte kemijskih reakcija, a cijeli proces odvija se unutar vremenskog raspona od nekoliko nanosekundi do mikrosekundi. Volumen rezultirajućih produkata detonacije gotovo je identičan početnom volumenu tvari, a toplina je već oslobođena pa su produkti zagrijani na visoke temperature i nalaze se pod visokim tlakom. Budući da su pod visokim tlakom, prilikom ekspanzije oslobađaju energiju i prate frontu udarnog vala koji se širi i kroz eksplozivnu tvar i kroz okolinu, zrak ili stijenu, ovisno o tome u kojem se mediju detonacija zbiva (Bohanek 2013). Na slici 2-3 prikazan je raspored tlakova prilikom detonacije u patroni eksploziva.



Kazalo:

1. Fronta udarnog vala,
2. Zona kemijskih reakcija,
3. Chapman-Jouguetova ravnina,
4. Udarni val u okolnom mediju,
5. Ekspandirajući plinoviti produkti,
6. Taylorov val produkata

D – brzina detonacije (m/s)

u – brzina produkta (m/s)

Slika 2-3. Detonacijski proces u patroni eksploziva (Dobrilović 2008)

Kako bi se bolje shvatilo detonacijske procese, u 19. i 20. stoljeću razvijene su teorije koje ih opisuju. CJ teorija, koja pretpostavlja da je detonacija idealna, jednodimenziona je

teorija detonacijskog procesa koju je postavio Chapman 1899., a dopunio Jouguet 1905. Prema ovoj teoriji udarni val, koji inicira reakciju, kreće se u ravnini te kroz eksplozivnu materiju putuje nepromijenjen, a reakcija se odvija u zoni udarnog vala. Sva energija trenutno se oslobađa u toj zoni.

ZND teorija (Zeldovich, Von Neuman, Döring) mijenjajući neke pretpostavke nadopunjuje CJ teoriju. Detonacijski val sačinjen je od dvije zone, zone reakcija i zone tlačnog udarnog vala. Zona reakcija se nalazi se iza zone tlačnog udarnog vala, jer se reakcija ne odvija se u zoni udarnog vala. Ova teorija, također, previše idealizira proces detonacije jer još uvijek smatra kako se udarni val kreće u ravnini, što nije slučaj u realnom procesu detonacije.

Kako bi se poboljšali modeli detonacijskih procesa potrebno je detonacijske valove promatrati u prostoru. U obzir je potrebno uzeti postupno reagiranje eksplozivne tvari pod djelovanjem tlaka i odrediti veličine politropskog (adijabatskog) eksponenta za realne tvari u području izuzetno visokih tlakova i temperatura. Za proces detonacije to konkretno znači da sam tok reakcije odstupa od idealiziranih modela. Reakcija u detonacijskoj zoni nikad nije završena, brzina detonacije je smanjena i, ako poprečni presjek eksplozivnog naboja postane premali (kritični promjer), proces će preći u deflagaciju ili se zaustaviti (Pinter 2019).

2.4. Brzina detonacije

Brzinom detonacije nazivamo brzinu širenja detonacijskog udarnog vala od mjesta iniciranja do kraja eksplozivnog naboja. Faktori koji direktno utječu na brzinu detonacije su promjer patrone eksploziva ili promjer minske bušotine. Ukoliko su ti promjeri premali, postoji mogućnost izostanka ili prekida detonacije. Kritičnim promjerom naziva se minimalan promjer potreban za postizanje stabilne detonacije za pojedini eksploziv.

Brzina detonacije zapravo je brzina kemijske promjene eksploziva i brzina propagiranja detonacijskog vala. Povećanje brzine detonacije uzrokuje i povećanje razorne snage, odnosno brizantnosti eksploziva, pri čemu se povećava mehanički rad, a smanjuju gubici topline isijavanjem. Na slici 2-4. prikazana je patrona eksploziva pri detonaciji.



Slika 2-4. Patrona eksploziva pri detonaciji (Škrlec 2015)

Detonacijska brzina uvelike ovisi o gustoći eksploziva, promjeru patrone, oblozi eksploziva, načinu iniciranja i temperaturi eksplozije, a za gospodarske eksplozive iznosi približno od 2000 m/s do 7000 m/s (Gokhale, 2011).

3. ANFO EKSPLOZIVI

Eksplozivi na bazi amonijeva nitrata (AN) najjeftiniji i najčešće su korišteni gospodarski eksplozivi. Prema procjenama, ANFO se koristi za 80% površinskih miniranja u Republici Hrvatskoj (Dobrilović i dr. 2014). Uzrok tolike zastupljenosti su relativno niska nabavna cijena, jednostavnost proizvodnje, sigurnost pri rukovanju, zadovoljavajući učinci miniranja te mogućnost mehaničkog punjenja bušotina. Naziv ANFO eksploziva potječe iz engleskog jezika (engl. *ammonium nitrate fuel oil*) (Pinter 2019). Bazu ANFO eksploziva čine granule amonijeva nitrata, koje uz dodatak goriva (mineralna ulja, plinska ulja, naftni derivati) čine eksplozivnu smjesu. Na slici 3-1. vidljiv je shematski prikaz proizvodnje ANFO eksploziva.



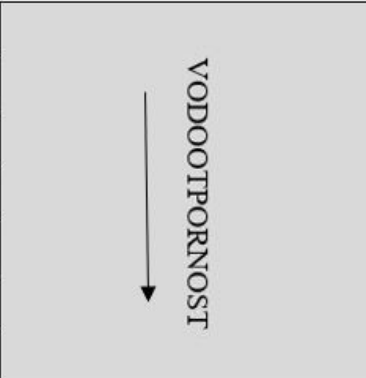
Slika 3-1. Shematski prikaz proizvodnje ANFO eksploziva (Bohanek 2016)

Dimenzija i poroznost granula amonijevog nitrata najvažnija su svojstva koja utječu na učinak eksploziva. ANFO eksploziv proizvodi se miješanjem amonijeva nitrata i goriva u omjeru 94,5% : 5,5%. Pri takvom omjeru bilanca kisika približna je nuli. Proizvodnja ANFO eksploziva odvija se u proizvodnom pogonu, a moguća je i proizvodnja na mjestu upotrebe, za što se koriste mobilna proizvodna postrojenja smještena na kamion. Ako je eksploziv proizveden na mjestu upotrebe, punjenje bušotina vrši se mehaničkim usipavanjem u bušotinu, dok se u drugim slučajevima pakira u patrone ili vreće. Ukoliko se tako pakiran eksploziv predugo skladišti, dolazi do otpuštanja goriva te se gube njegova eksplozivna svojstva, a negativna posljedica pri skladištenju može biti i vlaženje eksploziva. Vremenski period skladištenja ANFO eksploziva ne bi smio biti duži od tri mjeseca (Ester 2005).

ANFO eksploziv odlikuje značajna razorna snaga kao posljedica velikog volumena detonacijskih plinova, bez obzira na niski detonacijski tlak i detonacijsku brzinu. Njegovi su nedostaci ne idealna detonacija, niska gustoća i neotpornost na vodu.

Kako bi se postigla vodootpornost i povećala nasipna gustoća, u ANFO eksploziv dodaje se veća količina emulzije i takvim postupkom dobiva se teški ANFO ili HANFO (*engl. Heavy ANFO*). U tablici 3-1. prikazana je ovisnost 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

Postotak		
Emulzijski eksploziv	ANFO	
20	80	
40	60	
50	50	
60	40	
80	20	

Osim postizanja vodootpornosti, na taj način dobiva se eksploziv idealnije detonacije, veće osjetljivosti na detonatore, veće gustoće, kraćeg vremena punjenja, boljih performansi te nižih emisija plinova u odnosu na ANFO.

4. ODREĐIVANJE PRIJENOSA DETONACIJE ANFO EKSPLOZIVA

U daljnjem tekstu će biti objašnjen način određivanja prijenosa detonacije ANFO eksploziva.

4.1. Određivanje prijenosa detonacije eksploziva

Određivanje prijenosa detonacije eksploziva vrši se prema zahtjevima norme *HRN EN 13631-11:2004: Eksplozivi za civilnu uporabu. Jaki eksplozivi. 11. dio: Određivanje prijenosa detonacije (EN 13631-11:2003)*. Prijenos detonacije definira se kroz sposobnost iniciranja između dvije, u pravcu postavljene patrone sa zračnim razmakom između njih (HRN EN 13631-11: 2004). Ako se u deklaraciji proizvođača navodi da eksploziv stabilnu detonaciju razvija samo u zatvorenom prostoru, bušotini, ispitivanje se provodi smještanjem patrona eksploziva u čelične cijevi s međusobnim razmakom.

Za provođenje ispitivanja potrebno je sredstvo za postavljanje patrona (drvena letvica ili metalna šipka na koju se učvršćuju patrone), čelične cijevi te sustav za iniciranje prema zahtjevima norme HRN EN 13631-10:2004, točka 5.1. Dimenzije čeličnih cijevi, prema zahtjevima norme HRN ISO 4200:1991 dane su u tablici 4-1. Prema normi HRN EN 10025:2004 cijevi trebaju biti kvalitete S 235. Unutarnji promjer ispitne cijevi mora biti takav da ne ostaje prostora između patrona i cijevi zbog izbjegavanja kanalnog efekta (HRN EN 13631-11: 2004).

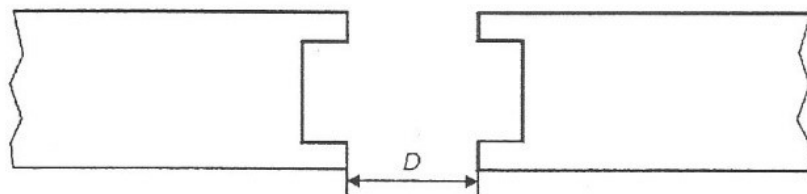
Tablica 4-1. Preporučene dimenzije cijevi (HRN ISO 4200:1991)

Unutarnji promjer (mm)	Debljina stjenke (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

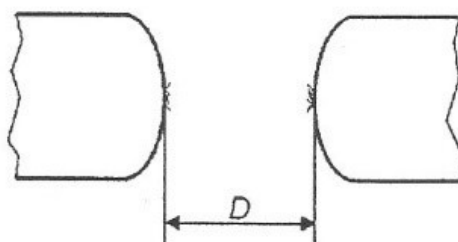
Uzorkovanje eksploziva vrši se slučajnim odabirom iz raspoložive količine proizvoda za ispitivanje u skladištu eksplozivnih tvari naručitelja ispitivanja.

Ispitni uzorci, i davatelj i primatelj, moraju biti komercijalne patrone najmanjeg promjera koji se stavlja na tržište (HRN EN 13631-11: 2004). Zbog postizanja stabilne detonacije duljina patrone davatelja mora biti peterostruki promjer patrone. Duljina patrone primatelja mora biti peterostruki promjer patrone. Ukoliko je potrebno, za mjerenje brzine detonacije prema normi HRN EN 13631-14:2004, koja se koristi za potvrđivanje prijenosa detonacije primatelju, ta se duljina može povećati. Ako je duljina patrone manja od tražene duljine, potrebno je spojiti dvije ili više patrona na način da se odsijeku krajevi koji se spajaju te se spoje u potpuni kontakt i zalijepe ljepljivom trakom.

Patrone je potrebno razdvojiti za iznos duljine traženog razmaka. Duljina razmaka (D) za patrone ravnog kraja mjeri se prema slici 4-1. Patrone zaobljenih krajeva potrebno dovesti u kontakt bez pritiskanja te pomaknuti jednu od patrona na veličinu traženog razmaka prema slici 4-2.

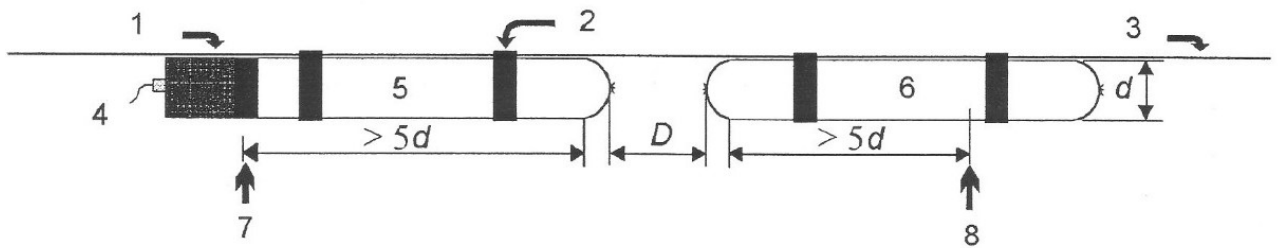


Slika 4-1. Razmak patrone ravnih krajeva (HRN EN 13631-11: 2004)



Slika 4-2. Razmak za patrone zaobljenih krajeva (HRN EN 13631-11: 2004)

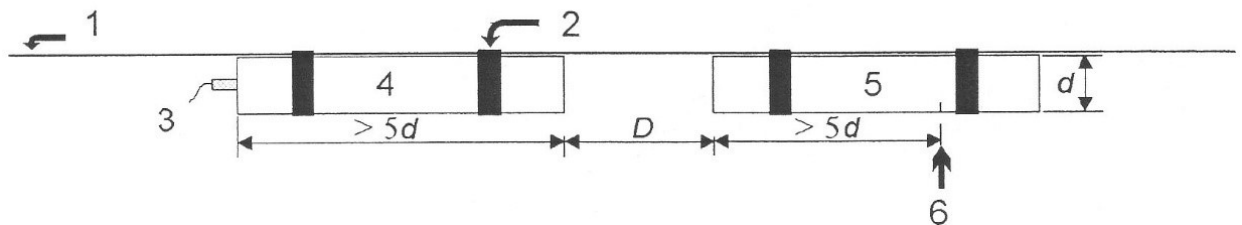
Patrone eksploziva koje nisu osjetljive na inicijalni impuls detonatora, a za koje je proizvođačem deklarirano da mogu detonirati u otvorenom prostoru postavljaju se prema slici 4-3. Patrone koje su osjetljive na inicijalni impuls detonatora, a za koje je proizvođačem deklarirano da mogu detonirati u otvorenom prostoru postavljaju se prema slici 4-4.



Kazalo:

1. Pojačnik,
2. Ljepljiva traka,
3. Letvica,
4. Detonator,
5. Davatelj,
6. Primatelj,
7. Spoj pojačnika i odrezanog kraja patrone,
8. Prvo osjetilo za mjerenje brzine detonacije.

Slika 4-3. Postavljanje ispitnog uzorka na otvoreno za eksplozive koji nisu osjetljivi na inicijalni impuls detonatora (zaobljene patrone) (HRN EN 13631-11: 2004)

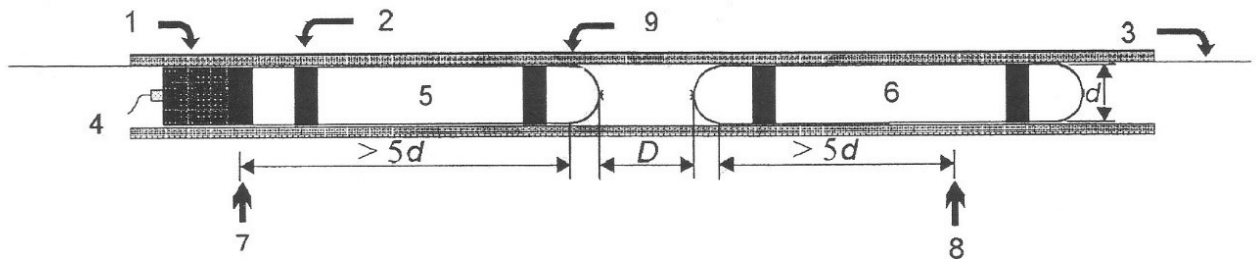


Kazalo:

1. Letvica,
2. Ljepljiva traka,,
3. Detonator,
4. Davatelj,
5. Primatelj,
6. Prvo osjetilo za mjerenje brzine detonacije

Slika 4-4. Postavljanje ispitnog uzorka na otvoreno za eksplozive koji su osjetljivi na inicijalni impuls detonatora (HRN EN 13631-11: 2004)

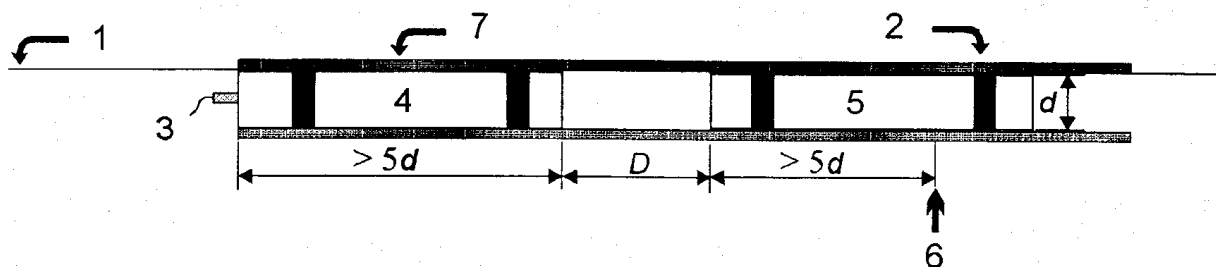
Patrone zaobljenih krajeva, koje nisu osjetljive na inicijalni impuls detonatora, a za koje je proizvođačem deklarirano da mogu detonirati u samo u bušotini (zatvorenom prostoru) postavljaju se prema slici 4-5. Patrone ravnih krajeva osjetljive na inicijalni impuls detonatora, a za koje je proizvođačem deklarirano da mogu detonirati u samo u bušotini (zatvorenom prostoru) postavljaju se prema slici 4-6.



Kazalo:

1. Pojačnik,
2. Ljepljiva traka,
3. Letvica,
4. Detonator,
5. Davatelj,
6. Primatelj,
7. Spoj pojačnika i odrezanog kraja patrone,
8. Prvo osjetilo za mjerenje brzine detonacije,
9. Čelična cijev

Slika 4-5. Postavljanje ispitnog uzorka u cijevi za eksplozive koji nisu osjetljivi na inicijalni impuls detonatora (HRN EN 13631-11: 2004)

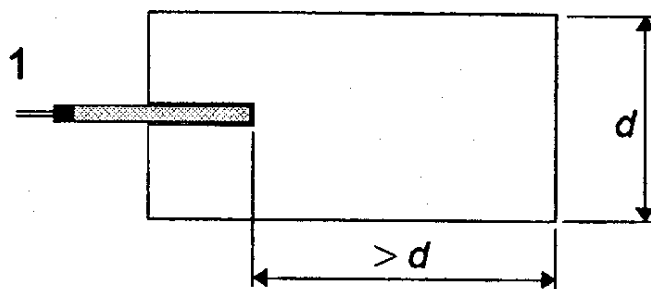


Kazalo

1. Letvica,
2. Ljepljiva traka,
3. Detonator,
4. Davatelj,
5. Primatelj,
6. Prvo osjetilo za mjerenje brzine detonacije,
7. Čelična cijev

Slika 4-6. Postavljanje ispitnog uzorka u cijevi za eksplozive koji su osjetljivi na inicijalni impuls detonatora (HRN EN 13631-11: 2004)

Prije samog ispitivanja potrebno je izmjeriti temperaturu ispitnog uzorka. Uzorak je potrebno opremiti inicijalnim sredstvom i mjernim sustavom. Ako se ispituje bez cijevi, ispitni uzorak mora biti postavljen slobodno iznad tla. Prema deklaraciji proizvođača u skladu s zahtjevima norme HRN EN 13631-10:2004, točka 5.1 uzorak se inicira pojačnikom ili detonatorom. Slika 4-7 prikazuje način postavljanja detonatora u pojačnik. Promjer pojačnika mora biti jednak ili manji promjeru patrone.



Slika 4-7. Postavljanje detonatora u pojačnik (HRN EN 13631-11: 2004)

Razmaci između patrona povećavaju se u koracima ukoliko je na početnom razmaku došlo do prijenosa detonacije. U početnoj fazi ispitivanja koraci mogu biti veći, a pri kraju iznose 1 cm. Ispitivanje ne mora početi od kontakta nego se preporučuje proizvođačem deklariran razmak.

Veličina prijenosa detonacije je onaj najveći razmak D (D_{max}) pri kojemu je u tri ispitivanja tri puta došlo do prijenosa detonacije (HRN EN 13631-11: 2004).

Nakon svakog ispitivanja u zapisnik ispitivanja Z-031 E upisuju se slijedeći podaci:

- a) poveznica s normom HRN EN 13631-11:2004,
- b) temperatura ispitnih uzoraka,
- c) oblik krajeva patrona,
- d) promjer i duljina patrona,
- e) duljinu, unutarnji promjer i debljinu stjenke čelične cijevi ako se koristi,
- f) način iniciranja,
- g) način mjerenja postojanja (brzine) detonacije,
- h) vrijednost D_{max} u cm.

4.2. Određivanje brzine detonacije eksploziva

Određivanje brzine detonacije eksploziva vrši se prema zahtjevima norme *HRN EN 13631-14:2004: Eksplozivi za civilnu uporabu. Jaki eksplozivi. 14. dio: Određivanje brzine detonacije (EN 13631-14:2004)*. Brzina detonacije eksploziva mjeri se u laboratoriju za ispitivanje eksplozivnih tvari ili vanjskom ispitivalištu – poligonu. Ispitivanje se provodi kontinuiranom ili diskontinuiranom (point to point) metodom.

Kontinuiranom metodom mjeri se brzina detonacije po cijeloj dužini eksplozivnog punjenja. Metoda se temelji na kontinuiranom snimanju promjene električnog otpora posebne sonde kroz koju prolazi stalna struja. Pod utjecajem detonacijskog vala, osjetilo se kontinuirano skraćuje i tako mu se mijenja otpor. Promjena otpora uzrokuje promjenu napona koja se bilježi na oscilogramu kao vremenska funkcija, odakle se može iščitati, za bilo koji dio eksplozivnog punjenja (Paškov 2022). Ova metoda češću primjenu pronalazi u mjerenju brzine detonaciju u minskim bušotinama nego za mjerenje brzine detonacije u patroni eksploziva.

Za mjerenje brzine detonacije diskontinuiranom metodom koriste se različite izvedbe elektronskih satova, uređaja koji mjere vrijeme nailaska detonacijskog vala od prvog do drugog osjetila priključenih na elektronski sat. Jedna od takvih metoda je elektrooptička

metoda mjerenja brzine detonacije koja koristi dva ili više optičkih osjetila. Optička, odnosno svjetlosna osjetila, senzori su sačinjeni od optičkih vlakana koja imaju sposobnost prenošenja svjetlosnog signala sukladnog detonacijskom valu. Osjetila se postavljaju na poznatu udaljenost, L pa se brzina detonacije može izračunati po formuli:

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

gdje su:

D – brzina detonacije (m/s),

L – udaljenost između mjernih sonde (mm),

t – vrijeme potrebno detonacijskom valu da prijeđe udaljenost L (s)

U današnje se vrijeme za mjerenje brzine detonacije koriste moderni elektronski satovi koji sami računaju brzinu detonacije eksploziva. Prilikom pripreme ispitnih uzoraka nužno je osigurati dovoljno velik razmak između dva osjetila kako bi se prolaz stabilnog detonacijskog vala mogao zabilježiti te kako bi se nepreciznosti kod mjerenja udaljenosti izbjegle. Mjerenje se izvodi s minimalno 2, ali često i s većim brojem osjetila kako bi se dobili podaci za više različitih segmenata na eksplozivnom punjenju (Paškov 2022). Česti naziv ove metode je i start-stop metoda jer prvo, start, osjetilo pokreće sat, a drugo ili stop osjetilo zaustavlja elektronski sat i rezultat se prikaže na njegovu zaslonu.

4.3. Određivanje prijenosa detonacije ANFO eksploziva u praksi

Ispitivanja u svrhu određivanja prijenosa detonacije ANFO eksploziva provedena su na vanjskom ispitivalištu – poligonu za ispitivanje eksplozivnih tvari. Obzirom da ANFO eksploziv nije osjetljiv na inicijalni impuls detonatora te da je za taj eksploziv proizvođačem deklarirano da može detonirati samo u bušotini, za iniciranje istog korišten je pojačnik, a eksploziv je smješten u čelične cijevi.

Za ispitivanje je korišten ANFO eksploziv komercijalnog naziva PAKAEX pakiran u PVC vreće. Na slici 4-8 prikazane su granule korištenog ANFO eksploziva u rasutom stanju.

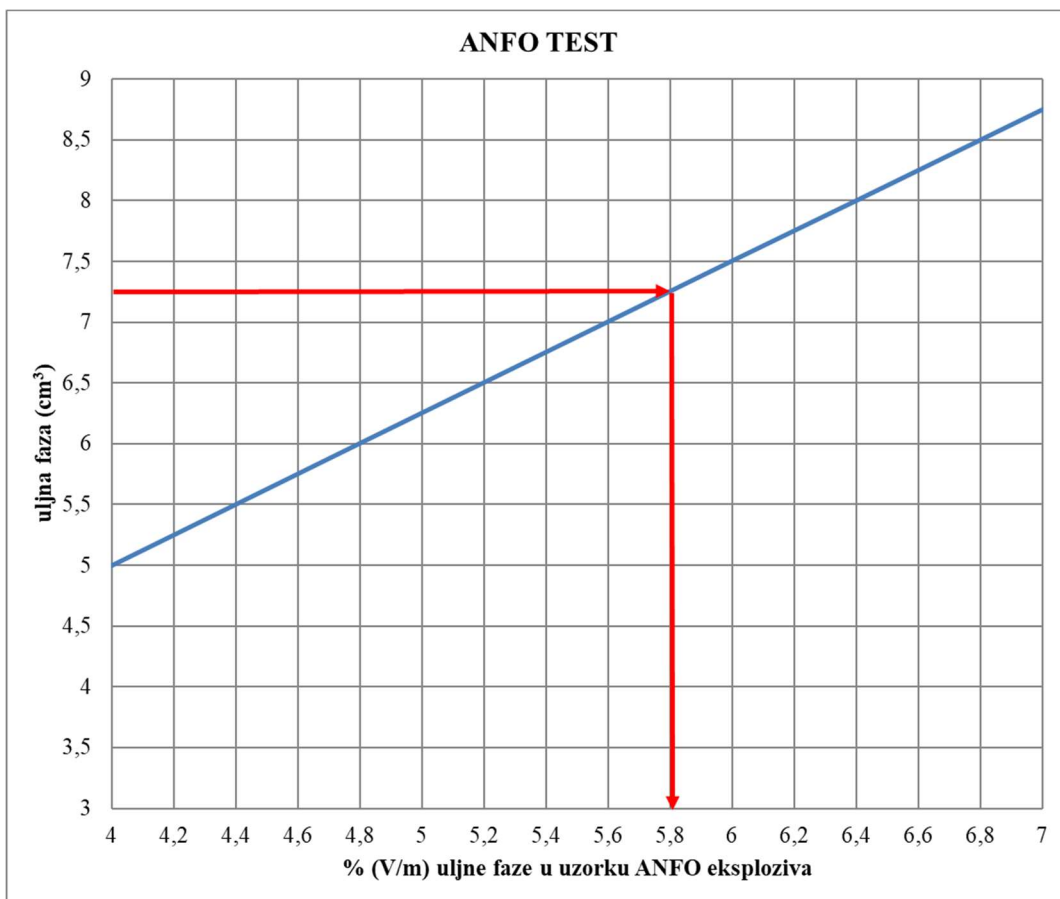


Slika 4-8. Granule korištenog ANFO eksploziva

Gustoća ANFO eksploziva Pakaex je određena eksperimentalno prema zahtjevima norme *HRN EN 13631-13:2003: Eksplozivi za civilnu uporabu. Jaki eksplozivi. 14. dio: Određivanje gustoće (EN 13631-13:2003)* dok je brzina detonacije određena eksperimentalno prema zahtjevima norme *HRN EN 13631-14:2004: Eksplozivi za civilnu uporabu. Jaki eksplozivi. 14. dio: Određivanje brzine detonacije (EN 13631-14:2004)*. Udio uljne faze određen je ANFO testom (Slika 4-9), a dobiveni podaci prikazani su u tablici 4-2.

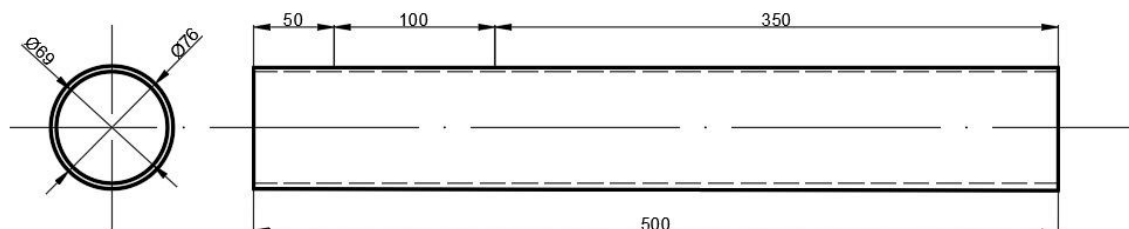
Tablica 4-2. Podaci o ANFO eksplozivu Pakaex dobiveni ispitivanjem

Podaci za ANFO eksploziv Pakaex	
gustoća eksploziva, ρ	0,848 g/cm ³
brzina detonacije, v (čelična cijev Ø 69 mm)	3403 m/s
udio uljne faze, w	5,8 %



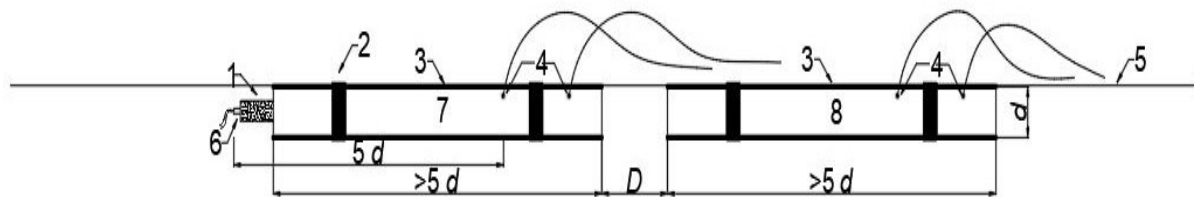
Slika 4-9. Udio uljne faze u uzorku ANFO eksploziva

Iz PVC vreća eksploziv se sipao u čelične cijevi dužine 500 mm, vanjskog promjera 76 mm i unutarnjeg promjera 69 mm. Na cijevima su izbušeni utori za postavljanje osjetila. Utor za prvo osjetilo izbušen je 350 mm od kraja cijevi čime je zadovoljen uvjet norme za minimalnom udaljenošću od inicijalnog sredstva u iznosu od 5 promjera ispitne cijevi, a utor za drugo osjetilo izbušen je na udaljenosti od 100 mm od prvog osjetila i 50 mm od drugog kraja cijevi. Na slici 4-10. prikazana je skica korištenih cijevi.



Slika 4-10. Cijev za smještaj eksploziva

Za svako ispitivanje koristile su se dvije cijevi: patrona davatelj i patrona primatelj, koje su se ljepljivom trakom pričvršćivale na letvicu kako bi se osigurala pravilna usmjerenost jednog naboja prema drugome te su se postavljale na potreban razmak. Na obje su cijevi postavljena osjetila za mjerenje brzine detonacije, ukupno 4 osjetila na 3 segmenta. Na patronu davatelj, prvi segment, postavljena su dva osjetila za mjerenje brzine detonacije na udaljenosti $5d$ od kraja detonatora i na međusobnom razmaku od 100 mm. Na patronu primatelj postavljena su dva osjetila za mjerenje brzine detonacije na udaljenosti 50 mm od kraja patrone i na međusobnom razmaku od 100 mm (treći segment). Udaljenost između drugog i trećeg osjetila je bila promjenjiva s obzirom da se mijenjala udaljenost za prijenos detonacije (drugi segment). Skica postava ispitivanja prikazana je na slici 4-11. Na slici 4-12. prikazan je stvarni postav ispitivanja s razmakom ispitnih cijevi 2 cm, a na slici 4-13. stvarni postav ispitivanja s razmakom ispitnih cijevi 45 cm.



Kazalo:

1. Pojačnik,
2. Ljepljiva traka,
3. Čelična cijev,
4. Osjetilo za mjerenje brzine detonacije,
5. Letvica,
6. Detonator,
7. Davatelj,
8. Primatelj

Slika 4-11. Postavljanje ispitnog uzorka



Slika 4-12. Ispitni uzorak postavljen za ispitivanje s razmakom patrona 2 cm



Slika 4-13. Ispitni uzorak postavljen za ispitivanje s razmakom patrona 45 cm

Na slici 4-14. je prikazan izgled cijevi kod koje nije došlo do prijenosa detonacije.



Slika 4-14. Ispitni uzorak kod kojega nije došlo do prijenosa detonacije

Brzina detonacije mjerena je pri svakom ispitivanju, a za mjerenje je korišten elektronski sat Explomet 2 (Slika 4-15.). Uređaj radi s točnošću od $\pm 0,01$ mikrosekunde te posjeduje mogućnost izračunavanja brzine detonacije i do 15000 m/s. Raspodjela optičkih osjetila može biti potpuno nasumična jer je uređaj sposoban samostalno razaznati njihov poredak. On omogućuje rad s dvostrukim pojačanim optičkim osjetilima te za oko 30% smanjuje trošak po metru optičkog kabela.



Slika 4-15. Kontinitro AS Explomet 2 (Kontinitro, 2019)

5. ANALIZA REZULTATA MJERENJA

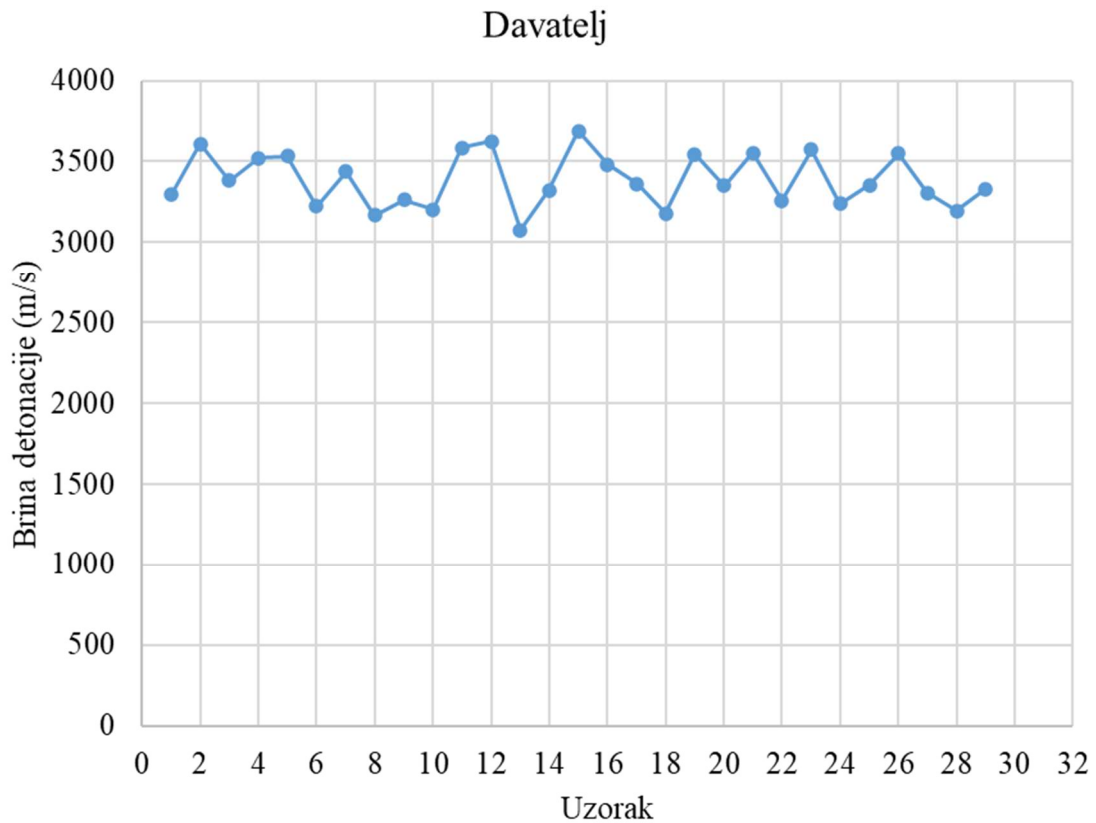
Ispitano je ukupno 29 uzoraka. Početna udaljenost između ispitnih naboja je iznosila 20 mm, a povećavao se, također, za korak od 20 mm sve do udaljenosti između ispitnih naboja od 300 mm. Nakon postizanja razmaka od 300mm, korak je povećan na 40 mm, pa na 60 mm i konačno na 100 mm te se pristupilo Brucetonovom up and down metodom sve dok na udaljenosti između ispitnih naboja nije ostvaren siguran prijenos detonacije, a na prvom koraku (10 mm) iznad nije došlo do prijenosa detonacije. Većini uzoraka je izmjerena temperatura neposredno prije samog ispitivanja. Izmjerena temperatura uzoraka bila je u rasponu od 16,10°C do 26,28°C. Toliko velik raspon u izmjerenim temperaturama uzoraka može se objasniti dugim periodom ispitivanja (kroz nekoliko mjeseci) gdje je raspon vanjskih temperatura zraka, u tom periodu, također, bio vrlo velik.

Rezultati određivanja prijenosa detonacije ANFO eksploziva su prikazani u tablici 5-1.

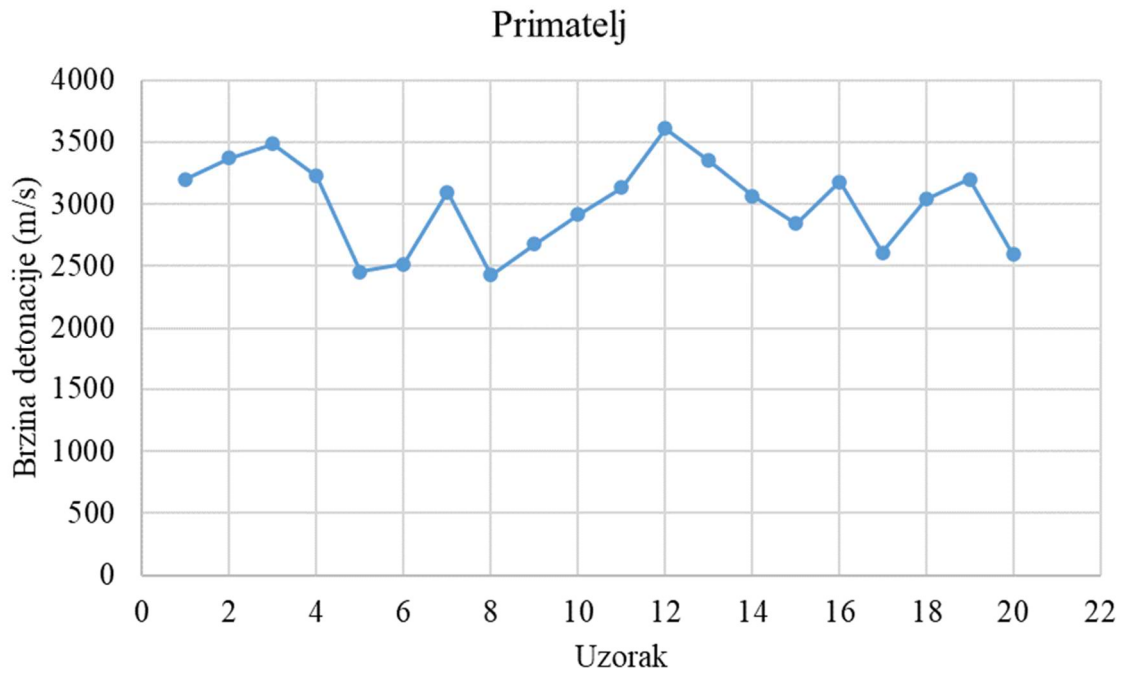
Tablica 5-1. Rezultati određivanja prijenosa detonacije ANFO eksploziva

Red. br.	Razmak između osjetila 1-2 (mm)	v_1 (m/s)	Razmak između osjetila 2-3 (mm)	v_2 (m/s)	Razmak između osjetila 3-4 (mm)	v_3 (m/s)	Brzina detonacije od 1-3 (mm)	Prijenos (mm)	Prijenos (DA/NE)
1.	100	3297	420	3379	100	3197	3291	20	DA
2.	100	3610	440	2917	100	3369	3299	40	DA
3.	100	3381	460	3133	100	3487	3334	60	DA
4.	100	3522	480	3010	100	3227	3253	80	DA
5.	100	3532	500	2767	100	2452	2917	100	DA
6.	100	3225	520	3003	100	2513	2914	120	DA
7.	100	3439	540	3346	100	3095	3293	140	DA
8.	100	3166	560	3277	100	2426	2956	160	DA
9.	100	3263	580	2614	100	2677	2851	180	DA
10.	100	3205	600	2898	100	2916	3006	200	DA
11.	100	3585	620	3157	100	3132	3291	220	DA
12.	100	3624	640	2512	100	3611	3249	240	DA
13.	100	3077	660	2647	100	3350	3025	260	DA
14.	100	3323	680	2928	100	3066	3106	280	DA
15.	100	3687	700	3082	100	2842	3231	300	DA
16.	100	3480	740	2492	100	3178	3050	340	DA
17.	100	3363	800	2767	100	2608	2913	400	DA
18.	100	3178	850	2584	100	3041	2934	450	DA
19.	100	3544	870	2836	100	3202	3194	470	DA
20.	100	3351	870	2412	100	2594	2786	470	DA
21.	100	3554	870	2237	100	679	2157	470	NE
22.	100	3258	880	3514	100	416	2396	480	NE
23.	100	3573	890	1461	100	610	1881	490	NE
24.	100	3238	900	2457	100	1953	2549	500	DA
25.	100	3353	900	1016	100	176	1515	500	NE
26.	100	3547	910	1601	100	-	-	510	NE
27.	100	3308	930	1647	100	-	-	530	NE
28.	100	3196	950	-	100	-	-	550	NE
29.	100	3331	1000	1526	100	-	-	600	NE

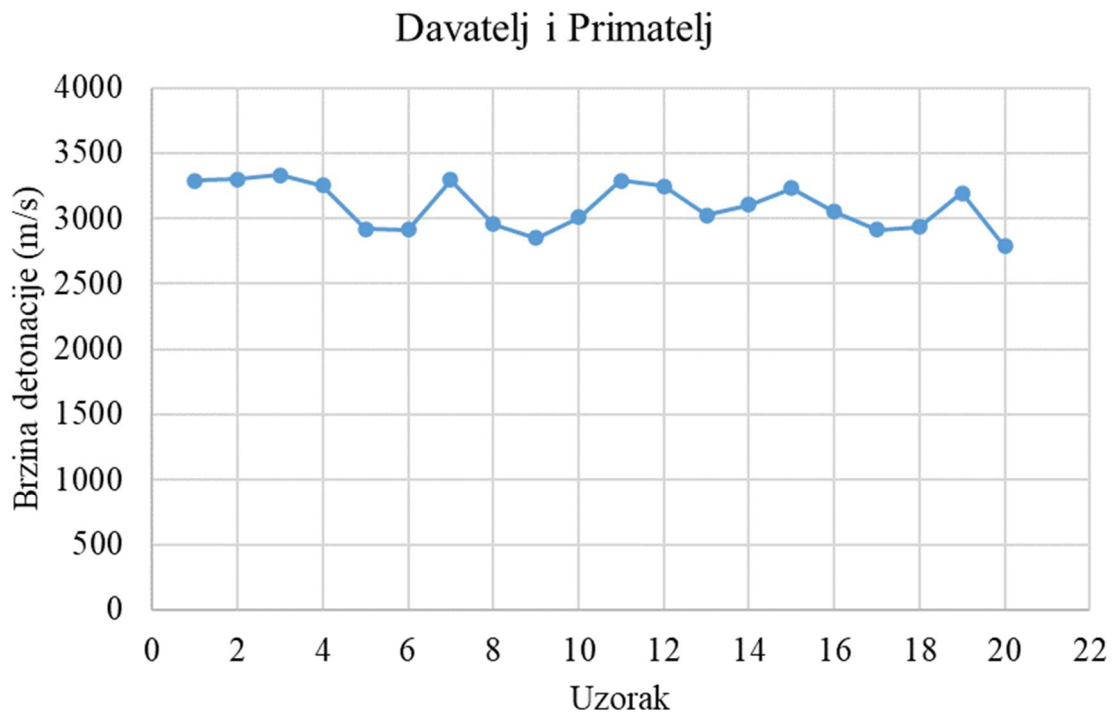
Rezultati mjerenja brzine detonacije na ispitnoj cijevi – davatelju prikazani su dijagramom na slici 5-1. Rezultati mjerenja brzine detonacije na ispitnoj cijevi – primatelju prikazani su dijagramom na slici 5-2. Rezultati mjerenja brzine detonacije na ukupnoj udaljenosti između osjetila broj 1 i broj 4 prikazani su dijagramom na slici 5-3., a rezultati mjerenja brzine detonacije u zraku između Davatelja i Primatelja prikazani su dijagramom na slici 5-4.



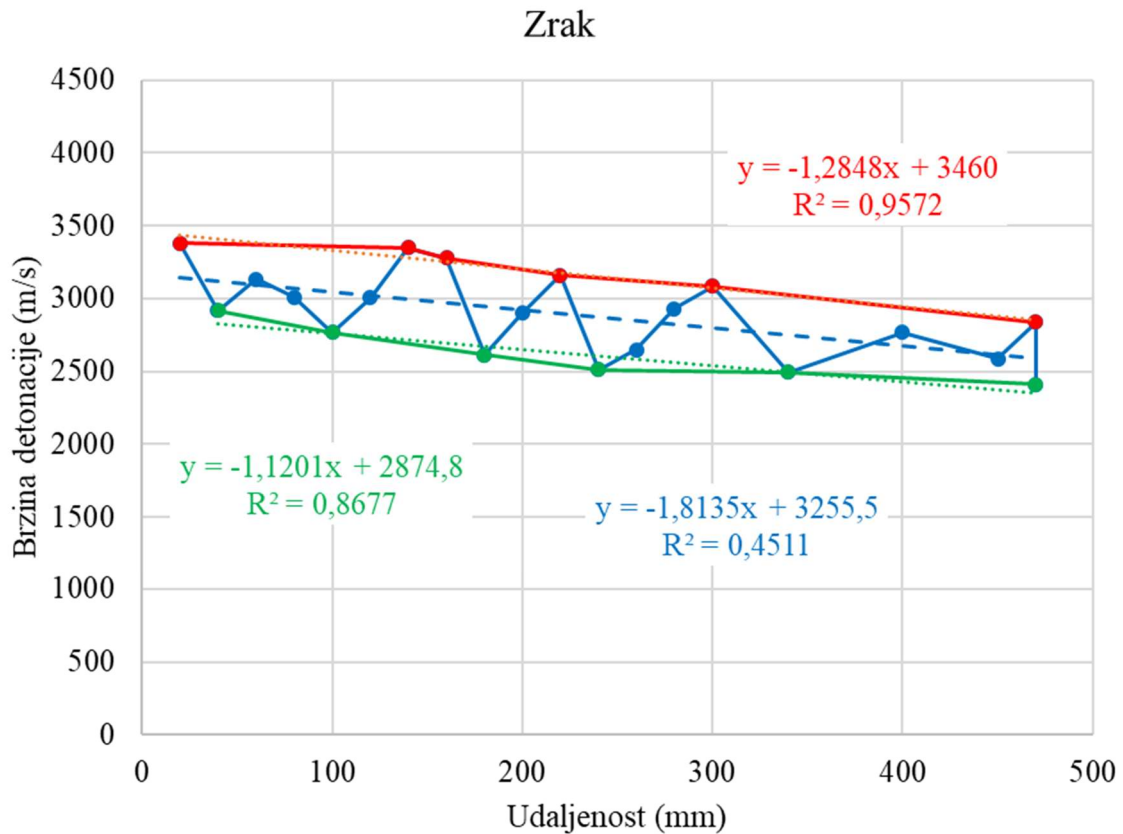
Slika 5-1. Brzina detonacije davatelja



Slika 5-2. Brzina detonacije primatelja



Slika 5-3. Brzina detonacije primatelja na ukupnoj udaljenosti između osjetila broj 1 i broj 4



Slika 5-4. Brzina detonacije primatelja u zraku između Davatelja i Primatelja

Iz dijagrama je na slikama od 5-1. do 5-4. i iz tablice 5-1. vidljivo kako je, kod davatelja, ostvareno najviše brzina detonacije, a kod primatelja ih ima manje. Razlog tomu je činjenica da nije kod svih ispitnih uzoraka došlo do prijenosa detonacije. Također je vidljiv trend opadanja brzine detonacije između osjetila 2 i 3, što je očekivano s obzirom da je prostor između njih najvećim dijelom zrak. Udaljavanjem primatelja od davatelja dolazi do opadanja brzine detonacije, a samim time i gubitka udarnog djelovanja, odnosno udarne energije potrebne za iniciranje primatelja. Zbog toga je i najveći rasap izmjerenih brzina detonacija vidljiv kod primatelja, gdje je razlika između minimalne i maksimalne izmjerene brzine detonacije iznosila 1185 m/s, za razliku od davatelja gdje je taj rasap brzina bio skoro duplo manji (610 m/s), dok je rasap brzina detonacije između davatelja i primatelja iznosio 967 m/s.

6. ZAKLJUČAK

Prijenos detonacije kod ANFO eksploziva je određen s ispitivanjima na poligonu s ukupno 29 uzoraka.

Koraci pomicanja naboja Primatelja u odnosu na naboj Davatelj su u početku iznosili 20 mm pri čemu se pokazalo da se može prijeći i na veće korake pomicanja što je rezultiralo koracima od 100 mm. Nakon što nije ostvaren prijenos detonacije na udaljenosti od 600 mm pristupilo se Brucetonovoj up and down metodi s manjim koracima, koji su bili polovice iznosa između dvije prethodne udaljenosti sve dok na udaljenosti između ispitnih naboja nije ostvaren siguran prijenos detonacije, a na prvom koraku (10 mm) iznad nije došlo do prijenosa detonacije.

Prijenos detonacije je ostvaren na udaljenosti od 470 mm u dva ispitivanja dok na udaljenosti od 480 mm nije došlo do prijenosa detonacije ANFO eksploziva te se može zaključiti da prijenos detonacije kod ANFO eksploziva punjenog u čelične cijevi iznosi 470 mm.

Preporuka je da se za daljnjim ispitivanjima odredi prijenos detonacije ANFO eksploziva u tzv. uvjetima otvorenosti odnosno u patronama bez čelične obloge i to u promjeru iznad kritičnog promjera ANFO eksploziva, a koji iznosi 60 mm.

7. LITERATURA

BOHANEK, V. 2013. Model nastajanja i analiza djelovanja kumulativnoga procesa linearnih eksplozivnih naboja, Doktorski rad, 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.

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.

ESTER, Z., 2005. Miniranje I – eksplozivne tvari, sredstva i metode miniranja. Zagreb, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

GOKHALE, B.V., 2011. Rotary Drilling and Blasting in Large Surface Mines, CRC Press

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

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

PAŠKOV, L., 2022. Poboljšanje točnosti mjerenja brzine detonacije elektrooptičkom metodom, Završni rad, Zagreb, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

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

ŠKRLEC, V., 2015. Analiza primjenjivosti eksploziva smanjene gustoće za gospodarska miniranja, Doktorski rad, Zagreb, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

Norme:

HRVATSKI ZAVOD ZA NORME. 2004. HRN EN 13631-11:2004: Eksplozivi za civilnu uporabu. Jaki eksplozivi. 11. dio: Određivanje prijenosa detonacije (EN 13631-11:2003)

HRVATSKI ZAVOD ZA NORME. 2004. HRN EN 13631-14:2004: Eksplozivi za civilnu uporabu. Jaki eksplozivi. 14. dio: Određivanje brzine detonacije (EN 13631-14:2004)

Online sadržaji:

Kontinitro SA, 2023. *Products*. URL: <https://www.kontinitro.com/products/> (11.8.2023.)