

Utjecaj materijala obloge i promjera eksplozivnog punjenja na brzinu detonacije ANFO eksploziva

Jug, Tomislav

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:036972>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-24**



Repository / Repozitorij:

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



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

**UTJECAJ MATERIJALA OBLOGE I PROMJERA EKSPLOZIVNOG PUNJENJA
NA BRZINU DETONACIJE ANFO EKSPLOZIVA**

Završni rad

Tomislav Jug

R4469

Zagreb, 2023.



KLASA: 602-01/23-01/103
URBROJ: 251-70-11-23-2
U Zagrebu, 03.07.2023.

Tomislav Jug, student

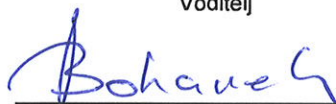
RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/23-01/103, URBROJ: 251-70-11-23-1 od 28.06.2023. priopćujemo vam temu završnog rada koja glasi:

UTJECAJ MATERIJALA OBLOGE I PROMJERA EKSPLOZIVNOG PUNJENJA NA BRZINU DETONACIJE ANFO EKSPLOZIVA

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

Voditelj

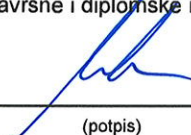


(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Vječislav Bohanek

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za
završne i diplomske ispite:

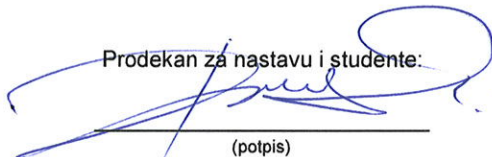


(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Mario Klanfar

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:



(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje
Pašić

(titula, ime i prezime)

**UTJECAJ MATERIJALA OBLOGE I PROMJERA EKSPLOZIVNOG PUNJENJA NA
BRZINU DETONACIJE ANFO EKSPLOZIVA**

Tomislav Jug

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

Sažetak

ANFO eksplozivi se zbog svojih zadovoljavajućih minersko tehničkih i detonacijskih svojstava te relativno niske cijene najviše koriste za gospodarska miniranja u rudarstvu i graditeljstvu. Uz ekonomski čimbenik, sigurnost prilikom miniranja, jednostavnost proizvodnje na mjestu upotrebe i mogućnosti mehaniziranog punjenja bušotina dodatni su razlozi učestalosti upotrebe. Premda su minerska svojstva ANFO eksploziva dobro poznata zbog neidealne detonacije ANFO eksplozivi su predmet mnogobrojnih istraživanja

U radu je dan prikaz utjecaja obloge i promjera detonacije na brzinu ANFO eksploziva te su provedene terenska ispitivanja s ciljem utvrđivanja utjecaja različitih metala obloge na izmjerenu brzinu detonacije.

Ključne riječi: ANFO, obloga, brzina detonacije
Završni rad sadrži: 34 stranica, 7 tablica, 16 slika, 0 priloga, i 17 referenci.
Jezik izvornika: Hrvatski
Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb
Mentor: Dr.sc. Vječislav Bohanek, izvanredni profesor RGNF
Ocjenjivači: Dr.sc. Vječislav Bohanek, izvanredni profesor RGNF
Dr.sc. Mario Dobrilović, redoviti profesor RGNF
Dr.sc. Vinko Škrlec, izvanredni profesor RGNF

Sadržaj

1. UVOD	7
2. EKSPLOZIVI, EKSPLOZIJA, DETONACIJA	8
2.1. EKSPLOZIVI.....	8
2.3. DETONACIJA	12
2.3.1. BRZINA DETONACIJE	13
3. ANFO EKSPLOZIV	14
3.1. DIMENZIJE I POROZNOST AMONIJEVA NITRATA TE SADRŽAJ NAFTE	16
3.1.1. PROMJER NABOJA	16
3.1.2. NAČIN INICIRANJA.....	17
3.1.3. TEMPERATURA EKSPLOZIVA.....	19
3.2. UTJECAJ OBLOGE	20
3.2.1. LAGANA OBLOGA (<i>LIGHT CONFIMENT</i>)	22
3.2.2. TEŠKA OBLOGA (<i>HEAVY CONFIMENT</i>).....	24
3.2.3. STIJENA KAO OBLOGA (<i>ROCK CONFIMENT</i>)	26
4. MJERENJE	27
5. REZULTATI I ANALIZA REZULTATA MJERENJA	30
6.ZAKLJUČAK	32
7. LITERATURA	33

POPIS TABLICA

Tablica 3-1. Karakteristike AN za gnojivo i AN za eksplozive (Ester,2005)	15
Tablica 3-2. Prikaz rezultata mjerenja ANFO eksploziva (Thomas, T.J., 2005.)	22
Tablica 3-3. Brzine detonacije kod AN-FO eksploziva u PVC cijevima (Thomas, T.J., 2005.)	24
Tablica 3-4. Rezultati mjerenja (Bohanek i dr., 2022.)	25
Tablica 3-5. Svojstva netaknute stijene (Esen, S., 2003.)	26
Tablica 3-6. Usporedba sposobnosti ANFO eksploziva na različitim promjerima stijene kao obloge (Esen, S., 2003.)	26
Tablica 4-1. Karakteristike cijevi	28
Tablica 4-2. APG 20 pojačnika	29
Tablica 5-1. Rezultati terenskog ispitivanja	30

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Opća podjela eksplozivnih sredstava (Bohanek;2013).....	8
Slika 2-2. Eksplozija (Dobrilović, 2010.).....	10
Slika 2-3. Proces sagorijevanja u eksplozivnoj tvari (Dobrilović, 2010)	11
Slika 2-4. Detonacijski proces u patroni eksploziva (Dobrilović, 2008)	12
Slika 3-1. AN-FO eksploziv (Zečić, 2015).....	14
Slika 3-2. Shematski prikaz proizvodnje ANFO eksploziva (Bohanek, 2016.).....	15
Slika 3-3. Prikaz poprečnog presjeka neporozne kuglice amonijevog nitrata, korištene u poljoprivredi (a) i porozne kuglice nakon apsorpcije nafte $15 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$ u nekoliko termalnih ciklusa (b) (Zygmunt i Buczkowski, 2007.).....	16
Slika 3-4. Utjecaj promjera na proračunatu brzinu (Pinter, 2019.).....	17
Slika 3-5. Utjecaj energije inicijalnog sredstva na brzinu detonacije ANFO eksploziva	18
Slika 3-6. Brzina detonacije u pojedinim sekcijama mjerenja za uzroke inicirane detonatorima (Bohanek i dr.,2013.)	19
Slika 3-7. Ispitane brzine detonacije u ovisnosti o temperaturi (Dobrilović i dr., 2014.).....	20
Slika 3-8. Različiti tipovi obloge: (a)sink, (b)savršena i (c) energetska; (Jackson i dr., 2010.)	21
Slika 3-9. Prikaz ovisnosti brzine detonacije i promjera eksploziva (Thomas, T.J., 2005.).....	23
Slika 3-10. Utjecaj M/C odnosa na brzinu detonacije ANFO eksploziva (Bohanek i dr., 2022.) ..	25
Slika 4-1. Explomet 2 uređaj (KONTINITRO, 2019)	27
Slika 4-2. Postav ispitivanja.....	29

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

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

1. UVOD

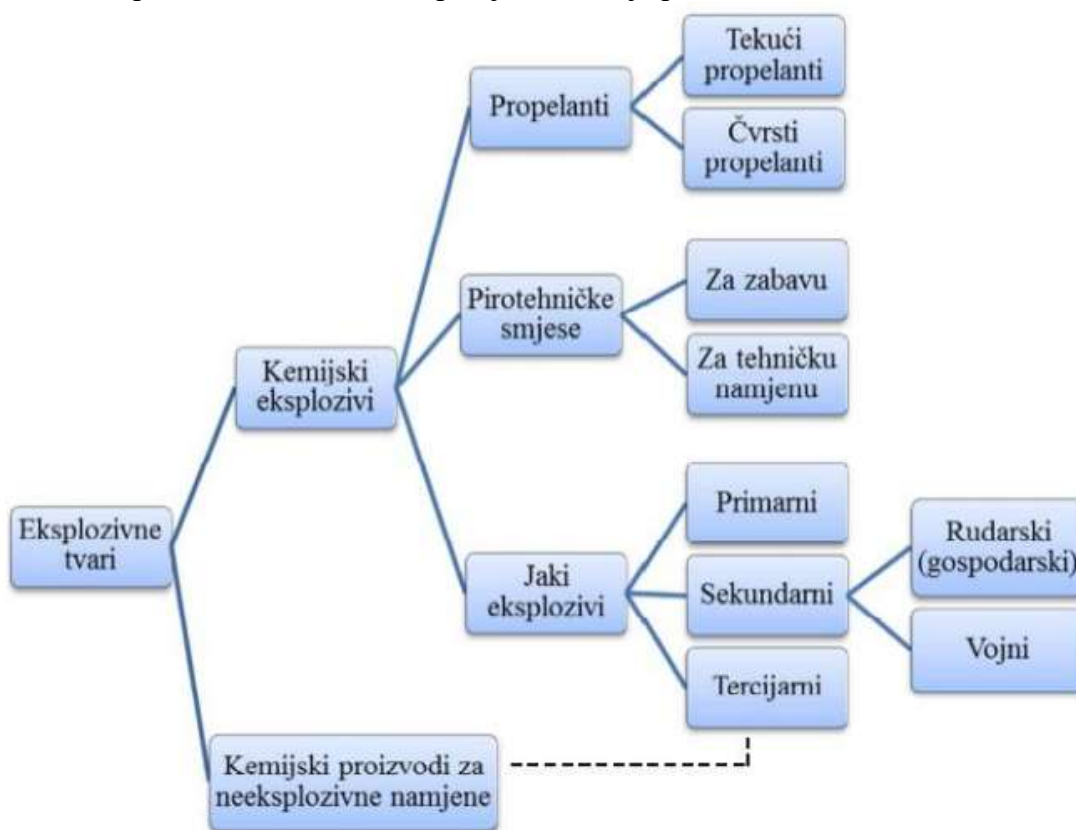
Eksplozivi su kemijski spojevi ili smjesa spojeva u kojima se djelovanjem vanjskog impulsa u obliku topline, udara, trenja i sl. razvija ekstremno brza egzotermna kemijska reakcija (eksplozija). Eksplozija se u općem smislu definira kao proces vrlo brze fizičke ili kemijske pretvorbe sustava uz prijelaz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

2. EKSPLOZIVI, EKSPLOZIJA, DETONACIJA

2.1. Eksplozivi

Eksplozivi su kemijski spojevi ili smjese koje imaju sposobnost da pod utjecajem vanjskog energetskog impulsa detoniraju, odnosno kemijski se razlažu u vrlo kratkom vremenskom periodu oslobađajući znatnu količinu plinova i topline (Krsnik, 1989).

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



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

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

Primarni eksplozivi ili inicijalni eksplozivi izrazito su osjetljivi na porast temperature, trenje i udar te pod djelovanjem vanjskog impulsa detoniraju. Najveću primjenu imaju kao

inicijalno punjenje električnih i neelektričnih detonatora te rudarskih kapica te se koriste kao senzibilizatori eksplozivnih smjesa. Karakteristike inicijalnih eksploziva su velika gustoća $3\text{-}4\text{g/cm}^3$, brzina detonacije $4000\text{-}5000\text{ m/s}$, energija eksplozije(detonacije) 1600 kJ/kg te su izrazito osjetljivi na sve vrste inicijalnih impulsa. Primarni eksplozivi nalaze se u skupini monomolekularnih eksploziva, a neki od njih su: bakrov azid, hidrazidna kiselina, živin fulminat, olovni stifanat, olovni azid itd. (Ester, 2005.).

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

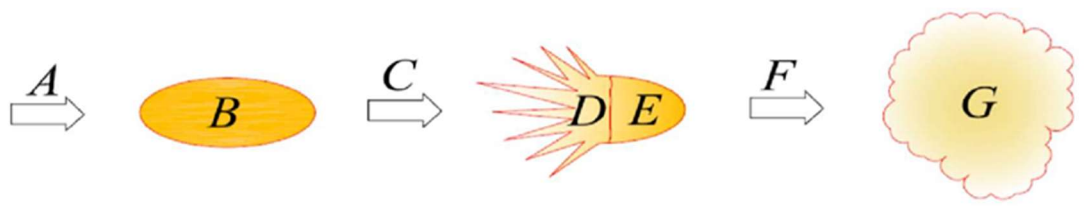
Monomolekularni eksplozivi su osjetljiviji na trenje, udar i porast temperature u odnosu na eksplozivne smjese pa se koriste za vojne svrhe, dok se u gospodarstvu upotrebljavaju za senzibilizaciju eksplozivnih smjesa i pri proizvodnji inicijalnih sredstava (Ester, 2005). Eksplozivne smjese dijelimo na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

2.2. Eksplozija

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

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

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



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

Kazalo:

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

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

D - plinoviti produkti,

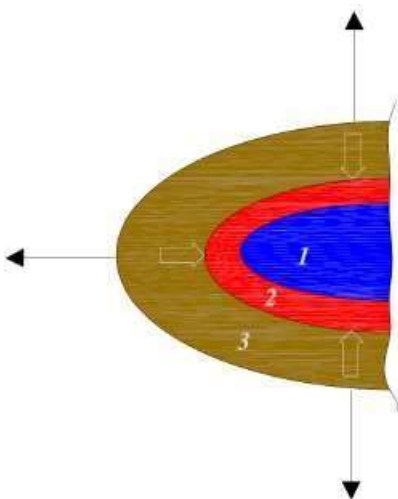
E - neporemećena eksplozivna tvar,

F - ekspanzija plinovitih produkata,

G - plinoviti produkti u ekspanziji ($T \approx 2000-5000 \text{ }^\circ\text{K}$, $v \approx 1000 \text{ kg/dm}^3$, $p \approx 10^5 \text{ bar}$, $Q \approx 3,5-7,5 \text{ kJ/g}$)

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

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



Kazalo:

1- neporemećena eksplozivna tvar,

2- zona kemijskih reakcija,

3- sagorjela tvar,

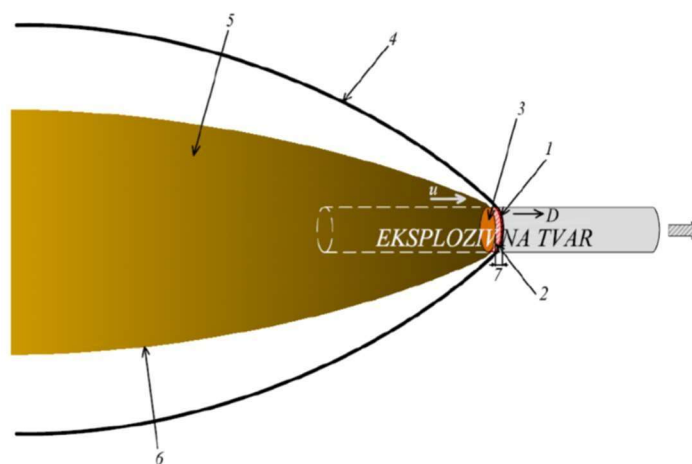
Slika 2-3. Proces sagorijevanja u eksplozivnoj tvari (Dobrilović, 2010)

2.3. Detonacija

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

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

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



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

Kazalo:

- 1- fronta udarnog vala,
 - 2- zona kemijskih reakcija,
 - 3- Chapman-Jouguetova ravnina,
 - 4- udarni (tlačni) val u okolnom mediju,
 - 5- ekspandirajući plinoviti produkti,
 - 6- Taylorov val produkata,
- D - brzina detonacije (m/s),
u - brzina produkata (m/s)

2.3.1. Brzina detonacije

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

Brizantnost eksploziva je radni učinak koji taj eksploziv vrši na okolinu. Podaci dobiveni mjerenjem brzine određuju nam gdje će taj eksploziv imati najbolju primjenu.

3. ANFO EKSPLOZIV

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



Slika 3-1. AN-FO eksploziv (Zečić, 2015)

Kako bi dobili eksplozivnu smjesu, amonijev nitrat miješa se s naftom najčešće u omjeru 94,5%AN : 5,5% nafta, sadrži otprilike 4% vlage i potrebno je provesti dvostupanjsko sušenje gdje, uz hlađenje i isparavanje vlage, stvaraju porozne strukture. Omjer 94,5%AN : 5,5% nafta koristi se iz razloga što je bilanca kisika približna nuli. Bilanca kisika, odnosno uravnoteženost kisika, je razlika količine kisika koja se nalazi u sastavu eksploziva (kemijski vezanog) i količine koja je potrebna za potpunu oksidaciju. Amonijev nitrat za izradu

umjetnih gnojiva sadrži vrlo malo vlage (0.3%), odlazi izravno u hladnjak gdje mu se dodaje glina (2.8-3.5%) (Ester, 2005). Osim nafte najčešće se koriste još plinska i mineralna ulja.



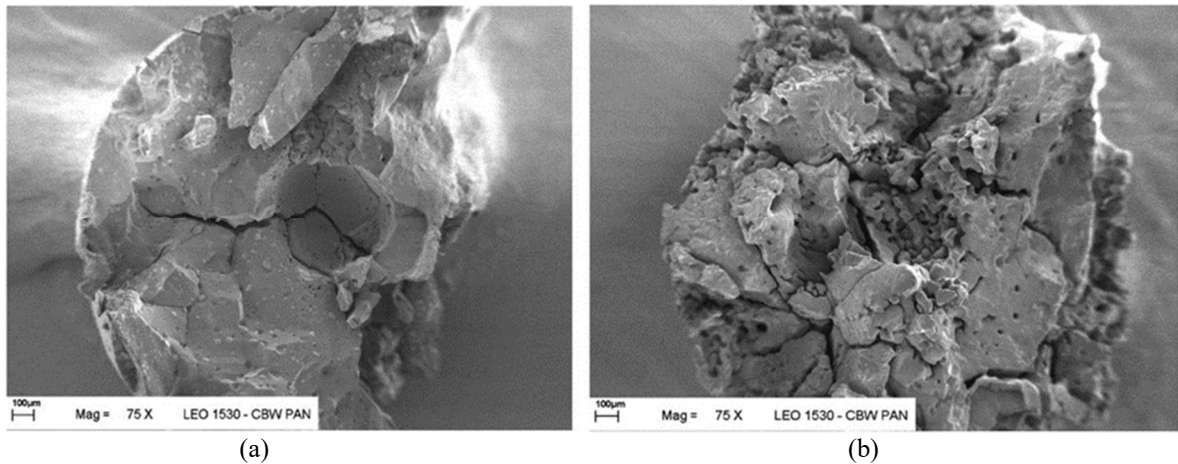
Amonijev nitrat

Gorivo
ANFO

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

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

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



Slika 3-3. Prikaz poprečnog presjeka neporozne kuglice amonijevog nitrata, korištene u poljoprivredi (a) i porozne kuglice nakon apsorpcije nafte $15 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$ u nekoliko termalnih ciklusa (b) (Zygmunt i Buczkowski, 2007.)

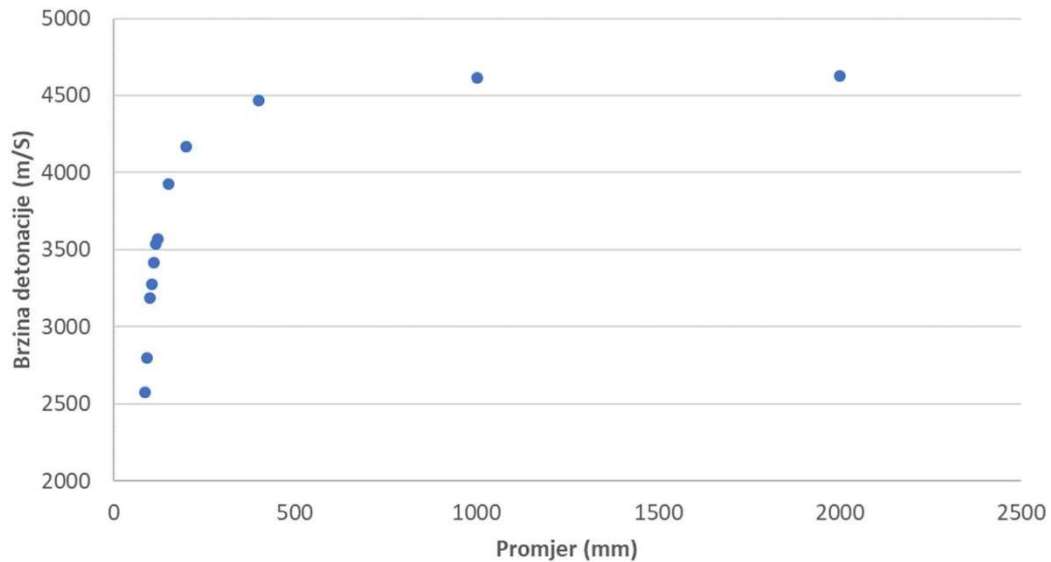
3.1. Dimenzije i poroznost amonijeva nitrata te sadržaj nafte

Dimenzija i poroznost amonijeva nitrata te sadržaj nafte bitni su faktori koji utječu na brzinu detonacije ANFO eksploziva koji uvelike utječe na samu sposobnost ANFO eksploziva da detonira. Tako su Zygmunt i Buczkowski (Zygmunt i Buczkowski, 2007) ispitivali utjecaj dimenzija amonij nitratnih kuglica, poroznosti i sadržaja nafte na brzinu detonacije ANFO eksploziva. U istraživanju su korištene kuglice amonijevog nitrata različitih dimenzijama i mogućnosti adsorpcije nafte. Određivanje brzine detonacije provedeno je u čeličnim cijevima promjera ($\varnothing = 36/39 \text{ mm}$) iniciranim pomoću 14 g RDX(90%):TNT(10%). Korištene su AN kuglice različitih poroznosti i dimenzija (otp. $1,50\text{-}2,50 \text{ mm}$) umiješane s naftom u omjeru $94,5\text{-}5,5\%$. Kuglice koje imaju najveću mogućnost apsorpcije (otp. $12\text{-}15 \text{ cm}^3/100\text{g}$) dala su visoke vrijednosti brzine detonacije, čak i do 2700 m/s , kuglice s apsorpcijskom mogućnošću (otp. $2,50\text{-}3,00 \text{ cm}^3/100\text{g}$) vrijednosti brzine detonacije oko $1600\text{-}1700 \text{ m/s}$, a kuglice s najmanjom apsorpcijskom mogućnošću ($x < 2,50 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$) nisu detonirale. Zaključak je da se povećanjem poroznosti povećava i mogućnost apsorpcije AN, dok gustoća pada i brzina detonacije raste.

3.1.1. Promjer naboja

Na brzinu detonacije eksploziva uvelike utječe promjer patrone odnosno minske bušotine. Ukoliko je promjer nedovoljne veličine detonacija može izostati ili može doći do prekida detonacije. Kritični promjer definira najmanji potrebni promjer da bi se

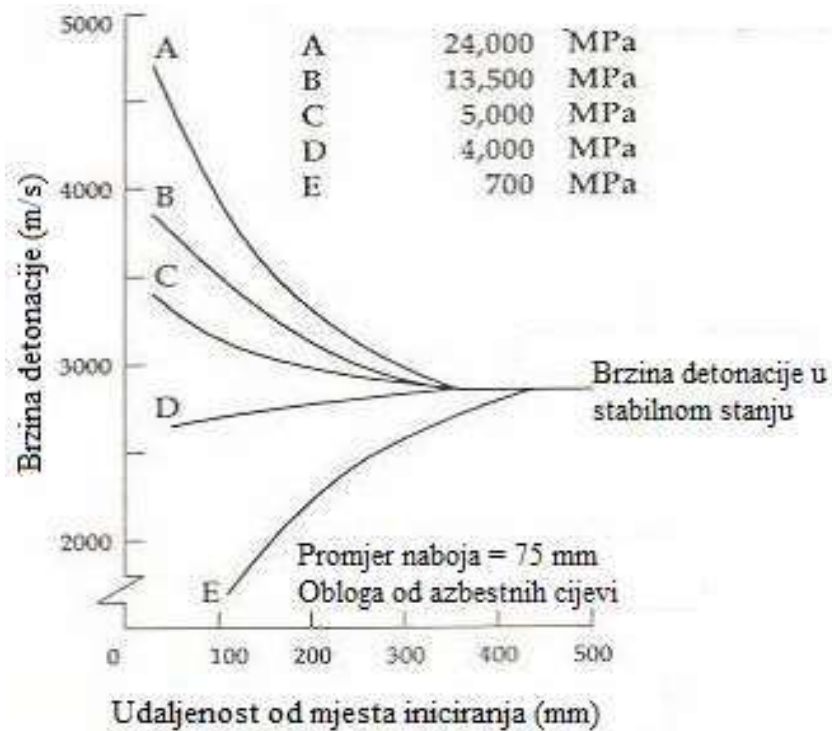
postigla stabilna deformacija za pojedinu eksplozivnu tvar ili smjesu. Na slici 3-4. prikazani su odnosi promjera minske bušotine i brzine detonacije. Iz grafa možemo isčitati nagli pad brzine detonacije s smanjenjem promjera ispod cca 250 mm i stabilizaciju brzine s daljnjimpovećanjem promjera naboja.



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

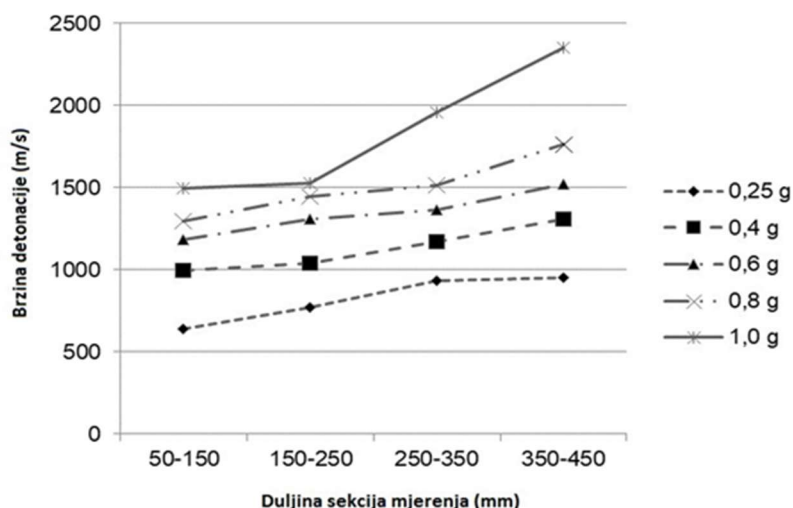
3.1.2. Način iniciranja

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



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

Na slijedećim dijagramima prikazani su međusobni odnosi brzina detonacije primjenom pojačnika prilikom iniciranja eksploziva i bez korištenja pojačnika, rezultati su prikazani u sekcijama mjerenja.

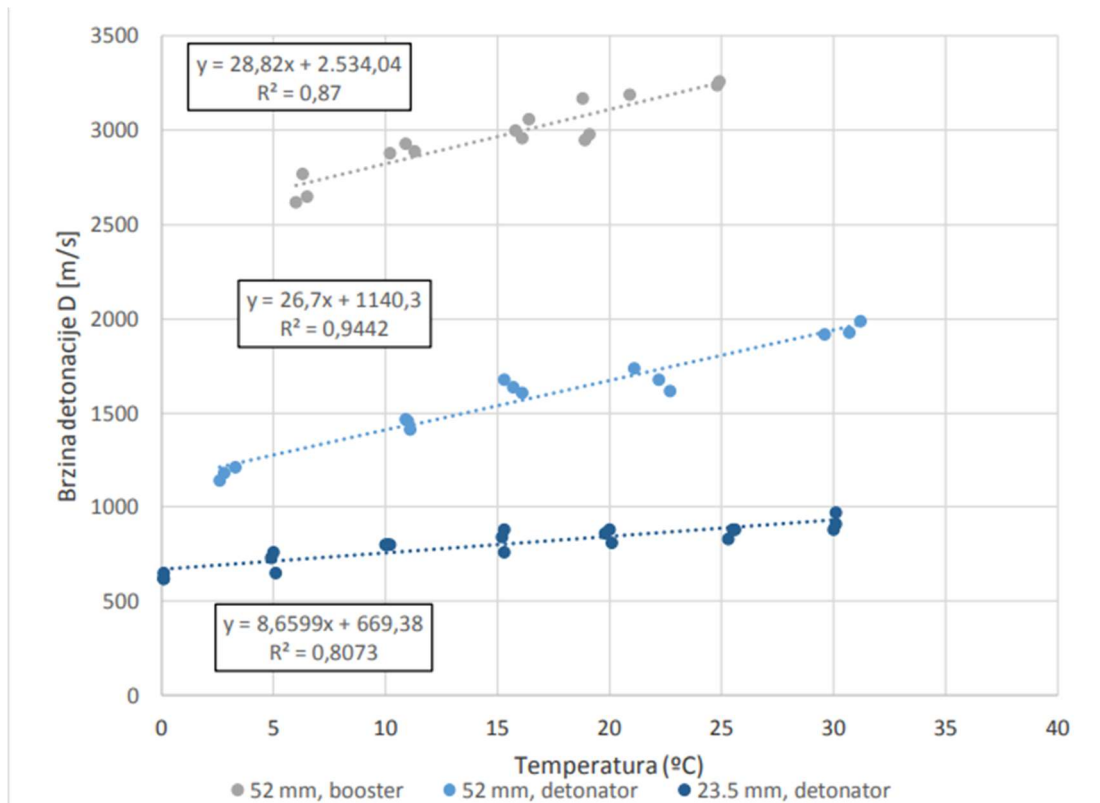


Slika 3-6. Brzina detonacije u pojedinim sekcijama mjerenja za uzroke inicirane detonatorima (Bohanek i dr.,2013.)

Iz rezultata ispitivanja prikazanih na slikama vidljivo je da ANFO eksploziv moguće inicirati u čeličnim cijevima detonatorima s minimalnom količinom eksplozivnog punjenja od 0,25 g. Brzina detonacije ANFO eksploziva raste s porastom mase eksploziva inicirajućeg sredstva. Minimalna izmjerena brzina detonacije iznosila je 590 m/s i izmjerena je prilikom iniciranja bez pojačnika. Maksimalna brzina detonacije iznosi 3367 m/s i izmjerena je prilikom iniciranja eksploziva PETN pojačnikom mase 100 g. Brzina detonacije raste od točke iniciranja prema kraju ispitne cijevi duljine 500 mm za sva inicirajuća sredstva. U svim slučajevima najmanje brzine su izmjerene na prvom segmentu od 50mm do 150 mm, a najveće brzine detonacije su izmjerene na zadnjem segmentu od 350 mm do 450 mm.

3.1.3. Temperatura eksploziva

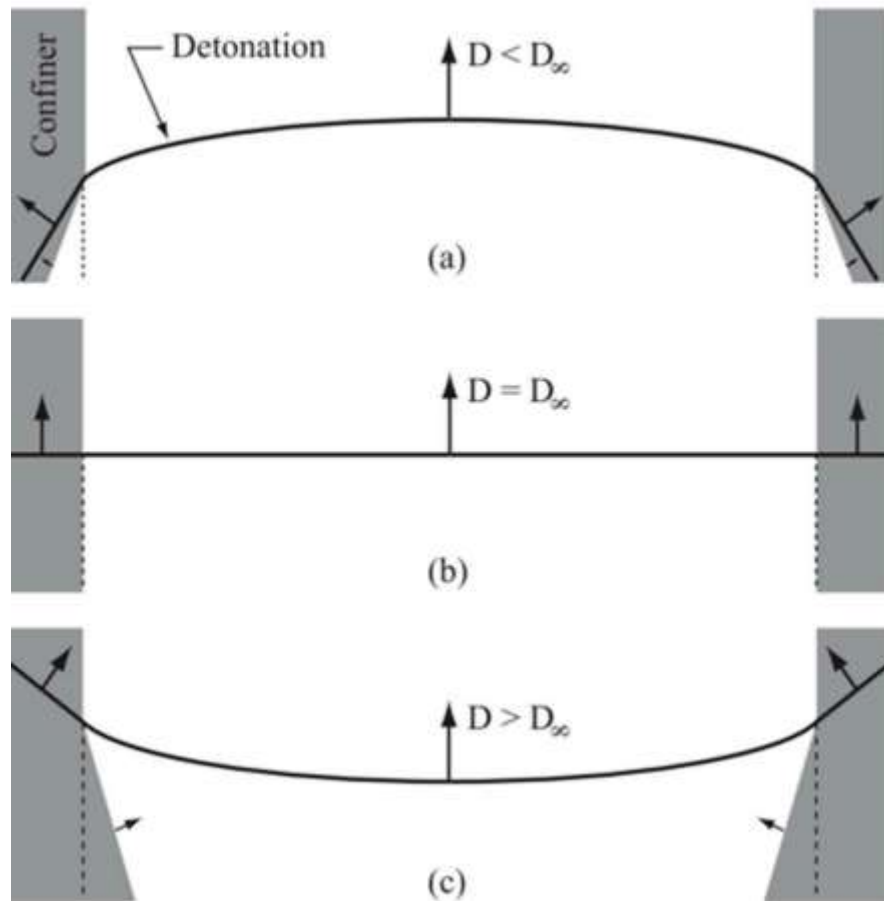
Istraživanje utjecaja same temperature na brzinu detonacije ANFO eksploziva (Dobrilović i dr., 2014). Plavi pravac na slici 3-8. iz kojega iščitavamo manje vrijednosti izmjerene brzine predstavlja iniciranje uporabom detonatora dok drugi pravac predstavlja iniciranje pri kojem je korišten pojačnik. Uzorci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



Slika 3-7. Ispitane brzine detonacije u ovisnosti o temperaturi (Dobrilović i dr., 2014.)

3.2. Utjecaj obloge

Obloga eksplozivnog punjenja ima važnu ulogu kod održavanja stabilne brzine detonacije kod neidealnih eksploziva, te utječe na povećanje brzine detonacije. Trenutno ne postoji model koji može opisati, u cijelosti, kakav je odnos između obloge i ispitivanog eksploziva. Utjecaj obloge se pokazao jako kompleksnim prema dosadašnjim ispitivanjima. Uloga same obloge se može opisati na 3 načina prema slici 3-7.



Slika 3-8. Različiti tipovi obloge: (a)sink, (b)savršena i (c) energetska; (Jackson i dr., 2010.)

Uloga obloge u detonacijskom procesu (slika 3-9) može biti različita:

- ukloniti energiju iz reakcijske zone (tzv. *sink* obloga),
- niti uklanja niti doprinosi energiji (savršena obloga),
- dodati energiju u reakcijsku zonu(energetska obloga)

Pregledom različite literature u navedenom području vidljivo je da se različite vrste obloge ugrubo mogu podijeliti u tri glavne skupine:

- Lagane obloge
- Teške obloge
- Stijena kao obloga

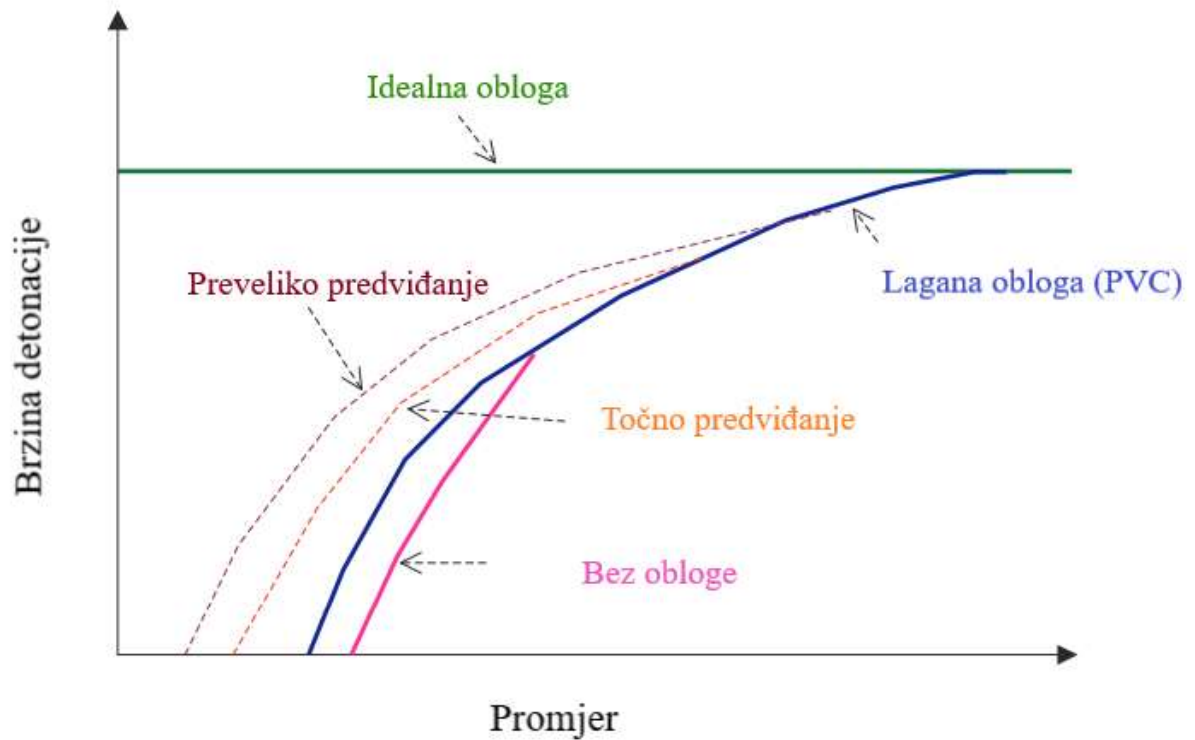
3.2.1. Lagana obloga (*Light confimenet*)

Lagana oblogu predstavlja onaj materijal materijal koji ima manju gustoću od eksploziva kojega testiramo. Obloge korištene pri ispitivanju su lagane su kartonska obloga i PVC obloga sa tankom stijenkom. U dosadašnjim testiranjima zaključeno je da je debljina stijenke lagane obloge zanemariva, te se samo promatra kakav utjecaj ima promjer eksploziva u oblozi na brzinu detonacije i sami uspjeh iste. Prikazana ispitivanja izvedena su na AN-FO eksplozivu te je u tablici 3-2 prikazana rezultati mjerenje brzine detonacije AN-FO eksploziva u različitim promjerima.

Tablica 3-2. Prikaz rezultata mjerenja ANFO eksploziva (Thomas, T.J., 2005.)

Karton Unutarnji promjer/Vanjski promjer	Brzina detonacije (km/h)
44.2/45.6	1.10, 200-400 mm sa pojačnikom dalje neuspjelo
51.4/53.0	1.49
64.2/65.8	2.15
76.8/83.6	2.56
86.6/88.8	2.77
98.2/104.6	3.04
125.8/132.2	3.42
150/158	3.58
178/187	3.92
202/210	4.12

Mjerenja iz tablice nam pokazuju brzine detonacije i koji su kritični promjeri za AN-FO eksploziv. Kod promjera eksploziva od 44.2 mm došlo je do zatajenja kod nekih uzoraka, ali kod onih koji su detonirali izmjerena je brzina od 1.10 km/s. Veći promjeri imaju sve veću brzinu, te smo iz tih podataka došli do grafa kojim predviđamo brzinu detonacije prikazanog u slici 3-10.



Slika 3-9. Prikaz ovisnosti brzine detonacije i promjera eksploziva (Thomas, T.J., 2005.)

Kod promjera manjih od 64 mm korišteni su pojačnici od 130 g, a kod većih promjera korišteni su pojačnici od 400 g. Prikaz rezultata ispitivanja u PVC cijevima se nalazi u tablici 3-3.

Tablica 3-3. Brzine detonacije kod AN-FO eksploziva u PVC cijevima (Thomas, T.J., 2005.)

PVC UP (mm) / VP (mm)	Omjer volumena	Brzina detonacije (m/s)
42.8 / 48.4	0.28	1.41, 1.35, 1.32, 1.25, 1.11, 1.14, neuspješna
45.0 / 48.6	0.17	1.28, 0.96, neuspješna
50.6 / 56.2	0.23	1.68
53.0 / 60.6	0.31	1.99
63.0 / 69.0	0.20	2.38
75.0 / 89.0	0.41	2.96
76.0 / 82.8	0.19	2.70
81.4 / 89.0	0.20	2.89
86.6 / 90.6	0.10	2.77
96.0 / 114.4	0.42	3.56
101.0 / 114.4	0.28	3.31
103.4 / 110.6	0.14	3.26
104.4 / 114.6	0.20	3.17
134.0 / 140.4	0.10	3.44
142.6 / 160.4	0.26	3.62
151.2 / 160.4	0.13	3.43
152.0 / 159.8	0.11	3.55

Iz prikazanih podataka se jasno vidi da je u ispitivanju sa najmanjim promjerom šest puta uspjelo i sedmi put zatajilo. Usporedbom ispitivanja u kartonu i PVC-u vidimo da je brzina detonacije malo veća nego u testu sa kartonom.

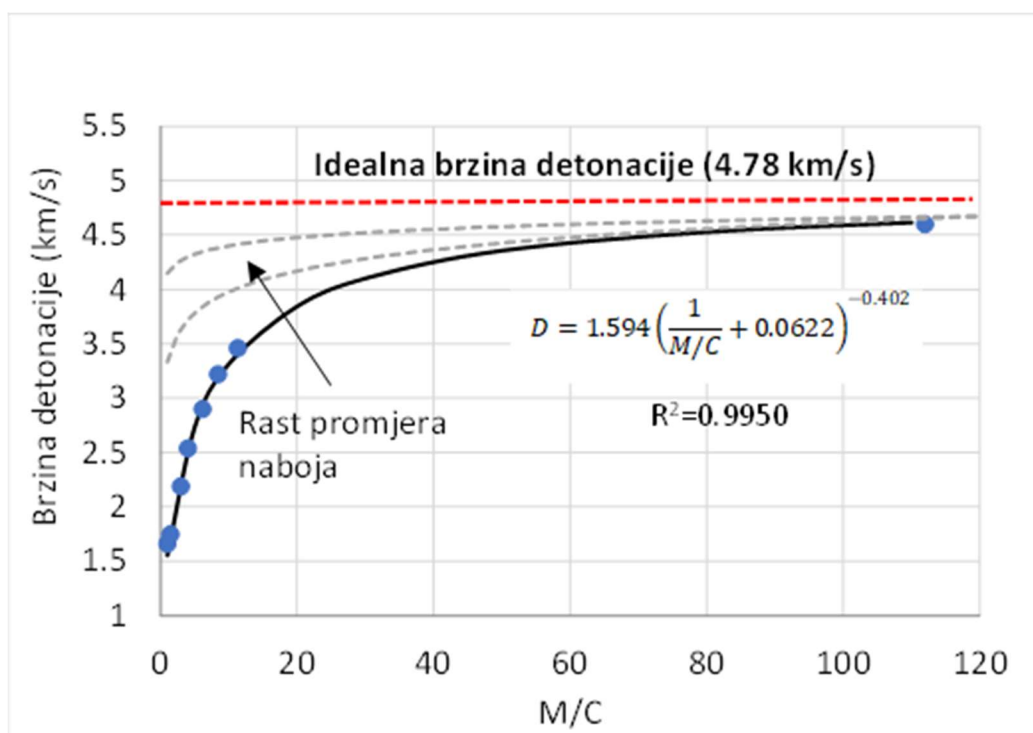
3.2.2. Teška obloga (*Heavy confiment*)

Kao primjer teške obloge u literaturi možemo naći različite metale poput čelika, aluminija i bakra. Primjer mjerenja brzine detonacije ANFO eksploziva u cijevima unutarnjeg promjera od približno 40mm za tri različita metala i različite debljine obloge prikazan je u tablici 3-4

Tablica 3-4. Rezultati mjerenja (Bohanek i dr., 2022.)

Br.	Vrsta obloge	Unutarnji promjer (mm)	Debljina obloge (mm)	Omjer metala i eksploziva	Brzina detonacije (km/s)
1	Steel	39	2,8	3.00	2.19
2	Steel	37	7.1	8.44	3.22
3	Steel	40	10.3	11.31	3.46
4	Al	40	2.5	0.82	*
5	Al	42	4.0	1.45	1.75
6	Al	40	10.0	4.03	2.54
7	Cu	40	1.0	0.99	1.66
8	Cu	40	5.0	6.15	2.90

U tablici 3-4. možemo vidjeti da se kod aluminija dogodio prekid u detonaciji na promjeru punjenja 40 mm. Na 42 mm nije došlo do prekida što nam potvrđuje da je to i kritični promjer. Iz rezultata mjerenja vidljivo je da brzina detonacije ANFO eksploziva kod svih metala raste sa debljinom obloge te da općeniti gledano brzina detonacije veća kod metala koji imaju veću gustoću. Različiti metali obloge i njihova utjecaj na brzinu detonacije ANFO eksploziva izražen je pomoću M/C odnosa za sve metale im prikazana slikom 3-9 i pripadajućom jednadžbom



Slika 3-10. Utjecaj M/C odnosa na brzinu detonacije ANFO eksploziva (Bohanek i dr., 2022.)

3.2.3. Stijena kao obloga (*Rock confinement*)

ANFO eksploziv se koristi u metalnim cijevima prilikom zavarivanja metala eksplozivom ili kod laboratorijskog testiranja brzine detonacije. Većina ANFO eksploziva se koristi za miniranja u rudarstvu i građevinarstvu gdje oblogu čine različite vrste stijena koje imaju i različita fizičko mehanička svojstva. Stoga su pojedini autori izveli ispitivanja s ciljem da utvrde ovisnost brzine detonacije ANFO eksploziva o stijenskom masivu. Konačni cilj je prilagoditi minerske parametre fizičko mehaničkim svojstvima stijene u kojoj se miniranje izvodi. Esen ja izveo ispitivanje u različiti stijenama sa različitim promjerima minskih bušotina. Karakteristike stijena prikazane su u tablici 3-5 a brzine detonacijski parametri za različite promjere bušotina u tablici 3-6

Tablica 3-5. Svojstva netaknute stijene (Esen, S., 2003.)

Vrsta stijene	Gustoća (g/cm ³)	P-valovi brzina	S-valovi brzina	Youngov modul	Poissonov koeficijent
Kimberlit	2.264	2521	1381	11.0	0.28
Monzonit	2.693	5023	2655	49.6	0.31
Hematit	4.220	5830	-	142.0	-

Tablica 3-6. Usporedba sposobnosti ANFO eksploziva na različitim promjerima stijene kao obloge (Esen, S., 2003.)

	165			250			Razlika		
	Kimberlit	Monzonit	Hematit	Kimberlit	Monzonit	Hematit	Kimberlit	Monzonit	Heomatit
D (km/s)	3.927	4.005	4.071	4.325	4.374	4.416	9.2	8.4	7.8
P (GPa)	3.212	3.350	3.483	3.954	4.067	4.146	18.8	17.6	16.0
ν (cm ³ /g)	0.984	0.983	0.979	0.957	0.951	0.946	2.8	3.4	3.5
γ	0.720	0.766	0.873	0.873	0.887	0.889	17.5	13.6	9.8

Kod stijene kao obloge stijena se odabire na temelju karakteristika kao što su čvrstoća i gustoća te drugi parametri koji nam pomažu u procjeni učinka detonacije. Ovi podaci se koriste za optimizaciju postupaka kako bi se postigla željena učinkovitost u razaranju stijene.

4. MJERENJE

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

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

Metode za određivanje brzine detonacije možemo podijeliti na:

- optičke metode
- diskontinuirane
- kontinuirane MJERENJE

U svrhu dokazivanja utjecaja debljine metalne obloge i promjera eksploziva na brzinu detonacije ANFO eksploziva provedeno je terensko ispitivanje na poligonu Ljubeščica Za izmjeru korištena je elektrooptička metoda pomoću elektroničkog sata Explomet 2. Brzina detonacija mjerila 2 segmenata, razmak između osjetila iznosio je 150 mm



Slika 4-1. Explomet 2 uređaj (KONTINITRO, 2019)

Mjerenja su izvedena na cijevima duljine 60 cm. Cijevi su izrađene od Aluminija i čelika različitih debljini stijenke i mase. U tablici 4.1. dane su karakteristike cijevi, a na slici 4-2. postav ispitivanja.

Tablica 4-1. Karakteristike cijevi

Br.	Confinement material	UP	W	M/C
		(mm)	(mm)	
1	Čelik	89	5	3.24
2	Čelik	89	5	3.35
3	Čelik	98	10	6.33
4	Čelik	98	10	6.21
5	Aluminij	89	5.1	0.96
6	Aluminij	89	5.1	0.95
7	Aluminij	79	2.5	0.49
8	Aluminij	79	2.5	0.49

Legenda:

- UP – unutarnji promjer
- W – debljina obloge ,
- M/C - metal/eksploziv,



Slika 4-2. *Postav ispitivanja*

Za iniciranje su korišteni su pojačnici komercijalnog naziva nazivom APG 20"Mini Booster". Karakteristike pojačnika dane su u tablici 4-2.

Tablica 4-2. APG 20 pojačnika

Promjer (mm)	20
Duljina (mm)	90
Masa eksploziva (g)	20
Ukupna masa (g)	29
Gustoća eksplozivnog punjenja (kg/m ³)	> 1500
Brzine detonacije eksploziva (m/s)	> 6500

5. REZULTATI I ANALIZA REZULTATA MJERENJA

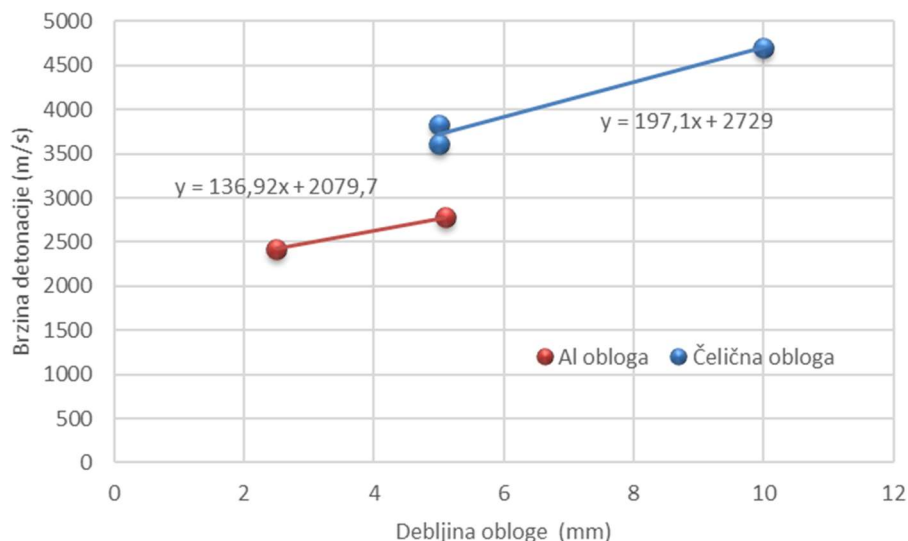
Rezultati mjerenja dobiveni primjenom elektroptičke metode mjerenja brzine detonacije ANFO eksploziva dani su u Tablici 5-1 a na slici 5-2. dan je grafički prikaz utjecaja debljine stijenske na izmjerenu brzinu detonacije ANFO eksploziva.

Tablica 5-1. Rezultati terenskog ispitivanja

Br.	Confinement material	VP	W	M/C	VoD
		(mm)	(mm)		(km/h)
1	Čelik	89	5	3.24	3.826
2	Čelik	89	5	3.35	3.603
3	Čelik	98	10	6.33	*
4	Čelik	98	10	6.21	4.7
5	Aluminij	89	5.1	0.96	*
6	Aluminij	89	5.1	0.95	2.778
7	Aluminij	79	2.5	0.49	2.422
8	Aluminij	79	2.5	0.49	*

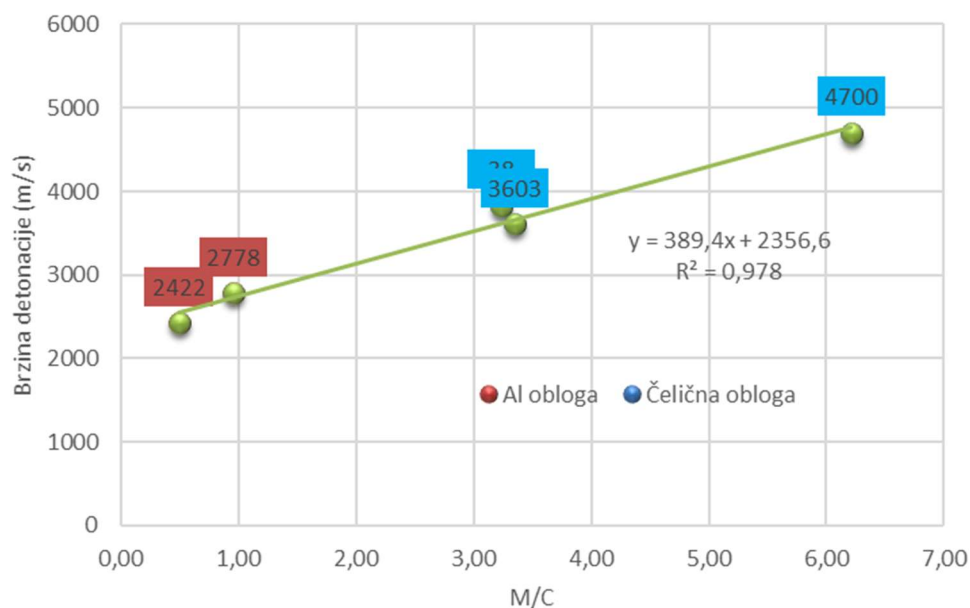
Legenda:

- VP – vanjski promjer
- W – debljina obloge ,
- M/C - metal/exploziv,
- VoD – brzina detonacije,
- * - mjerenje nije uspjelo



Slika 5-1. Utjecaj debljine obloge na izmjerenu brzinu detonacije ANFO eksploziva

Iz slike 5.1 vidljivo je da pri istom promjeru i debljini obloge i istom unutarnjem promjeru postoji značajna razlika u izmjerenim brzinama detonacije eksploziva ANFO eksploziva. Posljedica je to gustoće pojedinog metala koji utječe na ukupnu masu obloge. Premda cijevi od aluminija i čelika mogu imati isti promjer i debljinu stijenke, masa cijevi se značajno razlikuje. Stoga je na slici 5.2 prikazan utjecaj odnosa M/C na izmjerenu brzinu detonacije za oba metala zajedno.



Slika 5-2. Utjecaj M/C na izmjerenu brzinu detonacije ANFO eksploziva

6. ZAKLJUČAK

Temeljem provedenih ispitivanja na terenu možemo potvrditi da vrsta obloge i promjer utječu na brzinu detonacije ANFO eksploziva. Iz pregleda literature vidljivo je da obloga osim na brzinu detonacije ANFO eksploziva utječe i na kritični promjer eksploziva. Kod obloge promjera 40 mm od aluminijske manje debljine došlo je do prekida detonacije. Kod većih promjera od 80 mm, pri identičnoj debljini obloge, uzorci od čelika imaju veću izmjerenu brzinu detonacije što je posljedica veće gustoće i mase obloge. Za svaki od metala dana je jednačica kojom je utvrđena linearna ovisnost između brzine detonacije ANFO eksploziva i debljine. Kada su oba metala grupirana zajedno, preko M/C odnosa, a utvrđena je zajednička jednačica s visokim stupnjem korelacije ($R^2=0,978$) koja pokriva M/C raspon od 0,5 do 6,5. Premda postoji i druge karakteristike metala koje mogu utjecati na brzinu detonacije ANFO eksploziva, prema rezultatima ispitivanja gustoća metala ima presudan značaj.

7. LITERATURA

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

BOHANEK, V.; SUĆESKA, M.; DOBRILLOVIĆ, M.; HARTLIEB, P. 2022 Effect of Confinement on Detonation Velocity and Plate Dent Test Results for ANFO Explosive. *Energies* 15, 4404.

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

ESEN, S., 2003. A Statistical Approach to Predict the Effect of Confinement on the Detonation Velocity of Commercial Explosives, *Rock Mech. Rock Engng.* (2004) 37 (4), 317–330 DOI 10.1007/s00603-004-0026-3

ESEN, S., 2006. A Non-Ideal Detonation Model for Evaluating the Performance of Explosives in Rock Blasting, *Rock Mech. Rock Engng.* (2008) 41 (3), 467–497 DOI 10.1007/s00603-006-0119-2

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

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

JACKSON, S.I., 2015. The dependence of Ammonium-Nitrate Fuel-Oil (ANFO) detonation on confinement, <http://dx.doi.org/10.1016/j.proci.2016.09.027> (13.06.2023)

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

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

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

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

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

THOMAS, T.J., 2005. An evaluation of the confinement provided by pvc and cardboard pipes in unconfined detonation velocity measurements

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

ŽGANEC S., BOHANEK, V., DOBRILOVIĆ, M. Influence of a primer on the velocity of detonation of ANFO and Heavy ANFO blends. Central european journal of energetic materials 13 (3), str. 701-711.

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

