Mjerenje zakrivljenosti detonacijske fronte

Orešković, Kristijan

Master's thesis / Diplomski 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:169:277496

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

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



Repository / Repozitorij:

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







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij rudarstva

MJERENJA ZAKRIVLJENOSTI DETONACIJSKE FRONTE

Diplomski rad

Kristijan Orešković

R229

Zagreb, 2021.

KLASA: 602-04/20-01/233
URBROJ: 251-70-03-20-2
U Zagrebu, 12.01.2021.

Kristijan Orešković, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju Vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/20-01/233, UR. BROJ: 251-70-11-20-1 od 29.10.2020. godine priopćujemo temu diplomskog rada koja glasi:

MJERENJE ZAKRIVLJENOSTI DETONACIJSKE FRONTE

Za voditelja ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o diplomskom ispitu doc. dr. sc. Vinko Škrlec, docent Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Voditelj

(potpis)

Doc. dr. sc. Vinko Škrlec

(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)

Zahvala

U prvom redu, htio bih izraziti veliku zahvalnost mentorima dr.sc. Mariu Dobriloviću i Docentu Vinku Škrlecu koji su svojim znanstvenim i stručnim savjetima uvelike mi pomogli pri izradi ovoga diplomskog rada te omogućili korištenje Laboratorija za miniranje na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu.

Također se zahvaljujem doktorantici Barbari Štimac Tumari i tehničaru Draženu Pećini na pruženoj pomoći i radu tijekom provedbe laboratorijskih ispitivanja.

Sveučilište u Zagrebu

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Diplomski rad

MJERENJE ZAKRIVLJENOSTI DETONACIJSKE FRONTE

KRISTIJAN OREŠKOVIĆ

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

Sažetak

Razumijevanje djelovanja eksploziva vrlo je bitno za njihovo sigurno rukovanje i upotrebu. Osim kemijskog sastava eksploziva vrlo je bitna kemijska reakcija eksploziva koja se javlja pri detonaciji. Prilikom detonacije eksploziva dolazi do pojave detonacijske fronte koja ima određenu zakrivljenost. Zakrivljenost ovisi o nekoliko parametara kao što su promjer, duljina punjenja i brzina. U ovom radu objašnjena su već provedena laboratorijska ispitivanja autora sa prikazom različitih metoda mjerenja, te novog laboratorijskog ispitivanja provedenog na RGN fakultetu.

Ključne riječi: zakrivljenost detonacijske fronte, eksploziv, zakrivljenost, detonacija, brzina

Diplomski rad sadrži: 39 stranica, 5 tablica, 32 slike i 13 referenci.
Jezik izvornika: Hrvatski
Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Mentor: Doc.dr. sc. Vinko Škrlec, Docent RGNF
Komentor: Dr.sc. Mario Dobrilović, Redoviti profesor RGNF
Pomoć pri izradi: Mag.geol. Barbara Štimac Tumara, Doktorant RGNF

Ocjenjivači: Doc.dr. sc. Vinko Škrlec, Docent RGNF
Dr.sc. Mario Dobrilović, Redoviti profesor RGNF
Doc.dr.sc. Vjenčeslav Bohanek, Docent RGNF

Datum obrane: 15.01.2021., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagreb

University of Zagreb Master's Thesis

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

MEASURING OF THE DETONATION FRONT CURVATURE

KRISTIJAN OREŠKOVIĆ

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

Abstract

Understanding the effects of explosives is very important for their safe handling and use. In addition to the chemical composition of explosives, the chemical reaction of explosives that occurs during detonation is very important. During the detonation of explosives, a detonation front appears, which has a certain curvature. The curvature depends on several parameters such as diameter, length and velocity. This paper explains the already conducted laboratory tests by foreign authors with a presentation of different measurement methods, and a new laboratory test tested at the Faculty of RGN.

Keywords: detonation front curvature, explosive, curvature, detonation, velocity

Thesis contains: 39 pages, 5 tables, 32 figures and 13 references.

Original in: Croatian

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

Supervisors: Associate Professor Vinko Škrlec, docent RGNF
Associate Professor Mario Dobrilović, PhD

Technical support and assistance: Barbara Štimac Tumara, mag.ing.geol.

Reviwers: Associate Professor Vinko Škrlec, PhD
Associate Professor Mario Dobrilović, PhD
Associate Profesor Vjenčeslav Bohanek, PhD

Date of defense: 15.01.2021., Faculty of Mining, Geolgey and Petroleum Engineering, University of Zagreb

SADRŽAJ:

1.) UVOD ... 1

2) ZAKRIVLJENOST DETONACIJSKE FRONTE ... 2

3.) METODE MJERENJA ZAKRIVLJENOSTI DETONACIJSKE FRONTE ... 4

3.1.) Utjecaj promjera na detonacijsku zakrivljenost kod ANFO eksploziva ... 4

3.2.) Promatranje detonacijskog vala ANFO eksploziva sa aluminijskom oblogom ... 8

3.3.) Mjerenje brzine detonacije i detonacijske zakrivljenosti u perforiranoj sondi ... 12

3.3.1.) Vrste optičkih tehnika za mjerenje u perforiranoj sondi ... 12

3.3.2.) Opis metode ispitivanja u perforiranoj sondi ... 13

3.3.3.) Rezultati ispitivanja i korekcije rezultata ... 15

3.4.) Mjerenje detonacijske zakrivljenosti uporabom novorazvijenog sustava ... 17

3.5.) Mjerenje brzine i zakrivljenosti detonacijske fronte u nitrometanu (NM) ... 20

3.5.1.) Opis metode ispitivanja ... 21

3.5.2.) Rezultati ispitivanja ... 22

4.) LABORATORIJSKA ISPITIVANJA ... 24

4.1.) Priprema uzorka za mjerenje ... 24

4.2.) Spajanje uzorka u cjelinu za pucanje ... 25

5.) REZULTATI LABORATORIJSKIH ISPITIVANJA ... 29

5.1.) Rezultati za prvi mjerni postav ... 29

5.2.) Rezultati za drugi mjerni postav ... 30

5.3.) Rezultati za treći mjerni postav ... 31

5.4.) Rezultati za četvrti mjerni postav ... 32

5.5.) Rezultati za peti mjerni postav ... 33

5.6.) Objedinjeni rezultati laboratorijskih ispitivanja ... 34

6.) USPOREDBA LABORATORIJSKIH I TEORETSKIH REZULTATA ... 36

7.) ZAKLJUČAK ... 37

8.) LITERATURA ... 38

POPIS SLIKA:

Slika 3-1. Prikaz mjerenja zakrivljenosti detonacijske fronte ANFO eksploziva (Bdzil, 2002) 5
Slika 3-2. Prikaz detonacijskog vala u eksperimentu s ANFO eksplozivom (Bdzil, 2002) 6
Slika 3-3. Graf brzine detonacije za dva ANFO eksperimenta (Bdzil, 2002) 7
Slika 3-4. Uređaj Optimex 8 za mjerenje brzine detonacije i zakrivljenosti detonacijskog vala (Kubiček, 2015) 8
Slika 3-5. Cijev korištena za ispitivanja (Jackson, 2009) 9
Slika 3-6. Aluminijska cijev u presjeku sa prikazanim punjenjem (Jackson, 2009) 9
Slika 3-7. Detonacijska fronta u aluminijskoj oblozi (Jackson, 2009) 10
Slika 3-8. Detonacijska fronta u kartonskoj oblozi (Jackson, 2009) 10
Slika 3-9. Razlika širenja detonacijske fronte kroz uzorke različite duljine i debljine (Jackson, 2009) 11
Slika 3-10. Shema postavke mjerenja s nagnutim PFP te sondama od staklenih vlakana na krajnjoj površini (Kunzel, 2019) 14
Slika 3-11. Uređaj Optimex 64 15
Slika 3-12. Detonacijski prednji oblici rastaljenog ETN-a dobiveni u ispitivanjima 1 (crna) i 2 (siva) (Kunzel, 2019) 16
Slika 3-13. Detonacijski prednji oblici smjese AN-Al dobiveni u ispitivanjima 3,4 i 5 (Kunzel, 2019) 16
Slika 3-14. Shematski prikaz ispitivanja sa osijetilima smještenim na pola promjera (Pachman, 2019) 18
Slika 3-15. Raspored osjetila po promjeru eksploziva (Pachman, 2019) 18
Slika 3-16. Prikaz zakrivljenosti u vremenu za odnose L/D (Pachman, 2019) 19
Slika 3-17. Usporedba rezultata OPTIMEX sustava i brze kamere (Pachman, 2019) 19
Slika 3-18. Profil brzine čestica reakcijske zone 20
Slika 3-19. Shema i slika eksprimenta za mjerenje (Štimac, 2017) 22
Slika 3-20. Prikaz ploha Hugoniota nereagiranog NM i njegovih produkata detonacije i Rayleighova linije za NM 23
Slika 4-1. Prikaz izrade čepa na 3D printeru sa parametrima izrade 24
Slika 4-2. Punjenje uzorka ANFO eksplozivom 26
Slika 4-3. Gotovi uzorak sa spojenim optičkim vlaknima 27
Slika 4-4. Uzorak spreman za pucanje u zaštitnom uređaju 27
Slika 4-5. Prikaz rezultata na uređaju Explomet 28
Slika 4-6. Cjelokupni mjerni postav na laboratorijskim mjerenjima 28
Slika 5-1 Dijagram za prvi mjerni postav 30
Slika 5-2 Dijagram za drugi mjerni postav 31
Slika 5-3 Dijagram za treći mjerni postav 32
Slika 5-4 Dijagram za četvrti mjerni postav 33
Slika 5-5 Dijagram za peti mjerni postav 34
Slika 5-6. Dijagram objedinjenih rezultata svih mjernih postava 34

POPIS TABLICA:

Tablica 5-1. Rezultati za prvi mjerni postav 29
Tablica 5-2. Rezultati za drugi mjerni postav 30
Tablica 5-3. Rezultati za treći mjerni postav 31
Tablica 5-4. Rezultati za četvrti mjerni postav 32
Tablica 5-5. Rezultati za peti mjerni postav 33

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I ODGOVARAJUĆIH SI JEDINICA

Simbol	Značenje	Jedinica
D	brzina aksijalne detonacijske faze	(m/s)
D_n	brzina detonacijske faze	(m/s)
R	radijus	(mm)
P	gustoća	(g/cm^3)

1.) UVOD

Eksploziv je smjesa kemijskih spojeva u kojem se može razviti brza kemijska reakcija ako dođe do djelovanja vanjskog impulsa u bilo kojem obliku kao što su trenje, udar ili toplina. Tako oslobođena energija se pretvara u rad koji obavlja svoju zadaću u obliku rušenja, razaranja ili usitnjavanja.

Gospodarski eksplozivi vrlo su primjenjivi u različitim granama kao što su građevinarstvo, rudarstvo i vojna industrija. Ovisno za koju namjenu su proizvedeni mogu se svrstati u nekoliko glavnih grupa. Glavne grupe su barut, inicijalni eksplozivi, brizantni eksplozivi i pirotehničke smjese. Svaki eksploziv ima svoje karakteristike koje ovise o njegovoj namjeni a karakteristike se temelje na veličini čestica i kemijskom sastavu.

Eksplozive možemo podijeliti i prema agregatnim stanju na čvrste, tekuće i plinovite. U praksi se pretežno koriste čvrsti eksplozivi zbog lakšeg rukovanja, sigurnosti transporta i upotrebe. Iz istih praktičnih razloga za laboratorijska ispitivanja detonacijske zakrivljenosti korišten je ANFO praškasti eksploziv, a eksploziv je detoniran pomoću detonatorske kapice.

U ovom radu se proučava zakrivljenost detonacijske fronte na način da su se mjerili parametri koji su usko povezani sa detonacijom, a to su brzina, promjer i vrijeme. Također ispitivanja će se provoditi u različitim uvjetima i sa različitim ograničenjima.

Ovisno o vrsti eksploziva, duljini punjenja, promjeru i načinu ograničavanja zakrivljenost će biti manja ili veća što će se pokazati u ispitivanjima. Cilj ovog rada je usporediti postojeće metode ispitivanja zakrivljenosti detonacijske fronte te provesti ispitivanje novom metodom koja bi dovela do preciznijih rezultata. U teoriji ako se provede dovoljno istraživanja postoji mogućnost da se može dobiti idealna debljina stjenke. Pri čijoj debljini stjenke detonacija bi bila idealna.

2) ZAKRIVLJENOST DETONACIJSKE FRONTE

Fenomen neidealne detonacije odnosno odstupanja od detonacijske teorije primjenjive na visokobrizantne vojne eksplozive izuzetno je važan u području gospodarskih eksploziva, ali isto tako i u području improviziranih eksploziva (eng. *home made explosives*).

Neidealno ponašanje eksploziva rezultat je odnosa brzina dva procesa: brzine radijalne ekspanzije produkata u detonacijskoj reakcijskoj zoni i brzine kemijskih reakcija u toj zoni što je radijalna ekspanzija veća to je odstupanje od idealnosti veće. Neidealno ponašanje eksploziva manifestira se:

1. zakrivljenom frontom udarnog vala
2. nelinearnom ovisnošću detonacijske brzine o početnoj gustoći eksploziva
3. ovisnošću detonacijskih parametara o promjeru naboja i oblozi
4. velikim kritičnim promjerom
5. kemijskim reakcijama i nakon tzv. soničke točke, tj. oslobođenjem toplinske energije u fazi ekspanzije produkata

U sklopu istraživanja eksperimentalno su se istražili utjecaj promjera eksplozivnog naboja na detonacijske parametre (detonacijska brzina i tlak, širina detonacijske reakcijske zone, radijus zakrivljenosti detonacijskog vala) gospodarskog eksploziva tipa ANFO.

Osim toga, u cilju numeričkog modeliranja neidealne detonacije, termokemijski računalni program EXPLO5 mogu integrirati Wood-Kirkwoodove detonacijskom teorijom koja opisuje ponašanje neidealnih eksploziva jer uzima u obzir brzinu kemijskih reakcija i brzinu ekspanzije produkata. Pritom su se koristile direktne i indirektne metode eksperimentalnog određivanja modela brzine kemijskih reakcija, te indirektne metode za definiranje modela radijalne ekspanzije produkata. (Hrvatska zaklada za znanost, 2017)

U pravilu, teoretske vrijednosti parametara kao što su brzina i tlak detonacije su značajno većih iznosa u odnosu na mjerene veličine. Radijalna ekspanzija događa se u određenoj mjeri kod detonacije svih eksploziva. Kod smjesa kakve se nalaze kod gospodarskih eksploziva, ona je značajnija dok je kod monomolekularnih, skoro idealnih eksploziva ona puno manje izražena. U potpuno idealnom slučaju, radijalna komponenta ekspanzije ne postoji.

Za određivanje stupnja radijalne ekspanzije potrebno je odrediti zakrivljenost detonacijske fronte. Zakrivljenost fronte se može procijeniti, odnosno izračunati, nakon prethodne

utvrđene ovisnosti o drugim lakše mjerljivim parametrima, kao što su kritični promjer i polumjer te promjer naboja i duljina punjenja.

Zakrivljena detonacijska fronta pojavljuje se u nizu pojava kao što je neidealna detonacija, iniciranje detonacije točkastim izvorom energije te pomoću nadzvučnih projektila.

Jednostavna teorija povezuje efekt veličine (smanjenje brzine detonacije sa smanjenjem radijusa naboja polumjerom) cilindričnog punjenja sa njegovom prosječnom duljinom zone reakcije u nadzvučnom području zone reakcija, x_e ,tj. Udaljenost od mjesta počinjanja reakcija do zvučne ravnine može se opisati formulom 2-1.

$$\frac{Us}{D} = 1 - \frac{Xe}{\sigma R0} \qquad (2\text{-}1)$$

R_0 – polumjer

U_s – brzina detonacije

D – brzina detonacije

σ je funkcija koja opisuje stupanj gibanja fronte, a koji se kalibrira pomoću četiri eksploziva. Teoretski sve do sad provedene metode mjerenja zakrivljenosti detonacijske fronte dale su različite rezultate za iste eksplozive što i dalje govori da još nije razvijena savršena metoda mjerenja što će se kroz nova laboratorijska ispitivanja probati unaprijediti. Sve provedene metode nisu u potpunosti potvrdile teoretska nagađanja te je to još dodatni razlog za dodatna istraživanja.

3.) METODE MJERENJA ZAKRIVLJENOSTI DETONACIJSKE FRONTE

Kada se govori o metodama mjerenja zakrivljenosti do danas se razvilo nekoliko različitih metoda. Najviše se upotrebljavaju optičke, električne i kombinirane metode. Točnost podataka ovisi o osjetilima koja mjere nailaske vala te ih bilježe u obliku signala na određenom radijusu te o točnosti uređaja za očitavanje signala.

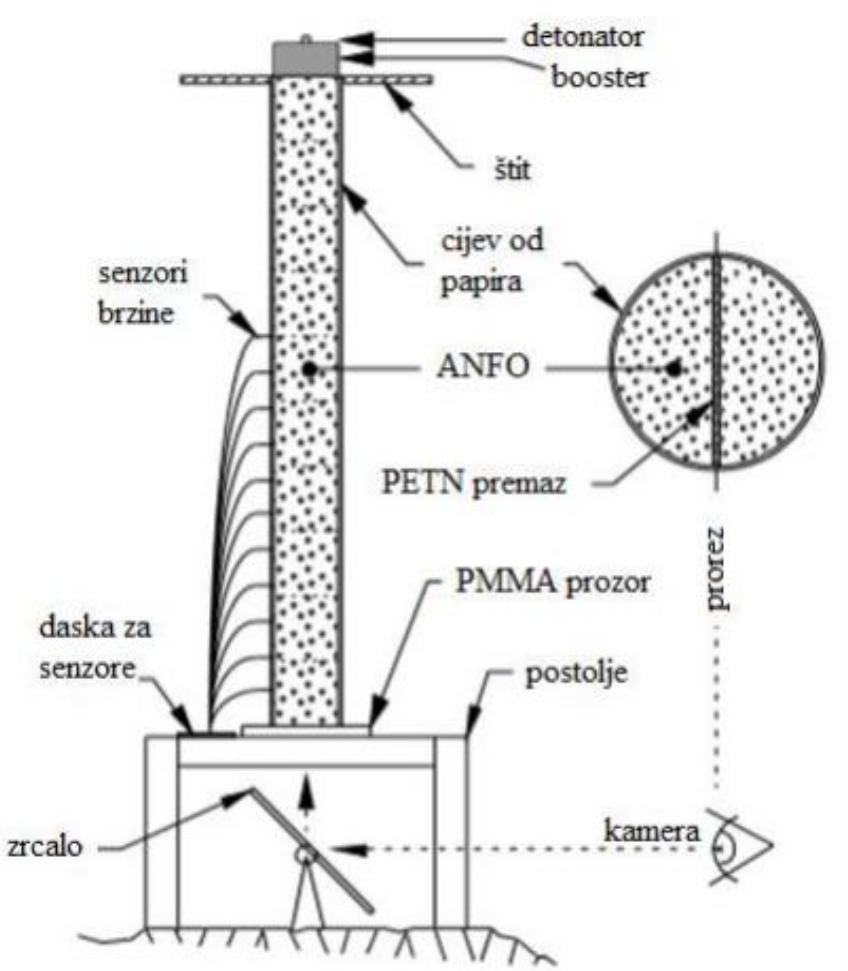
Sve metode mjerenja zakrivljenosti se provode na sličnom principu ali ipak se dobivaju različiti rezultati. Većina ispitivanja se provodi u laboratorijima koji omogućavaju gotovo idealne uvjete što opet utječe na same rezultate ispitivanja.

Zadatak svih metoda je da se dobiju što bolji rezultati u što realnijim uvjetima. Ograničavanje eksploziva različitim materijalima kao što su aluminiji, karton, plastika i čelik pomaže u stvaranju realnijih uvjeta ali opet ne idealno.

3.1.) Utjecaj promjera na detonacijsku zakrivljenost kod ANFO eksploziva

Jedan od glavnih parametara koji utječe na detonacijsku zakrivljenost je promjer eksploziva koji je u obliku ovog ispitivanja obuhvaćen. Postupak ispitivanja proveden je na uzorcima koji su punjeni eksplozivom a sam eksploziv je u papirnatim cijevima kako bi se smanjilo ograničavanje stijenki.

Promjeri su se kretali od 77 mm do 205 mm, a duljina cijevi je iznosila deset promjera eksploziva. Svaka detonacija je odgovarala analitičkom obliku iz kojeg se dobiva lokalna normalna brzina D_n i lokalna ukupna zakrivljenost koje generiraju funkciju polumjera R, te se paralelno ucrtavaju na graf kako bi se dobila funkcija D_n.



Slika 3-1. Prikaz mjerenja zakrivljenosti detonacijske fronte ANFO eksploziva (Bdzil, 2002)

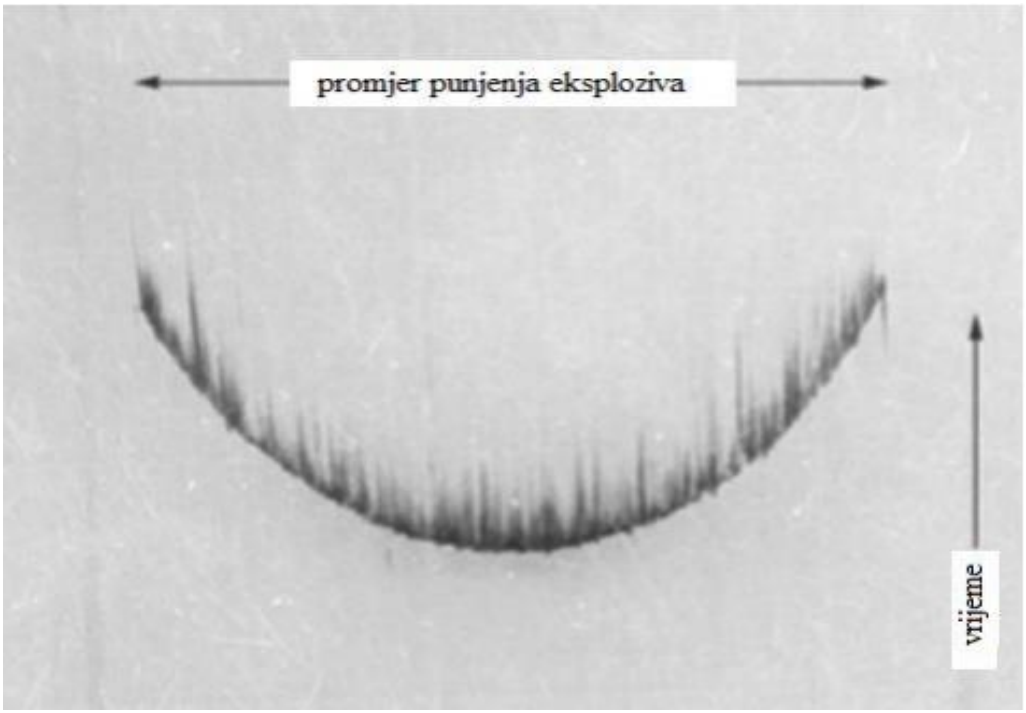
Eksploziv se nalazi u papirnatoj cijevi, a na dnu se nalazi postolje sa kamerom koja pomoću zrcala omogućuje mjerenje. S lijeve strane su pozicionirani senzori za mjerenje brzina detonacije. Na vrhu je postavljen čep radi boljeg prijenosa energije eksploziva a za pojačanje energije iniciranja korišten je booster. U sredini ANFO punjenja nalazio se premaz PENT-a. Da bi se eliminirao negativni utjecaj punjenja eksploziva, eksploziv se pakirao u vrećice i dobro izmiješao prije iniciranja.

Premaz boje PETN-a služi za sprječavanje prodora reakcijskog svjetla s detonacijske fronte. Reakcijsko svjetlo ima tendenciju raspršiti se 20 mm do 30 mm ispred valnog fronta. Ispitivani promjeri su između 77 mm i 205 mm. Najbolji rezultati dobiveni su uz omjer duljine punjenja i promjera (L/D) koji je iznosio 10 dužina, točnije ti slučajevi su uspješno ponovljeni bez velikih odstupanja (Gregurev 2019).

Naboji se postavljaju okomito zbog određenih prednosti:

- gornje opterećenje dobro je raspoređeno
- detonacijska prednja zakrivljenost se lako odredi na dnu uzorka
- aksijano simetrična raspodjela gustoće omogućava minimalizaciju nagiba fronte detonacijskog vala
- rotirajuća kamera pomoću koje su se bilježili rezultati ima brzinu pisanja od 1 mm/μs
- središte naboja određeno je kao središte između dva ruba

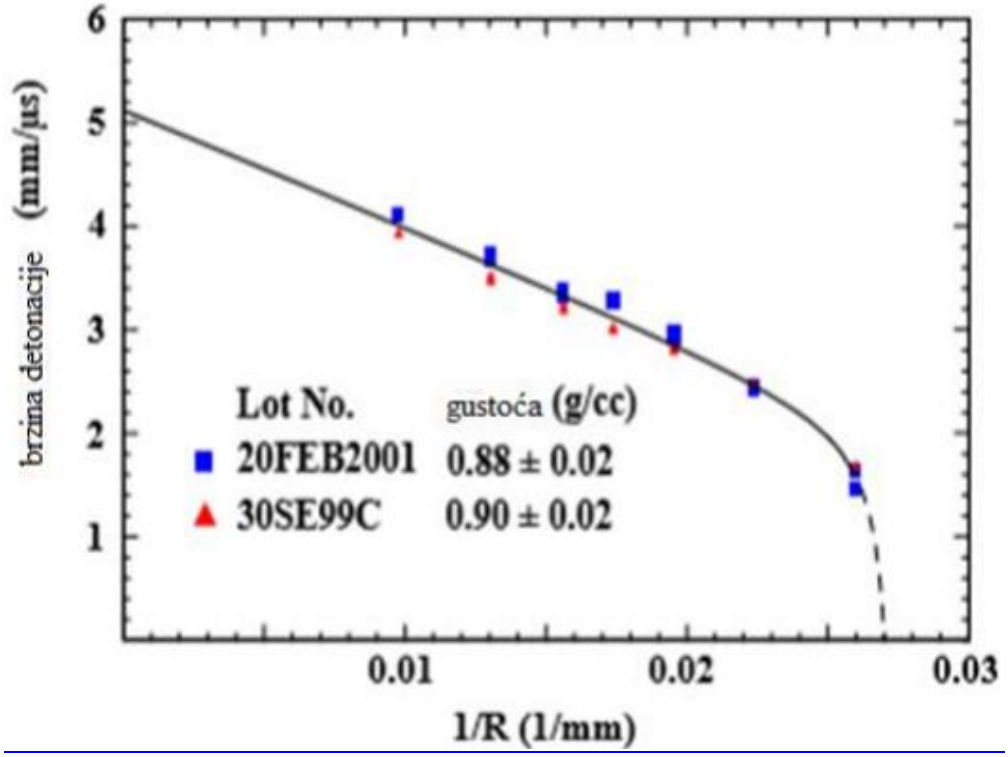
Kako bi se izmjereni trag prikazao na slici, potrebno je provesti uvećanje a nakon provedenog uvećanja, dobije se rezultat kao na slici 3-2.



Slika 3-2. Prikaz detonacijskog vala u eksperimentu s ANFO eksplozivom (Bdzil, 2002)

Na slici 3-2. prikazana je detonacijska fronta koja ovisi o naboju promjera. Bitno je napomenuti kako gustoća ovog eksploziva iznosi 0,88 g/cm3 .

Provedeno je i ispitivanje s gustoćom eksploziva od 0,90 g/cm3, brzina se nije puno razlikovala, ali zato je nastala velika razlika kod impulsa električnog naboja očitanog na ploči.



Slika 3-3. Graf brzine detonacije za dva ANFO eksperimenta (Bdzil, 2002)

Na slici 3-3. je prikazana razlika u brzinama detonacije u odnosu na omjer duljine i radijusa kroz faze dva eksperimenta s ANFO eksplozivom

Brzina i radijus zakrivljenosti mogu se mjeriti još i elektrooptičkom metodom. Mjerenje brzine elektroptičkom metodom zahtjeva postavljanje serije optičkih vlakana. Vlakna je potrebno smjestiti okomito na os naboja eksplozivnog punjenja. Vlakna se povezuju s elektrooptičkim uređajem koji registrira i obrađuje rezultate mjerenja.

Jedan takav uređaj je Optimex 8 koji ima mogućnost mjerenje dodatnih opcija. Dobra razlučivost uređaja omogućava bolju primjenu metode, tj. osim brzine može se mjeriti i zakrivljenost detonacijskog vala.



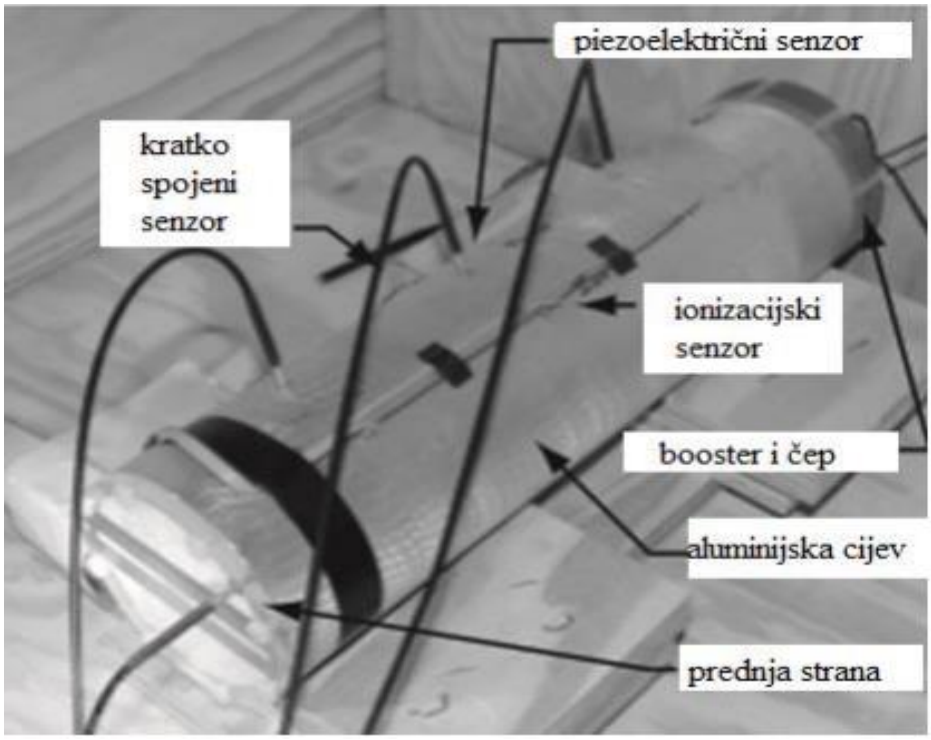
Slika 3-4. Uređaj Optimex 8 za mjerenje brzine detonacije i zakrivljenosti detonacijskog vala (Kubiček, 2015)

3.2.) Promatranje detonacijskog vala ANFO eksploziva sa aluminijskom oblogom

Ideja ovog ispitivanja je bila objasniti odnos između tvrde obloge i detonacijske fronte. Detonacije u eksplozivnim smjesama amonij-nitrat-gorivo-ulje (ANFO) ograničene su aluminijskom oblogom te omogućuju prijenos energije detonacije ispred fronte detonacije zbog brzine zvuka aluminija koja prelazi brzinu detonacije. Konačni učinak ovog prijenosa energije na detonaciju nije do kraja jasan.

Problem bi se mogao riješiti tako da se pojača detonacija predkompresijom eksploziva u blizini zida. Ali gledajući sa druge strane mogle bi se smanjiti performanse eksploziva.

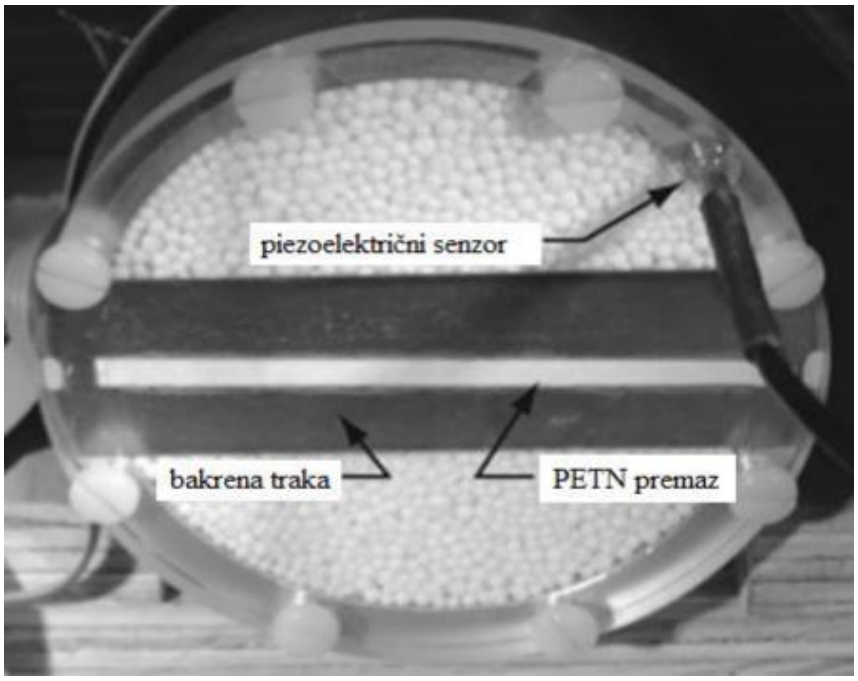
Trenutno se ti fenomeni ne razumiju dobro, ali sa polako detonirajućim i neidealnim visokoeksplozivnim sustavima (NIHE) koji postaju sve rasprostranjeniji dolazi do određenog napredka u istraživanju. Jako je poželjno pravilno razumijevanje i predviđanje performansi ovih metalnih NIHE sustava kako bi se mogle predvidjeti moguće anomalije kod rezultata.



Slika 3-5. Cijev korištena za ispitivanja (Jackson, 2009)

Unutar aluminijske cijevi, koje u ovom pokusu služe kao obloga, postavljen je ANFO eksploziv, te je priključen na osjetila u obliku senzora.

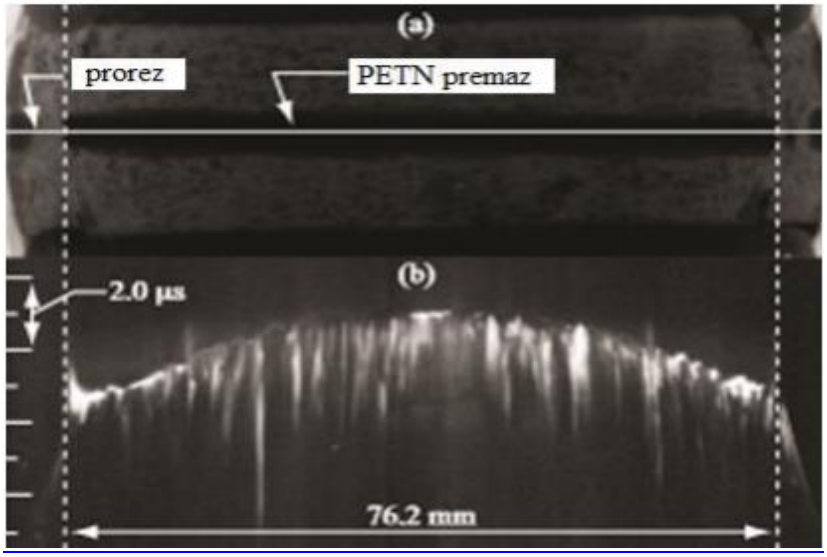
Rezultati ispitivanja su bili vidljivi na presjeku te su zabilježeni kamerom, jer se bljesak prenosio preko PETN premaza.



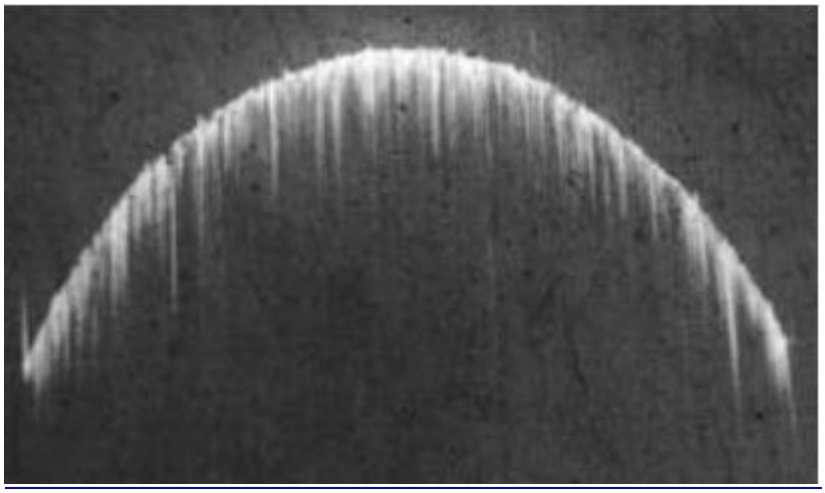
Slika 3-6. Aluminijska cijev u presjeku sa prikazanim punjenjem (Jackson, 2009)

U ovom pokusu mjere se brzina detonacijskog vala i brzina naprezanja elastičnog vala koji se pokreće u metalu uslijed detonacije. Prednji profili detonacije bilježe se na krajevima cijevi.

U ovom sustavu korištene su 3 vrste osjetila: piezoelektrično, ionizacijsko i osjetilo kratkog spoja. Piezoelektrično osjetilo ima nesigurnost u mjerenju brzine detonacije od čak 3%, dok ionizacijsko i kratkog spoja osjetilo imaju nesigurnost od 1% u mjerenju brzine detonacije (Jackson 2009).

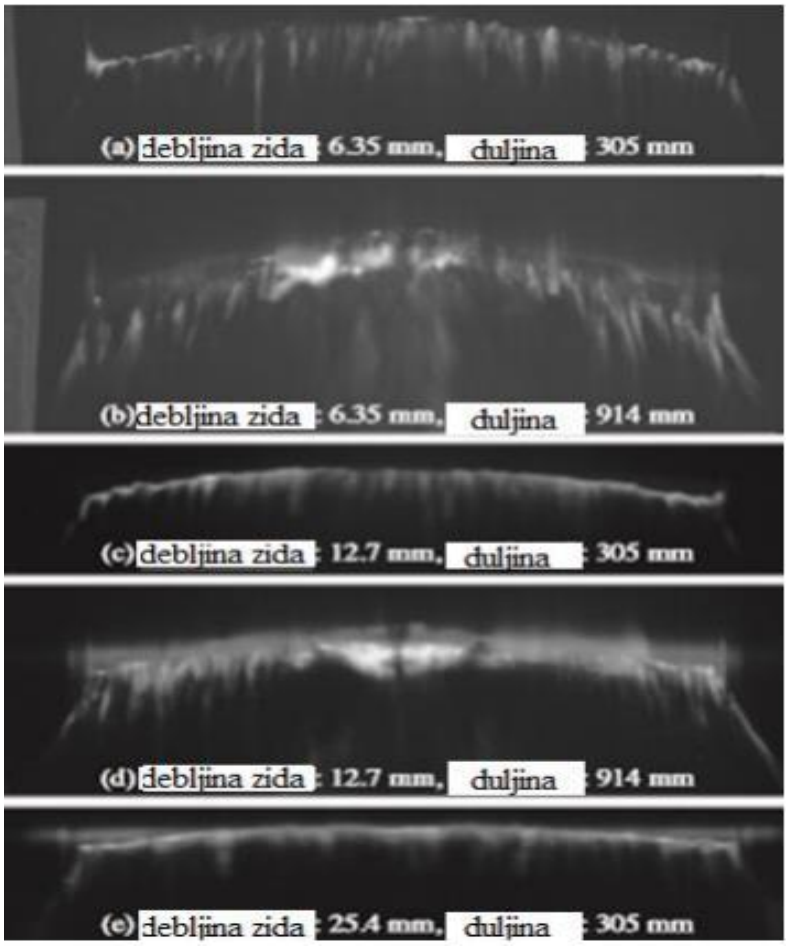


Slika 3-7. Detonacijska fronta u aluminijskoj oblozi (Jackson, 2009)



Slika 3-8. Detonacijska fronta u kartonskoj oblozi (Jackson, 2009)

Na slikama 3-7. i 3-8. se jasno vidi velika razlika u zakrivljenosti detonacijske fronte što ovisi o materijalu kojim je eksploziv ograničen. Osim o materijalu ograničavanja zakrivljenost detonacijske fronte ovisi i o duljini punjenja samog eksploziva.



Slika 3-9. Razlika širenja detonacijske fronte kroz uzorke različite duljine i debljine (Jackson, 2009)

Kvaliteta prikaza prednje strane je slabije kvalitete zbog malog promjera cijevi koje su korištene u ovom pokusu u odnosu na veličinu ANFO eksploziva.

Detonacijski valovi šireni su u aluminijskim cijevima ispunjenim neidealnim eksplozivom tipa ANFO. Debljina stijenke cijevi varirala je od 6,35 do 25,4 mm dok su duljine od 305 mm i 914 mm. Ova je konfiguracija bila zanimljiva jer je brzina zvuka aluminijskog okvira premašila brzinu detonacije.

Također su provedena preliminarna ispitivanja pojačanja kako bi se utvrdila jačina vala potrebna za inicirati stabilnu ANFO detonaciju bez značajnog pretjerivanja. Zapisi prednjeg oblika pokazali su maksimalnu zakrivljenost od zida, s različitim karakterističnim oblicima valova nego što su uočeni u slabo zatvorenim ANFO eksplozivima. Detonacija i aluminijsko naprezanje brzine valova zabilježene su kratkim spojem, ionizacijom i piezoelektričnim osjetilima ugrađenim u stjenke cijevi. U svim slučajevima, povećanje debljine stjenke cijevi dovela je do većih brzina detonacije i manje zakrivljenosti fronte vala.

3.3.) Mjerenje brzine detonacije i detonacijske zakrivljenosti u perforiranoj sondi

U ovoj vrsti ispitivanja je opisana nova tehnika mjerenja dva ključna parametra, a to su detonacijska brzina i detonacijska zakrivljenost fronte. Tehnika mjerenja koristi perforiranu sondu sa svjetlovodom koji prelazi preko eksplozivnog punjenja pod kutom od 45 °. Male rupe izbušene u sondi jezgre djeluju kao zračne praznine i proizvode svjetlosne impulse po dolasku detonacijskog vala.

Zakrivljena fronta detonacijskog vala koji prolazi duž ove sonde uzrokuje ne linearno vrijeme raspodjela svjetlosnih impulsa koja se može analizirati kako bi se utvrdila i detonacijska brzina i zakrivljenost prednjeg udara.

Tehnika je testirana na ljevanom eritritol tetranitratu, a također i na praškastoj smjesi amonijeva nitrata i aluminija. Rezultirajuća brzina detonacije u potpunosti se slagala s prethodno izmjerenim i izračunatim vrijednostima.

3.3.1.) Vrste optičkih tehnika za mjerenje u perforiranoj sondi

Optičke tehnike su od velikog interesa na području mjerenja vezanih uz detonaciju. Ekstremne temperature i pritisak detonacijskog vala generiraju intenzivnu emisiju svjetlosti koji se mogu koristiti u raznim vrstama dijagnostike.

Mjerenja brzine detonacije s nizom optičkih vlakana postavljenih okomito na os naboja te spojeni na jednostavan krug flip-flopa pojavio se prvi put u 80-im i tehnika je ubrzo postala prilično česta zbog svoje funkcionalnosti. Nekoliko instrumenata koji se temelje na ovom principu su komercijalno dostupni kao što su SpeedTrap (MREL), Explomet-FO-2000 (Kontinitro SA) i VOD-815 (OZM istraživanje).

Dublja analiza svjetlosnih signala prikupljenih optičkim sondama pomoću kamera je prihvaćena kao korisna u laboratoriju LEDAP u Coimbri (Portugal). Tamo su korištene višežilne optičke vrpce koje su na kraju dobile naziv u prijevodu višestruke optičke sonde (MFOP). Isti niz eksperimenata već je testiran pomoću optičkih vlakana sonde povezane s fotodiodama i brzim sustavom akvizicije.

Druga tehnika za mjerenje brzine detonacije razvijena je u TNO istraživačkom centaru u Nizozemskoj. Temelji se na analizi dobivenog optičkog signala od jednog polimernog optičkog vlakna s malim rupama stvorenim u njegovoj jezgri. Male rupe proizvode

svjetlosne impulse po dolasku detonacijskog vala bilo adijabatskom kompresijom zračnih šupljina ili hvatanjem svjetlosti od proizvoda visoke detonacije.

Vlakno s rupama je bilo izvorno nazvana Fiber Optic Probe (FOP), ali u ovom primjeru naziva se perforiranim vlaknima, tj.sonda (PFP) kako bi se izbjegla zabuna s drugim optičkim optičkim tehnikama. PFP tehnika daje zadovoljavajuće rezultate u IEnM od 2012.g.

Ove tehnike prikazuju modifikaciju PFP tehnike koja omogućuje određivanje brzina detonacije i polumjera zakrivljenosti detonacijske fronte u određenom dijelu za eksplozivni naboj iz jednog eksperimenta.

3.3.2.) Opis metode ispitivanja u perforiranoj sondi

U ovom ispitivanju korištena su dva eksploziva s vrlo različitim parametrima detonacije. Prvi eksploziv je molekularni eksplozivni, eritritol tetranitrat izliven u talini (ETN). ETN je bio rastopljen u vodenoj otopini na temperaturi od 80 ° C i postupno napunjen u aluminijske cijevi s unutarnjim promjerom od 31 mm, duljinom od 100 mm i debljinom stijenke od 2 mm. Gustoća taljenog materijala je $1,70 \pm 0,01\ g \cdot cm^{-3}$.

Drugi eksploziv bila je smjesa amonijevog nitrata (90%) i aluminija (10%).

Amonijev nitrat gnojiva prosijan je kroz sito od 1 mm kako bi se izbjegle nakupine aglomerata te se odmah pomiješao s finom aluminijskom bojom (Albo 608). Time je nastao sivi prah koji se ubacuje u polipropilenske cijevi unutarnjeg promjera 36 mm i duljine 250 mm te debljina stjenke 2 mm.

Eksploziv je odvojen do gustoće od $1,02 \pm 0,04\ g \cdot cm^{-3}$ i na vrh je pričvršćeno 10 g eksploziva Semtex 1A vezanog za plastiku.

Svjetlosni signali generirani su i prikupljeni pomoću postavljenih sondi s perforiranim vlaknima (PFP) preko eksplozivnih naboja nagnutih cca. 45 ° što je prikazano na slici 3-10.

Kanali za sonde su napravljeni u ETN nabojima pričvršćivanjem žice promjera 2,3 mm u kućište naboja prije samog topljenja. Žica je premazana tankim slojem silikonske masti i nakon toga pažljivo uklonjena kako bi se ETN učvrstio. U slučaju praškastog eksplozivnog punjenja, sonde su fiksirane u položaj prije punjenja cijevi eksplozivom. PFP se sastoje od jednog plastičnog optičkog vlakna promjera jezgre od 1 mm i plašta promjera 2,2 mm sa 9 rupa izbušenih u njegovoj jezgri. Promjer rupa bio je 0,3 mm i dubine oko 1,1 mm.

Sonda je postavljena u eksplozivni naboj na način da je srednja rupa bila je smještena na osi naboja, a kut sonde prema osi naboja bio je između 44 ° i 54 °. Stvarni kut utvrđen je na osnovu fotografije snimljene nakon fiksiranja sonde, a osi rupa bile su orijentirane okomito na os naboja.



Slika 3-10. Shema postavke mjerenja s nagnutim PFP te sondama od staklenih vlakana na krajnjoj površini (Kunzel, 2019)

U prva tri testa, optički signali otkriveni su jednostavnim svjetlosnim detektorom te su snimljeni osciloskopom (Tektronix) s brzinom uzorkovanja od 1250 $MS.s^{-1}$.

Ispitivanja 4 i 5 su mjereni naprednim optičkim analizatorom OPTIMEX 64 koji je opremljen s 8 mjernih kanala. U ovom je slučaju stopa uzorkovanja bila 250 $MS.s^{-1}$ po kanalu što odgovara vremenskoj razlučivosti od 4 ns.

Čeone strane naboja u testovima 4-5 završene su plastičnim čepom u kojem je između osi naboja izbušeno 7 rupa promjera 1 mm u razmacima od 2,5 mm.

Sloj samoljepljive aluminijske folije debljine 0,05 mm postavljen je na vrh čepa.



Slika 3-11. Uređaj Optimex 64

3.3.3.) Rezultati ispitivanja i korekcije rezultata

Određena su vremena dolaska detonacijske fronte u određene položaje (rupe) od vrhunca vremena. Oblik detonacijske fronte utvrđen je radijalnim položajem rupe i odgovarajućeg vremena dolaska.

Vrijeme dolaska trebalo je naravno ispraviti za promjenu njihovog osnog položaja pomoću jednadžbi:

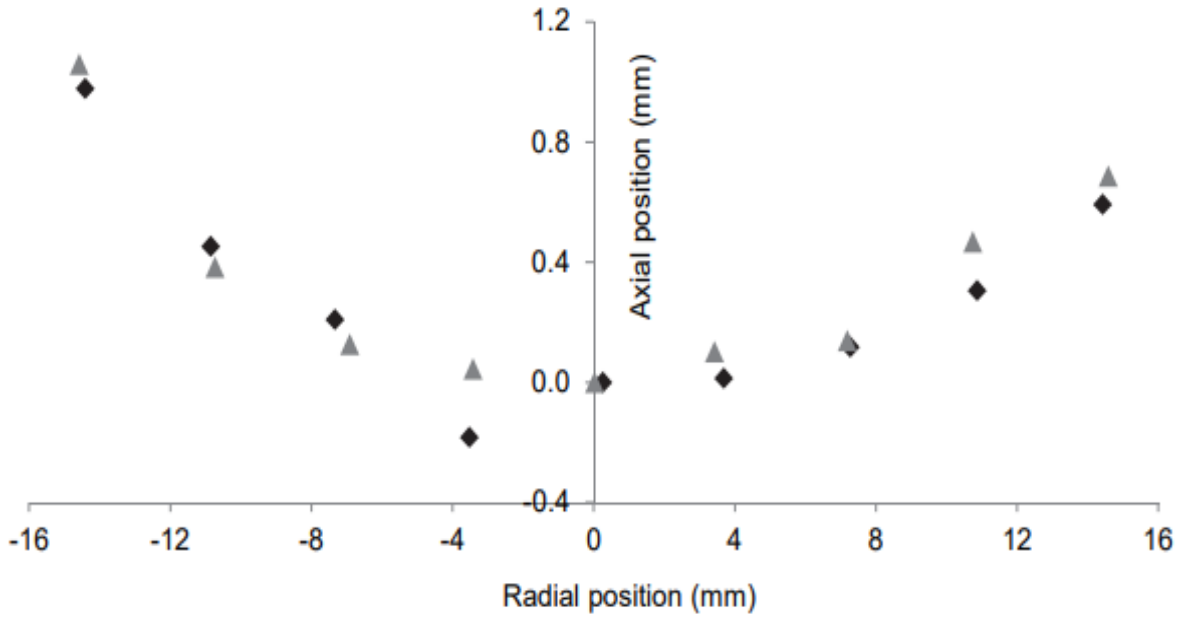
$$y_n = h_n \cos(\alpha) - y_c \qquad (3\text{-}1)$$

$$x_n = D\,((t_n - h_n \cos(\alpha)/D) - t_c) \qquad (3\text{-}2)$$

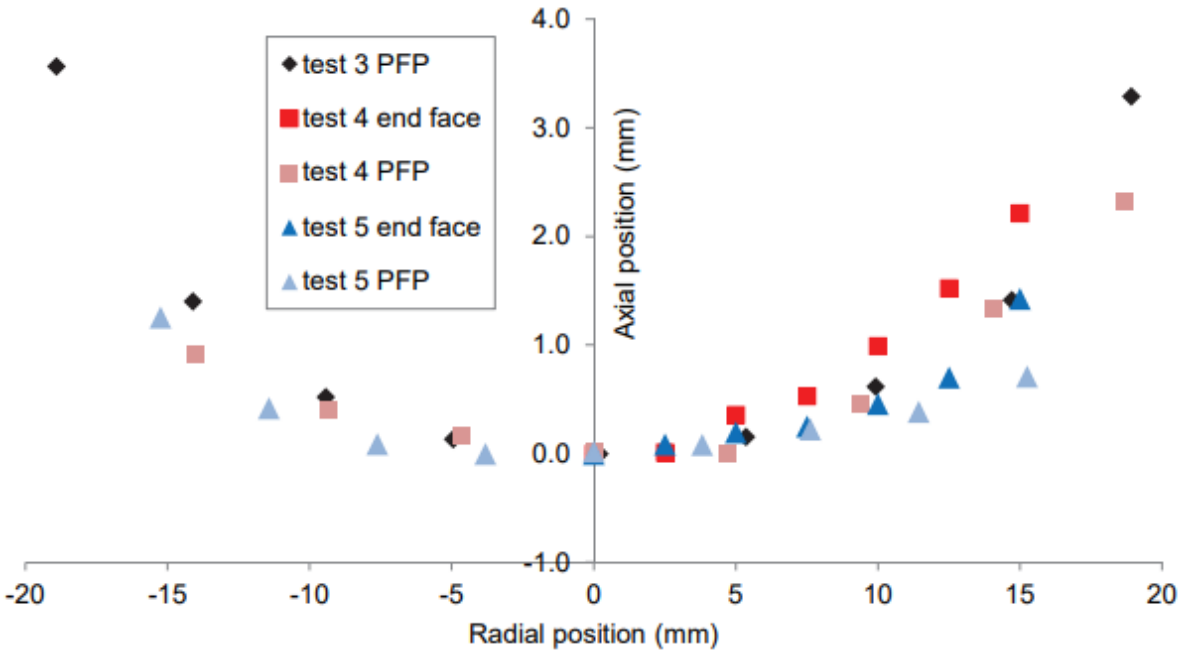
gdje su x_n i y_n ispravljeni radijalni i aksijalni položaj fronte detonacije na n-toj rupi,

a h_n je udaljenost između prve i n-te rupe. y_c i t_c su aksijalni položaj i vrijeme koji odgovaraju dolasku fronte detonacije u srednju rupu i D je brzina detonacije određena iz parova rupa s istim radijalnim položajem (tj. rupe br. 4-6, 3-7, 2-8 i 1-9).

Polumjer zakrivljenosti prednjeg dijela detonacije R je zatim određen kružnom regresijom podataka o aksijalno-radijalnom položaju. U slučaju smjese AN-Al, tri krajnje točke nisu korištene jer im je radijalni položaj bio unutar zida kućišta.



Slika 3-12. Detonacijski prednji oblici rastaljenog ETN-a dobiveni u ispitivanjima 1 (crna) i 2 (siva) (Kunzel, 2019)



Slika 3-13. Detonacijski prednji oblici smjese AN-Al dobiveni u ispitivanjima 3,4 i 5 (Kunzel, 2019)

Dobivenim rezultatima se ustanovilo da je nagnuta perforirana sonda od vlakana (PFP) korisna tehnika za istovremeno mjerenje brzine detonacije i zakrivljenosti detonacijske fronte.

U slučaju detonacijske frontalne zakrivljenosti, rezultati PFP-a pomalo su pomaknuti s kontrole mjerenja, ali imaju isti trend.

Glavna prednost nagnute PFP tehnike je mogućnost određivanja dviju parametara unutar bilo kojeg odjeljka ili čak nekoliko odjeljaka eksplozivnog naboja istovremeno. Prilično dobri rezultati mogli bi se dobiti čak i s prilično osnovnim instrumentima, ali dobro uređeni sustav pomaže u dobivanju još točnijih rezultata. Nedostatak bi mogao biti nužnost uvođenja sonde u punjenje pod kutom koji može biti nezgodan, posebno u slučaju prešanog eksploziva.

Ispitivanje tehnike na druge vrste eksploziva kao što su emulzije, tekućine i prešanih eksplozivi te fotografski dokazi interakcije detonacijskog vala sa sondom još nisu do kraja istraženi (Künzel 2019).

3.4.) Mjerenje detonacijske zakrivljenosti uporabom novorazvijenog sustava

Sposobnost novorazvijenog neovisnog pasivnog optičkog sustava OPTIMEX za mjerenje zakrivljenosti fronte detonacije prikazan je na nabojima prešanog eksploziva A-IX-1 (smjesa RDX / ceresin-stearin s 95/5 mas.%). Naboji, s omjerom duljine i promjera od jedan do četiri, pripremljeni su iz cilindričnih promjera 21 mm, 30 mm, 40 mm i 50 mm te su prešani do gustoće od 1,66 g/cm^3. Takvi naboji detoniraju brzinom od 8220 m/s. Detonacijska zakrivljenost je dobivena pomoću 8 optičkih vlakana a rezultati su uspoređeni sa fotografijama snimljenim ultrabrzom kamerom UHSi 12/24.

Geometrija vala ovisi o brojnim parametrima eksplozivnog naboja, definiranim prije pokretanja naboja, kao što su:

• kemijski sastav eksploziva,

• gustoća naboja,

• dimenzije punjenja - promjer i omjer duljine i promjera,

• uvjeti zatvorenosti

• vrsta inicijacije,

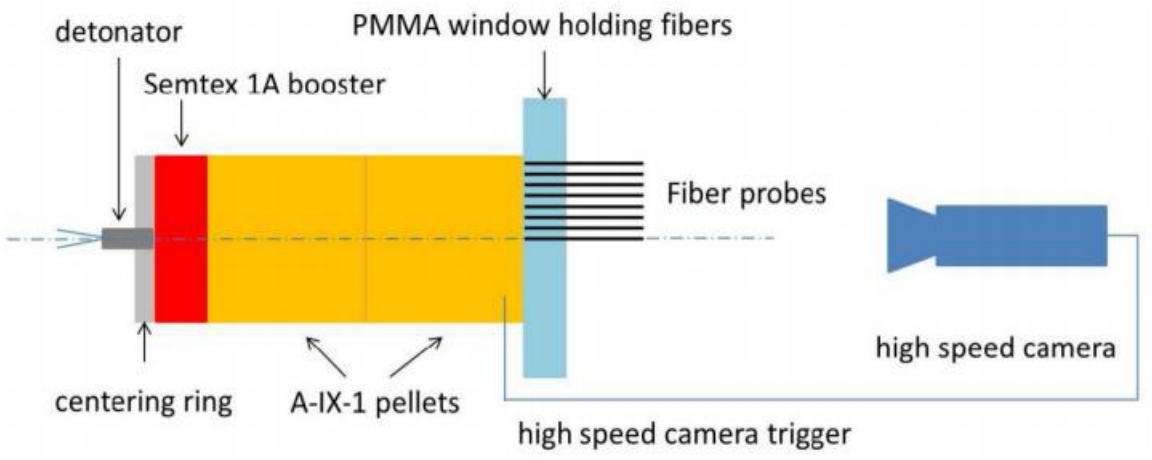
• početna temperatura

Shematski sklop je prikazan na slici 3-14. za L/D = 2. Stvarni eksperimentalni raspored pomoću 8 vlakana duž cijelog promjera naboja prikazan je na slici 3-15.

Korišteni su naboji promjera 30, 40 i 50 mm za slučaj sa L/D = 1, a naboji promjera 21 mm korišteni su za omjer cilindara L/D = 2. Sastavljanje naboja iz pojedinih cilindara je jedini praktični način pripreme duljih cilindričnih naboja.

Pritiskom na cjelokupno punjenje L/D = 4 u jednom komadu stvara poteškoće u održavanju konstantne gustoće duž naboja čak i pri postupnom pritisku. Kako bi se mogli smjestiti senzori izbušena je četvrtasta prozirna PMMA ploča (prozor) debljine 10 mm okomito na njegovu površinu sa 8 rupa promjera 1 mm.

Prozor je zatim pritisnut na donju površinu eksploziva te je učvršćen trakom bez ikakvog ljepila za održavanje tankog sloja zraka između površine. Poravnanje čaše za miniranje sa osi naboja osigurana je centrirajućim plastičnim cilindrom.



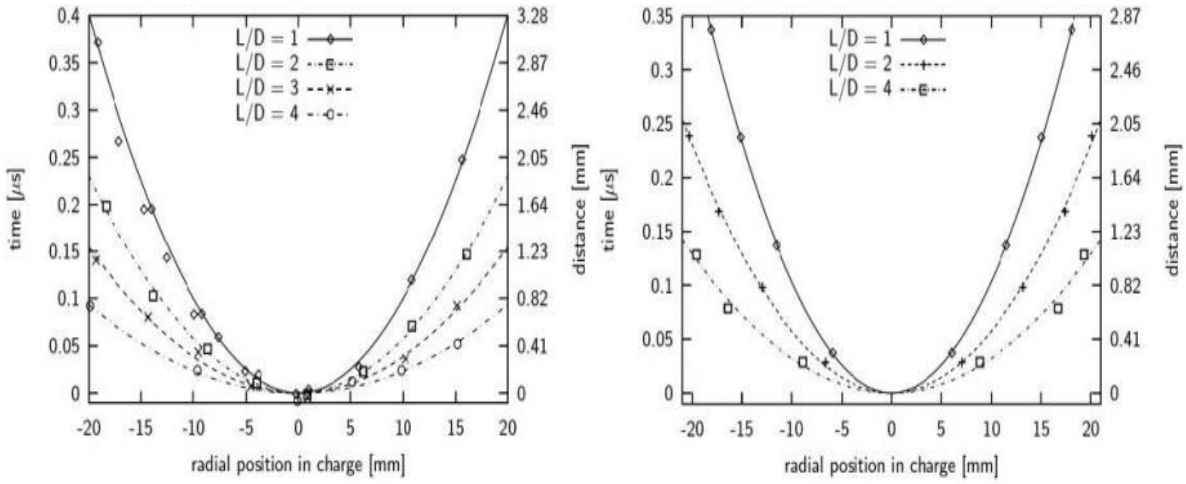
Slika 3-14. Shematski prikaz ispitivanja sa osijetilima smještenim na pola promjera (Pachman, 2019)



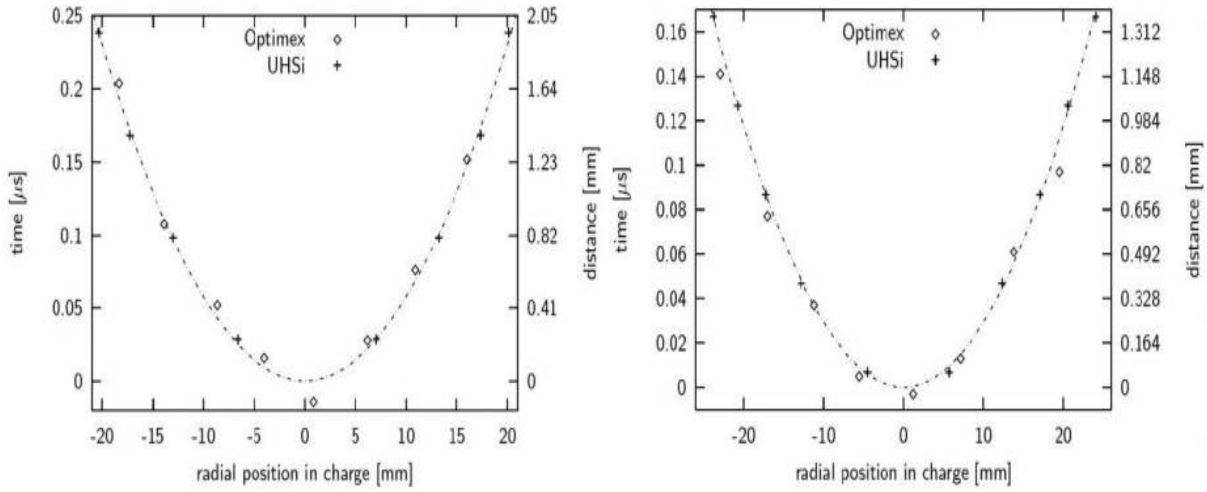
Slika 3-15. Raspored osjetila po promjeru eksploziva (Pachman, 2019)

Rezultati predstavljeni u ovoj studiji izmjereni su s nabojima koji imaju L/D u rasponu od jedan do četiri. Dobiveni oblici, izmjereni su pomoću oba uređaja, OPTIMEX-a i brze kamere (UHSi), te su prikazani na slici 3-16.

Postupno smanjenje zakrivljenosti fronte detonacije s povećanjem duljine naboja se jasno pokazuje, a konačna usporedba performansi OPTIMEX sustava u odnosu na UHSi 12/24 kameru prikazana je na slici 3-17. za naboje od 40 mm sa L/D = 2 i L / D = 4.



Slika 3-16. Prikaz zakrivljenosti u vremenu za odnose L/D (Pachman, 2019)



Slika 3-17. Usporedba rezultata OPTIMEX sustava i brze kamere (Pachman, 2019)

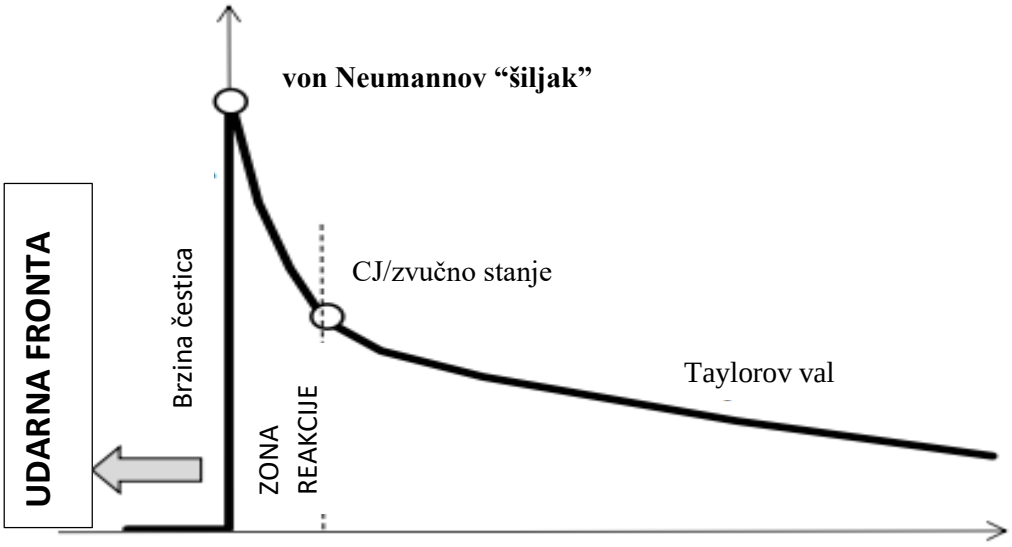
Rezultati dobiveni sa sustavom OPTIMEX gotovo se idealno podudaraju sa rezultatima dobivenim kamerom ultra velike brzine. U slučaju dugih naboja (L/D = 4) početno prijelazno stanje vezano za inicijaciju se smanjuje, što rezultira relativno malim učinkom naboja promjera.

3.5.) Mjerenje brzine i zakrivljenosti detonacijske fronte u nitrometanu (NM)

Nitrometan (NM) je tekući eksploziv koji se uglavnom proučava kao primjer homogenog eksploziva u kondenziranoj fazi, poput tekućeg TNT-a i monokristalnog PETN-a. Budući da je homogen tekući eksplozivi je savršeno kristalno čvrst te kao takav eksplozivi ne sadrži praznine, nema žarišta tijekom inicijacije kompresije šoka. Šok inicijacije takve eksplozije vlada u potpunosti jakim sabijanjem tankog sloja eksploziva i podvrgava temperaturi ovisnoj brzini reakcije. Dodavanjem male količine nečistoća ili aditiva, svojstva inicijacije mogu se promijeniti od homogenog do heterogenog eksploziva.

Zona kemijske reakcije (CRZ) prostorna je udaljenost između udarnog vala i zvučnog vala lokusa u jednodimenzionalnoj detonaciji koja se neprestano širi što je prikazano na slici 3-18.

Pokreće se udarni val kemijske reakcije na von Neumannovom skoku i na zvučnom lokusu, ali ne sve, kemijske reakcije dogodile su se, a kemijska brzina otpuštanja topline je nula.



Slika 3-18. Profil brzine čestica reakcijske zone

Teško je točno izmjeriti zonu reakcijskog vala detonacije NM. Mnogo različitih tehnika se koristi za izravna ili neizravna mjerenja CRZ homogenih eksploziva, poput eksperimenata s potiskivanjem ploče. Budući da je uvjet za uspješan eksperiment velika vremenska razlučivost, tu se kao najbolja i najpouzdanija pokazala laserska brzina interferometrija. Interferometrija je zadovoljavajuća ako se primjenjuje u impedancijiskim eksperimentma s prozorima gdje je blok prozirnog materijala ("prozor") pričvršćen na pročelju površine

cilindričnog eksplozivnog naboja. Ova tehnika daje profile brzine i vremena što je čini izravno primjenjivim za mjerenje duljine CRZ tekućih eksploziva.

Ovisno o varijacijama (Fabry-Perot, VISAR, ORVIS, PDV), vremenska razlučivost kreće se od 10 ns do najmanje 1 ns.

Duljina CRZ-a NM varira za različite autore i različite eksperimentalne i primijenjene tehnike numeričkog modeliranja. Većina studija slaže se s postojanjem bržih i sporijih kemijskih reakcija u CRZ. Prvo, uglavnom korišteno i referencirano, a time i većina pouzdanih pokusa na dužini CRZ nitrometana izveli su Engelke i suradnici.

Oni su koristili mjerenja zakrivljenosti prednjeg dijela na NM i procijenili duljinu CRZ približno 6 ns (36 um). I Bouyer i suradnici te Sheffield i suradnici temeljili su svoje eksperimente na ovome pokusu i koristili su lasersku interferometriju za mjerenje profila brzine čestica u stabilnom stanju detonacijskog vala. U njihovim eksperimentima, vremenska razlučivost varirala je od 8 ns do 1 ns. Njihovi su rezultati potvrdili prethodne radove.

Naglo smanjenje profila brzine čestica u prvih 5-10 ns praćeno je mnogo sporijim smanjenjem u brzini čestica s vremenom, sve dok ne dosegne procijenjene uvjete CJ na približno 50 ns (300 μm). Pored prethodno spomenute visoke vremenske razlučivosti potrebne u eksperimentu postavljanja, jedan od glavnih problema u određivanju CRZ u NM je nesigurnost u identificiranju stanja CJ iz profila reakcijske zone.

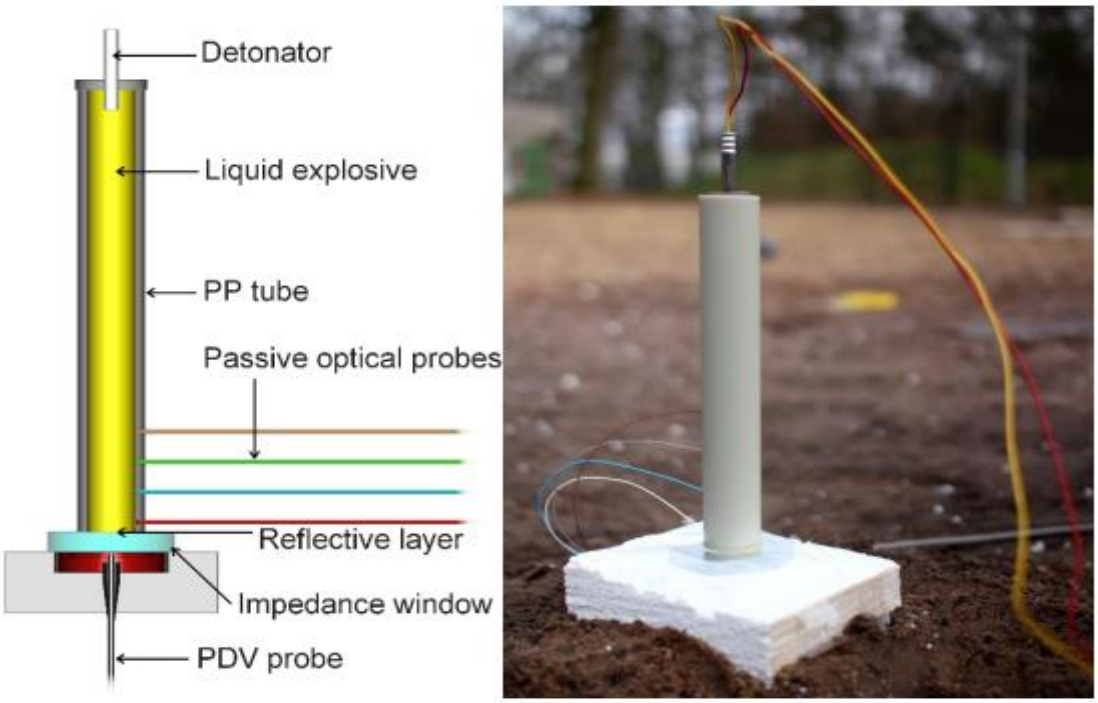
Sporije kemijske reakcije nakon otprilike prvih 10 ns rezultira ravnijim profilom bez karakterističnog pada što ga čini zahtjevnim za određivanjem kraja reakcijske zone. Brzina čestica na von Neumannovom skoku mjeri se u većini pokusa na NM/PMMA sučelju i pokazuje raspon od 2,2 do 2,45 mm/μs. Treba naglasiti da izmjereni vrhovi su 10 do 20% ispod teoretski procijenjenih vrijednosti zbog nedovoljnog vremena razlučivost većine eksperimentalnih uređaja.

3.5.1.) Opis metode ispitivanja

Tekuće eksplozivne smjese sastojale su se od nitrometana čistoće veće od 97 % i 1,2-diaminoetan (EDA, etilendiamin, čistoće 99,5%) u masenim omjerima 90:10 i 99: 1. Tekući eksplozivi napunjeni su u polipropilenske (PP) cijevi s unutarnjom stranom od 22,5 mm promjera i debljine stjenke od 4,2 mm.

Omjer duljine i promjera naboja bio je l/d =10. Cijev je na jednom kraju zatvorena držačem detonatora koji je dobiven 3D ispisom i diskom od 6 pločica polimetilmetakrilata (PMMA). Punjenje je inicirano industrijskim detonatorima s osnovnim punjenjem od 0,72 g RDX-a pakiranim u aluminijsku oblogu.

Cijev s ispitivanim eksplozivom učvršćena je u okomitom položaju s usmjerenim detonatorom prema dolje (slika 3-19).



Slika 3-19. Shema i slika eksprimenta za mjerenje (Štimac, 2017)

Brzina detonacije izmjerena je pomoću niza pasivnih optičkih sondi okomitih na os naboja. Četiri staklena optička vlakna s vanjskim promjerom plašta od 0,9 mm umetnuti su u bušotine izbušene u kućištu punjenja međusobono udaljene 30 mm. Dubina bušenja bila je takva da su vrhovi sondi još uvijek odvojeni od tekućeg eksploziva slojem debljine 0,5 mm od plastike kako bi se izbjeglo curenje. Prenosili su se svjetlosni signali koje stvara eksploziv optičkim vlaknima i snimljeni sustavom za prikupljanje svjetlosti OPTIMEX-8. Brzina detonacije određena je kao nagib udaljenosti i vremena.

3.5.2.) Rezultati ispitivanja

Prikazani rezultati pokazuju da se PDV tehnika može koristiti za određivanje detonacije širina vala i vremena reakcije, međutim ne može u potpunosti riješiti „von Neumannovu špicu“. Kao posljedica vrlo oštrog skoka i nedovoljne vremenske razlučivosti (5 ns), eksperimentalno dobiveni rezultat je skraćen. Eksperimentalno određeno vrijeme reakcije za

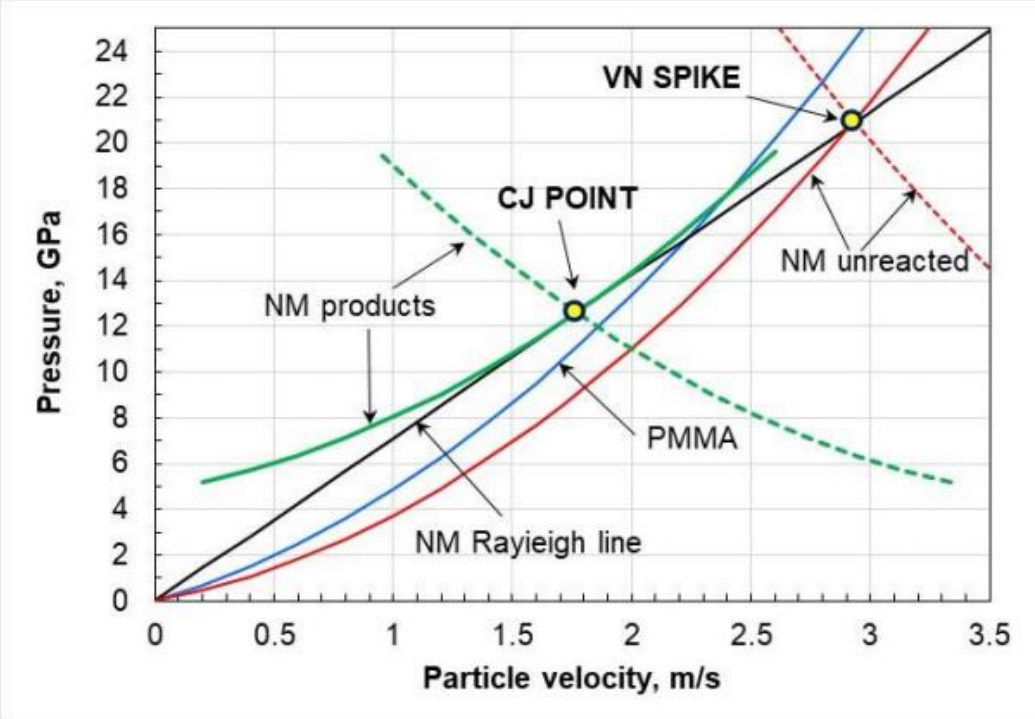
NM sa 1% EDA iznosi 60 ns (širina 267 μs) blizu je vrijednosti od 50 nm koje su iznijeli neki drugi autori.

Reakcija za vrijeme NM koji sadrži 10% EDA malo je duže i iznosi 85 nm (širina 361 μs). Rezultati također pokazuju da se struktura zone detonacijske reakcije može modelirati. Kinetički modul EXPLO5 zasnovan na Wood-Kirkwoodovom modelu detonacije. Model brzine reakcije ovisan je o tlaku, i ugrađen u EXPLO5, kalibriran je za reprodukciju eksperimentalnog vremena reakcije i profila brzine i vremena čestica NM.

Takav se kalibrirani model koristi za modeliranje zone reakcije detonacije. Rezultati izračuna potvrđuju eksperimentalno promatranu strukturu reakcijske zone, postojanje vrlo brzih reakcija u ranoj fazi (80% materijala reagira u prvih 1 ns i 95% u prvih 7 ns), nakon čega slijedi polagani stupanj (od 7 ns do stanja CJ, 60 ns).

Također, izračunate vrijednosti tlaka i brzine čestica na von Neumannovom šiljku i točki CJ za oba ispitivana NM kompozicije, slažu se s podacima izračunatim iz Hugoniota NM (reagirao je i nije reagirao) i Rayleighova linija (presjek prikazan na slici 3-20).

Kombinirajući eksperimentalna mjerenja brzine čestica i numeričko modeliranje pokazalo se korisnim pristupom u rješavanju von Neumannovoj vršnoj vrijednosti detaljne strukture reakcijske zona eksploziva.



Slika 3-20. Prikaz ploha Hugoniota nereagiranog NM i njegovih produkata detonacije i Rayleighova linije za NM

4.) LABORATORIJSKA ISPITIVANJA

Laboratorijska ispitivanja zakrivljenosti detonacijske fronte provode se u svrhu dokazivanja zakonitosti odnosa zakrivljenosti fronte u različitim mjernim postavima. Ova laboratorijska ispitivanja razlikuju se od prethodno objsašnjenih ispitivanja nekih drugih autora koji su ispitivali zakrivljenost detnacijske fronte na sličan način.

Za ova laboratorijska ispitivanja korišteni su suvremeni uređaji poput 3D pisača i novog uređaja explomet. U sljedećim poglavljima su prikazani procesi pripreme, spajanja i pucanja uzoraka u laboratoriju.

Laboratorijska mjerenja provedena u laboratoriju su u velikoj mjeri pomogla pri postavu terenskih mjerenja gdje su se koristili puno veći uzorci sa većom količinom eksploziva. Te kao takva ova laboratorijska mjerenja služe kao preliminarna.

4.1.) Priprema uzorka za mjerenje

Postupak izrade i pripreme uzorka sastoji se od nekoliko koraka. Prvi korak podrazumjeva izradu plastičnog čepa kružnog oblika sa rupicama raspoređenim dužinom polumjera koje služe za ulaz optičkog vlakna (osjetila). Čep se izrađuje pomoću 3D printera uz određene parametre temerature što je prikazano na slici 4-1.



Slika 4-21. Prikaz izrade čepa na 3D printeru sa parametrima izrade

Na tako dobivenom plastičnom čepu nalazi se 6 rupa za isto toliko optičkih vlakana pomoću kojih se mjere vremena nailaska detonacijskog vala.

Drugi dio koji je potreban za pripremu uzorka je čelična cijev promjera 42,5 mm koja na svojoj bočnoj plohi ima rupu za dodatnu optičku sondu koja mjeri brzinu detonacije na drugom explomet uređaju. Za ovaj dio uzorka ne zahtjeva se specijalna cijev nego obična čelična cijev gdje utjecaj obloge kod eksploziva ne-idealne detonacije može biti vrlo značajan, zato što čvršća obloga smanjuje opadanje tlaka i temperature u zoni reakcije, što povećava opseg gorenja, odnosno zona rekacije se skraćuje, a detonacija postaje brža i stabilnija.

Treći dio kod pripreme uzorka je eksploziv tipa ANFO. Takav eksploziv je primjer ne idealnog eksploziva koji je smjesa amonij nitrata i dizel goriva. Gustoća eksplozivne tvari kod ANFO eksploziva iznosi 0,850 g/cm^3. Masa korištenog eksploziva po uzorku je između 31 i 35 grama.

Četvrti dio uzorka je električni detonator pomoću kojeg se detonira sam uzorak. A osim detonatora korištena je i samoljepljiva izolir traka za bolje prijanjanje ostalih dijelova.

Zadnji i najvažniji dio uzorka su optička vlakna koja se stavljaju na dno uzorka kroz rupice na plastičnom čepu te se spajaju na uređaj explomet za mjerenje vremena nailaska svjetlosnog vala. Uzorak sadrži 6 takvih optičkih vlakana.

4.2.) Spajanje uzorka u cjelinu za pucanje

Svi navedeni dijelovi uzorka spajaju se u jednu cjelinu kako bi se dobio odgovarajući uzorak za pucanje. Ovisno o mjernom postavu sa unutarnje strane plastičnog čepa stavljaju se brtve u obliku izolir trke ili bakrene trake i to u komadu ili na segmentni način svaki komadić trake za svoju rupu.

U ovim laboratorijskim ispitivanjima obuhvaćeno je 5 mjernih postava od kojih je prvi bio bez ikakve zaštite rupa na čepu, drugi je bio izolir traka segmentno, treći postav je bio izolir traka puna po cijelom profilu, četvrti postav je bio bakar segmentno i posljednji postav je bio bakar po punom profilu.

Ovisno o mjernom postavu pripremamo čep na koji se kasnije postavlja čelična cijev. Tako spojeni uzorak se puni ANFO eksplozivom što je prikazano na slici 4-2.

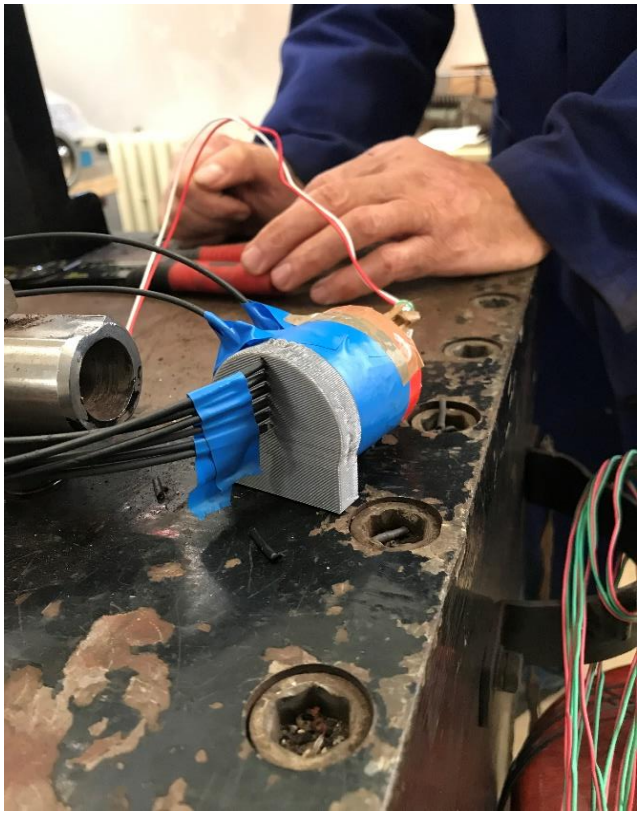
Nakon što je uzorak napunjen ANFO eksplozivom pokriva se samoljepljivom izolir trakom kako bi se mogao pričvrstiti električni detonator.



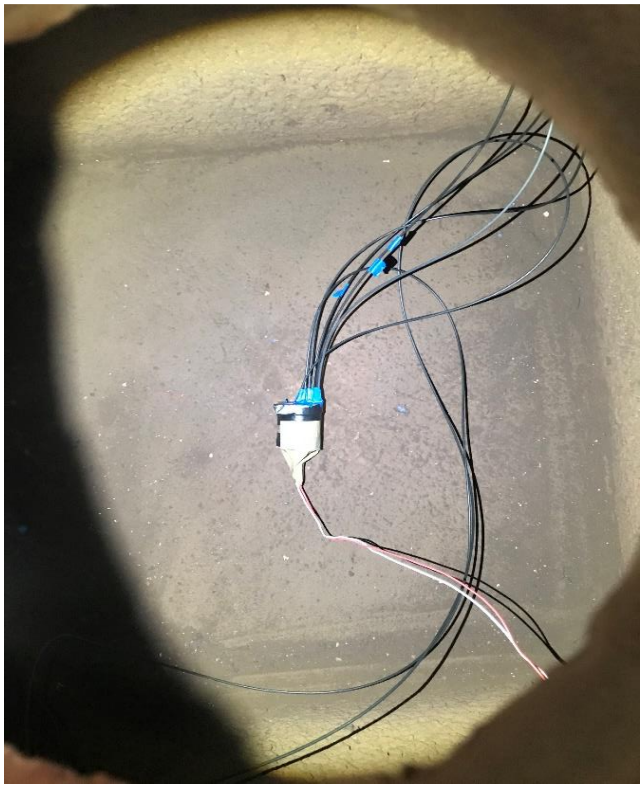
Slika 4-22. Punjenje uzorka ANFO eksplozivom

Na kraju preostaje spajanje optičkih vlakana na dno uzorka koji se također učvrste izolir trakom kako pri spuštanju u zaštitni uređaj nebi ispale te na taj način pokvarile rezultate. Prikaz gotovog uzorka sa optičkim vlaknima nalazi se na slici 4-3.

A uzorak spreman za pucanje nalazi se na slici 4-4.



Slika 4-23. Gotovi uzorak sa spojenim optičkim vlaknima



Slika 4-24. Uzorak spreman za pucanje u zaštitnom uređaju

Nakon što se ovako pripremljeni uzorak otpuca dobiveni rezultati na uređaju explomet se iskazuju u vremenu nailaska vala na pojedinu sondu a prikaz jednog takvog rezultata prikazan je na slici 4-5.



Slika 4-25. Prikaz rezultata na uređaju Explomet

Prikaz svih rezultata i objašnjenje prisutnih anomalija u rezultatima opisano je u poglavlju 5. gdje su sadržani svi dobiveni rezultati a sveobuhvatni prikaz laboratorijski mjerenja prikazan je na slici 4-6. sa explometom, sondama i zaštitnim uređajem za pucanje.



Slika 4-26. Cjelokupni mjerni postav na laboratorijskim mjerenjima

5.) REZULTATI LABORATORIJSKIH ISPITIVANJA

Provedenim laboratorijskim ispitivanjima dobiveni su rezultati za 5 mjernih postava te su na kraju zajedno grupirani u svrhu dobivanja određenog trenda rezultata odnosno prikaza određene zakonitosti između različitih mjernih postava.

Za svaki mjerni postav provedena su 3 pucanja kako bi dobili srednju vrijednost te samim time točnije podatke i mogćnost eliminiranja ne logičnih rezultata. U rezultatima su prikazane tablice sa srednjm vrijednostima mjernih postava i pripadajućim dijagramima.

Svrha laboratorijskih ispitivanja je dobivanje najpovoljnijeg mjernog postava kako bi se isti mogao iskoristiti na terenskim ispitivanjima za dobivanje najtočnijih rezultata.

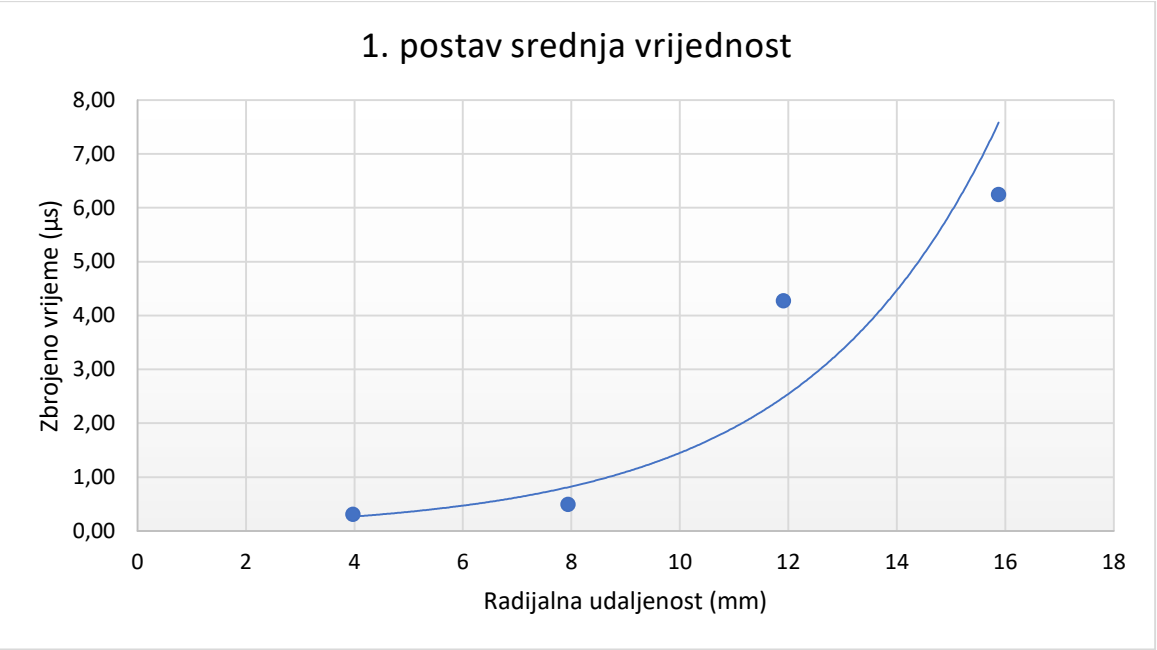
5.1.) Rezultati za prvi mjerni postav

Za prvi mjerni postav bez pokrova provedena su 3 ispitivanja a na temelju njih dobivena je tablica 5-1. sa prikazom srednjih vrijednosti od sva 3 ispitivanja. U tablici su prikazane vrijednosti radijalne udaljenosti, zbrojenog vremena nailaska vala te pravo izmjereno vrijeme.

Tablica 5-1. Rezultati za prvi mjerni postav

1.postav – bez pokrova – srednja vriednost			
Položaj	**Radijalna udaljenost**	**Zbrojeno vrijeme**	**Izmjereno vrijeme**
0	0 mm	0 µs	0 µs
1	3,97 mm	0,31 µs	0,31 µs
2	7,94 mm	0,49 µs	0,18 µs
3	11,91 mm	4,27 µs	3,78 µs
4	15,88 mm	6,24 µs	1,97 µs
5	19,85 mm	16,24 µs	9,99 µs

Pomoću podataka iz tablice 5-1. dobiven je dijagram prikazan na slici 5-1. a iz prikazanog dijagrama se može vidjeti da se točke ne poklapaju idealno sa detonacijskim valom, odnosno vidljivo je određeno odstupanje te je spajanje dijagrama upotrebljena interpolacija.



Slika 5-27 Dijagram za prvi mjerni postav

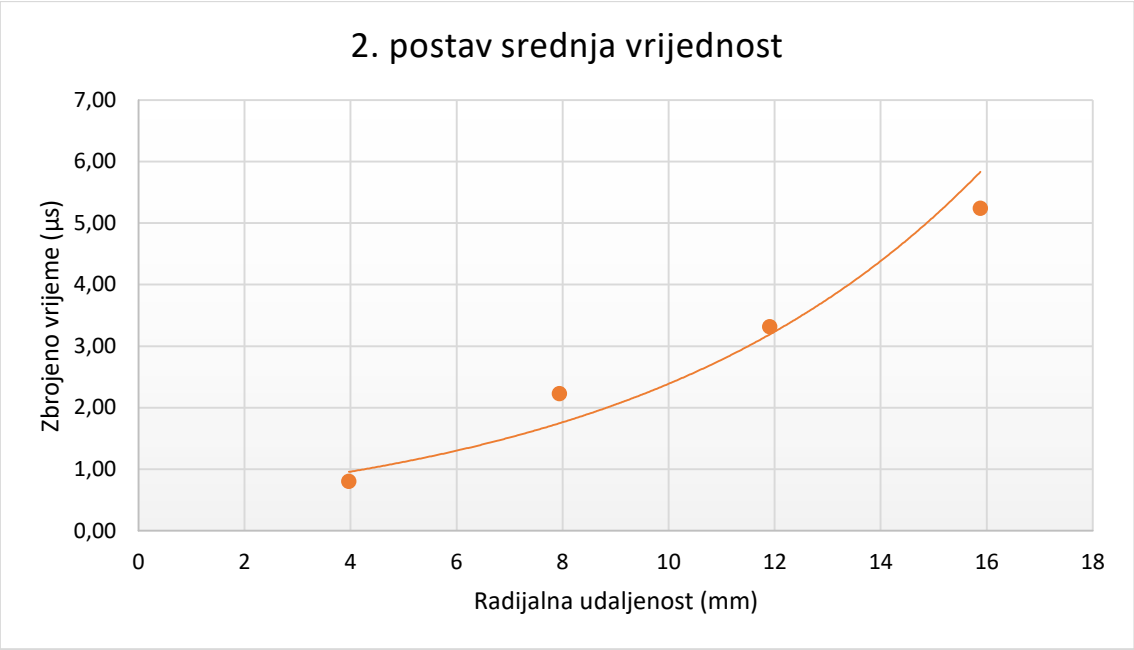
5.2.) Rezultati za drugi mjerni postav

Za drugi mjerni postav segmentne izolir trake provedena su 4 ispitivanja iz razloga što je jedno mjerenje dalo ne logične rezultate pa je isto ponovljeno. Iz tih ispitivanja dobivena je srednja vrijednost parametara koji su prikazani u tablici 5-2.

Tablica 5-2. Rezultati za drugi mjerni postav

2.postav – pokrov – izolir traka segmentno - srednja vriednost			
Položaj	**Radijalna udaljenost**	**Zbrojeno vrijeme**	**Izmjereno vrijeme**
0	0 mm	0 µs	0 µs
1	3,97 mm	0,80 µs	0,80 µs
2	7,94 mm	2,23 µs	1,42 µs
3	11,91 mm	3,32 µs	7,49 µs
4	15,88 mm	5,24 µs	1,93 µs
5	19,85 mm	9,78 µs	4,53 µs

Pomoću podataka iz tablice 5-2. dobiven je dijagram prikazan na slici 5-2. a iz prikazanog dijagrama se može vidjeti da se točke bolje poklapaju nego u prethodnom postavu što nam govori da ispitivanje sljedećih postava može bit još bolje.



Slika 5-28 Dijagram za drugi mjerni postav

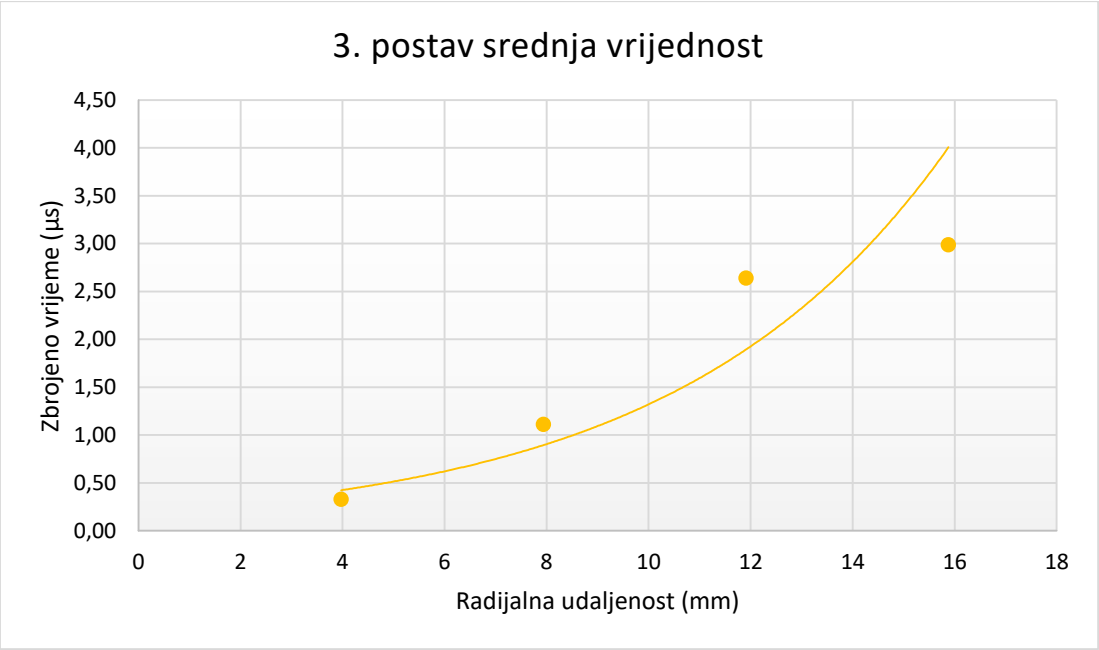
5.3.) Rezultati za treći mjerni postav

Treći mjerni postav je postavljen sa punim profilom izolir trake i za njega je također provedeno 4 ispitivanja kao i za prošli postav zbog jednog ponovljenog ispitivanja. Srednje vrijednosti dobivenih podataka prikazane su u tablici 5-3.

Tablica 5-3. Rezultati za treći mjerni postav

3.postav – pokrov – izolir traka puna - srednja vriednost			
Položaj	**Radijalna udaljenost**	**Zbrojeno vrijeme**	**Izmjereno vrijeme**
0	0 mm	0 µs	0 µs
1	3,97 mm	0,33 µs	8,78 µs
2	7,94 mm	1,11 µs	0,78 µs
3	11,91 mm	2,64 µs	1,53 µs
4	15,88 mm	2,99 µs	0,35 µs
5	19,85 mm	18,31 µs	15,32 µs

Iz dobivenih srednjih vrijednosti radijalne udajenosti i zbrojenog vremena prikazan je dijagram na slici 5-3. gdje se vidi slično podudaranje točaka kao u prethodnom mjernom postavu.



Slika 5-29 Dijagram za treći mjerni postav

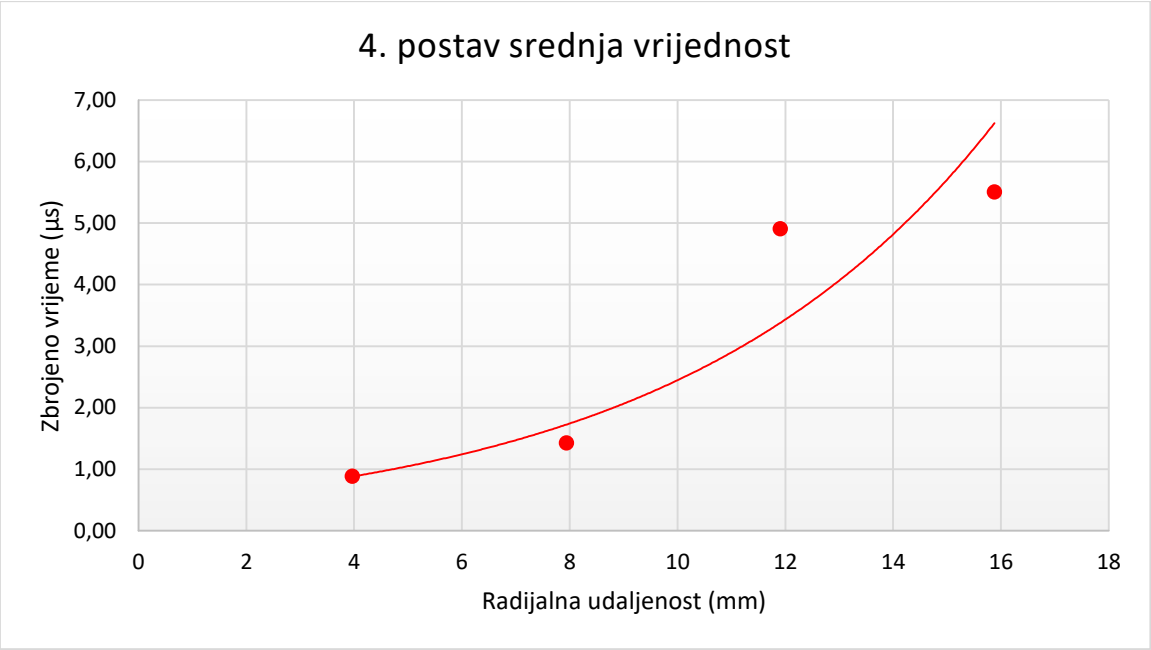
5.4.) Rezultati za četvrti mjerni postav

Za četvrti mjerni postav upotrebljena je segmentna bakrena traka u čijem slučaju nije bilo ponovljenih ispitivanja. Rezultati srednjih vrijednosti prikazani su u tablici 5-4.

Tablica 5-4. Rezultati za četvrti mjerni postav

4.postav – pokrov – bakrena traka segmentno - srednja vriednost			
Položaj	**Radijalna udaljenost**	**Zbrojeno vrijeme**	**Izmjereno vrijeme**
0	0 mm	0 µs	0 µs
1	3,97 mm	0,33 µs	8,78 µs
2	7,94 mm	1,11 µs	0,78 µs
3	11,91 mm	2,64 µs	1,53 µs
4	15,88 mm	2,99 µs	0,35 µs
5	19,85 mm	18,31 µs	15,32 µs

Iz dobivenih rezultata za ovaj mjerni postav dijagram je prikazan na slici 5-4. iz kojeg vidimo da raspored točaka je sličan prethodnom mjernom postavu.



Slika 5-30 Dijagram za četvrti mjerni postav

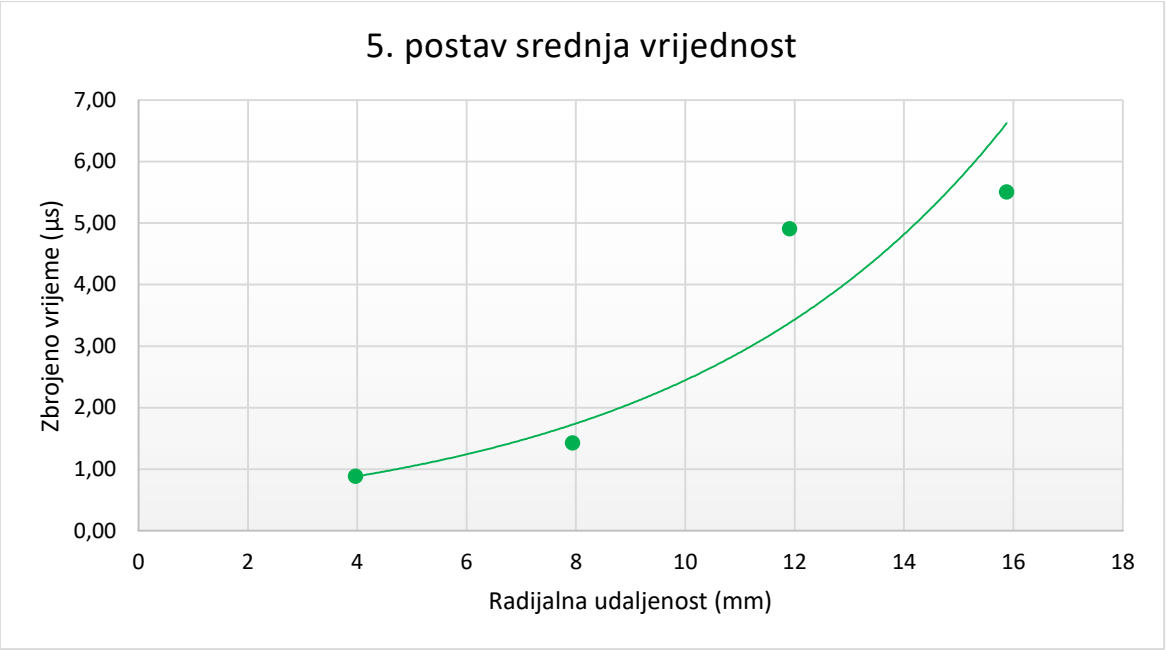
5.5.) Rezultati za peti mjerni postav

U posljednjem mjernom postavu korištena je bakrena traka u punom svom profilu te su provedena 3 mjerenja. Srednje vrijednosti mjerenja prikazane su u tablici 5-5.

Tablica 5-5. Rezultati za peti mjerni postav

5.postav – pokrov – bakrena traka puna - srednja vriednost			
Položaj	**Radijalna udaljenost**	**Zbrojeno vrijeme**	**Izmjereno vrijeme**
0	0 mm	0 µs	0 µs
1	3,97 mm	0,45 µs	0,45 µs
2	7,94 mm	0,66 µs	0,21 µs
3	11,91 mm	1,03 µs	0,37 µs
4	15,88 mm	6,86 µs	5,82 µs
5	19,85 mm	8,61 µs	1,76 µs

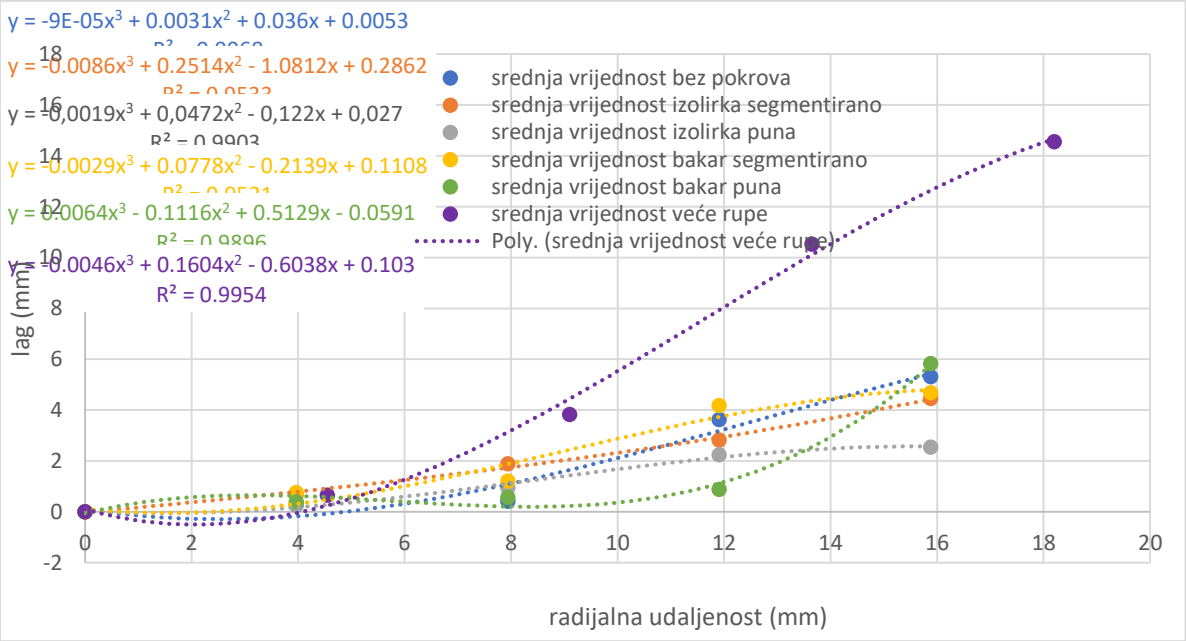
Dijagram za srednje vrijednosti radijalne udaljenosti i zbrojenog vremena prikazan je na slici 5-5. iz priloženog dijagrama se može uočiti da je položaj točaka sličan prethodnom mjernom postavu.



Slika 5-31 Dijagram za peti mjerni postav

5.6.) Objedinjeni rezultati laboratorijskih ispitivanja

Provedbom ispitivanja svih mjernih postava omogućen je prikaz pojedinih krivulja na zajedničkom dijagramu koji pokazuje tendenciju kretanja detonacijskog vala za određeni mjerni postav te na taj način ukazati na najbolji mogući mjerni postav. Dijagram sa svim prikazanim krivuljama prikazan je na slici 5-6.



Slika 5-32 Dijagram objedinjenih rezultata svih mjernih postava

Iz priloženog dijagrama možemo uočiti da je za svaki mjerni postav pomoću jednadžbe izračunata točnost u rasponu od 95,21% za bakar segmentno pa do 99,68% za postav bez

pokrova. Također se može vidjeti da rezultati za sve mjerne postave se grupiraju u jednoj zoni osim za postav sa većim rupama koji nije dao dobre rezultate i odskače od ostalih rezultata.

Izmjerena brzina detonacije između prvog i drugog osijetila je 828 m/s dok je stvarna brzina nešto manja i iznosi 801 m/s. Mjerenje brzine detonacije provedeno je pomoću drugog explometa i nije uspijelo u svakom od pojedinih ispitivanja te je moguće manje odstupanje od ove vrijednosti.

6.) USPOREDBA LABORATORIJSKIH I TEORETSKIH REZULTATA

Rezultati koje su dobili autori R.A. Catanah i L.G.Hill u laboratoriju u New Mexicu pokazali su da promjer ima veliki utjecaj na detonacijsku zakrivljenost što je potvrdilo njihova teoretska nagađanja. Kod većih promjera dobivena je lakše uočljiva i pravilnija detonacijska zakrivljenost što je i očekivano ponašanje detonacijskog vala. Tako provedeno ispitivanje u usporedbi sa mojim laboratorijskim ispitivanjem potvrđuje da za male promjere punjenja detonacijska zakrivljenost je mala jer i u mom slučaju zakrivljenost detonacijske fronte je mala zbog malog promjera punjenja.

Osim promjera na zakrivljenost detonacijske fronte utječe zatvorenost eksploziva. Takvu vrstu ispitivanja proveo je Scott I. Jackson u poglavlju 3.2. ovog rada. U ispitivanjima navedenog autora eksploziv je ograničavan kartonskim i aluminijskim cijevima što je pokazalo da ima značajan utjecaj na izgled zakrivljenosti detonacijske fronte. Uzorci u kartonskoj cijevi su imali puno veću detonacijsku zakrivljenost od onih u aluminijskim cijevima. Tako dobiveni rezultati upućuju da u mojim laboratorijskim ispitivanjima osim promjera na malu zakrivljenost detonacijske fronte utječe i način ograničavanja eksploziva što je u mojim ispitivanjima ograničavano sa čeličnom cijevi što je potvrdilo da tvrđa obloga smanjuje zakrivljenost ali povećava efikasnost eksploziva.

U ostalim teoretsko laboratorijskim ispitivanjima autora provedena su istraživanja sa drugačijim eksplozivima od ANFO tipa eksploziva kao što je nitrometan što je dalo i ne baš usporedive rezultate sa ANFO ispitivanjima zbog velike razlike u gustoći eksploziva. Osim drugačijeg eksploziva korištene su i drugačije metode bilježenja rezultata. Osim optičkim vlaknima nailasci vala su mjereni i ultra brzom kamerom koja je dala gotovo identične rezultate kao i puno precizniji osciloskop za mjerenje što nije dovelo do razmišljanja o ne pouzdanosti pojedinih uređaja.

Usporedbom objedinjenih rezultata laboratorijskih ispitivanja sa rezultatima ostalih autora može se vidjeti da se zakrivljenost detonacijske fronte razlikuje od ispitivanja do ispitivanja. Najbliži izgled zakrivljenosti dobiven je sa čvrstim ograničavanjem eksploziva sa sličnim promjerom.

7.) ZAKLJUČAK

Na temelju uspoređenih rezultata ostalih autora sa mojim laboratorijskim ispitivanjima može se doći do različitih zaključaka. Uporabom sofisticiranih i skupih uređaja moguće je dobiti više rezultata bolje kvalitete prikaza ali ne nužno i puno točnije od nekih jeftinijih varijanti kao što su ultra brza kamera i explomet. Veličina zakrivljenosti detonacijske fronte ovisi o nekoliko važnih parametara od kojih svaki može poremetiti izgled detonacijske fronte.

Na temelju usporedbe rezultata najvažnije je da su eksplozivi iste vrste odnosno gustoće kako bi bili međusobno usporedivi. Važan je način ograničavanja eksploziva odnosno vrsta materijala cijevi je li kartonska ili čelična cijev. Ako uspoređujemo uzorak iste vrste eksploziva npr. tipa ANFO i tvrde obloge kao što je čelik ili aluminij onda kao ključni parametar koji utječe na zakrivljenost detonacijske fronte je promjer cijevi. Veći promjer cijevi omogućava zalet detonacijske fronte što daje realnije iznose brzine detonacije te jasniji izgled zakrivljenosti detonacijske fronte.

Osim promjera u svim ispitivanjima bitna je duljina punjenja eksploziva koja ovisi o samom promjeru i može iznositi od 5 do 10 dužina promjera, tako da duljina punjenja je promjenjiva i može se korigirati u svrhu dobivanja još točnijih rezultata i sigurnosti ispitivanja jer velikim omjerom možemo dobiti uzorke koje sadrže i nekoliko kilograma eksploziva.

8.) LITERATURA

Bdzil, John B., Tariq D.Aslam, Richard A. Catanach and Larry G. Hill (2002): DSD FRONT MODELS: NONIDEAL EXPLOSIVE DETONATION IN ANFO, Los Alamos National Laboratory Los Alamos, New Mexico 87545.

GREGUREV, K.,2019. Zakrivljenost detonacijske fronte eksploziva neidealne detonacije. Diplomski rad. Sveučilište u Zagrebu: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

Jackson, S.I., Charles B. Kiyanda, and Mark Short (2009): Precursor Detonation Wave Development in ANFO due to Aluminum Confinement Shock and Detonation, Physics Group Los Alamos National Laboratory.

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

Smirnov, E.B., Kostitsin, O.V., Koval, A.V., and I. A. Akhlyustinet al (2016):Model of non-ideal detonation of condensed high explosives, Federal State Unitary Enterprise "Russian Federal Nuclear Center—Academician Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics", Vasilieva 13, Snezhinsk, Chelyabinsk Region 456770, Russia.

Štimac, B., 2019. Numeričko modeliranje ANFO eksploziva. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu.

Tančak, A. (2019) Utjecaj obloge na detonacijske parametre ANFO eksploziva, Završni rad Sveučilište u Zagrebu: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

INTERNET IZVORI

Catanach, R.A., Hill, L.G.: Diameter effect curve and detonation front curvature measurments for ANFO.

URL: https://permalink.lanl.gov/object/tr?what=info:lanl-repo/lareport/LA-UR-01-3261

Clark Souers, P. (04.10.2004.): Size effect and detonation front curvature.

URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/prep.19970220408

Hrvatska zaklada za znanost HRZZ, Neidealne detonacije gospodarskih eksploziva.

URL: https://hrzz.hr/barbara-stimac/

Kubíček, M 2015. Optimex 8. URL:

https://www.urel.feec.vutbr.cz/web_documents/produkty/2016/marsalek_optimex8_en. pdf

Künzel, M., Vodochodsky, O., Kucera, J. i Jiri Pachman (2019): Simultaneous measurement of detonation velocity and detonation front curvature using fiber optic probe. New Trends in Research of Energetic Materials, Czech Republic

URL:file:///E:/DIPLOMSKI%20RAD/curvature/Kunzel_2019_Measurements%20of%20detonation%20velocity%20and%20front%20curvature%20using%20fiber%20optic%20probe.pdf

PACHMAN, J., KÜNZEL, M., KUBÁT, K. SELESOVSKY, J. MARŠÁLEK, R. POSPÍŠIL, M., KUBÍČEK, M., PROKEŠ, A. (2016): OPTIMEX: Measurement of Detonation Front Curvature with a Passive Fiber Optical System. URL:

file:///E:/DIPLOMSKI%20RAD/curvature/mjerenja_Pachman_2016_OPTIMEX%20Rc%20measurement.pdf