

# Metode za mjerenje brzine detonacije; instrumenti i primjena

---

**Horinek, Fran**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2020**

*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:169:010512>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-15**



*Repository / Repozitorij:*

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



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

**METODE ZA MJERENJE BRZINE DETONACIJE; INSTRUMENTI I PRIMJENA**

Završni rad

Fran Horinek

R4182

Zagreb, 2020.



KLASA: 602-04/20-01/95  
URBROJ: 251-70-03-20-2  
U Zagrebu, 23.09.2020.

**Fran Horinek, student**

## **RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME**

Na temelju Vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/20-01/95, UR.BR. 251-70-03-20-2 od 28.04.2020. godine priopćujemo temu završnog rada koja glasi:

### **METODE ZA MJERENJE BRZINE DETONACIJE; INSTRUMENTI I PRIMJENA**

Za voditelja ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o završnom ispitu doc. dr. sc. Vječislav Bohanek, docent Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

  
Voditelj

(potpis)

doc. dr. sc. Vječislav Bohanek

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za  
završne i diplomske ispite

  
(potpis)

Doc. dr. sc. Dubravko  
Domitrović

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i  
studente

  
(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Dalibor  
Kuhinek

(titula, ime i prezime)

## **METODE ZA MJERENJE BRZINE DETONACIJE; INSTRUMENTI I PRIMJENA**

Fran Horinek

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

### Sažetak

Brzina detonacije je jedno od važnijih karakteristika eksploziva koja određuje upotrebu pojedinog eksploziva. Postoji više različitih uređaja i metoda kojima se mjeri brzina detonacije eksploziva. U radu su prikazane pojedine metode mjerenje brzine detonacije eksploziva a pojedini instrumenti, koji su najčešće u primjeni, su i detaljno prikazani.

Ključne riječi: Eksplozivi, brzina detonacije  
Završni rad sadrži: 24 stranice, 0 tablica, 25 slika, 2 priloga, i 15 referenci.  
Jezik izvornika: Hrvatski  
Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Dr. sc. Vječislav Bohanek, docent RGNF

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

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. DETONACIJA I BRZINA DETONACIJE .....	2
2.1. Dimenzije i poroznost amonijeva nitrata te sadržaj nafte.....	3
2.2. Promjer .....	4
2.3. Način iniciranja.....	5
2.4. Temperatura .....	7
2.5. Obloga.....	7
3. METODE ZA MJERENJE BRZINE DETONACIJE.....	10
3.1. D'austriche metoda .....	10
3.2. Optičke metoda.....	11
3.3. Diskontinuirane metode mjerenja brzine detonacije .....	12
3.4. Kontinuirane metode mjerenja brzine detonacije .....	13
4. INSTRUMENTI I PRIMJENA .....	14
4.1. Elektroptička metoda ili metoda optičkih vlakana .....	14
4.1.1. OZM Research instrumenti.....	16
4.1.2. Kontinitro AS instrumenti .....	18
4.2. Instrumenti koji koriste metodu žičnih otpora.....	19
Slika 4.3-1 Datatrap (MREL,2020.) .....	21
5. ZAKLJUČAK .....	24
6. LITERATURA .....	25

## POPIS SLIKA

Slika 2-1 Detonacijski proces u patroni eksploziva (Dobrilović, 2008.).....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Slika 2-2 Utjecaj gustoće kuglica ispitan je na kuglicama dimenzija <0,50-1,2mm (Zygmunt i Buczkowski, 2007).....	4
Slika 2-3 Ovisnost brzine detonacije ANFO-a o sadržaju nafte.....	4
Slika 2-4 Odnos promjera i brzine detonacije (Pinter,2019.)	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Slika 2-5 Utjecaj inicijalne energije na brzinu detonacije eksploziva(Bohanek i dr.,2013.).....	5
Slika 2-6 Brzina detonacije u pojedinim sekcijama mjerenja za uzorke inicirane detonatorima (Bohanek i dr. ,2013.).....	6
Slika 2-7 Brzina detonacije u pojedinim sekcijama mjerenja za uzorke inicirane boosterima (Bohanek i dr. ,2013.).....	6
Slika2-8 Ispitane brzine detonacije u ovisnosti o temperaturi (Dobrilović i dr., 2014).....	7
Slika 2-9 Odnos debljine aluminijske obloge naspram brzine detonacije (Jackson,2017.).....	8
Slika 2-10 Izmjerene i predviđene brzine detonacije (Esen, 2004).....	9
Slika 3-1 Shematski prikaz D’autriche metode (K.L. i B.K. Kosanke,1992.).	11
Slika 3-2 Mjerenje brzine detonacije eksploziva upotrebom kamere.....	11
Slika 3-4 Shema mjerenja brzine detonacije pomoću “Vodex-100A”(Danntech CC,2015.).....	<b>1E</b>
<b>rror! Bookmark not defined.</b>	
Slika 4-1 Mjerenje radijusa zakrivljenosti detonacijske fronte. ....	15
Slika 4-2 Mjerenje radijusa zakrivljenosti detonacijske fronte .....	15
Slika 4-3 VOD 815 (OZM research, 2020.) .....	16
Slika 4-4 Optimex 64 (OZM research, 2020.).....	17
Slika 4-5 Explomet-fo-2000(Žbulj,2019.).....	18
Slika 4-6 Explomet 2(Kontinitro SA,2019.).....	19
Slika 4-7 Mjerenje brzine detonacije eksploziva u bušotini.....	20
Slika 4-8 Mjerenje brzine detonacije u uzorku.....	20
Slika 4-9 Datatrap(MREL,2020.) .....	21

Slika 4-10 Minitrap (MREL,2020.).....	22
Slika 4-11 Handitrap (MREL, 2020.).....	22

### **POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA**

Oznaka	Jedinica	Opis
$\Delta p$	Pa	diferencijalni tlak
$f$	-	koeficijent otpora
$L$	m	duljina
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	gustoća
$O$	m	opseg
$A$	m <sup>2</sup>	površina
$v$	m/s	brzina

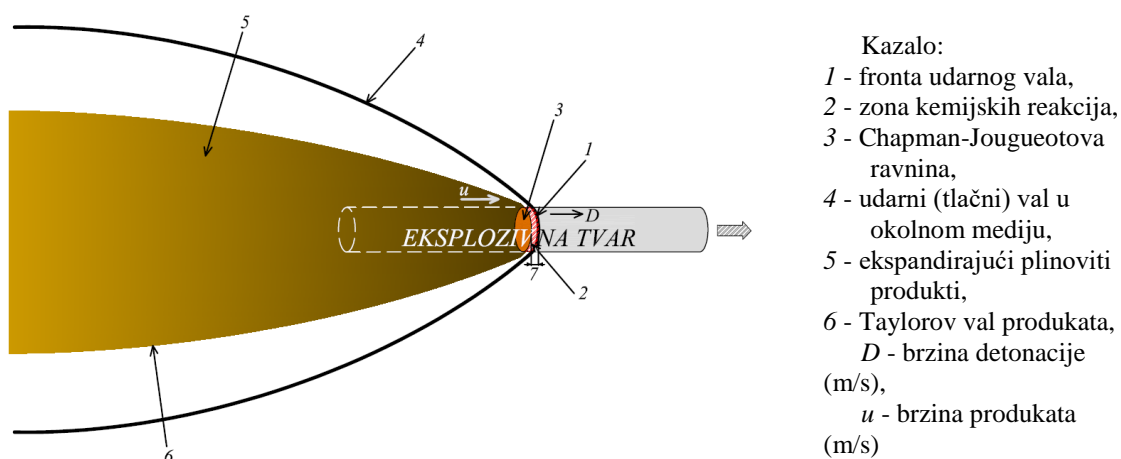
## 1. UVOD

Eksplozivi su kemijski spojevi ili smjese koje pod djelovanjem vanjskog impulsa u obliku topline, udara, trenja i sl. razvijaju ekstremno brzu egzotermnu kemijsku reakciju (eksploziju), praćenu oslobađanjem velike količine topline i nastajanjem zagrijanih plinovitih produkata raspadanja, volumena znatno većeg od početnog koji se nalaze pod tlakom mnogo većim od tlaka okoline. Energija oslobođene eksplozijom ima različitu primjenu od vojne industrije do uporabe eksploziva u civilne svrhe. Radi sigurnijeg i uspješnijeg rukovanja s eksplozivnim tvarima potrebno je poznavati fizikalno kemijska i minersko tehnička svojstva eksploziva. Brzina detonacije je jedno od važnijih karakteristika eksploziva koja određuje upotrebu pojedinog eksploziva. Postoji više različitih uređaja i metoda kojima se mjeri brzina detonacije eksploziva. U radu su prikazane pojedine metode mjerenje brzine detonacije eksploziva a pojedini instrumenti, koji su najčešće u primjeni, su i detaljno prikazani.



## 2. DETONACIJA I BRZINA DETONACIJE

Eksplodija je nagla ekspanzija tvari do volumena mnogo većeg od njena početnog volumena. Pojam eksplozija tako uključuje efekte koji prate, ili uključuju, brzo sagorijevanje i detonaciju, kao sasvim fizičke procese” (Johnsson i Person, 1970). Eksplozivne reakcije se unutar eksplozivne tvari mogu dogoditi u dva načina odvijanja procesa: sagorijevanje ili detonacija.



Slika 2.1. Detonacijski proces u patroni eksploziva (Dobrilović, 2008.)

*Detonacija* je kemijska reakcija brža od brzine zvuka u eksplozivnoj tvari, događa se u eksplozivu, kod koje eksplozivna tvar prelazi iz čvrstog u plinovito agregatno stanje. Detonacija nastaje napredovanjem tlačnog udarnog vala od mjesta iniciranja kroz eksplozivnu tvar. Fronta vala napreduje nadzvučnom brzinom i djeluje na sloj eksplozivne tvari te je stlačuje. Prelaskom kritične energije počinje kemijska reakcija detonacijskog raspada sloja eksploziva, čijim se produktima i razvijenom reakcijskom toplinom tlak povisuje na ekstremne vrijednosti (reda veličine  $10^5$  bara), te time omogućuje dalje širenje udarnog vala.

*Deflagracija* je ubrzano izgaranje plamenom (pali eksplozivnu smjesu ispred sebe). Kada se eksploziv na jednom mjestu zapali inicijalnim uređajem, stvara se plamena fronta koja napreduje tako da se susjedni slojevi zagrijavaju plamenom i u njih difundiraju aktivne molekule koje daju poticaj reakciji. Brzina rasprostiranja reakcije (napredovanje plamene fronte) jednaka je po redu veličine brzini prijenosa topline vođenjem i prijenosa mase

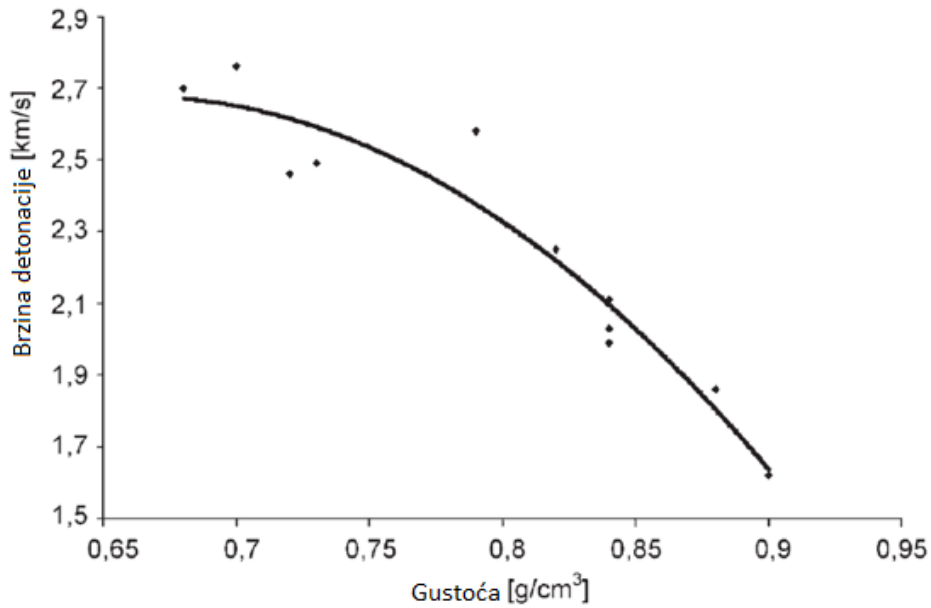
difuzijom, deflagracijska brzina je podzvučna reakcija, manja je od brzine zvuka. Deflagracija u velikoj mjeri ovisi o vanjskim čimbenicima (tlak, temperatura i dr.)

Postoji niz čimbenika koji utječe na brzinu detonacije eksploziva. Čimbenici koji utječu na brzinu detonacije eksploziva prikazani su na primjeru ANFO i Heavy ANFO eksploziva, koji se odlikuju neidealnom detonacijom, a imaju raširenu upotrebu u rdarstvu. Čimbenici koji najviše utječu na njihovu brzinu detonacije su:

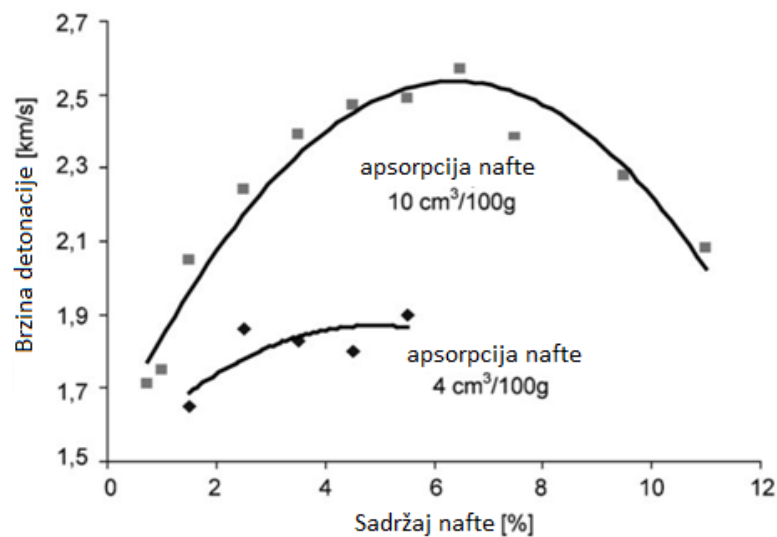
- A) Dimenzije i poroznost amonijeva nitrata te sadržaj nafte
- B) Promjer
- C) Način iniciranja
- D) Temperatura
- E) Obloga
- F)

### 2.1. Dimenzije i poroznost amonijeva nitrata te sadržaj nafte

Otpucavanjem ANFO kuglica različitih različitih poroznosti i dimenzija (otp. 1,50-2,50 mm) umiješane s naftom (94,5-5,5%) pomoću pojačnika (14g , RDX(90%):TNT(10%)) izmjerena je brzina detonacije eksploziva unutar čeličnih cijevi promjera ( $\emptyset = 36/39$  mm). Kuglice koje imaju manju apsorpcijsku mogućnost ( $x < 2.50$  cm<sup>3</sup>/100 g) nisu detonirale. Kod brzina detonacije koju smo izmjerili za kuglice s apsorpcijskom mogućnošću (otp. 2.50 – 3.00 cm<sup>3</sup>/100g) očitavanje iznosi 1600-1700 m/s, a kuglice koje imaju najveću mogućnost apsorpcije (otp.12–15 cm<sup>3</sup>/100g) davale su očitavanja čak i do 2700m/s. Što nas dovodi do zaključka da se pri povećanju poroznosti povećava i mogućnost apsorpcije, dok gustoća pada a brzina detonacije raste. Na slici 2.2. prikazan je dijagram ovisnosti brzine detonacije o gustoći AN kuglica , a na slici 2.3 je prikazan dijagram ovisnosti brzine detonacije o sadržaju apsorbirane nafte.



**Slika 2.2.** Utjecaj gustoće kuglica ispitan je na kuglicama dimenzija <0,50-1,2mm (Zygmunt i Buczkowski, 2007)



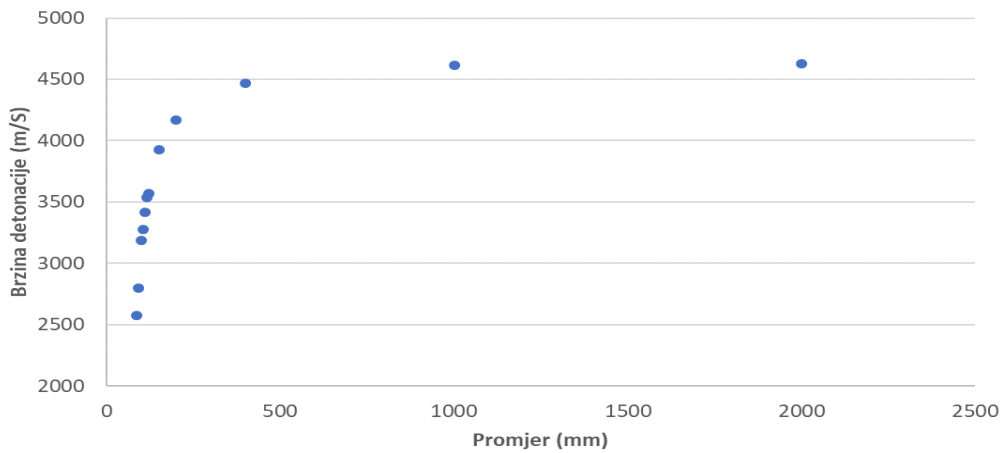
**Slika 2- 1.** Ovisnost brzine detonacije ANFO-a o sadržaju nafte

Pomoću očitavanja dijagrama primjećujemo da su granice brzine detonacije proporcionalne s postotkom apsorbirane nafte puno veće kod kuglica veće poroznosti.

## 2.2. Promjer

Promjer patrone odnosno minske bušotine izravno je povezan s brzinom detonacije eksplozivne tvari ili smjese. U slučaju da je promjer nedovoljne veličine do detonacije se uopće ne dolazi. Najmanji potreban promjer da bi se postigla stabilna deformacija za

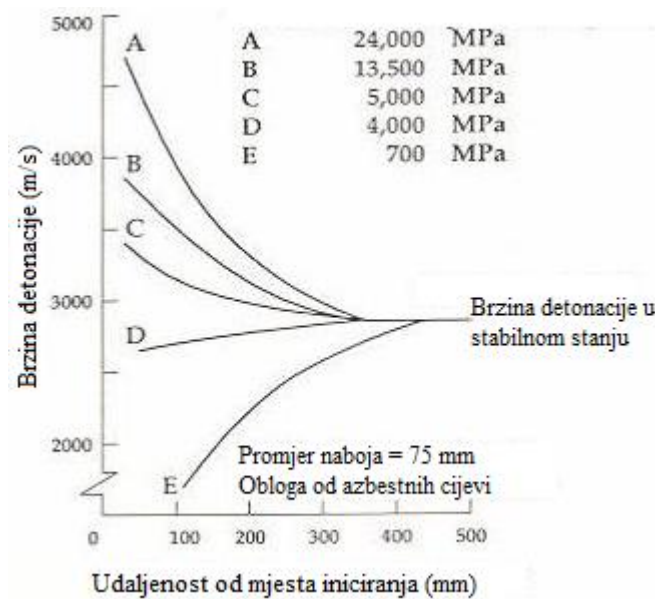
pojedini eksplozivnu tvar ili smjesu nazivamo kritičnim promjerom. presjeka. Slika 2-4. pokazuje odnos promjera minske bušotine i brzine detonacije.



Slika 2- 2. Odnos promjera i brzine detonacije (Pinter,2019.)

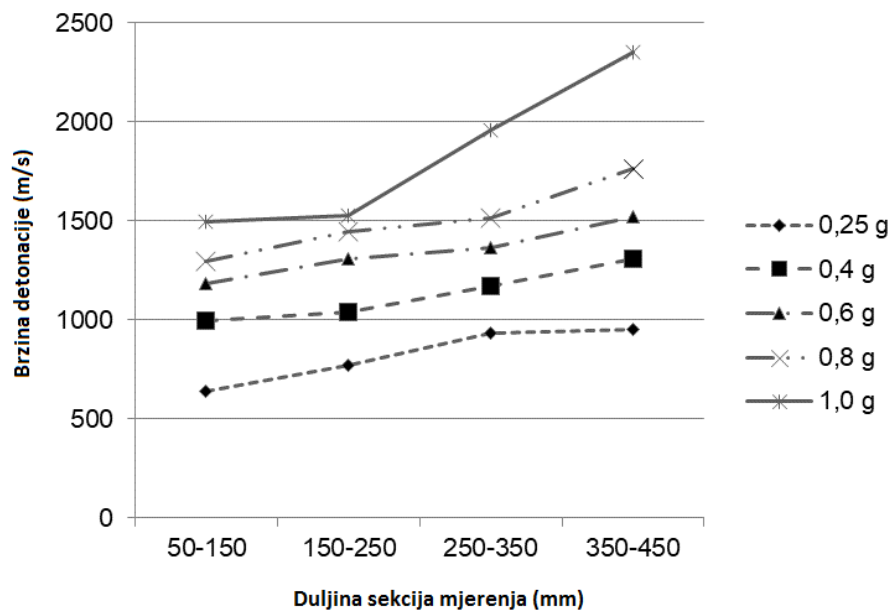
### 2.3. Način iniciranja

Brzina detonacije također ovisi o načinu inicijacije odnosno o količini inicijalne energije koju inicijalno sredstvo preda eksplozivu prilikom detonacije.. Na slici 2-5. su prikazane brzine detonacije za različite energije inicijacije.

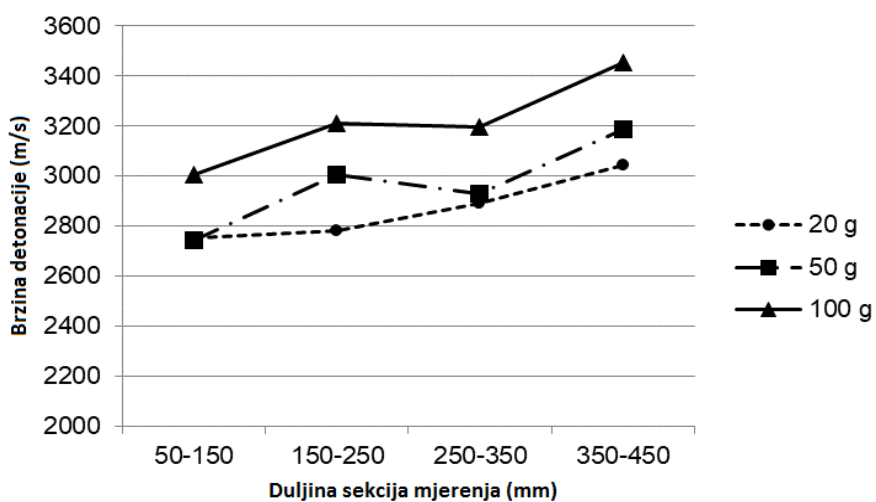


Slika 2- 5. Utjecaj inicijalne energije na brzinu detonacije eksploziva (Bohanek i dr, 2013.)

Slijedeća dva dijagrama opisuju međusobne odnose brzine detonacije različitih inicijalnih sredstava u sekcijama mjerenja. Slika 2-6. prikazuje brzine detonacije koje se javljaju pri iniciranju isključivo detonatorima, a slika 2-7. pokazuje brzine detonacije pri iniciranju s pojačnicima.



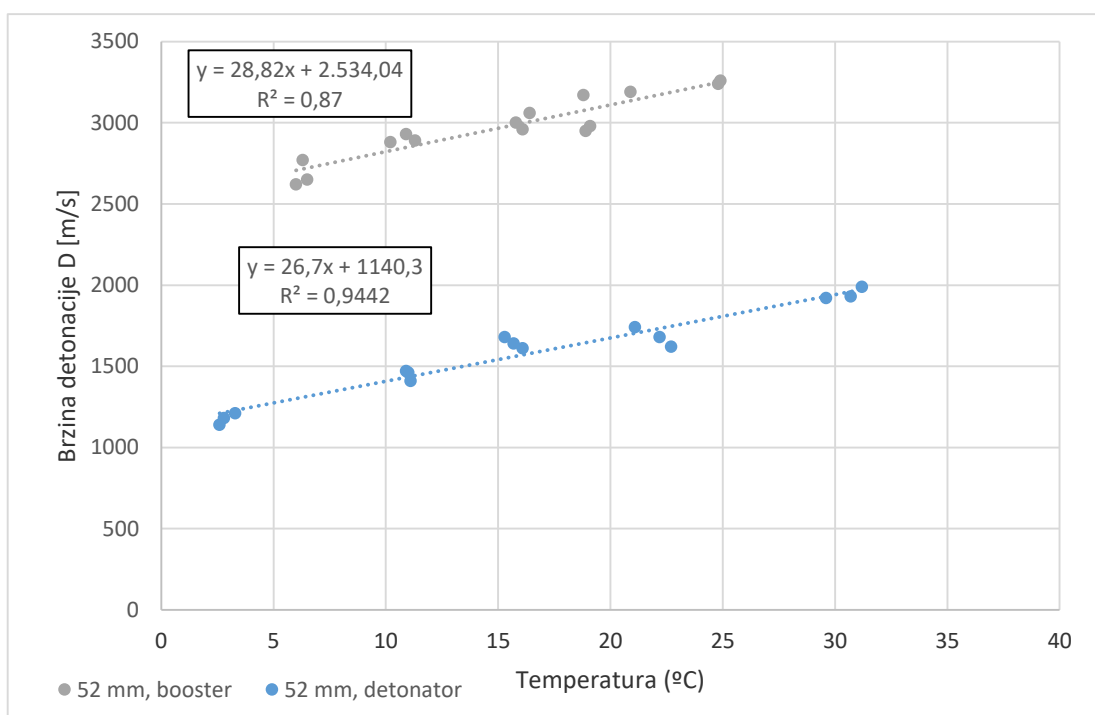
**Slika 2- 6.** Brzina detonacije u pojedinim sekcijama mjerenja za uzroke inicirane detonatorima (Bohanek i dr.,2013)



**Slika 2- 7.** Brzina detonacije u pojedinim sekcijama mjerenja za uzroke inicirane pojačnicima (Bohanek i dr.,2013)

## 2.4. Temperatura

Tokom istraživanja utjecaja same temperature na brzinu detonacije ANFO kuglica (Dobrilović i dr., 2014). Prvi pravac, s manjim vrijednostima izmjerene brzine, predstavlja iniciranje upotrebom detonatora dok drugi pravac predstavlja iniciranje pomoću pojačnika. Uzorci inicirani detonatorima s pojačnicima su se kondicionirali pri temperaturama od 0°C, 10°C, 15°C, 20°C i 25°C, a uzorci koji su inicirani isključivo detonatorima na temperaturama 0°C, 10°C, 15°C, 20°C i 30°C. Za mjerenje brzine detonacije koristili su se optički senzori. Na slici 2-8. se može vidjeti porast brzine detonacije proporcionalno s porastom temperature za iniciranje detonatorima i pojačnicima.

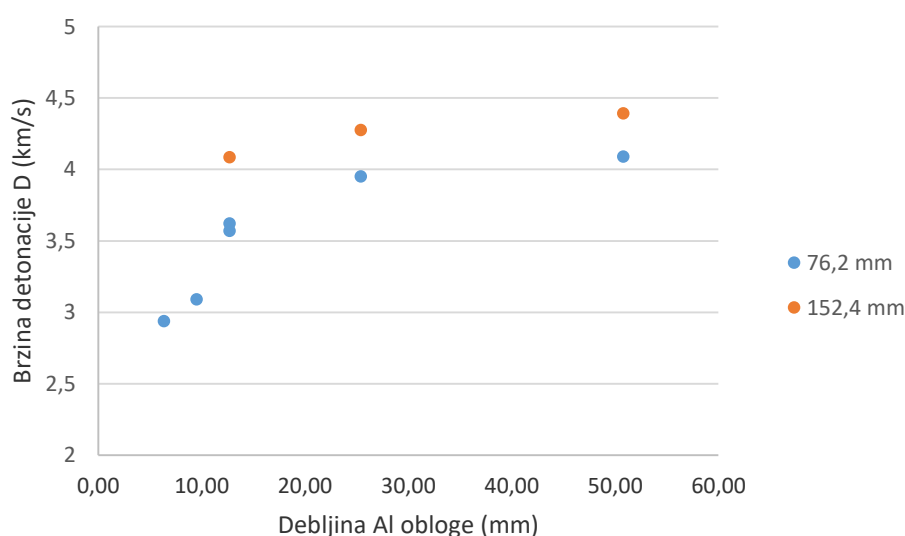


Slika 2-8. Ispitane brzine detonacije u ovisnosti o temperaturi (Dobrilović i dr., 2014)

## 2.5. Obloga

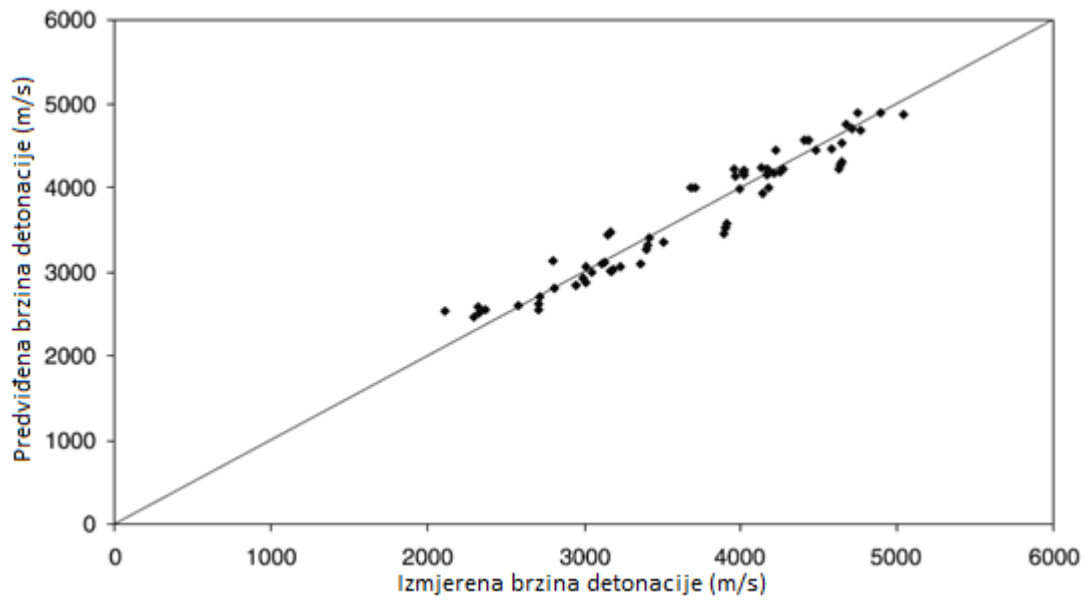
Pri održavanju brzine detonacije stabilnom kod nesavršenih eksploziva obloga može imati vrlo važnu ulogu. Što je ona čvršća to je u primarnoj zoni bočni pomak više spriječen, a s obzirom na to niti tlak ni temperatura ne padaju pa se tako povećava opseg gorenja u primarnoj reaktivnoj zoni. Osim povećanja brzine detonacije kao posljedicu korištenja obloge, također može biti korisna pri smanjenju kritičnog promjera, odnosno najmanjeg mogućeg promjera patrone ili minske bušotine pri kojoj eksploziv može ostvariti stabilnu detonaciju. Uzmemo li za primjer istraživanje (Esen,2004.) iz kojeg je zaključak da je

kritični promjer za ANFO eksploziv bez obloge 63mm i istraživanje RGN fakulteta (Dobrilović i dr., 2014) u kojem uz primjenu obloge (čelična cijev) eksploziv uspješno detonira pri promjeru od 52mm. Debljina obloge je u proporcionalnom odnosu sa brzinom detonacije, a osim obloge postavljene oko eksploziva, oblogom se smatra i stijena koja oblaže eksploziv u minskoj bušotini. Detonacije se odvijaju u raznim stijenama raznih fizikalno mehaničkih svojstava. A proces je znatno složeniji jer sadrži fragmentiranje stijenske mase. Iz priloženog dijagrama možemo zaključiti da su debljina obloge i brzina detonacije u proporcionalnom odnosu. Slika 2-9. pokazuje porast brzine detonacije s povećanjem debljine obloge za dva različita promjera.



**Slika 2- 9.** Odnos debljine aluminijske obloge naspram brzine detonacije (Jackson,2017.)

Podatkovnom analizom obloga je opisana kao funkcija ovisna o svojstvima stijene i eksploziva. Stijenska svojstva se opisuju pomoću gustoće, te brzine S i P valova unutar intaktne stijene. Brzinu idealne detonacije određujemo pomoću “ VIXEN – I” računalnog modela (Esen, 2004). Model je najtočniji kada ga primjenimo na stijenu s Youngovim modulom elastičnosti manjim od 92 GPa , iako se u posebnim slučajevima može koristiti i kod stijena sa većim vrijednostima Youngovog modula elastičnosti. Slika 2-10. prikazuje odnos izmjerene i predviđene brzine detonacije, a dijagonalna linija predstavlja slučajeve u kojem su predviđena i izmjerena brzina detonacije identične.



Slika 2- 10. Izmjerene i predviđene brzine detonacije (Esen, 2004)



### 3. METODE ZA MJERENJE BRZINE DETONACIJE

Postoje razne metode za mjerenje brzine detonacije diljem svijeta. Svaka od pojedinih metoda ima svoje prednosti i nedostatke. Mjerna oprema kojom se mjeri brzina detonacije treba osigurati:

- točno određivanje dolaska detonacijskog vala pomoću odgovarajućih osjetila za mjerenje brzine,
- precizno mjerenje vrlo kratkih vremenskih intervala (u  $\mu\text{s}$ ) potrebnih da detonacijski val prijeđe poznatu udaljenost.

Ovisno o odabranoj mjernoj opremi metode za određivanje brzine detonacije mogu se podijeliti na:

- optičke metode, temeljene na upotrebi različitih tipova brzih kamera,
- električne metode, temeljene na upotrebi različitih vrsti sonde koji signal prenose različitim elektroničkim brojačima ili osciloskopu.

#### 3.1. D'austriche metoda

Ova metoda ispituje brzinu detonacije tako da stvori dva detonirajuća vala koja se šire s oba kraja eksplozivnog punjenja kroz detonirajući štapin. Detonirajući štapin se polaže na aluminijsku plohu kako bi se mogla očitati točka sudara. Potom se izmjeri udaljenost točke sudara od središnje točke spoja, a sama je udaljenost proporcionalna brzini detonacije. Na slici 3-1 je dan shematski prikaz D'austriche metode. Formula za izračun brzine detonacije pomoću D'austriche metode izgleda ovako:

$$D_u = D_f * \left( \frac{d_1}{2d_2} \right) \quad (3-1)$$

Pri čemu je:

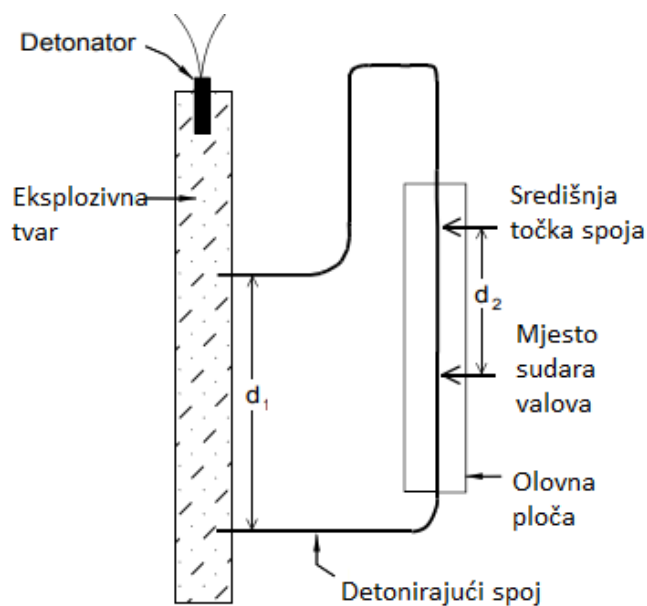
$D_u$  - tražena brzina detonacije eksploziva

$D_f$  - brzina detonacije spoja

$d_1$  - udaljenost između dva priključka spoja na eksplozivnoj napravi

$d_2$  - udaljenost između središnje točke spoja i mjesta gdje se valovi sudaraju

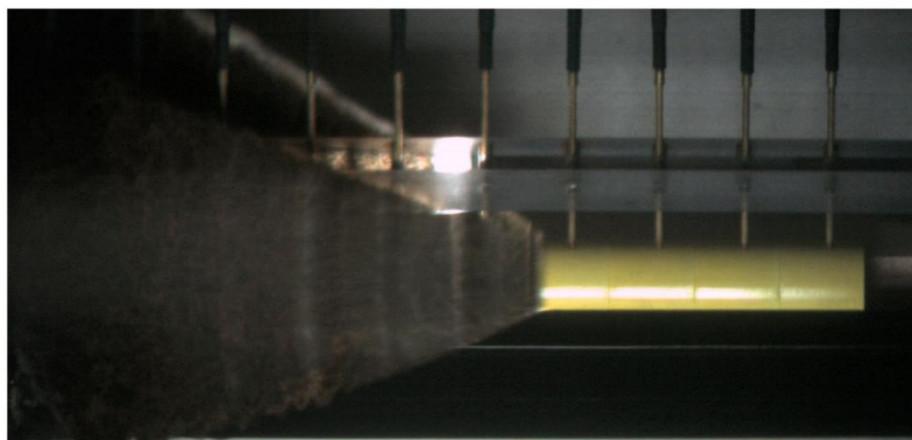
Slika 3-1. prikazuje shematski prikaz postavljanja D'austriche metode, te najvažnije dijelove.



Slika 3-1. Shematski prikaz D'austriche metode (K.L. i B.K. Kosanke,1992.)

### 3.2. Optičke metoda

Detonacijski proces moguće je optički promatrati kamerama visoke brzine, što bi značilo da je kamera sposobna napraviti puno više slika u određenoj jedinici vremena s obzirom na običnu kameru. Eksplozija je sama po sebi proces koji uzrokuje pojavu svjetlosti. Svjetlost koju eksplozija emitira se zabilježava konstantno u stvarnom vremenu. Brzina detonacije se lako može izračunati iz videozapisa pokreta detonacijskog vala. Kamere visoke brzine imaju mogućnosti pri niskim rezolucijama razviti čak 130000 slika u sekundi. Dugotrajne su jer snimaju s određene sigurnosne udaljenosti koja je potrebna kako bi kamera ostala očuvana. Primjer mjerenja dan je slikom 3-2.



Slika 3-2. Mjerenje brzine detonacije eksploziva upotrebom kamere

### 3.3. Diskontinuirane metode mjerenja brzine detonacije

Sistemi za mjerenje brzine detonacije ovom metodom su podržani od strane elektronskih satova različite izvedbe. Ukoliko se osjetila postavljene u eksploziv na poznatu udaljenost, nailazak detonacijskog vala na prvu sondu će uključiti elektronski sat, dok će ga nailazak vala na drugu sondu isključiti. Prema tome se brzina detonacije računa kao:

$$D = \frac{L}{t} \quad (3-2)$$

gdje su:

D – brzina detonacije (m/s),

L – razmak između sondi (m),

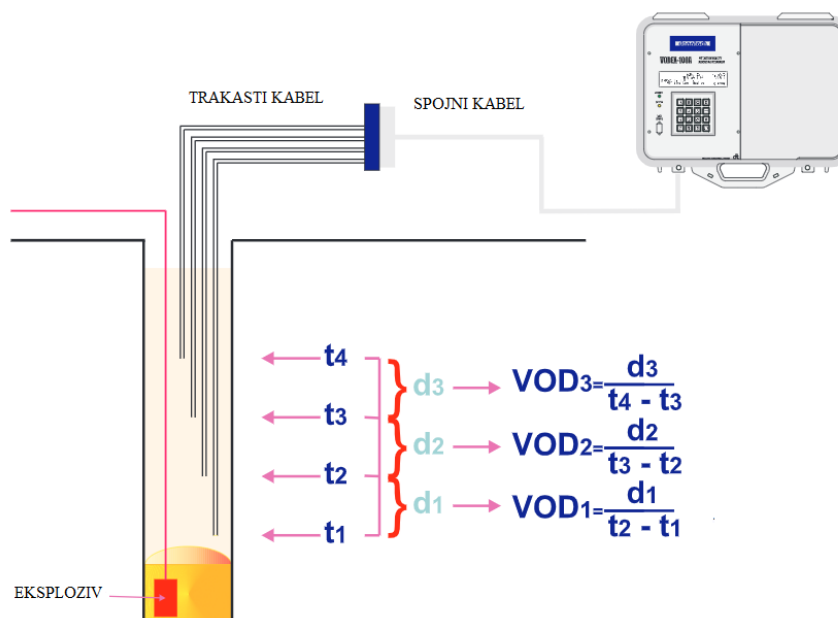
t – vremenski interval u kojem je detonacijski val prešao udaljenost L (s).

Prilikom provođenja testa potrebno je osigurati da:

udaljenost između početne pozicije i prve sonde bude dovoljno velika za postizanje stabilnog detonacijskog vala,

udaljenost između sondi bude dovoljna kako bi se izbjegle nepreciznosti u mjerenju udaljenosti. (Sućeska, 1995)

Za mjerenje se koriste osjetila različite izvedbe, minimalan broj osjetila je 2 ali se često koristi veći broj osjetila kako bi se dobilo više podataka. Primjer diskontinuiranog mjerenja brzine detonacije na više segmenta dana je slikom 3-3.



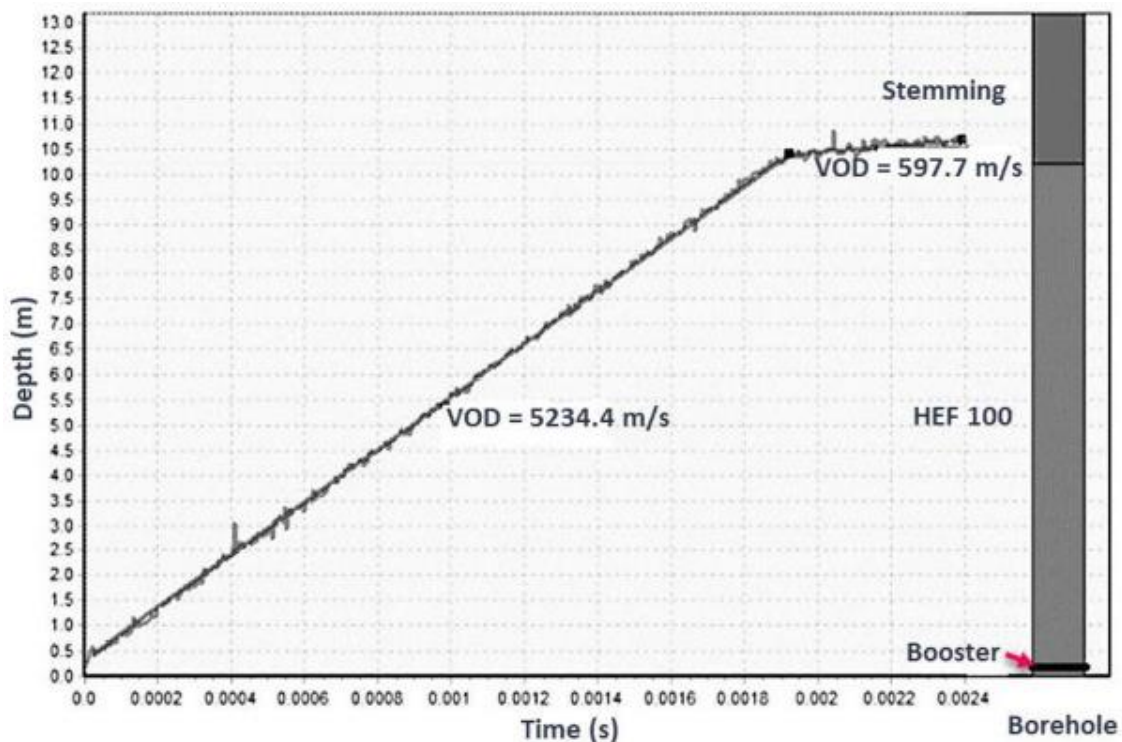
Slika 3-3. Shema mjerenja brzine detonacije pomoću "Vodex-100A" (Danntech CC, 2015.)

Vrlo često se ove metode nazivaju i start-stop metode jer se u pravilu koriste dva osjetila prvo ili start koje pokreće elektronski sat i drugo ili stop koje ga zaustavlja. Metoda nam ne može izmjeriti promjenu brzine detonacije po segmentu, rezultat mjerenja je srednja brzina detonacije za pojedini segment

### 3.4. Kontinuirane metode mjerenja brzine detonacije

Za razliku od diskontinuiranih metoda kontinuiranim metodama se mjeri brzina detonacije kontinuirano po cijeloj dužini eksplozivnog punjenja. Uglavnom se koriste za mjerenja brzine detonacije u minskoj bušotini dok se znatno rjeđe koristi za mjerenje brzine detonacije u patroni eksploziva. Princip kontinuiranog određivanja brzine detonacije temelji se na kontinuiranom snimanju promjene električnog otpora posebne vrste sonde kroz koji teče stalna struja, uzrokovane napredovanjem detonacijskog vala kroz eksplozivno punjenje. Sonda se postavlja unutar eksplozivnog punjenja paralelno s njegovom uzdužnom osi. Pod utjecajem detonacijskog vala, sonda se kontinuirano skraćuje, te joj se mijenja otpor.

Primjena električnog otpora uzrokuje promjenu napona u strujnom krugu, koja se bilježi na oscilogramu kao funkcija vremena. Pomoću očitavanja sa oscilograma moguće je izračunati brzinu detonacije u bilo kojem dijelu eksplozivnog punjenja. (Sućeska, 1995). Princip kontinuiranog mjerenja brzine detonacije u bušotini dan je slikom 3-4.



Slika 3-4. Kontinuirano mjerenje brzine detonacije u minskoj bušotini

#### **4. INSTRUMENTI I PRIMJENA**

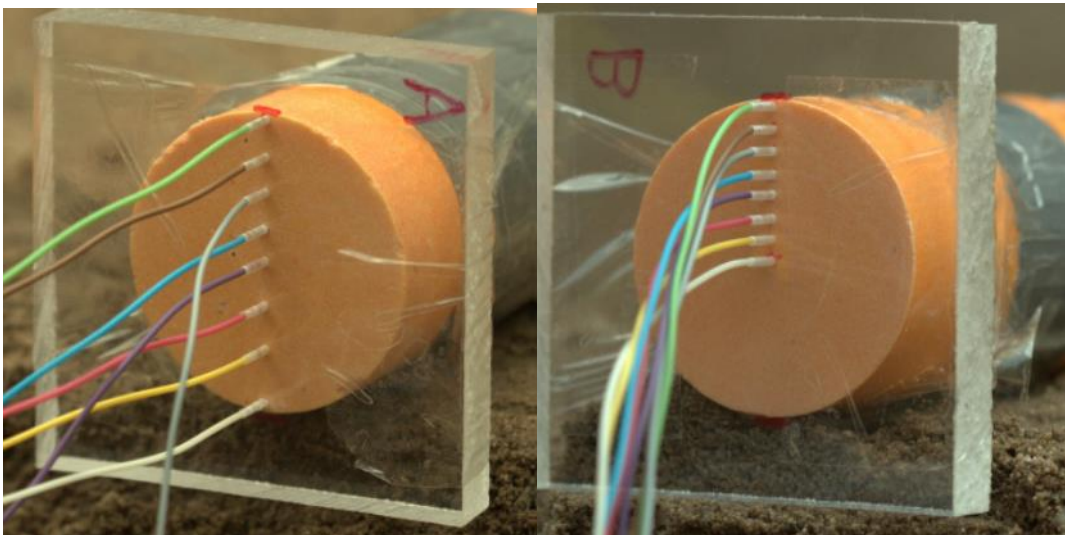
Na osnovi primjene gore navedenih metoda konstruirani su različiti instrumenti koji se mogu pronaći u upotrebi. Pojedini instrumenti su izrazito skupi skupi te imaju usko specijaliziranu primjenu dok su drugi jeftiniji i lako dostupni. U radu je prikazano nekoliko različitih instrumenata koji koriste diskontinuiranu i kontinuiranu metodu mjerenja. Kod diskontinuiranog načina mjerenja brzine obrađeni su instrumenti koji koriste elektrooptičku metodu kod kontinuiranog načina mjerenja instrumenti koji koriste otporne koaksijalne žice kao osjetilo.

##### **4.1. Elektrooptička metoda ili metoda optičkih vlakana**

Određivanje brzine detonacije temelji se na mogućnosti optičkog vlakna da prihvati svjetlosni signal u trenutku dolaska svjetlosnog vala, i da proslijedi taj signal do pogodne mjerne opreme, koja omogućava precizno bilježenje vremenskog intervala između dva signala. Ova metoda koristi optička vlakna odnosno svjetlosne sonde koje su sposobne primiti i prenesti svjetlosni signal sukladno sa detonacijskim valom. Funkcionira od točke do točke, tako da prvi senzor kad primi signal označava početak mjerenja vremena, a prilikom nailaska detonacijskog vala na drugi senzor se označava kraj. S obzirom da znamo fiksnu udaljenost, možemo ju podijeliti sa dobivenim vremenom, koje je detonacijskom valu potrebno da prijeđe put od početnog do krajnjeg senzora, te tako dobiti brzinu detonacije, što najčešće rade sami uređaji. Ovo je uz metodu žičnih otpora najraširenija metoda zbog svoje efikasnosti, jednostavnosti korištenja te pristupačnosti opreme potrebne za izvođenje mjerenja. Poznati proizvođači opreme i instrumenata za mjerenje brzine detonacije su OZM Research i Kontinitro SA. Instrumenti se uglavnom primjenjuju za mjerenje brzine detonacija eksploziva, detonirajućeg štapina, vremena kašnjenja detonatora i usporivača, a u zadnje vrijeme i za mjerenje radijusa zakrivljenosti detonacijske fronte slika 4-1., slika 4-2.



Slika 4-1. Mjerenje radijusa zakrivljenosti detonacijske fronte.



Slika 4-2. Mjerenje radijusa zakrivljenosti detonacijske fronte.

#### 4.1.1. OZM Research instrumenti

**VOD 815** je uređaj koji služi za precizno i direktno mjerenje brzine detonacije ili deflagracije čvrstog tekućeg ili plinovitog uzorka. Mjerenja se izvode uz korištenje svjetlosnih sondi. Metodom svjetlosnih sondi koja je ranije objašnjena, ima sposobnost zapisati brzinu detonacije čak do 20 000m/s u vremenskim intervalima od 0 do 40 sekundi sa razmakom snimanja od 10 nanosekundi, a koristi 8 zasebnih sondi sa neovisnim mjeračima. Najčešće se koristi u svrhu kontrole kvalitete eksploziva u industriji, zbog čega mu je važna odlika jednostavnost korištenja. Može se koristiti za sve jake i slabe, vojne i civilne eksplozive. Svjetlosne sonde pružaju potpuni otpor na vlagu i elektromagnetske smetnje što omogućava korištenje VOD 815 sa bilo kojom drugom instrumentacijom. Dizajniran je sa ulazima za svjetlosne sonde Ø1/2.2, sučelje je povezano sa PC računalom preko USB priključka, što nam omogućava iznimnu lakoću upravljanja podacima. Kao što je ranije napomenuto jednostavnost korištenja je na visokoj razini, sveukupno postavljanje ispitivačkog postrojenja za mjerenje brzine detonacije zahtjeva ne više od 10 minuta. Na slici 4-3. prikazan je instrument VOD 815.



Slika 4-3. VOD 815 (OZM research, 2020.)

**OPTIMEX 64** je napredni znanstveni instrument koji koristi višestruke svjetlosne sonde za zapis svjetlosnih signala koji su posljedica eksplozije u vremenu. Koristan je za determinaciju parametara detonacije svih vrsta eksplozivnih materijala. OPTIMEX 64 predstavlja noviju generaciju VOD-815 uređaja sa potpuno redizajniranim

optoelektroničkim sistemom zapisivanja (*optoelectronic acquisition system*) i naprednim značajkama procjene podataka na temelju opsežnih istraživanja eksplozivne svjetlosti. Optičke sonde u principu pružaju otpor prema vlažnosti i elektromagnetskim smetnjama, pa ga tako čine prikladnim za korištenje s drugom instrumentacijom. Koristi se za mjerenje detonacije. Sa visokim brojem svjetlosnih sondi, mogućnosti ovog instrumenta nadilaze mogućnosti kamera visoke brzine. Zapisuje potpuni profil svjetlosnog intenziteta u vremenu nastale u specifičnim mjestima u eksplozivnom punjenju. Analiza profila svjetlosnog intenziteta čini procjenu takvih signala pouzdanom za sve uzorke čak i neidealne eksplozive. Prozirnost eksploziva, slaba emisija svjetla, naknadna izgaranja kod ovog instrumenta ne mogu škoditi rezultatima mjerenja. Apliciran je najčešće u slučaju određivanja brzine detonacije, zakrivljenosti detonacijskog vala, brzine detonacije u inertnim materijalima, brzina širenja cilindra, te za kompletno nadgledanje iniciranja eksploziva. Može sadržavati čak do 8 optičkih modula od kojih svaki ima 8 neovisnih kanala za mjerenje koji primaju optičke sonde i sonde staklenih vlakana. Duljina zapisivanja je 520  $\mu\text{s}$  pri maksimalnoj stopi zapisivanja od 130000 podatkovnih točaka. Promjer plastične svjetlosne sonde je  $\text{\O} 960\mu\text{m}$ , dok je za sondu od staklenih vlakana promjer  $\text{\O} 50\mu\text{m}$ . Udaljenost od mjesta testiranja je za plastične sonde 100m , dok je u slučaju staklenih sondi udaljenost 500m. Mjerenje se može obaviti pri temperaturi između 0 i 50°C. Za rad s ovim instrumentom potreban je dvodnevni trening, odnosno osposobljavanje osobe za rad s instrumentom. Slika 4-4. prikazuje instrument Optimex 64.



Slika 4-4. Optimex 64 (OZM research, 2020.)



#### 4.1.2. Kontinitro AS instrumenti

**Explomet-fo-2000** je instrument koji se koristi za mjerenje brzine detonacije unutar metode optičkih vlakana, koja je ranije opisana. Može mjeriti brzinu detonacije u oblozi, te kontinuiranim načinom napraviti 5 mjerenja, odnosno po jedno mjerenje između svake od 6 sonde. Jedna sonda upali svih 5 mjerača pa svaka iduća sonda pri aktivaciji postepeno gasi mjerače. Sonde moraju biti složene po točnom redosljedu ako želimo izmjeriti brzinu detonacije, a sam instrument mjeri vrijeme osvjetljenja dvije uzastopne sonde i na temelju njihove udaljenosti računa brzinu detonacije do 10000 m/s. Može raditi u paru sa površinskim kablom, koji je zapravo snop optičkih sonde duljine 50 metara, spoj je specijalni 6-to kanalni sa kodnim bojama radi lakšeg korištenja. U spoj se stavlja 6 plastičnih svjetlosnih sonde promjera 1 mm, a priključak promjera 2,2 mm. Naprimjer preciznost mjerenja vremena je svedena na vrlo niskih +/- 10 nanosekundi. Slika 4-5. prikazuje Explomet-do-2000.



Slika 4-5. Explomet-fo-2000 (Žbulj,2019.)

**Explomet 2** je uređaj podosta novijeg datuma, s mnogim znatnim poboljšanjima, kao što su lakše korištenje, veća brzina i modernije sučelje. Raspodjela svjetlosnih sonde može biti potpuno nasumična, uređaj je sposoban sam razaznati poredak svjetlosnih sonde. Explomet 2 radi s točnošću od +/-0.01 milisekunde, a s velikom preciznošću može zapisati brzine detonacije do 15000 m/s. Svi podaci (datumi, vremena, trajanja, brzine) se sistematski spremaju na SD karticu. Također radi sa površinskim kablom koji se sastoji od 6 svjetlosnih sonde najčešće promjera Ø1/2.2, a Explomet 2 može raditi sa dvostrukom pojačanom svjetlosnom sondom. Također je važno napomenuti da se trošak po metru optičkog kabela

u prosjeku smanjio za otprilike 30%. Slika 4-6. prikazuje explomet 2 iz nekoliko perspektiva gledanja.

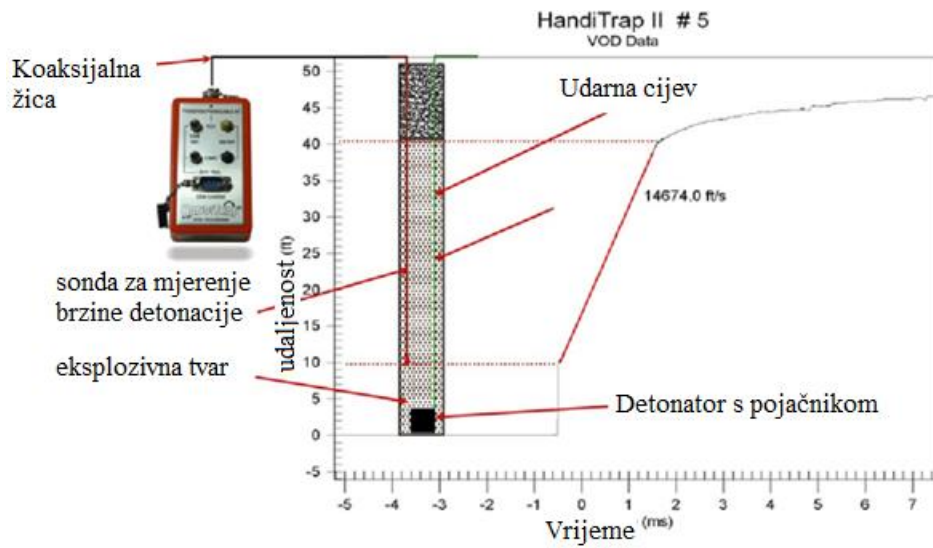


Slika 4-6. Explomet 2 (Kontinitro SA, 2019.)

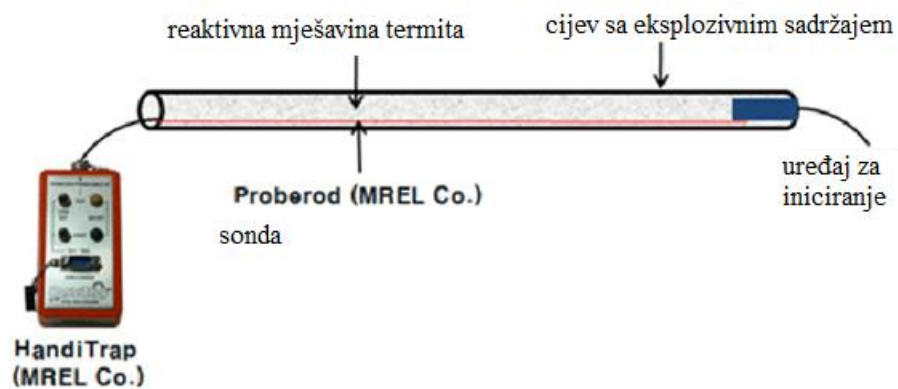
#### 4.2. Instrumenti koji koriste metodu žičnih otpora

Postoji više inačica ovih uređaja ali za potrebu ovog rada razmotrit će se instrumenti koje je proizvela MREL grupa. Trenutno nude HandiTrap, MiniTrap i DataTrap što se tiče uređaja za mjerenje brzine detonacije. Brzinu detonacije dobivamo preko žičnih otpora, uređaji su osjetljivi na utjecaj električne smetnji, a troškovi potrošnih materijala su relativno visoki. Djeluju pri niskom naponu i prilično niskoj jakosti struje otprilike manje od 50mA, što znači da uređaj neće izazvati preuranjenu detonaciju svojim djelovanjem. Imaju sposobnost kontinuiranog nadziranja više minskih bušotina, što ih čini pogodnima za terenska mjerenja, ali svakako se brzina detonacije mora naknadno računati.

Instrumenti se uglavnom primjenjuju za mjerenje brzine detonacije eksploziva u bušotini kao što je to prikazano slikom 4-7. , a nešto rjeđe za mjerenje brzine detonacije u uzorcima kao što je to prikazano slikom 4-8.

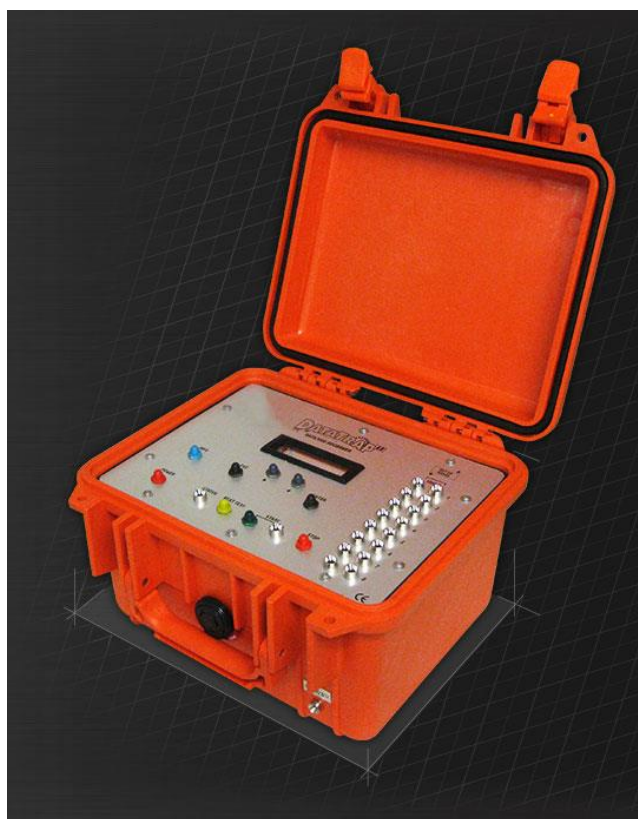


Slika 4-7. Mjerenje brzine detonacije eksploziva u bušotini (K. Min-Seong i dr., 2015.)



Slika 4-8. Mjerenje brzine detonacije u uzorku (K. Min-Seong i dr., 2015.)

Datatrapp je uređaj koji služi za zabilježavanje signala iz pretlaka zračnog vala, te sadrži senzore za mjerenje signala pod vodom, akcelerometre, termo elemente, tenzometre, senzore za mjerenje brzine detonacije i druge senzore. Bez potrebe za razvlačenjem dugih signalnih žica do udaljenog ispitivačkog pogona. Ima mogućnost snimanja miniranja i analize svih zabilježenih podataka. Uređaj sadrži 8 kanala na kojeg se svakog može spojiti do 4 bušotine u nizu, što sveukupno daje broj testiranih bušotina iz jednog otpucavanja je 32. Frekvencija zapisivanja se kreće između 1 Hz sve do 10MHz. Iz jednog puta može ispitati 8 eksplozivnih uzoraka. Ciklus trajanja baterije je 6 sati. A mjeri brzine detonacije između 2500-9000m/s. Na slici 4-9. se može vidjeti kako izgleda instrument Datatrapp.



Slika 4-9 Datatrapp (MREL,2020.)

Minitrapp je uređaj istog proizvođača nešto manjih dimenzijai mogućnosti u odnosu na Datatrapp. Ima više manje iste mogućnosti spajanja što se tiče različitih senzora i mjerača, ali u manjoj količini. Uređaj sadrži 1 kanal za mjerenje brzine detonacije i jedan za opsežno mjerenje na kojeg se može spojiti do 4 bušotine u nizu. Frekvencija zapisivanja se kreće između 1 Hz i 2MHz. Vrijeme trajanja mjerenja je između 2 i 4 sekunde. Što se tiče mjerenja brzine detonacije na izoliranom eksplozivnom uzorku, moguće je ispitati samo jedan uzorak.

A vrijeme trajanja baterije je 12 sati. Pogodan je za korištenje na terenu zbog svoje lakoće i mobilnosti. Slika 4-10. prikazuje instrument Minitrap.



Slika 4-10. Minitrap (MREL,2020.)

Handi trap je najmanji uređaj za mjerenje brzine detonacije od proizvođača MREL. Vrlo je jednostavnog izgleda, a sukladno tome ga odlikuju pristupačna cijena i jednostavnost korištenja. Frekvencija zapisivanja mu je 1Mhz. Radi na 12 bitnoj rezoluciji. Sadrži jedan kanal za mjerenje brzine detonacije, a vrijeme zapisivanja mu je 132 milisekunde (131,072 podatkovna točka). Nema mogućnost mjerenja u više minskih bušotinu u seriju, a isto vrijedi i za izolirani eksplozivni uzorak . Iznimno je pogodan za korištenje na terenu zbog iznimno malih dimenzija i mase. Handitrap možemo vidjeti na slici 4-11.



Slika 4-11. Handitrap (MREL, 2020.)

## 5. ZAKLJUČAK

Instrumenti za mjerenje brzine detonacije se stalno razvijaju. Mjerne mogućnosti instrumenata su sve veće, a cjenovno su sve pristupačnije. Obzirom da je brzina detonacije eksploziva parametar koji se može relativno lako i relativno jeftino izmjeriti instrumenti za mjerenje brzine detonacije su neizostavan dio laboratorija za ispitivanje eksploziva. Sve više rudarskih firmi posjeduje ove instrumente kao neizostavni dio kontrole kvalitete miniranja. Instrumenti se također koristi pri proizvodnji i istraživanju u području vojnih i civilnih eksploziva.

## 6. LITERATURA

DR.TETE A., DR. DESHMUKH, A., DR.YERPUDE, R.R., 2015., Design and Implementation of Electronic Measurement System for Velocity of Detonation of Explosive International Journal of Scientific and Engineering Research , Vol. 6, Issue 6.

MINISTRY OF COAL GOVERNMENT OF INDIA,2001.,Evaluation of explosives performance through in-the-hole detonation velocity measurement National institute of Rock Mechanics

MERTUSZKA, P., PYTLIK ,M.,2019., Analysis and comparsion of the continuous detonation velocity measurment method with the standrad method, Institute of Industrial organic Chemistry, Poland

MIN-SEONG, K., HYEONG-MIN, K., SANG-SUN, J., YUN-YEONG, J., HOON, P., SANG-HO, C.,2015. Determiation of combustion propagation velocity of Thermite reaction mixture using continuous VOD measurment system,Journal od Korean Society od Explosives and Blasting Engineering, EXPLOSIVES&BLASTING, Vol. 33, No. 3.

SUĆESKA, M., 1995. Test Methods for Explosives (Shock Wave and High Pressure Phenomena), Springer-Verlag ,New York, SAD.

ESEN, S., 2004. A statistical approach to predict the effect od confinement on the detonation velocity of commercial explosive. Rock mechanics and rock engineering,37(4), str.317-330.

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

DOBRILOVIĆ, M., 2008. Raspoloživa energija tlačnog udarnog vala udarne cjevčice i njezina primjena u iniciranju elektroničkog detonatora. Zagreb, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

ZYGMUNT, B. I BUCZKOWSKI, D., 2007. Influence of Ammonium Nitrate Prills Properties on Detonation Velocity of ANFO. Propellants, Explosives, Pyrotechnics. Warsaw, Poland.

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

ŽBULJ,M., 2019.Eksplozivi s mikročesticama (Diplomski rad). Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.



ŽGANEC, S., BOHANEK, V., DOBRILOVIĆ, M., 2013. Influence of a primer on the velocity of detonation of ANFO and Heavy ANFO blends. Central european journal of energetic materials 13, (3).

DOBRILOVIĆ, M., BOHANEK, V., ŽGANEC, S., 2014. Influence of explosive charge temperature on the velocity of detonation of ANFO explosives. Central european journal of energetic materials, 11, (2).

KOSANKE K.L. I KOSANKE B.K., 1992. D'autriche – Shock Tube Measurement od High Propagation Rates in Pyrotehnic Materials, Pyrotehnics Guild International Bulletin, No. 80. str. 171-178.

Izvori s interneta:

<https://www.kontinitro.com/-/products/>

[http://mrel.com/blasting\\_instrumentation/products.html](http://mrel.com/blasting_instrumentation/products.html)

<https://www.phantomhighspeed.com/>

<https://www.shottrack.com.au/>

<http://www.vibronics.com/demos/TLC-SpeedVOD-System.pdf>

<https://www.ozm.cz/>