

# Zakrivljenost detonacijske fronte eksploziva neidealne detonacije

---

Grgurev, Krešimir

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:048268>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-03**



*Repository / Repozitorij:*

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



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

**ZAKRIVLJENOST DETONACIJSKE FRONTE EKSPLOZIVA  
NEIDEALNE DETONACIJE**

Diplomski rad

Krešimir Grgurev  
R-225

Zagreb, 2019.

ZAKRIVLJENOST    DETONACIJSKE    FRONTE    EKSPLOZIVA    NEIDEALNE  
DETONACIJE

Krešimir Grgurev

Diplomski rad je izrađen:                      Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za rudarstvo i geotehniku  
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Sažetak

Eksplozivi su energetski materijali koji se koriste za razne svrhe. Poznavanje pojedinih značajki gospodarskih eksploziva te njihovu povezanost omogućuje određivanje područja primjene. Zakrivljenost detonacijske fronte eksploziva neidealne detonacije jedan je od parametara koji određuje stupanj neidealnosti detonacijskog procesa. Njezina veličina određuje i kritični promjer eksploziva, a utječe na brzinu detonacije i tlak detonacije. Zakrivljenost detonacijske fronte eksploziva neidealne detonacije se može mjeriti i proračunati putem modela i pomoću formula. U radu je dan pregled metoda za mjerenje zakrivljenost detonacijske fronte eksploziva neidealne detonacije odnosno matematičkih modela proračuna.

Ključne riječi: eksplozivi, neidealna detonacija, zakrivljenost detonacijske fronte

Završni rad sadrži:    49 stranica, 2 tablica, 27 slike i 13 referenci.

Jezik izvornika:                      hrvatski

Završni rad je pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta  
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Mentor:                                      Dr.sc. Mario Dobrilović, Izvanredni profesor RGNF

Ocjenjivači:                                Dr. sc. Mario Dobrilović, Izvanredni profesor RGNF  
Dr. sc. Vječislav Bohanek, Docent RGNF  
Dr. sc. Vinko Škrlec, Docent RGNF

Datum obrane:                              13.prosinac 2019., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu.

THE CURVATURE OF THE DETONATION FRONT OF A NONIDEAL EXPLOSIVE  
DETONATION

Krešimir Grgurev

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

Explosives are energy materials used for a variety of purposes. Knowledge of the particular characteristics of commercial explosives and their correlation makes it possible to determine the scope of use. The curvature of the detonation front of a nonideal detonation explosive is one of the parameters that determines the degree of nonideality of the detonation process. Its size also determines the critical diameter of the explosive and affects the detonation velocity and detonation pressure. The curvature of the detonation front of a nonideal detonation explosive can be measured and calculated using models and formulas. The paper gives an overview of methods for measuring the curvature of the detonation front of nonideal detonation explosives, ie mathematical calculation models.

Keywords: explosives, nonideal detonation, curvature of the detonation front

Thesis contains: 49 pages, 2 tables, 27 figures and 13 references.

Original in: Croatian

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

Supervisor: Associate Professor Mario Dobrilović, PhD

Reviewers: Associate Professor Mario Dobrilović, PhD  
Assistant Professor Vječislav Bohanek, PhD  
Assistant Professor Vinko Škrlec, PhD

Date of defense: 13.december 2019., Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,  
University of Zagreb

## SADRŽAJ

|  |    |
|--|----|
| 1. UVOD.....   | 1  |
| 2. NEIDEALNA DETONACIJA .....  | 3  |
| 3. METODE MJERNJA ZAKRIVLJENOSTI DETONACIJSKE FRONTE.....                                  | 7  |
| 3.1. DSD, „ <i>detonation shock dynamics</i> “ metoda.....                                 | 8  |
| 3.1.1. Prva i druga glavna zakrivljenost .....   | 12 |
| 3.2. Mjerenja rotirajućom kamerom zakrivljenosti detonacijske fronte ANFO eksploziva ..... | 17 |
| 3.2.1. Neidealna detonacija kod eksploziva ANFO tipa.....                                  | 22 |
| 3.2.2. Provođenje pokusa kod eksploziva ANFO tipa.....                                     | 23 |
| 4. Dn-k ANALIZA .....  | 33 |
| 4.1. Izračun Dn-k analize .....  | 34 |
| 4.2. Usporedba valnih fronti i obloge .....  | 36 |
| 5. REZULTATI ISPITIVANJA .....   | 40 |
| 6. SISTEMATIZACIJA LITERATURNIH MJERNIH PODATAKA .....                                     | 44 |
| 7. ZAKLJUČAK.....  | 47 |
| 8. LITERATURA .....  | 48 |

## POPIS SLIKA

|  |    |
|--|----|
| Slika 2-1: Prikaz neidealne (dvodimenzionalne) detonacije (Esen, 2004).....  | 4  |
| Slika 2-2: Prikaz neidealne detonacije u p-t dijagramu (Cunningham, 2006).....   | 5  |
| Slika 3-1: Model eksperimentalnog promatranja i razvoja detonacije (Smirnov, 2016).....  | 9  |
| Slika 3-2: Razvoj detonacije jakog eksplozivnog naboja promjera 120mm (Smirnov, 2016)<br>.....   | 10 |
| Slika 3-3: Prirast brzine detonacije u ovisnosti od omjera udaljenosti i omjera promjera naboja<br>za promjere od 60 mm i 120 mm (Smirnov, 2016). .... | 11 |
| Slika 3-4: Fronta detonacijskog vala cilindričnog eksplozivnog naboja (Smirnov, 2016) .  | 14 |
| Slika 3-5: Zakrivljenost fronte u ovisnosti od promjera naboja. (Smirnov, 2016).....   | 15 |
| Slika 3-6: Razlika zakrivljenosti u ovisnosti od promjera naboja (Smirnov, 2016).....  | 15 |
| Slika 3-7: Prikaz zavisnosti brzine i glavne zakrivljenosti detonacijske fronte<br>(Smirnov, 2016).....  | 16 |
| Slika 3-8: Shema mjerenja zakrivljenosti fronte ANFO eksploziva (Bzdil, 2002).....   | 17 |
| Slika 3-9: Prikaz detonacijskog vala u eksperimentu s ANFO eksplozivom (Bzdil, 2002)   | 19 |
| Slika 3-10: Graf brzine detonacije kroz faze za dva ANFO štapna eksperimenta<br>(Bzdil, 2002).....   | 20 |
| Slika 3-11: Mjerni uređaj Optimex 8 (Kubiček, 2015) .....  | 21 |
| Slika 3-12: Cijev iz ispitivanja 6-305 (Jackson, 2009).....  | 23 |
| Slika 3-13: Prikaz prednje strane ispitivane cijevi (Jackson, 2009).....   | 24 |
| Slika 3-14: Prikaz raspodjele osjetila na cijevi (Jackson, 2009) .....   | 25 |
| Slika 3-15: Primjer podataka osjetila (Jackson, 2009) .....  | 26 |
| Slika 3-16: Prikaz pozicija i vremena aktiviranja pojedinih osjetila (Jackson, 2009).....  | 27 |
| Slika 3-17: Prikaz detonacijske fronte u aluminijskoj oblozi (Jackson, 2009) .....   | 28 |
| Slika 3-18: Prikaz detonacijske fronte u kartonskoj oblozi (Jackson, 2009).....  | 28 |
| Slika 3-19: Razlika širanja detonacijske fronte kroz uzorke različite duljine i debljine (Jackson,<br>2009).....                                       | 29 |
| Slika 3-20: Raspodjela osjetila po promjeru poprečnog presjeka patrone eksploziva (Tančak,<br>2019).....   | 31 |
| Slika 3-21: Raspodjela osjetila po polumjeru poprečnog presjeka patrone eksploziva (Tančak,<br>2019).....  | 32 |
| Slika 4-1: Usporedba prikaza valnih fronti (Jackson, 2009) .....   | 36 |
| Slika 4-2: Prikaz varijacija prednjeg dijela detonacijske fronte u odnosu na debljinu stijenke<br>(Jackson, 2009).....                                 | 37 |

|  |    |
|--|----|
| Slika 4-3: Prikaz odnosa $D_n$ i $k$ u odnosu na veličinu radijusa (Jackson, 2009) ..... | 38 |
| Slika 4-4: Prikaz ponašanja valne krivulje u odnosu na ograničenje (Jackson, 2009).....  | 39 |

## **POPIS TABLICA**

|   |    |
|---|----|
| Tablica 5-1: Efekt promjera i podatci valne fronte (Canatach i Hill, 2002)..... | 41 |
| Tablica 5-2: Rubni kut detonacije prilikom različitih obloga (Yu, 2018) .....   | 43 |



## 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)                 |
| $r$        | radijalna koordinata                             | (mm)                 |
| $\Theta$   | kut koji zatvaraju ravnina i detancijska fronta  | (°)                  |
| $k_1(r)$   | glavna zakrivljenost detonacijske fronte         | (mm)                 |
| $k_2(r)$   | druga glavna zakrivljenost detonacijske fronte   | (mm)                 |
| $k$        | koeficijent zakrivljenosti detonacijske krivulje | (-)                  |
| $T$        | temperatura                                      | (K)                  |
| $p$        | tlak   | (Pa)                 |
| $z$        | prostorna zakrivljenost                          | (mm)                 |
| $\Phi$     | promjer  | (mm)                 |
| $\rho$     | gustoća  | (g/cm <sup>3</sup> ) |
| $\alpha_1$ | koeficijent sposobnosti                          | (mm)                 |
| $\eta$     | koeficijent sposobnosti                          | (mm)                 |

## 1. UVOD

Eksplozivi se koriste osim u rudarstvu i građevinarstvu, strojarstvu i dr. Eksplozivi se primjenjuju u rasutom stanju, patronama, metcima ili drugim oblicima prilagođenim načinu primjene.

Patronirani ili u rasutom stanju se koriste za punjenje minske bušotine. Na učinak odnosno veličinu odloma stijene utječu svojstva eksploziva kao što su ukupna raspoloživa energija, način iniciranja, parametri minskog polja te svojstva miniranog materijala.

Eksploziv je materija koja pod utjecajem egzotermne kemijske reakcija prelazi u produkte raspadanja čiji je volumen, nakon ekspanzije, znatno veći od početnoga.

Potencijalna energija stlačenih i zagrijanih plinovitih produkata posljedica je toplinske energije oslobođene tijekom eksplozije u bušotini. Vrijeme trajanja same eksplozije, odnosno detonacije izuzetno je kratko, veličine ns do  $\mu$ s, temperature su od 2000 do 5000 K, a tlak eksplozije od 1 do 20 GPa.

Idealna detonacija je proces koji prati teoretske modele i teorije (npr. CJ teorija), s malim odstupanjima između računatih i mjerenih parametara procesa.

Kod neidealne detonacija odstupanja su značajnija i javljaju se kod civilnih, rudarskih eksploziva koji su smjese, a ne monomolekularne tvari.

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, promjer naboja duljina punjenja i dr.

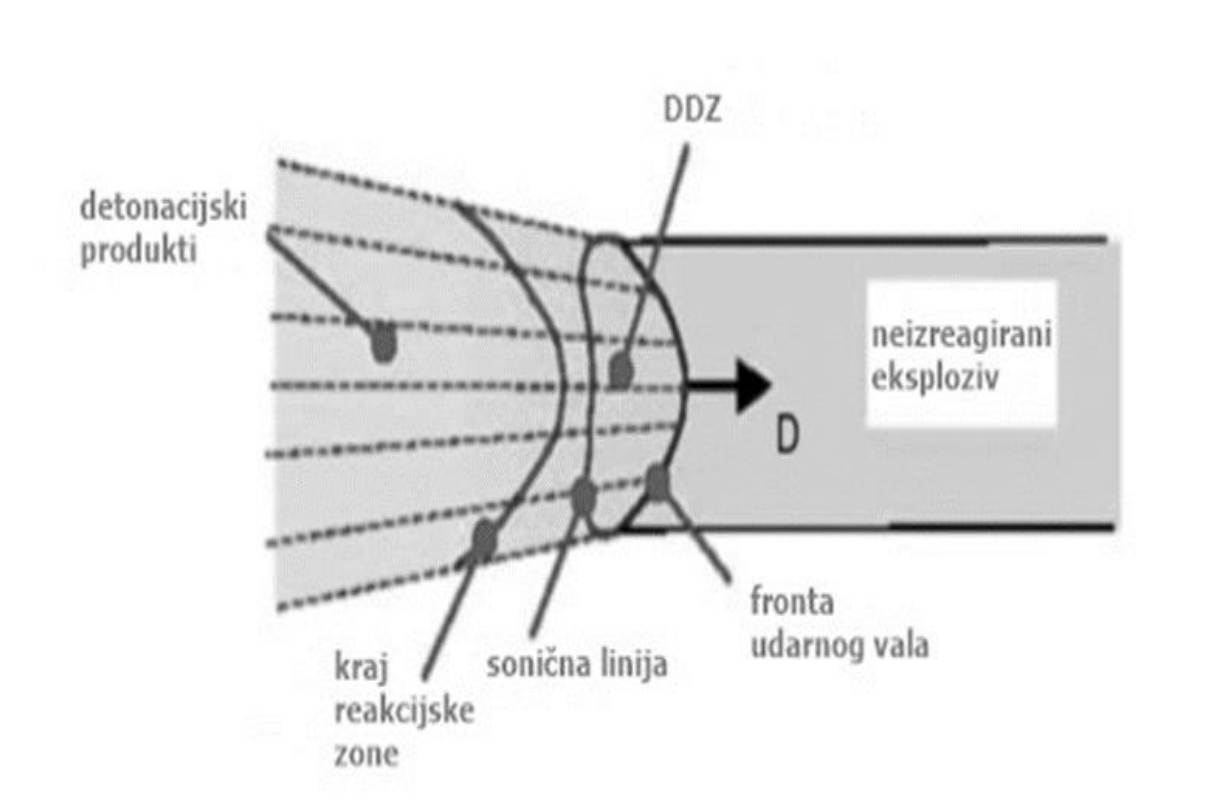
## 2. NEIDEALNA DETONACIJA

Neidealna detonacija je proces koji se javlja kod neidealnih (komercijalnih) eksploziva, odnosno smjesa.

Vrijednost brzine i ostalih parametara detonacije znatno varira u odnosu na vrijednosti kod idealne detonacije, pogotovo ako su eksplozivi manjeg promjera. U ovom slučaju vrijednosti mogu biti jednake jednoj trećini teoretskih vrijednosti.

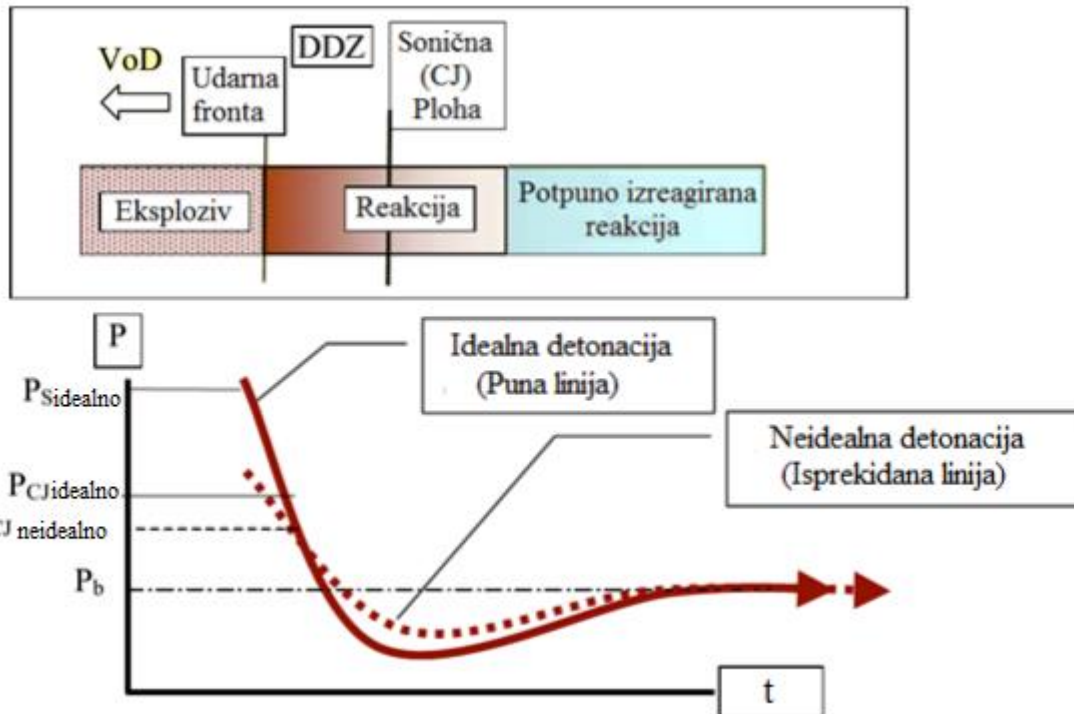
Razlog tome leži u činjenici da se zona kemijskih reakcija nalazi iza sonične linije (granice brzine zvuka u plinovitim produktima) te do oslobađanja energije u toj zoni odnosno do drugačije kemijske kinetike odnosno brzine i tijeka kemijskih reakcija,

Na slici 2-1. se nalazi shematski dvodimenzionalni (2D) prikaz neidealne detonacije. Frontu udarnog vala slijedi i podržava DDZ (*eng. detonation driven zone*) koja je omeđena soničnom linijom. U toj zoni dolazi do početka ekspanzije a kemijske reakcije nisu završene te se oslobađanje topline prostire do kraja reakcijske zone koja leži iza sonične linije,



Slika 2-1. Prikaz neidealne (dvodimenzionalne) detonacije (Esen, 2004)

Raspored vrijednosti tlakova po pojedinim područjima eksploziva i vremenu nakon djelovanja udarnog vala za idealnu i neidealnu detonaciju prikazan je na slici 2-2.



Slika 2-2. Prikaz neidealne detonacije u p-t dijagramu (Cunningham, 2006)

Kao što je prikazano na slici 2-2., tlakovi idealne detonacije i sam proces znatno se može razlikovati od neidealne detonacije

Smanjenje tlakova, širina i zakrivljenost zone te brzina detonacije ovisi o vrsti eksploziva, promjeru, gustoći i dr.

Iako neidealna detonacija nakon nekog vremena ima višu vrijednost tlaka, u početku je ona bila znatno manja od idealne detonacije i dalje je sveukupna vrijednost energije znatno manja (uglavnom preko 50%).

Kod eksploziva neidealne detonacije, eksplozivnih smjesa, toplina eksplozije, detonacijski tlak i brzina detonacije nižih su vrijednosti ali je vrijeme djelovanja produkata na okolinu dulje što po definiciji uzrokuje manje dinamičke impulse tlaka i vršna naprezanja dok je korisna energija prenesena na okolinu te obavljeni rad tek nešto manji u odnosu na eksplozive idealne detonacije.

Ovisno o vrsti primjene i željenom djelovanju eksploziva značajke pojedinih procesa odnosno eksploziva određuju njihov odabir.

### **3. METODE MJERNJA ZAKRIVLJENOSTI DETONACIJSKE FRONTE**

U primjeni se nalazi više metoda za mjerenja zakrivljenosti detonacijske fronte. Metode mogu biti optičke, električne ili kombinirane.

Preciznost mjerenih podataka ovisi o korištenim osjetilima koji daju signal u trenutku nailaska fronte detonacijskog vala na određenom radijusu naboja te o preciznosti uređaja za registriranje signala.



### 3.1. DSD, „*detonation shock dynamics*“ metoda

DSD metoda je u osnovi elekrokontaktna metoda postizanja vremenske distribucije signala ovisno o radijusu eksplozivnog naboja.

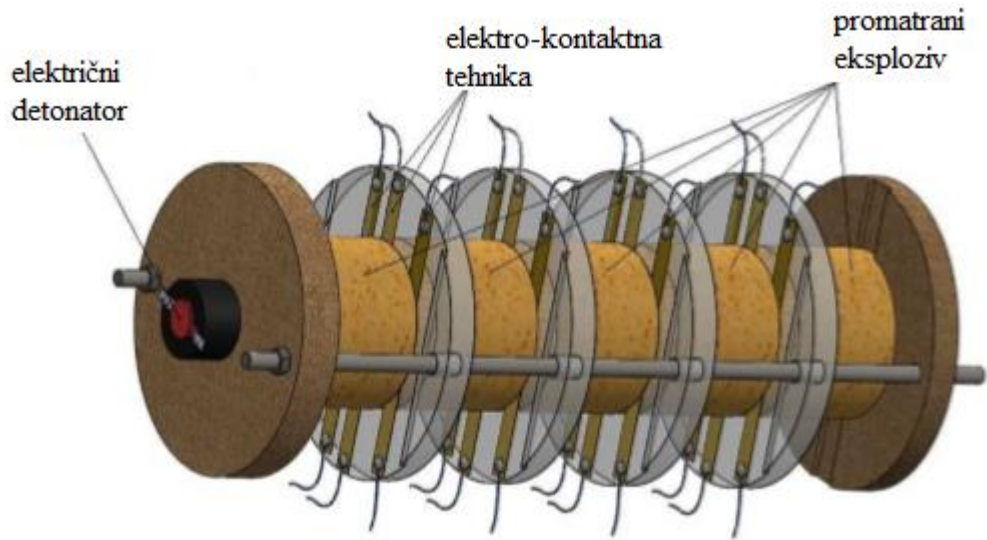
Metoda se temelji na međusobnoj povezanosti lokalne brzine fronte i njegove lokane zakrivljenosti. Poveznica ovisi o jednadžbi stanja produkata eksplozije i brzini reakcije.

Pomoću jednadžbe prednjeg oblika fronte detonacijskog vala mogu se odrediti brzina i oblik te zakrivljenost u proizvoljnoj geometriji .

Potrebno je postaviti diferencijalnu jednadžbu oblika fronta s rubnim ograničenjima na plaštu naboja da bi model bio primjenjiv u neidealnim eksplozivima (Smirnov, 2016).

Mjerni postav ili model sastoji se od eksplozivnog punjenja s ugrađenim elektrokontaktim osjetilima postavljenim na plastičnim diskovima.

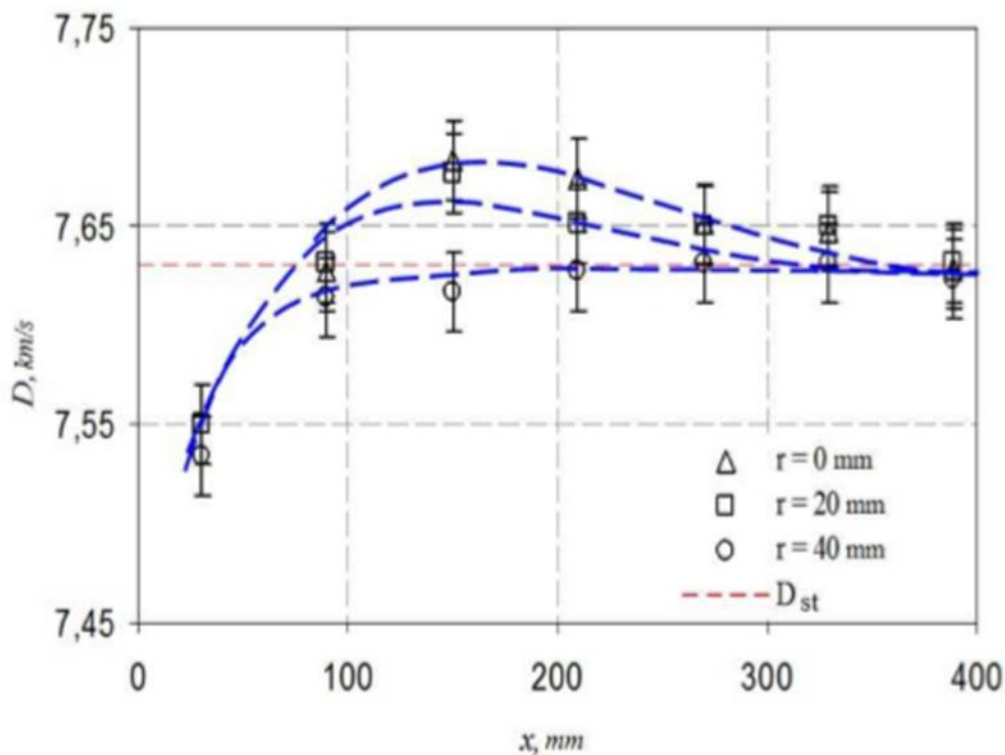
Na slici 3-1. je prikazan horizontalni DSD model.



Slika 3-1. Model eksperimentalnog promatranja i razvoja detonacije (Smirnov, 2016)

Standardni promjeri eksploziva koji se koriste za ispitivanja su: 15 mm, 20 mm, 40mm, 60 mm, 120 mm. Promjeri su standardizirani kako bi se dobila odgovarajuća distribucija brzina detonacije.

Određivanje oblika i brzine te njihove ovisnosti u procesu detonacije je demonstrirano grafom na slici 3-2. Taj graf prikazuje trend distribucije brzina detonacije u odnosu na duljinu punjenja od mjesta iniciranja na definiranim radijusima naboja.

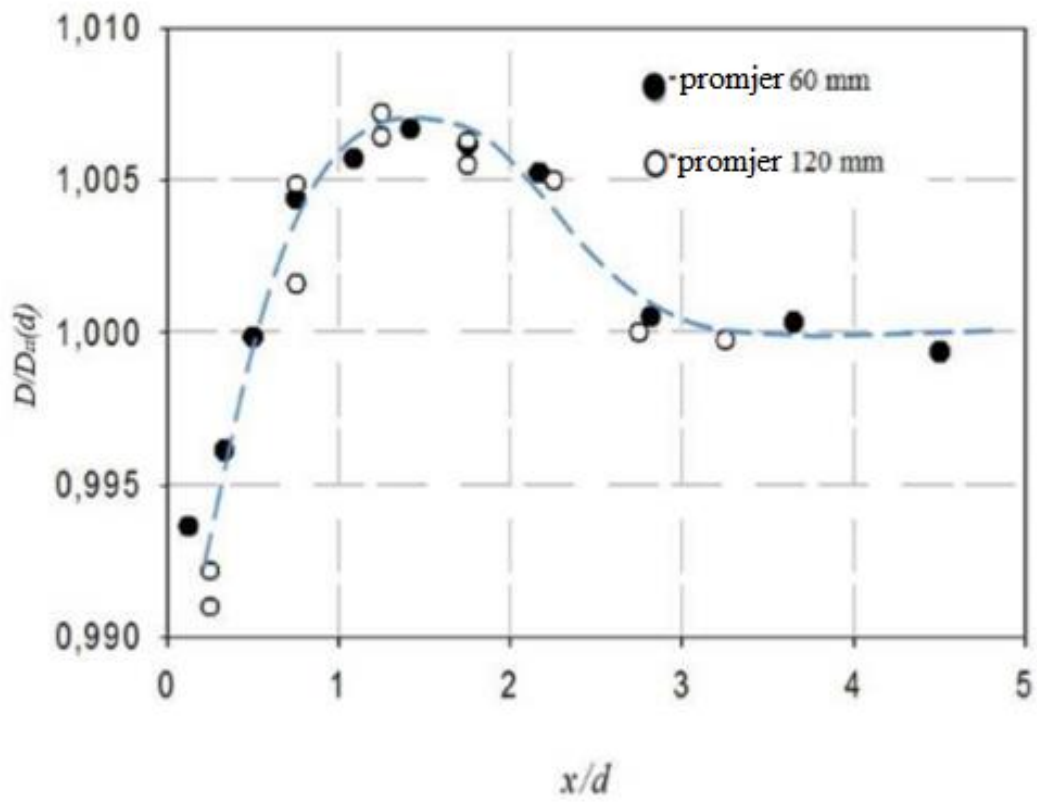


Slika 3-2. Razvoj detonacije jakog eksplozivnog naboja promjera 120 mm (Smirnov, 2016)

Korišteni eksploziv je bio promjera 120 mm. Pomoću osjetila postavljenih u središnjoj osi, te na radijusu od 20 mm i 40 mm izmjereni su veći prirasti brzine prema središnjici naboja.

Tijekom ispitivanja utvrđeno je da prirast brzine detonacije na udaljenosti od mjesta iniciranja te postizanje stabilne brzine detonacije ne ovisi od promjera naboja već od odnosa promjera i udaljenosti.

To je potvrđeno podacima mjerenim na nabojima promjera 60 mm i 120 mm. Dijagram ovisnosti stabilne brzine detonacije i brzina detonacija mjerenih na udaljenosti do trostrukog promjera od mjesta iniciranja pokazuju period odnosno zonu prirasta brzine te smanjenje do stabilne brzine na spomenutoj udaljenosti.



Slika 3-3. Prirast brzine detonacije u ovisnosti od omjera udaljenosti i omjera promjera naboja za promjere od 60 mm i 120 mm (Smirnov, 2016)

### 3.1.1. Prva i druga glavna zakrivljenost

Za određivanje prednje zakrivljenosti, dobiveni profili se aproksimiraju analitičkim ovisnostima koji ovise o svim geometrijskim karakteristikama neidealnog eksploziva. Dobiveni profili su aproksimirani sljedećom zakonitošću (Smirnov, 2016):

$$z = f(z), \quad (3-1)$$

Gdje je:

$z$  - prostorna zakrivljenost (mm)

Zakrivljenost bilo koje trodimenzionalne površine može se izračunati, tj. odrediti iz odgovarajuće kombinacije njegovih prvih i drugih derivacija pravaca prostornih osi pravokutnog koordinatnog sustava.

Prva, odnosno glavna zakrivljenost se pomoću radijalnih koordinata izražava na sljedeći način:

$$k_1(r) = \frac{z''(r)}{[1+z'(r)^2]^{3/2}}, \quad (3-2)$$

Gdje je:

$r$  - radijalna koordinata koja se mjeri od osi naboja (mm),

$z''$  -  $d^2z / dr^2$  (mm),

$z'$  -  $dz/dr$  (mm),

$k_1(r)$  – glavna zakrivljenost detonacijske fronte (mm).

Pretpostavlja se da profil prednjeg dijela detonacijskog vala mora biti relativno simetričan prema osi.

Izražava se i druga glavna zakrivljenost koja nudi rješenje na složene matematičke izraze, a izražava se u radijalnom koordinatnom sustavu. Druga glavna zakrivljenost je dana izrazom (3-3).

$$k_2(r) = \frac{\sin\theta}{r} = \frac{\sin \arctan(z'(r))}{r} = \frac{z'(r)}{r[1+z'(r)^2]^{1/2}}, \quad (3-3)$$

Gdje je:

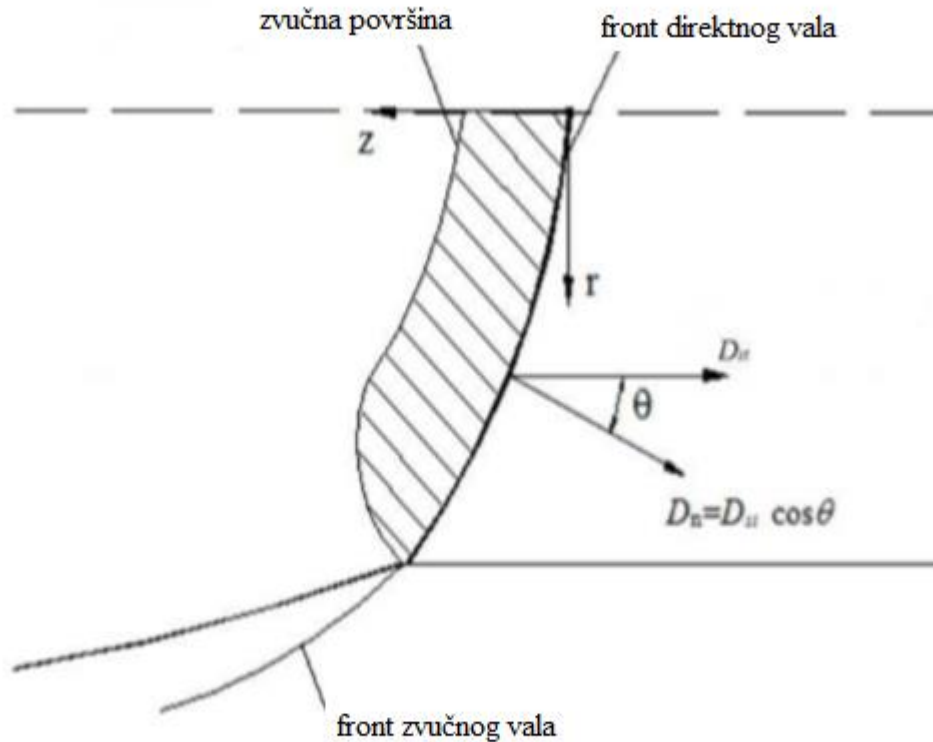
$z'$  -  $dz/dr$

$r$  - radijalna koordinata koja se mjeri od osi naboja,

$k_2(r)$  – druga glavna zakrivljenost detonacijske fronte

$\theta$  – kut koji zatvaraju ravnina i detonacijska fronta.

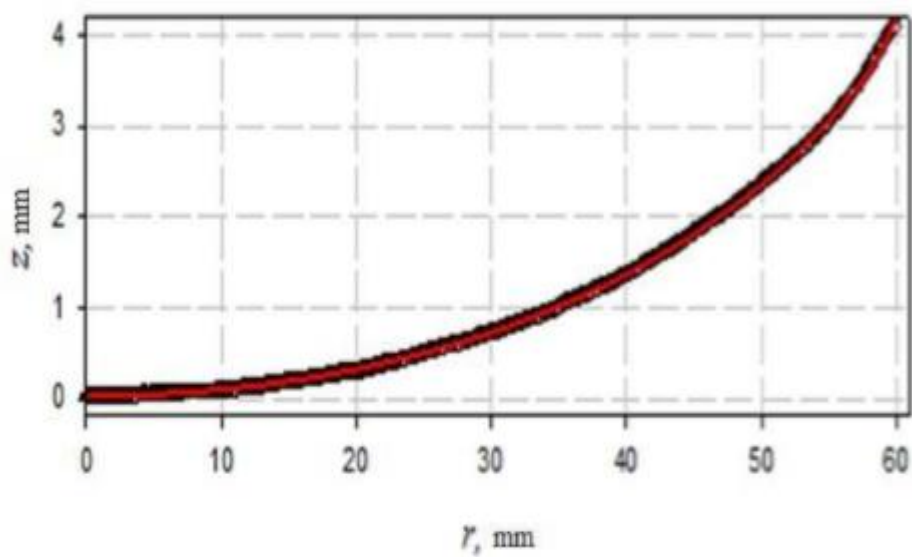
Na slici 3-4 prikazane su glavne veličine zakrivljenosti detonacijske fronte te komponente brzine detonacije.



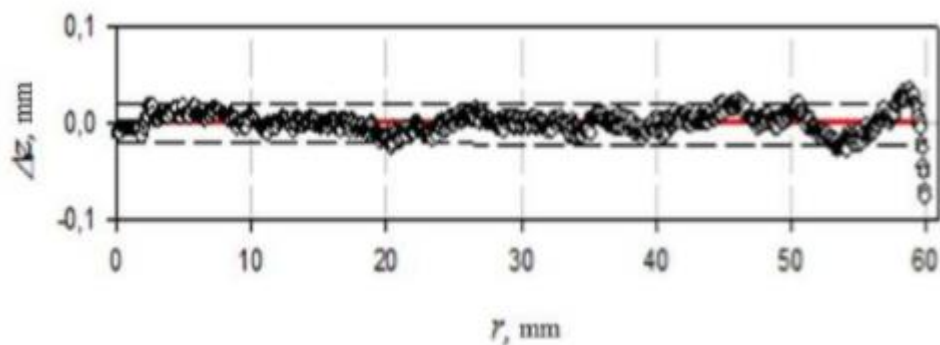
Slika 3-4. Fronta detonacijskog vala cilindričnog eksplozivnog naboja (Smirnov, 2016)

Pitanje je, da li je potrebno razmatrati i promjer kao karakteristiku pri detonacijskoj krivulji iako je jedna od glavnih geometrijskih komponenti samog eksploziva. Rezultat je prikazan na slikama 3-5. i 3-6.

Distribucija zakrivljenosti fronte ovisno od promjera naboja dana je na slici 3-5., a razlika zakrivljenosti na slici 3-6.



Slika 3-5. Zakrivljenost fronte u ovisnosti od promjera naboja. (Smirnov, 2016)

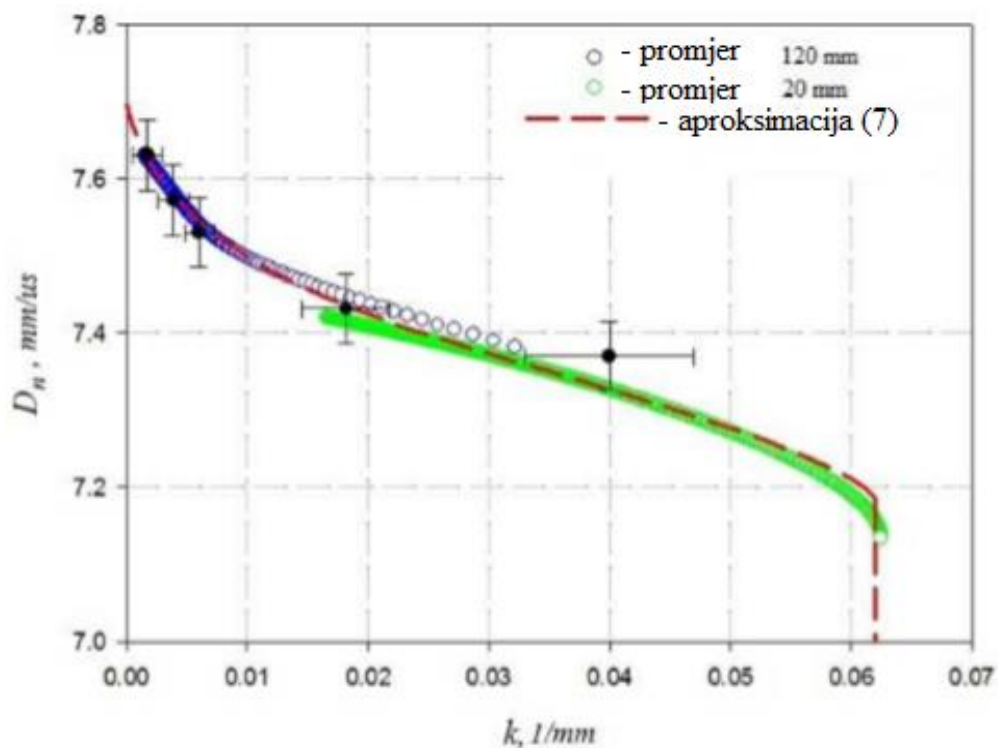


Slika 3-6. Razlika zakrivljenosti u ovisnosti od promjera naboja (Smirnov, 2016)

Rezultati opisani na grafikonima ne odstupaju značajno s odnosnom promjera i duljine naboja.

Zavisnost brzine od glavne zakrivljenosti detonacijske fronte je prikazana na slici 3-7.





Slika 3-7. Prikaz zavisnosti brzine i glavne zakrivljenosti detonacijske fronte (Smirnov, 2016)

Na slici 3-7. je vidljiva neovisnost brzine i prednje zakrivljenosti o promjeru. Ispitivanja su provedena na nabojima promjera od 20 mm i 120 mm.

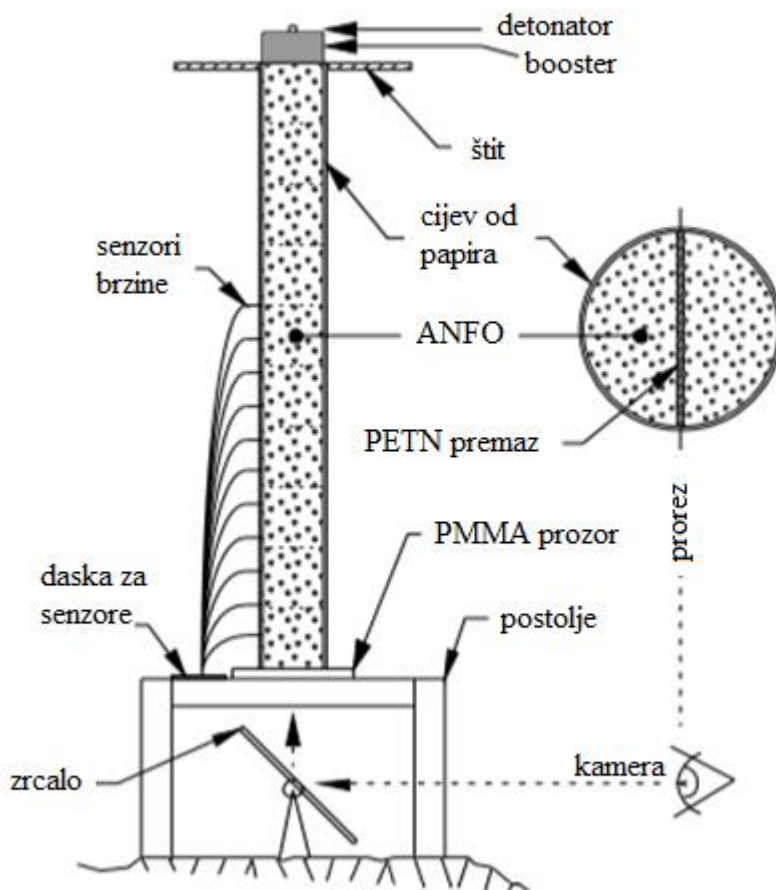
Rezultati mjerenja omogućavaju izračunavanje aproksimacijske krivulje u skladu s eksperimentalnim podacima.

Graf prikazuje odstupanje eksperimentalnih i izračunatih vrijednosti. Odstupanja, osim na rubnim zonama ne premašuje vrijednost od 0,05 mm. Kada se ta odstupanja preračunaju, odnosno prikažu u razlici vremena, dobije se vrijednost od 0,000007 ms.

### 3.2. Mjerenja rotirajućom kamerom zakrivljenosti detonacijske fronte ANFO eksploziva

Kod navedenog mjerenja zakrivljenosti detonacijske fronte ANFO eksploziva mjerni postav prikazan je na slici 3-8.

Uzorak je postavljen vertikalno a zakrivljenost fronte se mjeri zapisom kamere s rotirajućim zrcalom. Brzina detonacije mjerena je elektrokontaktnom metodom.



Slika 3-8. Shema mjerenja zakrivljenosti fronte ANFO eksploziva (Bdzil, 2002)

Eksplziv je smješten u kartonsku cijev, a na dnu se nalazi postolja gdje je ugrađena kamera koja preko zrcala omogućuje mjerenje.

S lijeve strane su stavljena osjetila pomoću kojih je mjerena brzina detonacije.

Na vrhu je postavljen čep radi boljeg prijenosa energije i 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.

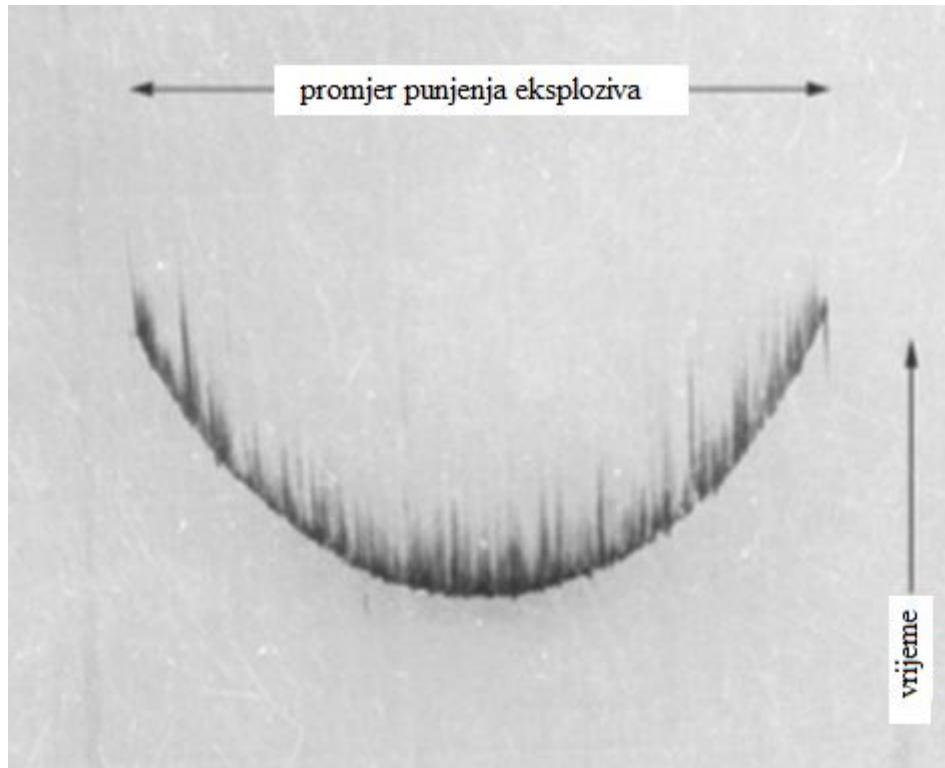
Traka boje PETN-a služi za blokiranje reakcijskog svjetla s detonacijske fronte. Reakcijsko svjetlo ima tendenciju raspršiti se 20mm do 30mm ispred valnog fronta. Ovim postupkom sprječava se raspršenje reakcijskog svjetla.

Ispitivani promjeri su bili između 77 mm i 205 mm. Najbolji rezultati dobiveni su uz omjer duljine punjenja i promjera (L/D) koji je iznosio iznosio 10, tj. ti slučajevi su uspješno ponovljeni bez velikih odstupanja.

Naboji se postavljaju okomito zbog slijedećih prednosti: gornje opterećenje dobro je raspoređeno, detonacijska prednja zakrivljenost se lako odredi na dnu, aksijano simetrična raspodjela gustoće omogućava minimalizaciju nagiba fronte detonacijskog vala.

Rotirajuća kamera pomoću koje su se bilježili rezultati ima brzinu pisanja od 1 mm/ $\mu$ s. Filmovi se očitavaju na optičkom komparatoru od ruba do ruba. Središte naboja određeno je kao središte između dva ruba.

Kako bi se izmjereni trag prikazao na slici, potrebno je provesti uvećanje. Nakon provedenog uvećanja, dobije se rezultat kao na slici 3-9.

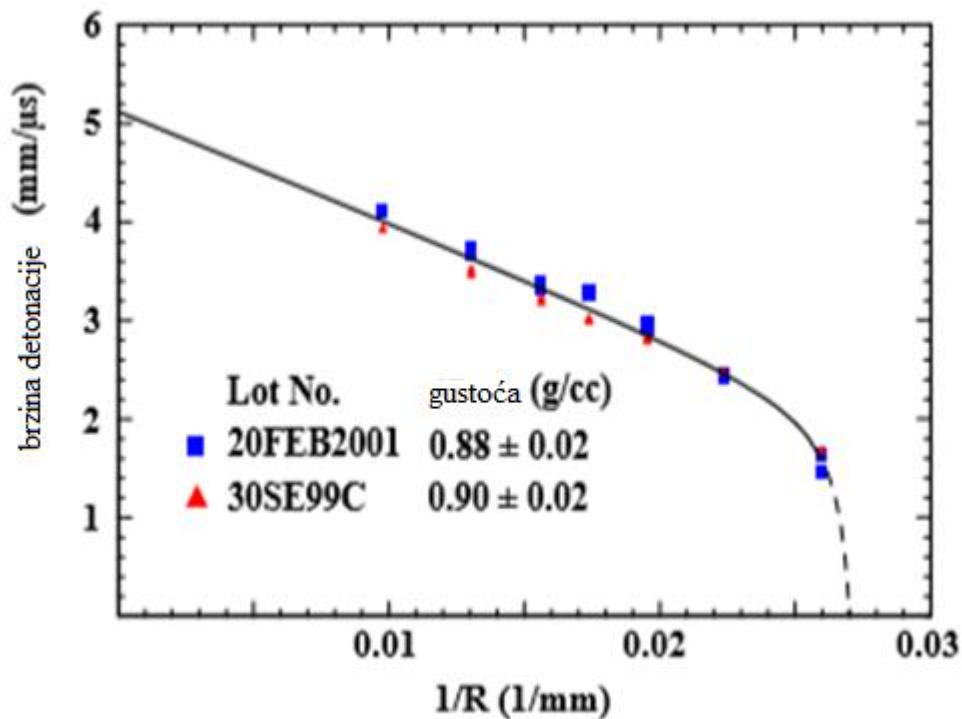


Slika 3-9. Prikaz detonacijskog vala u eksperimentu s ANFO eksplozivom (Bdzil, 2002)

Na slici 3-9. prikazana je detonacijska fronta ovisna o naboju promjera. Bitno je napomenuti kako gustoća ovog eksploziva iznosi  $0,88 \text{ g/cm}^3$ .

Provedeno je ispitivanje s gustoćom eksploziva od  $0,90 \text{ g/cm}^3$ . Brzina se nije znatno razlikovala, odnosno nije bilo velikih razlika u brzinama, ali zato je nastala velika razlika kod impulsa električnog naboja očitano na ploči.

Razlika brzina detonacije u odnosu na omjer duljine i radijusa kroz faze dva eksperimenta s ANFO eksplozivom prikazana je na slici 3-10.



Slika 3-10. Graf brzine detonacije kroz faze za dva ANFO eksperimenta (Bdzil, 2002)

Brzina  $i$  i radijus zakrivljenosti mogu se mjeriti još i elektrooptičkom metodom. Mjerenje brzine elektrooptičkom 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.

Kvalitetnijim uređajem, primjerice modelom Optimex 8, tada se mogu mjeriti dodatni podatci. Dobra razlučivost uređaja omogućava bolju primjenu metode, tj. osim brzine može se mjeriti i zakrivljenost detonacijskog vala.

Na slici 3-11. prikazan je mjerni uređaj Optimex 8



Slika 3-11. Mjerni uređaj Optimex 8 (Kubíček, 2015)

### 3.2.1. Neidealna detonacija kod eksploziva ANFO tipa

Tema značajnog interesa u posljednjih par godina je precizno predviđanje neidealne eksplozivne detonacije.

Glavne karakteristike neidealnih eksploziva su: niska gustoća, visoka poroznost, a gorivo i oksidans se ne miješaju na molekularnoj razini. Direktno povezano s time, neidealni eksplozivi imaju manju brzinu detonacije, a puno veće reakcijske zone detonacije.

Potrebno je provesti kalibraciju DSD teorije neovisno od vrste eksploziva. Pomoću kalibracije može se modelirati širenje detonacije s promjenom brzine detonacije, u ovisnosti od zakrivljenosti površine detonacije i kuta zakrivljenosti detonacije.

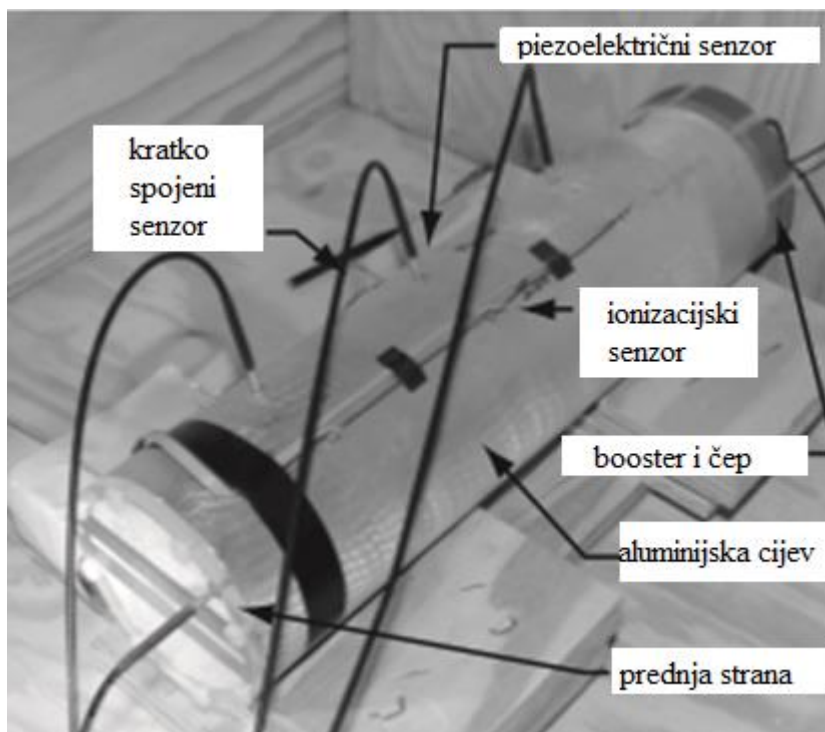
Prekursorska energija, odnosno energija koja se prenosi iza detonacijskog udara udarnog vala može potencijalno pojačati, zbog veće gustoće, ili spriječiti detonaciju. Pojačanje nastaje zbog viška zarobljene energije, ali pretkompresija može razbiti strukturu eksploziva, desenzibilirati ga i dovesti do lokalnog prekida detonacije.

Osim lokalnih prekida, može doći i do većih gubitaka, odnosno potpunog prekida detonacije. U obzir se mora uzeti i duljina reakcijske zone te debljina fronte. Brzina može znatno varirati ako dođe do promjene parametara detonacije.

Zbog fizičkog razumijevanja ovih interakcija, detonacija se ne može precizno niti pretpostaviti niti modelirati bez kalibracije postupka kod neidealnih eksploziva. Za modeliranje se koristi DSD teorija.

### 3.2.2. Provođenje pokusa kod eksploziva ANFO tipa

Jedan od pokusa koji se provodi je pokus s ANFO eksplozivom u aluminijskom cijevi. (Jackson, 2009). Na slici 3-12. opisan je pokus.



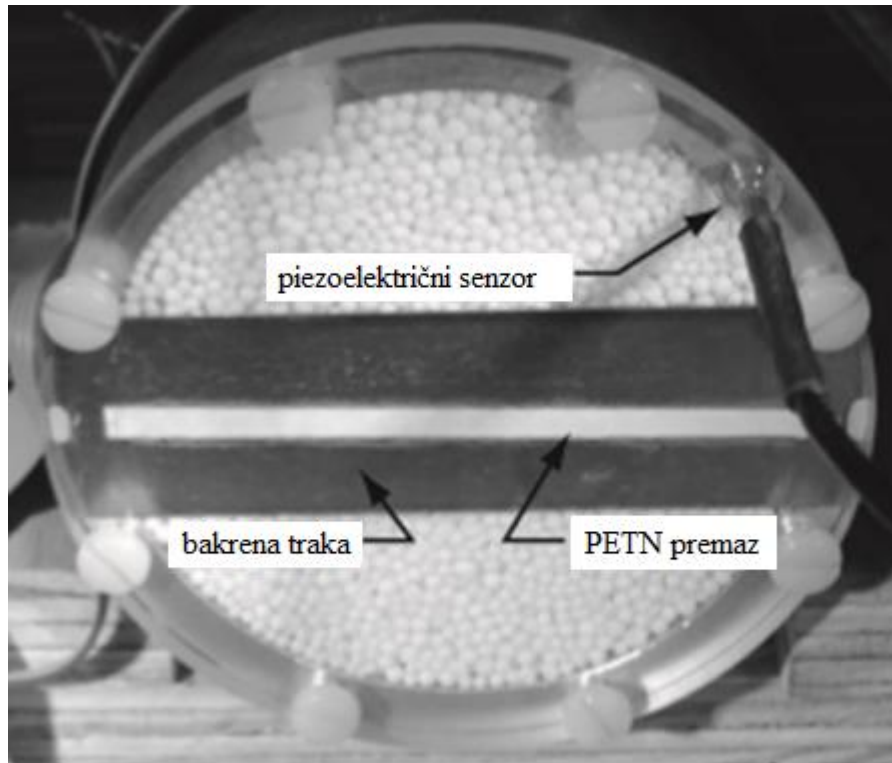
Slika 3-12. Cijev iz ispitivanja 6-305 (Jackson, 2009)

U aluminijskim cijevima, koje služe kao obloga, postavi se ANFO eksploziv.

Cilj ovog eksperimenta je uspješno okarakterizirati interakciju između krute obloge, detonacijske fronte i nereagiranog eksploziva. Rezultati su bili vidljivi na presjeku te snimljeni kamerom, jer se bljesak prenosio preko PETN premaza i dao svjetlost krivulji detonacije.

Prednja strana ispitivane cijevi prikazana je na slici 3-13.





Slika 3-13. Prikaz prednje strane ispitivane cijevi (Jackson, 2009)

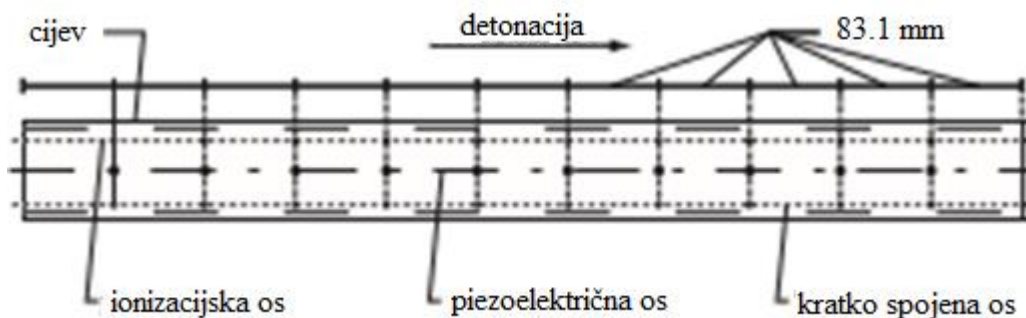
Eksperimentalno promatrane brzine detonacije ovise o eksplozivnim svojstvima, veličini naboja i stupnju zaštite. Parametri uključuju debljinu obloge i duljinu naboja.

Mjere se brzina detonacijskog vala te brzina naprezanja elastičnog vala koji se pokreće u metalu uslijed detonacije.

Prednji profili detonacije bilježe se na krajevima cijevi te se razmatraju novi oblici valova s kojima se susrećemo u ovim sustava zbog zatvorenosti jakog eksploziva.

U ovom sustavu korištene su 3 vrste osjetila: piezoelektrično, ionizacijsko i kratko spojeno osjetilo. Piezoelektrično osjetilo je imalo nesigurnost u mjerenju brzine detonacije od 3%, dok su ionizacijsko i kratko spojeno osjetilo imali nesigurnost od 1% u mjerenju brzine detonacije (Jackson, 2009).

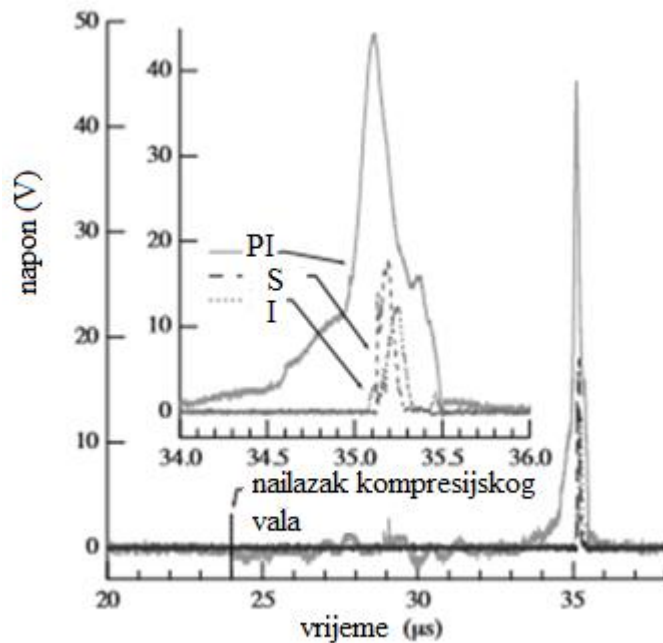
U bočnom presjeku prikazane su osi svih osjetila. Prikaz bočnog presjeka dan je na slici 3-13.



Slika 3-14. Prikaz raspodjele osjetila na cijevi (Jackson, 2009)

Iako, u slijedećem primjeru se sumnja da je došlo do kvara osjetila, Snimka mjerenja prikazana na slici 3-15. predstavlja opći primjer djelovanja kompresije i dekompresije zbog prisustva obloge (Jackson, 2009).

Primjer je prikazan na slici 3-15.

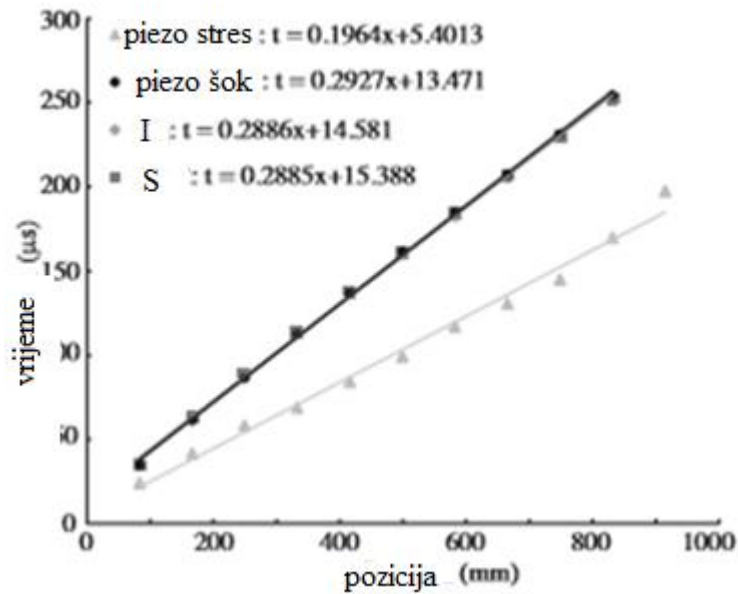


Slika 3-15. Primjer podataka osjetila (Jackson, 2009)

Kompresija se odvija od početka do 35  $\mu\text{s}$ , a nakon toga se javlja faza razrjeđenja.

Tijekom razdoblja kompresije, kratko spojeni i ionizirajući senzori se aktiviraju u razmaku od 100ns jedan od drugog. Međusobno senzori se aktiviraju u razmaku od 1  $\mu\text{s}$  u svakom ispitivanju.

Primjer pojave valova u eksperimentu prikazan je na slici 3-16.



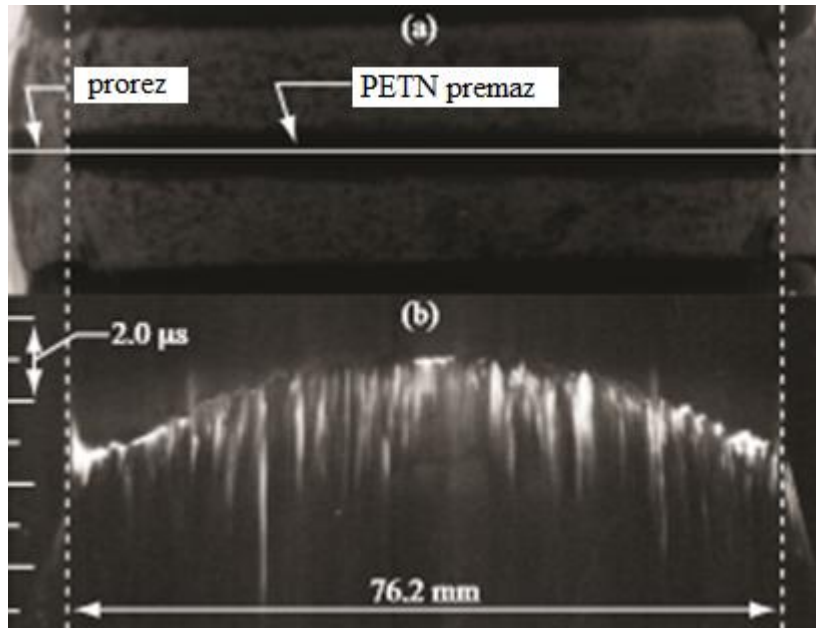
Slika 3-16. Prikaz pozicija i vremena aktiviranja pojedinih osjetila (Jackson, 2009)

Sva osjetila, ionizacijsko (I), kratko spojeno (S) i piezoelektično, daju usklađene odzive. Širenje elastičnog vala dovodi do naprezanja u aluminiju. Naprezanje se nalazi ispred fronte detonacije i u području je brzine zvuka u aluminiju.

Zbog mehaničkog dizanja osjetila kratkog spoja, koji zahtjeva da udarni val pomakne poklopac i prouzroči kratki spoj, dolazi do kašnjenja od  $64\mu\text{s}$ . Ovo kašnjenje je prouzrokovano zbog mehaničke konstrukcije osjetila te ne dolazi do kašnjenja kod piezoelektičnih i ionizacijskih osjetila.

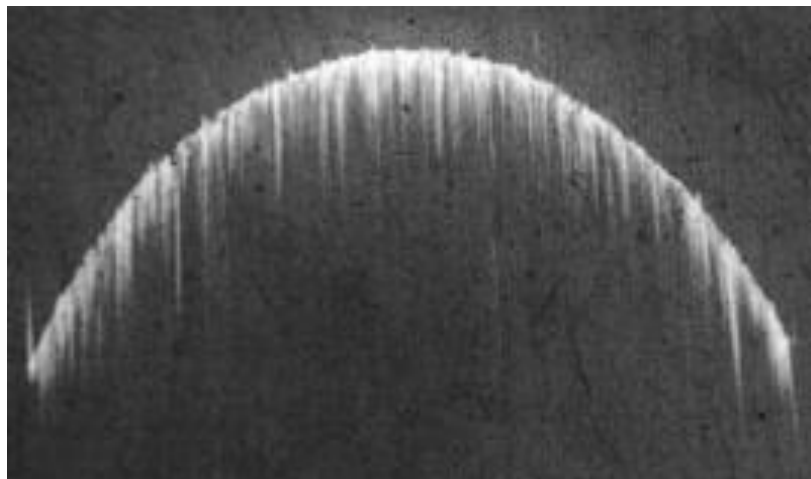
Kraće cijevi će zbog potisne sile imati manje izbočenje, a duže cijevi će imati veće izbočenje, tj. imati će veću krivulju zakrivljenosti detonacijske fronte.

Zakrivljenost detonacijske fronte zavisi ne samo o duljini, nego i o materijalu koji se koristi za izvedbu. Na slici 3-17. prikazan je primjer sa aluminijem.



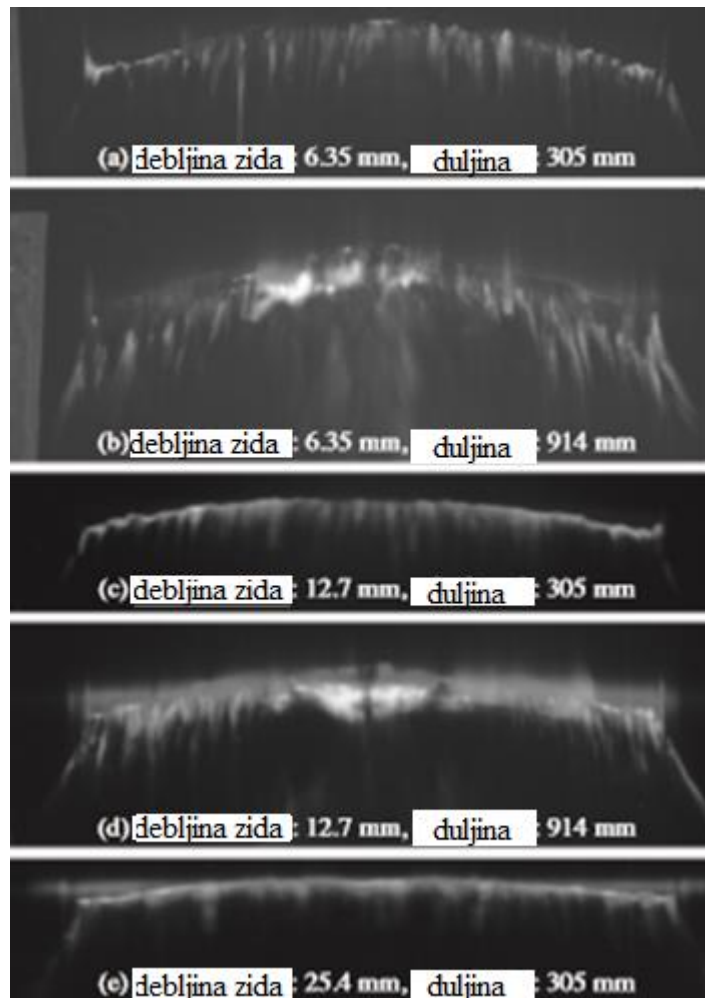
Slika 3-17. Prikaz detonacijske fronte u aluminijskoj oblozi (Jackson, 2009)

Na slici 3-18. prikazan je zapis detonacijske fronte sa kartonskoj oblozi.



Slika 3-18. Prikaz detonacijske fronte u kartonskoj oblozi (Jackson, 2009)

Osim razlike u materijalu, gdje se na primjerima jasno vidi kako isti eksploziv reagira u različitim materijalima, dolazi i do razlike koja je ovisna o duljini punjenja. Primjeri su prikazani na slici 3-19.



Slika 3-19. Razlika širenja detonacijske fronte kroz uzorke različite duljine i debljine (Jackson, 2009)

Zapaljenje PETN boje je na niskoj razini praćeno jačom reakcijom. Određeni slučajevima (b,d,e) prikazano je na zapisu da valovi s difuznim i slabijim prednjim dijelom dolaze prije glavne fronte vala.

Osim toga kvaliteta prikaza prednje strane je lošija zbog malog promjera cijevi korištenih u ovom istraživanju u odnosu na veličinu ANFO-a.

Prednji zapisi, može se reći diskreditiraju detonacijsku frontu. Poboljšanje razlučivosti se na prednjoj strani može postići uklanjanjem cijevi većeg promjera ili primjenom ANFO eksploziva manjih promjera.

Drugačija raspodjela osjetila može se koristiti za mjerenje radijusa zakrivljenosti fronte udarnog vala. Opisana je metoda s kratko spojenim osjetilima, ali može se koristiti i elektrooptička metoda.

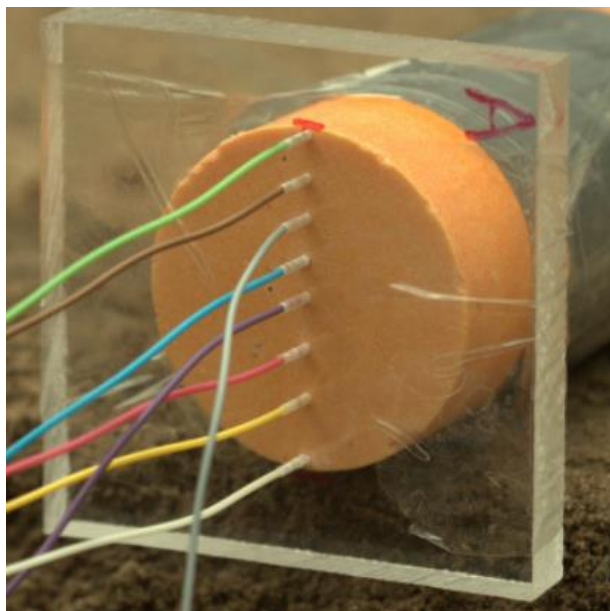
Elektrooptičkom metodom osjetila se mogu postaviti na dva načina.

Prvi način je raspodjela osjetila po promjeru poprečnog presjeka patrone eksploziva, s jednakim udaljenostima između svakog osjetila. Prvo i posljednje osjetilo nalazi se na obodu dok je između njih udaljenost jednaka promjeru.

Drugi način je raspodjela osjetila po polumjeru s jednakim udaljenostima svakog osjetila. Prvo osjetilo smješteno u središtu poprečnog presjeka, a zadnje osjetilo se nalazi na obodu poprečnog presjeka.

Osjetila se može postaviti onoliko koliko mjerni uređaj ima izlaza. Što više osjetila se može postaviti, znači da će rezultati mjerenja biti precizniji.

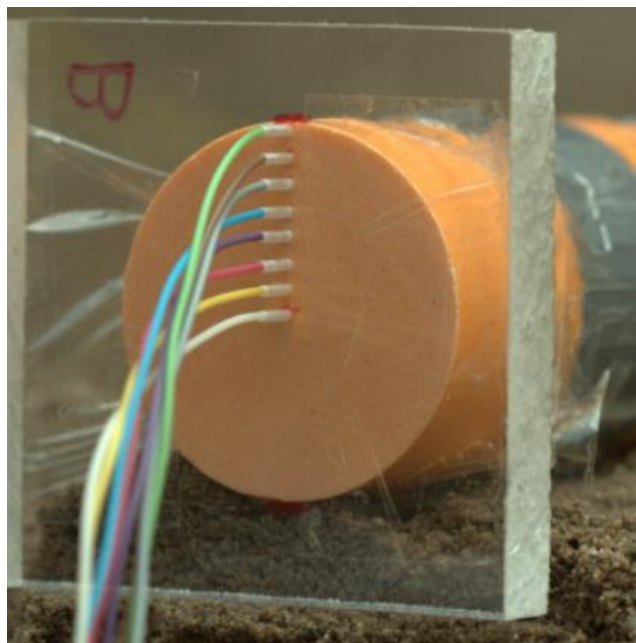
Prvi prikazani primjer nalazi se na slici 3-20.



Slika 3-20. Raspodjela osjetila po promjeru poprečnog presjeka patrone eksploziva (Tančak, 2019)

Na slici 3-21. nalazi se raspodjela osjetila po polumjeru.





Slika 3-21. Raspodjela osjetila po polumjeru poprečnog presjeka patrone eksploziva  
(Tančak, 2019)

Na slikama 3-20. i 3-21. obloga je drugačija. Ne koristi se aluminijska, nego obloga od pleksistakla. Kućište je također od pleksistakla. Bušilicom se probuše rupe za osjetila te se nakon umetanja osjetila moraju učvrstiti.

Rasap rezultata će biti drugačiji ovisno od primijenjene metode.

Najbolje rješenje je koristiti obje metode ako je moguće, jer će se tada dobiti najprecizniji mjerni podatci.

#### 4. Dn-k ANALIZA

U odnosu na DSD analizu, koja se temelji na konceptu odstupanja od normalne brzine detonacije  $D_n$ . Ta brzina odstupa od Chapman-Jouguet-ove (CJ) brzine čija je funkcija zakrivljenost  $k$  povezana s lokalnom valnom frontom.

Tako je odnos Dn-k izveden eksperimentalno iz detonacije mjerenja brzine i oblika valne fronte u eksperimentu brzine štapa. Ako dođe do gubitaka energije iz detonacijske reakcijske zone prema sporednom zidu, tada se usporava prednji kraj detonacije kraj zida.

Rezultat toga je divergencija detonacijske fronte i kretanje zvučne ravnine u suprotnom smjeru. Očitavanje tog efekta se događa s povećanjem zakrivljenosti s polumjerom od centra te dolazi do podešavanja brzine oko ruba.

Različiti koeficijent zakrivljenosti detonacijske krivulje može se ovako nametnuti kada se detonacija modificira tj. ograničava se drugačijim materijalom.

#### 4.1. Izračun Dn-k analize

Eksperimentalni djelovi prednjeg dijela detonacijske krivulje obično pristaju u analitičku jednadžbu  $z(r)$  sa sličnim karakterističnim oblikom. Tada se brzina  $D_n$  može izračunati iz izraza:

$$D_n = \frac{D}{\sqrt{1+z'}}, \quad (3-4)$$

Gdje je:

$z'$  -  $dz/dr$

$D$  – brzina aksijalne detonacijske faze

$D_n$  – brzina detonacijske faze

Brzina aksijalne detonacijske faze dobivena je iz stijenki eksplozivnog punjenja. Koeficijent zakrivljenosti  $k$  se tada može izraziti na sljedeći način:

$$k = \frac{z''}{[1+(z')^2]^{3/2}} + \frac{z'}{r\sqrt{1+(z')^2}}, \quad (3-5)$$

Gdje je:

$z''$  -  $d^2z / dr^2$

$z'$  -  $dz/dr$

$r$  – radijus

$k$  – koeficijent zakrivljenosti detonacijske krivulje

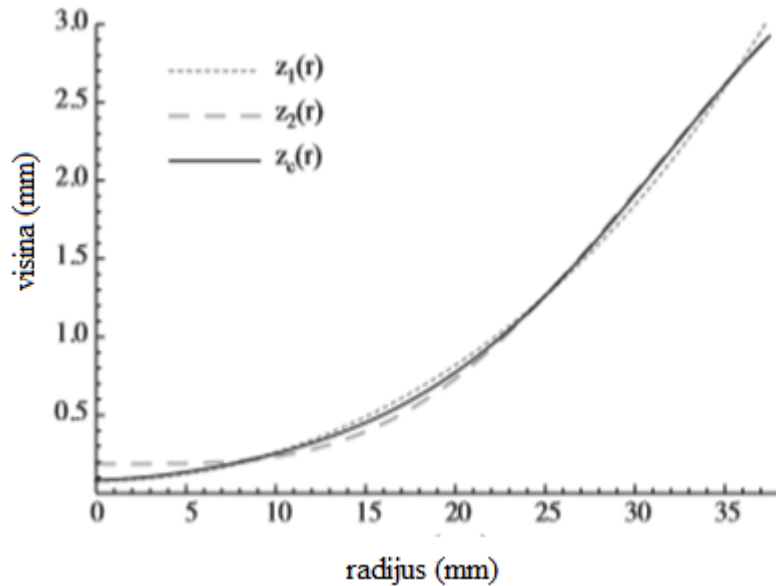
Za granularne korištene eksplozive, korištenje  $C^2$  analitičke funkcijske  $z(r)$  krivulje ublažava vrijednosti prve i druge derivacije  $z'(r)$  i  $z''(r)$ .

Ublažavanje vrijednosti se koristi da se izbjegnu greške koje bi dobili kada bi se direktnim matematičkim postupkom izračunali podatke eksperimentalne valne fronte.

Kod korištenja ove metode, ključno je da dobiveni podatci odgovaraju stvarnom obliku valne fronte, iako razlike nisu toliko velike kao kod prednjeg dijela krivulje.

## 4.2. Usporedba valnih fronti i obloge

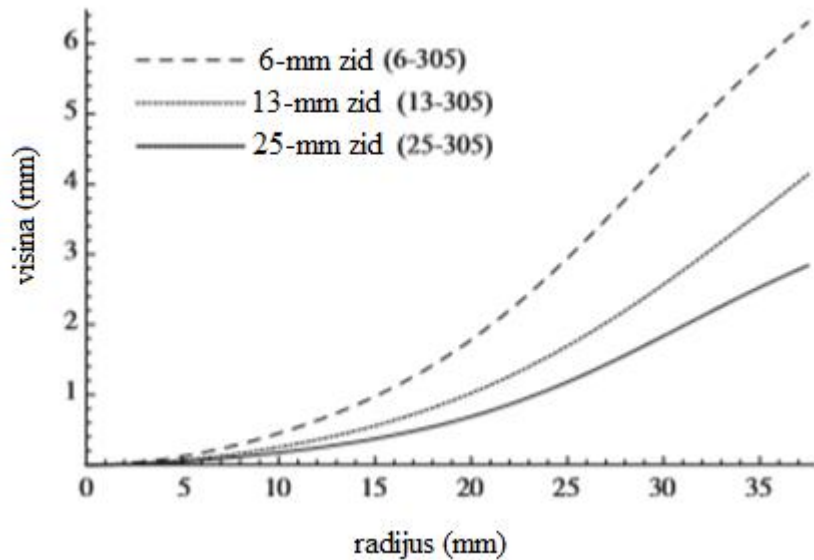
Na slici 4-1. je prikazana usporedba valnih fronta.



Slika 4-1. Usporedba prikaza valnih fronta (Jackson, 2009)

Na slici 4-1. razlike nisu velike, ali nisu ni vrijednosti koje su izražene u milimetrima. Kad se to uzme u obzir tada je jasno da je ipak potrebno provesti postupak ublažavanja vrijednosti da bi se dobili znatno preciznije rezultate.

Na slici 4-2. prikazana je usporedba prednjeg dijela valne fronte u odnosu na različitu debljinu stijenke.

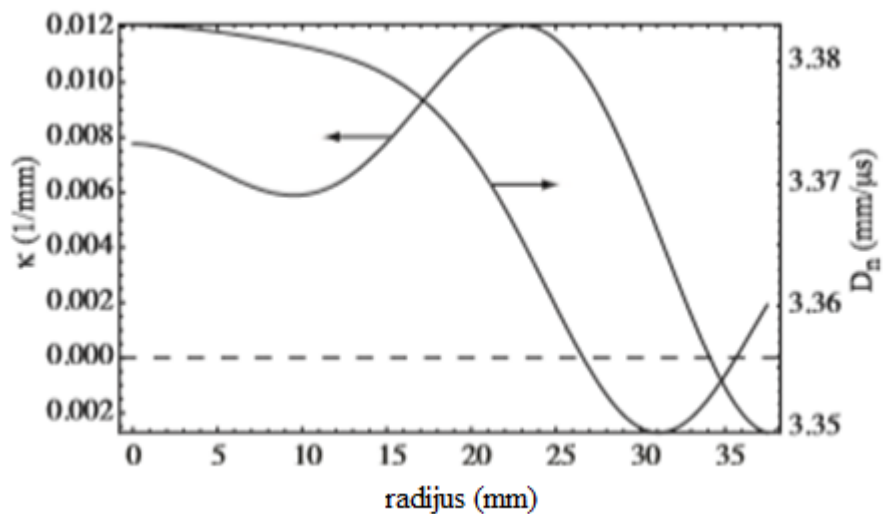


Slika 4-2. Prikaz varijacija prednjeg dijela detonacijske fronte u odnosu na debljinu stijenke (Jackson, 2009)

Na slici 4-2. je prikazan utjecaj debljine stijenke. Debljina stijenke znatno utječe na valnu frontu. S debljom stijenkom, valna fronta detonacijske krivulje imati će manji nagib tj. zakrivljenost detonacijske fronte će biti manja.

Sukladno tome ako je stijenka manje debljine, zakrivljenost detonacijske fronte je veća što dovodi do zaključka da zakrivljenost detonacijske fronte raste sa smanjenjem debljine.

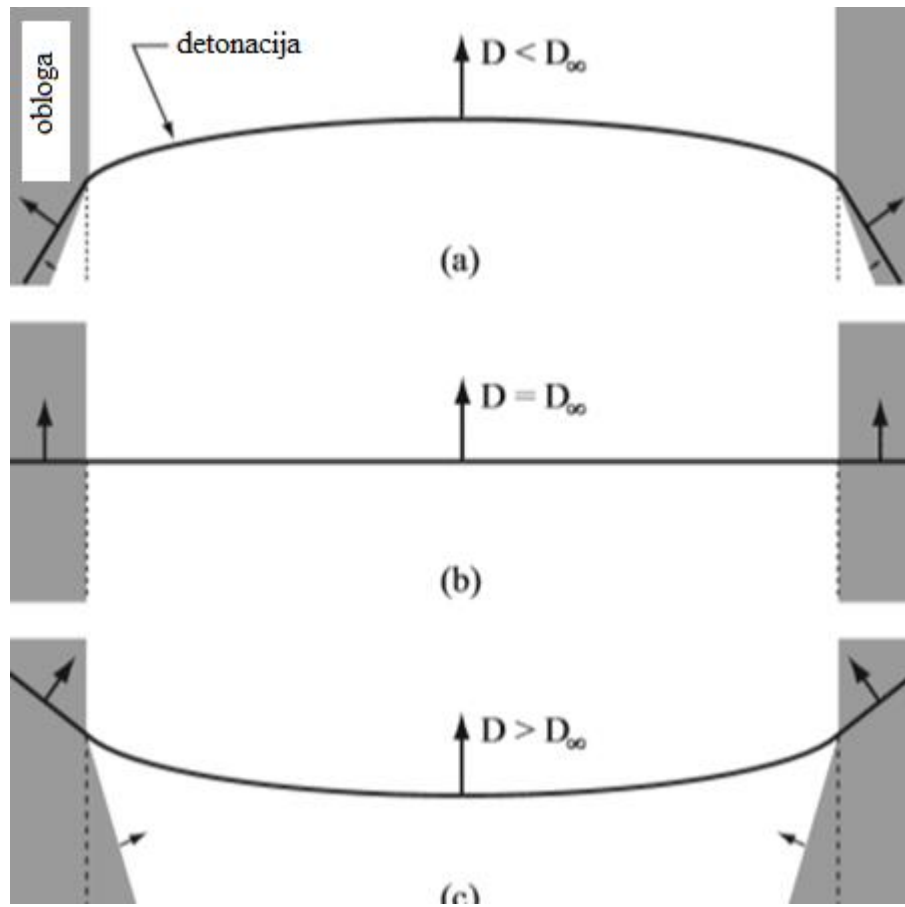
Najbolji odnos je objašnjen na slici 4-3. u kojoj je prikazana razlika između  $D_n$  i  $k$  u odnosu na radijus, tj. kako se ponašaju zadani parametri s povećanjem radijusa eksplozivnog punjenja.



Slika 4-3. Prikaz odnosa  $D_n$  i  $k$  u odnosu na veličinu radijusa (Jackson, 2009)

Efekt ograničenja na prednji dio detonacijske fronte govori da drugačija debljina obloge ili vrsta materijala s kojim se ograničava eksplozivno punjenje utječe na zakrivljenost detonacijske valne fronte.

Preporučljivo je razmotriti različite tipove ograničenja valne fronte. Razmotrit će se tri tipa koja su pojednostavljeno prikazana na slici 4-4.



Slika 4-4. Prikaz ponašanja valne krivulje u odnosu na ograničenje (Jackson, 2009)

Na slici 4-4. u prvom primjeru (a) dolazi do uklanjanja energije iz reakcijske zone, odnosno dolazi do udubljenja zbog ograničavajućeg materijala.

U drugom primjeru (b), ne dolazi niti do uklanjanja energije iz reakcijske zone, niti do povećanja energije u reakcijskoj zoni (savršeno ograničenje).

U trećem primjeru (c) dolazi do povećanja energije u podzvučnom području reakcijske zone.



## **5. REZULTATI ISPITIVANJA**

U okviru ovog poglavlja bit će prikazani rezultati ispitivanja za određivanje krivulje zakrivljenosti kod neidealnih eksploziva. Osim što različite vrste eksploziva daju različite rezultate, zakrivljenost krivulje ovisi još o promjeru eksplozivnog punjenja, vrsti obloge i dr.

Prilikom usporedbe ispitivanja najpouzdanije je proučiti upravo promjer eksplozivnog punjenja i vrstu obloge jer ta dva parametra najviše utječu na krivulju zakrivljenost kod neidealne detonacije.

Rezultati su dani u tablici 5-1.

Tablica 5-1. Efekt promjera i podatci valne fronte (Catanach i Hill, 2002)

| Pro-<br>mjer-<br>punje-<br>nja $\Phi$<br>(mm) | Gusto-<br>ća<br>punje-<br>nja $\rho$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | Brzina<br>detona-<br>cije<br>$D_0$<br>(mm/ $\mu$ s) | Koefici-<br>jent<br>sposo-<br>bnosti<br>$\alpha_1$ (mm) | Koeficijent<br>sposobnosti<br>$\eta$ | z/R<br>Max. | Rubni<br>kut<br>(°) | Kut<br>nagiba<br>(°) | Broj<br>otpućavanja<br>(N) |
|---|--|---|---|--------------------------------------|-------------|---------------------|----------------------|----------------------------|
| 77  | 0,91   | 1,68  | *   | *                                    | *           | *                   | *                    | 3850                       |
| 90  | 0,89   | 2,41  | 25,32   | 0,7126                               | 0,4694      | 52,6                | 0,53                 | 3849                       |
| 90  | 0,93   | 2,47  | x   | x                                    | x           | x                   | x                    | 3851                       |
| 102   | 0,89   | 2,79  | 36,96   | 0,6389                               | 0,4689      | 49,9                | 0,93                 | 3853                       |
| 102   | 0,88   | 2,82  | x   | x                                    | x           | x                   | x                    | 3846                       |
| 105   | 0,88   | 2,99  | 37,33   | 0,6522                               | 0,4221      | 47,4                | 0,21                 | 3847                       |
| 105   | 0,92   | 3,01  | 40,50   | 0,6504                               | 0,4573      | 49,6                | 0,26                 | 3852                       |
| 128   | 0,92   | 3,18  | 47,76   | 0,6270                               | 0,4424      | 47,9                | 0,20                 | 3854                       |
| 128   | 0,92   | 3,22  | 41,64   | 0,6641                               | 0,4484      | 49,5                | 0,03                 | 3855                       |
| 153   | 0,90   | 3,46  | 52,58   | 0,6425                               | 0,4337      | 47,8                | 0,14                 | 3857                       |
| 153   | 0,91   | 3,51  | 54,01   | 0,6358                               | 0,4314      | 47,5                | 0,18                 | 3848                       |
| 205   | 0,91   | 3,92  | 64,96   | 0,6471                               | 0,4068      | 46,1                | 0,34                 | 3856                       |
| 5300  | 0,88   | 4,94  | x   | x                                    | x           | x                   | x                    | (2)                        |
| 9100  | 0,91   | 5,26  | x   | x                                    | x           | x                   | x                    | (2)                        |

\*- neuspjeli rezultati

x- neizmjereni rezultati

Najveći utjecaj ima promjer naboja, tj. kut nagiba i rubni kut smanjuju se sa povećanjem promjera. Zbog gotovo jednake gustoće naboja u svim uzorcima s povećanjem promjera dolazi do povećanja brzine detonacije.

Koeficijenti sposobnosti su postavljeni da bi se mogla kontrolirano provesti detonacija, tj. da bi se krivulja kontrolirala u blizini ruba. U nedostatku ova dva koeficijenta krivulja bi bila nepravilnija. Koeficijent  $A_1$  se uzima u vrijednostima od 1 do 100, po potrebi i više. Koeficijent  $\eta$  se uzima u vrijednostima od 0 do 1.

Ako se koeficijenti uzmu većih vrijednosti nego što bi trebali biti, doći će do dodatnog zakrivljenja krivulje. Dodatno zakrivljenje neće biti rezultat promjera niti obloge, samo krivo uzeti koeficijenti.

U istraživanju su provjerena dva kuta a to su kut nagiba i rubni kut. Povećanjem gustoće punjenja za jednaki promjer dolazi do povećanja kuteva.

Osim ovih vrijednosti potrebno je još i proučiti utjecaj obloge na krivulju zakrivljenosti. Kao obloga mogu se koristiti različiti materijali, smjese i legure.

Vrsta obloge može biti:

- jaka
- slaba
- dodatno oslabljena
- supersonično oslabljena

U tablici 5-2. prikazane su teoretske, numeričke i eksperimentalne vrijednosti.

Tablica 5-2. Rubni kut detonacije prilikom različitih obloga. (Yu, 2018)

| Vrsta obloge            | Materijal obloge        | Rubni kut detonacije (°) |           |                 |
|-------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------|-----------------|
|                         |                         | Teoretski                | Numerički | Eksperimentalni |
| Jaka                    | 2024 aluminij           | 85,3                     | 84,6      | 85,1            |
|                         | HR – 2 čelik            | 80,9                     | 80,3      | 80,6            |
|                         | Messing                 | 78,8                     | 78,3      | 78,6            |
|                         | W-Mo legura             | 83,8                     | 83,4      | 83,5            |
|                         | U-Ni legura             | 82,2                     | 81,7      | 81,9            |
|                         | W-Fe-Ni legura          | 84,9                     | 84,3      | 84,6            |
| Slaba                   | Fenolna smola           | 44,4                     | 45,2      | 45,0            |
|                         | PMMA                    | 44,4                     | 45,2      | 45,0            |
| Dodatno oslabljena      | Silikonsko-gumena pjena | 44,4                     | 45,4      | 45,1            |
| Supersonično oslabljena | LiH                     | 75,2                     | 85,5      | *               |

\*- neuspjeli pokušaj

Obloge se koriste radi postizanja što idealnije detonacije, odnosno želi se izbjeći rasipanje energije. U tablici 5-2. podjeljenja je vrsta obloge, opisani su materijali koji se koriste za formiranje obloge te su dani rezultati nakon detonacije.

Ovi materijali su uzeti kao primjer jer su to materijali koji se najčešće danas primjenjuju u različitim poljima (građevina, rudarstvo, strojarstvo i dr.).

Eksperimentalna rješenja ne odstupaju daleko od teoretskih i numeričkih rješenja. U nekim slučajevima su bliža teoretskim vrijednostima u nekima numeričkim. Razlog tome su različita svojstva samih materijala na koje se ne može utjecati.

Jedino neuspjelo ispitivanje je kod supersonično oslabljenje legure gdje će upravo ta razlika biti veća, no međutim ispitivanje se nije uspilo provesti. Nije postignuta stabilna detonacija i zato nema zadovoljavajućih rješenja.

## 6. SISTEMATIZACIJA LITERATURNIH MJERNIH PODATAKA

Literaturni mjerni podatci ponudili su rješenja kako provesti ispitivanja pomoću različitih metoda. Sve metode se baziraju na sličnom principu, ali se opet razlikuju te ih je bitno odvojeno svrstati.

Svi eksplozivi se ispituju u laboratorijima u idealnijim uvjetima nego što su stvarni uvjeti u prirodi. To je dodatni parametar koji je potrebno uzeti u obzir. Razlika idealne i neidealne detonacije također govori o još jednom uvjetu koji je potrebno uzeti u obzir.

Kod idealne detonacije slijedi se teorija (CJ teorija), dok se kod neidealne detonacije moraju provesti dodatna istraživanja. Istraživanja su se mogla provesti na više načina kao što je ranije elaborirano.

DSD teorija se bazira na tome da se promatraju krivulje zakrivljenosti za različite promjere. Promatra se prva ili glavna zakrivljenost i druga zakrivljenost.

Zakrivljenosti ovise o geometrijskim karakteristikama neidealnog eksploziva te o snazi punjenja. Nakon postave jednadžbi dolazi teži dio. Treba aproksimirati sve vrijednosti i posložiti ih te opisati grafovima. Dobivene vrijednosti se mogu promatrati u dva slučaja: 2D i 3D.

Najbitnija geometrijska karakteristika eksploziva je promjer. Velike su rasprave bile oko toga kako promjer utječe na zakrivljenost detonacijske fronte neidealnih eksploziva. Glavna rasprava je bila vezana za to koliko će se promijeniti zakrivljenost detonacijske fronte ako se promijeni veći promjer.

Osim razlike u vrsti detonacije i uvjetima, razlika se javlja i u vrsti eksploziva. Za primjer je uzet eksploziv tipa ANFO u različitim ograničavajućim sredstvima. Elaborirana su tri sredstva, a to su aluminij, karton i pleksistaklo. Opisano je ponašanje detonacijske fronte u svim sredstvima.

Bitno je napomenuti da je postupak malo drugačiji kod eksploziva ovog tipa. Nije više horizontalan nego vertikaln. Također i promjer kod kojeg su bile najmanje devijacije je određen. Promjer je bio ovisan o omjeru s duljinom, rezultat koji bi dao najpreciznije rješenje je kad bi taj omjer bio 10.

Nakon standardizacije ovog postupka došlo je do razlika u mjerenim impulsima kad bi se promjenila gustoća eksploziva. Kako bi se otklonile razlike u mjerenim impulsima došlo se do zaključka da se treba provesti kalibracija.

Kalibracija se nije provodila samo radi razlike u mjerenim impulsima, nego da bi se detonacijska fronta sa svim parametrima mogla modelirati.

Prekursorska energija se javlja kao problem koji je također potrebno razumjeti. Može pojačati detonaciju ali ju može i prekinuti. Potrebno je razumjeti kako će utjecati na svaku detonaciju neovisno o uvjetima u kojima dolazi do detonacije, vrsti eksploziva i dr.

Opisani su različite metode, senzori koji su korišteni i način na koji su korišteni. Korištena su 3 tipa osjetila te je svaki imao drugačiju svrhu kod metode s kratkim spojem. Kod elektrooptičke metode korišteni su optički senzori.

Izračun Dn-k analize se razlikuje od dosadašnje DSD teorije te je analiza za sebe. Pomoću obrazaca (3-4, 3-5) se dobije zakrivljenost pomoću Dn-k analize.

Zaključak je bio da će razlika biti u zakrivljenosti fronte koja će ovisi o debljini stijenke. Odnosno sa smanjenjem debljine stijenke javit će se veća zakrivljenost detonacijske krivulje i obratno.

Osim debljine stijenke, razmotrena su tri tipa ograničenja i njihov utjecaj na energiju u reakcijskoj zoni, bilo da energija ostaje ista, povećava se ili smanjuje.

Debljina stijenke se može mijenjati i tako se mijenja zakrivljenost fronte. Ako se provede dovoljno istraživanja postoji mogućnost da se može ispitati idealna debljina stijenke. Pri toj debljini stijenke detonacija ne bi više bila neidealna nego idealna.

## 7. ZAKLJUČAK

Zakrivljenost detonacijske fronte jedan je od najvažnijih parametara detonacije. Prostorno širenje detonacije je u direktnoj zavisnosti od zakrivljenosti detonacijske fronte.

Zakrivljenost se može odrediti na više različitih načina, samo treba biti oprezan ovisno koji se postupak provodi, npr. bez kalibracije DSD teorija ne bi dala valjane rezultate i te rezultate bi bilo vrlo teško modelirati.

Iako je DSD teorija za proračun zakrivljenosti detonacijske fronte neidealnih eksploziva najviše korištena, Dn-k analiza također daje dobre rezultate. Princip Dn-k analize je drugačiji od DSD teorije, ali rješenja naposljetku bude dosta slična.

Sve korištene teorije i analize daju zadovoljavajuće rezultate, ali pomoću DSD teorije moguće je jednostavnije postaviti precizan model detonacijske krivulje, a time je olakšano percipiranje zakrivljenosti detonacijske krivulje neidealnih eksploziva u prostoru.

Parametri detonacijske fronte su još od 1998.g. prepoznati kao važna tema prilikom proračunavanja djelovanja eksploziva, a zadnjih nekoliko godina se sve detaljnije istražuju (od 2016.g.).

Razlog tome je što je detonacija svih gospodarskih korištenih eksploziva neidealna. Razumijevanje je tada ključna stavka u predviđanju kakve rezultate očekivati i kako provesti ispitivanja da bi se došlo do preciznih rezultata.

Daljnijim razvojem dosadašnjih teorija i tehnologija postavlja se temelj za bolje razumijevanje same detonacije što na kraju može dovesti do preciznijih rješenja kod određivanja zakrivljenosti detonacijske fronte.



## 8. LITERATURA

1. E. B. Smirnov, O. V. Kostitsin, A. V. Koval 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.
2. CUNNINGHAM C. 2006.: *Blasthole Pressure: What it really means and how we should use it*, International Society of Explosives Engineers.
3. Scott I. Jackson, 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.
4. John B. Dzil, 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.
5. Mark Short (2002): *DSD FRONT MODELS: NONIDEAL EXPLOSIVE DETONATION IN ANFO*, Department of Theoretical and Applied Mechanics University of Illinois Urbana, Illinois 61801.
6. ESEN, S. 2004. *A non-ideal detonation model for commercial explosives*. Brisbane, Julius Kruttschnitt mineral research centre, Department of mining, minerals and materials engineering, University of Queensland.
7. PACHMAN, J., KUNZEL. M., NEMEC, O., MAJZLIK, J., 2017. *A comparison of methods for detonation pressure measurement*, Springer-Verlag GmbH Germany
8. Kubiček, M 2015. *Optimex 8*. URL:  
[https://www.urel.feec.vutbr.cz/web\\_documents/produkty/2016/marsalek\\_optimex8\\_en.pdf](https://www.urel.feec.vutbr.cz/web_documents/produkty/2016/marsalek_optimex8_en.pdf)
9. Yu, M. (2018) *The Confinement Effect of Inert Materials on the Detonation of Insensitive High Explosives*. World Journal of Mechanics, 8, 161-181.  
<https://doi.org/10.4236/wjm.2018.85012>
10. Tančak, A. (2019) *Utjecaj obloge na detonacijske parametre ANFO eksploziva*, Završni rad Sveučilište u Zagrebu: Rudarsko-geološko-naftni fakultet

11. DOBRILOVIĆ, M., 2010. *Miniranje 1*. Presentacije s predavanja. Sveučilište u Zagrebu: Rudarsko-geološko-naftni fakultet
12. PINTER, J., 2019. *Brzina detonacije ANFO eksploziva*. Diplomski rad. Sveučilište u Zagrebu: Rudarsko-geološko-naftni fakultet
13. Štimac, B., 2019. *Numeričko modeliranje ANFO eksploziva*. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu