

# TNT ekvivalent prilikom izračuna seizmičkog utjecaja miniranja

---

Olivani, Josip

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:535996>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-21**



*Repository / Repozitorij:*

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



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

**TNT EKVIVALENT PRILIKOM IZRAČUNA SEIZMIČKOG UTJECAJA  
MIIRANJA**

Diplomski rad

Josip Olivani

R293

Zagreb, 2023.



KLASA: 602-01/23-01/209  
URBROJ: 251-70-11-23-2  
U Zagrebu, 15.12.2023.

**Josip Olivani, student**

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/23-01/209, URBROJ: 251-70-11-23-1 od 04.12.2023. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

### TNT EKVALENT PRILIKOM IZRAČUNA SEIZMIČKOG UTJECAJA MIIRANJA

Za voditelja ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada Doc.dr.sc. Siniša Stanković nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu

Voditelj

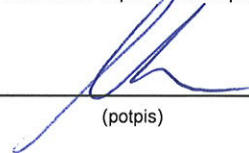


(potpis)

Doc.dr.sc. Siniša Stanković

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za  
završne i diplomske ispite:

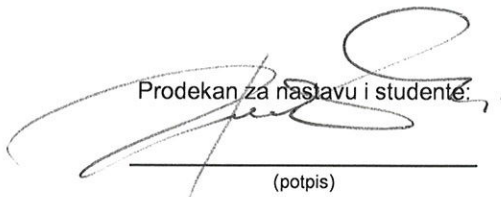


(potpis)

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)

TNT EKVIVALENT PRILIKOM IZRAČUNA SEIZMIČKOG UTJECAJA MINIRANJA

Josip Olivani

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

Sažetak

Eksplzivne tvari su kemijski spojevi ili smjese koje imaju sposobnost da detoniraju pod utjecajem vanjskog, energetskog impulsa. Za bolje razumijevanje karakteristika nekog eksploziva, valja imati referencu, odnosno eksploziv sa čijim bi se svojstvima usporedila svojstva promatranog eksploziva. Zato se računa TNT ekvivalent. Za potrebe ovog rada analizirat će se TNT ekvivalent u smislu brzine oscilacija prilikom miniranja.

Ključne riječi: Miniranje, eksplozivi, TNT ekvivalent, seizmički utjecaji, EXPLO5  
Završni rad sadrži: 49 stranice, 12 tablica, 20 slika i 30 reference.  
Jezik izvornika: Hrvatski  
Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb  
Mentori: Dr. sc. Siniša Stanković, docent RGNF  
Ocjenjivači: Dr. sc. Siniša Stanković, docent RGNF  
Dr. sc. Vinko Škrlec, izvanredni profesor RGNF  
Dr. sc. Vječislav Bohanek, izvanredni profesor RGNF

## TNT EQUIVALENCE WHILE CALCULATING SEISMIC IMPACT OF BLASTING

Josip Olivani

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

### Abstract

Explosive substances are chemical compounds or mixtures that could detonate under the influence of an external, energetic impulse. For a better understanding of the characteristics of an explosive, it is necessary to have a reference, that is, an explosive with whose properties the properties of the observed explosive would be compared. That is why the TNT equivalent is calculated. For the purposes of this work, the TNT equivalent will be analyzed in terms of the speed of oscillations during blasting.

Keywords: Blasting, explosives, TNT equivalence, seismic impact of blasting, EXPLO5

Thesis contains: 49 pages, 12 tables, 20 figures, i 30 references.

Original in: Croatian

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

Supervisors: Assistant Professor Siniša Stanković, PhD

Reviewers: Assistant Professor Siniša Stanković, PhD  
Associate professor Vinko Škrlec, PhD  
Associate professor Vječislav Bohanek, PhD

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	6
2. CILJEVI RADA .....	7
3. EKSPLOZIVI .....	8
3.1. Eksplozija i eksplozivne tvari .....	9
3.2. Razvoj eksploziva.....	11
3.3. Svojstva eksploziva .....	13
3.3.1. Minersko – tehničke karakteristike eksploziva.....	14
4. KARAKTERISTIKE TNT-A.....	18
5. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA .....	20
5.1. Značajke miniranja i vrijednosti TNT ekvivalenta za neke prizemno detonirane komercijalne eksplozive .....	20
5.2. Procjena ekvivalentnosti eksploziva termokemijskim pristupom .....	28
5.3. Analiza kriterija za određivanje TNT ekvivalenta.....	28
5.4. Vrijednosti TNT ekvivalenta zračnog udara za niz komercijalnih eksploziva	30
5.5. Problematika TNT ekvivalenta .....	33
6. ISPITIVANJA .....	34
7. SEIZMIČKI UTJECAJ MINIRANJA.....	36
7.1. Određivanje brzine oscilacija tla.....	37
7.2. Norme za određivanje dozvoljenih brzina oscilacija tla ili stijenskih masa.....	39
8. REZULTATI .....	41
8.1. Osnove brzine oscilacija tla uzrokovane detonacijom .....	41
8.2. Obrada podataka u EXPLO5 termokemijskom kodu .....	42
8.3. Korelacija rezultata Trauzl testa i detonacijskih parametara .....	45
8.4. Analiza rezultata .....	47
9. ZAKLJUČAK.....	50
10. LITERATURA .....	51

## POPIS SLIKA

Slika 3-1. Shematski prikaz eksplozije (Dobrilović, 2008).....	9
Slika 3-2. Kemijska eksplozija prilikom miniranja (Hustrulid, 2011) .....	10
Slika 3-3. Shematski prikaz detonacije u patroni eksploziva (Sućeska, 2001) .....	11
Slika 3-4. Crni barut (HIGHBROW, 2022).....	12
Slika 3-5. Mjerenje brzine detonacije po metodi Dautriche (Krsnik, 1989) .....	14
Slika 3-6. Određivanje radne sposobnosti eksploziva Trauzlovom probom (Krsnik, 1989) .....	15
Slika 3-7. Uređaj za određivanje osjetljivosti eksploziva (Mueller instruments, n. d.).....	16
Slika 3-8. Hessova proba (Krsnik, 1989) .....	17
Slika 4-1. Strukturna formula TNT-a (Šipek, 2017) .....	18
Slika 5-1. Plan poligona za testiranje (Formby i Wharton, 1996).....	21
Slika 5-2. Idealni zračni udarni val (Krsnik, 1989).....	22
Slika 5-3. Promjene udarnog tlaka u ovisnosti o udaljenosti (Krsnik, 1989).....	24
Slika 5-4. Krivulja netipičnog udarnog vala (Formby i Wharton, 1996) .....	25
Slika 5-5. Krivulja tipičnog udarnog vala (Formby i Wharton, 1996).....	25
Slika 5-6. Shema eksplozivnog naboja (Wharton et al, 2000) .....	31
Slika 5-7. Plan ispitivanja (Wharton et al, 2000) .....	32
Slika 6-1. Raspored mjerenja (Škrlec, 2015).....	34
Slika 7-1. Dijagram granica brzina čestica za određene tipove konstrukcija u funkciji frekvenciji prema DIN 4150 (Stanković, 2011) .....	40
Slika 8-1. Korisničko sučelje EXPLO5 (Sućeska et al, 2021) .....	43
Slika 8-2. Graf produkta topline detonacije i volumena detonacijskih produkata te rezultata Trauzl testa .....	46

## POPIS TABLICA

Tablica 4-1. Minersko - tehničke karakteristike TNT-a (Krsnik, 1989) .....	19
Tablica 6-1. Brzine oscilacija .....	35
Tablica 7-1. Granične vrijednosti brzina oscilacija prema normi DIN 4150 .....	39
Tablica 8-1 Detonacijski parametri izračunati putem EXPLO5 koda.....	44
Tablica 8-2 TNT ekvivalent izražen u postocima .....	47
Tablica 8-3 TNT ekvivalentna težina .....	48
Tablica 8-4 Jednadžba bez TNT za pravac 1 .....	48
Tablica 8-5 Jednadžba sa TNT za pravac 1 .....	48
Tablica 8-6 Jednadžba bez TNT za pravac 2.....	49
Tablica 8-7 Jednadžba sa TNT za pravac 2.....	49
Tablica 8-8 Usporedba rezultata za pravac 1.....	49
Tablica 8-9 Usporedba rezultata za pravac 2.....	49



## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Mjerna jedinica	Značenje
TNT	-	Trinitrotoluen
T	°K	Temperatura
V	Kg/dm <sup>3</sup>	Volumen
p	bar	Tlak
W	kJ/g	Toplina
$Q_E$		Količina energije po kilogramu eksploziva
$Q_{ekv}$	kg	Ekvivalentna količina eksploziva
$Q$	kg	Količina eksploziva
$Q_{TNT}$	MJ/kg	Količina energije po kilogramu TNT-a
$TNT_e$		TNT ekvivalent
$m_{TNT}$	kg	Masa TNT eksploziva koji stvara jednak vršni pretlak udarnog vala na istoj udaljenosti
$m_x$	kg	Masa korištenog eksplozivnog naboja
$D_E$	m/s	Brzina detonacije eksploziva
$D_{TNT}$	m/s	Brzina detonacije TNT-a
$d$	cm	Odsječak na y osi krivulje grafa ekvivalenta topline detonacije TNT-a
$m$		Nagib ravne krivulje grafa ekvivalenta topline detonacije TNT
$p_{CJ}$	bar	Tlak detonacije
$Z$	m/kg <sup>(1/3)</sup>	Omjer udaljenosti od eksploziva i trećeg korijena mase naboja
$I$		Impuls tlaka
$v, PPV$	cm/s, mm/s	Brzina oscilacija tla
$D$	m	Udaljenost između minskog polja i mjesta opažanja
$W$	kg	Masa jednovremenog detoniranog eksplozivnog punjenja

$x$		EkspONENT količine punjenja
$y$		EkspONENT faktora stijene
$k_m$		Koeficijent načina miniranja
$R$	m	Udaljenost između minskog polja i mjesta opažanja
$n_p$		Koeficijent prigušenja seizmičkih valova na putu širenja
$H$		Koeficijent miniranja
$\beta$		Koeficijent prigušenja
$SD$	$\text{m/kg}^{1/2}$	Svedena udaljenost
$W_{exp}$	kg	Masa stvarnog eksploziva
$H_{TNT}^d$	MJ/kg	Oslobodena toplina pri detonaciji TNT-a

## 1. UVOD

Razvoj eksploziva u velikoj mjeri zasluga je rudarske djelatnosti i ljudske potrebe za pridobivanjem čvrstih mineralnih sirovina. Time je došao kraj teškom fizičkom radu i korištenju ručnih alata za drobljenje stijena. Tehnologiju bušenja i miniranja u svrhu pridobivanja mineralnih sirovina predložio je Martin Weigel 1613. godine u Freibergu u Njemačkoj, a prvi zapis o uspješnoj primjeni nove tehnologije seže u 1617. godinu kada je izvedeno miniranje u Schemintzu. Tom prilikom korištena je energija crnog baruta, pirotehničke smjese kalijeva nitrata, sumpora i drvenog ugljena koja se smatra prvim eksplozivom u povijesti (Dobrilović et al, 2019).

Dakle, eksplozivi i eksplozivne tvari su nedvojbeno unaprijedili ljudsku civilizaciju. Iako postoje oni kojima će prva asocijacija na eksplozive biti negativna u pogledu vojnih razaranja, to ne treba biti slučaj. Naime, dobro je poznata činjenica kako je švedski znanstvenik Alfred Nobel, osnivač zaklade za poticanje znanosti, umjetnosti i mira, izumio i pronašao moderne eksplozive koje je isključivo smatrao alatima za dobrobit čovječanstva (Dobrilović et al, 2019).

Danas postoje razne primjene eksplozije i eksplozivnih tvari, počevši od najpoznatijih poput u rudarskoj industriji za dobivanje sirovina i prilikom izrade podzemnih prostorija i tunela, u građevinskoj, poljoprivrednoj i vojnoj industriji te za sigurno uklanjanje, odnosno rušenje građevinskih i drugih objekata (Krsnik, 1989). Nadalje, eksplozivi se upotrebljavaju u borbi protiv elementarnih nepogoda, u metalurgiji za obradu metala, u sustavima za katapultiranje pilota i za zaštitu vozača automobila zračnim jastukom i slično (Sućeska, 2001).

Moć eksploziva krije se u velikoj količini potencijalne energije. Ukoliko se žele ukloniti negativne konotacije vezane uz eksplozive, potrebno je poznavati proces eksplozije te sastav i karakter eksplozivnih tvari kako bi se omogućilo odgovorno korištenje istih. Drugim riječima, potrebno je mnogo znanja i iskustva za kontrolirano i pravilno rukovanje eksplozivima uz poštivanje zakona te mjera zaštite (Ester i Dobrilović, 2016).

S obzirom da ne postoji točno određena metoda po kojoj bi se opisao ili vrednovao eksploziv, koristi se TNT ekvivalent, koji je u upotrebi dugi niz godina u vojne svrhe i za istraživanje i razvoj eksploziva (Cooper, 1994). Svrha TNT ekvivalenta jest da se svojstva određenog eksploziva usporede sa svojstvima TNT-a kako bi se stekao dojam o kakvom se eksplozivu radi.

## 2. CILJEVI RADA

Osnovni ciljevi rada su:

- Objasniti značaj eksploziva za razvoj čovječanstva,
- Iskoristiti TNT kao svojevrsan etalon, odnosno mjerilo za određivanje učinka ostalih eksploziva kako bi se lakše vrednovala i pojasnila svojstva drugih eksploziva a u svrhu proračuna seizmičkog utjecaja miniranja.

Da bi se navedeni ciljevi ostvarili, potrebno je poznavati povijest i razvoj eksploziva te karakteristike i svojstva Trinitrotoluena, odnosno TNT-a. Primjerice, voda je jedan od najbitnijih kemijskih spojeva. Gustoća tvari se često uspoređuje s gustoćom vode, odnosno iskazuje se relativna gustoća. Na taj način lakše je predočiti fizikalnu veličinu gustoće tvari.

Prema tome, zadaća TNT ekvivalenta je pobliže opisati karakteristike i svojstva drugih eksploziva uspoređujući ih s karakteristikama TNT-a.

### 3. EKSPLOZIVI

Eksplozivi ili eksplozivne tvari su kemijski spojevi ili smjese koje imaju sposobnost da detoniraju pod utjecajem vanjskog, energetskog impulsa, odnosno da se kemijski razlažu u vrlo kratkom vremenu pritom oslobađajući znatnu količinu topline i plinova (Krsnik, 1989). Nadalje, eksploziv se smatra materijalom koji pod utjecajem egzotermne kemijske reakcije prelazi u produkte raspadanja koji imaju znatno veći volumen od početnog (Ester, 2005).

Osnovne značajke eksplozivnih tvari su:

- Potencijalna energija temeljena na kemijskoj strukturi eksplozivnih tvari,
- Brzo razlaganje prikladnim iniciranjem,
- Stvaranje plinovitih produkata s istovremenim oslobađanjem energije (Agrawal, 2010).

Eksplozive prema namjeni dijelimo na inicijalne, brizantne, rudarske ili gospodarske te specijalne eksplozive (Krsnik, 1989). Rudarski ili gospodarski eksplozivi predstavljaju sve eksplozive koji se upotrebljavaju za miniranje u privredi. Smatraju se energetskim materijalima koji eksplozivnom pretvorbom mijenjaju potencijalnu kemijsku energiju u kinetičku energiju udarnih valova i energiju ekspanzije plinovitih produkata kemijske reakcije (Škrlec, 2015).

U pravilu, gospodarski eksplozivi su smjese sastavljene od:

- Goriva – kemijskih spojeva koji su nositelji ugljika i vodika,
- Oksidansa – nositelja kisika (najčešće je riječ o nitratima),
- Senzibilizatora – monomolekularnog eksploziva koji služe za poticanje stabilne detonacije (Škrlec, 2015).

Za pravilan odabir eksploziva, potrebno je uskladiti potrebe projekta sa svojstvima eksploziva. Neka od najvažnijih svojstava su stabilnost i brzina detonacije, snaga, gustoća, vodootpornost, sigurnost pri upotrebi, osjetljivost na iniciranje i drugi koji će se detaljnije obraditi u narednim poglavljima.

Valja napomenuti da prema kemijskom sastavu eksplozive dijelimo na:

- ANFO (*eng. Amonium nitrate fuel oil*)
- Plastične,
- Amonij – nitratno praškaste,
- Vodoplastične ili slurry,

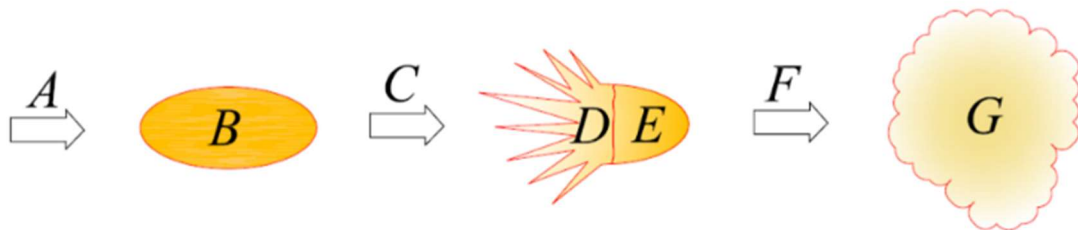
- Emulzijske eksplozive (Škrlec, 2015).

U današnje vrijeme, ANFO eksplozivi su jedni od najupotrebljavanijih. Sastoje se od amonijevog nitrata i goriva, najčešće nafte.

### 3.1. Eksplozija i eksplozivne tvari

Eksplozija predstavlja vrlo brzu pretvorbu početne tvari ili sustava uz ekspanziju nastalih plinovitih produkata i pretvorbu potencijalne energije u mehanički rad. Dakle, eksplozija je egzotermna reakcija pri kojoj dolazi do naglog prijelaza ili oslobađanja energije. Termin eksplozija nastao je od latinske riječi *explodere*, što znači raspasti se (Škrlec, 2015).

Na slici 3-1. prikaza je shema eksplozivnog procesa.



Slika 3-1. Shematski prikaz eksplozije (Dobrilović, 2008)

Tumač simbola:

- A – inicijalni impuls,
- B – neporemećena eksplozivna tvar ( $t \approx 20$  °C,  $v \approx 0,2-1,5$  kg/dm<sup>3</sup>,  $p \approx 1$  bar),
- C – proces pretvorbe,
- D – plinoviti produkti,
- E – neporemećena eksplozivna tvar,
- F – nagla ekspanzija plinovitih produkata,
- G – plinoviti produkti u ekspanziji ( $T \approx 2000-5000$  °K,  $V \approx 1000$  kg/dm<sup>3</sup>,  $p \approx 105$  bar,  $Q \approx 3,5-7,5$  kJ/g).

Eksplozije se dijele na fizikalne, nuklearne i kemijske. Kod fizikalnih eksplozija dolazi do fizikalnog oslobađanja ili pretvorbe jednog oblika energije u drugi bez promjena

kemijskog sastava tvari, dok kod kemijskih eksplozija dolazi do naglog razlaganja tvari pri čemu se odvija pretvorba u plinovito stanje uz oslobađanje toplinske energije. S druge strane, nuklearne eksplozije su procesi pretvaranja nuklearne energije u toplinsku (Škrlec, 2015).

Na slici 3-1. prikazana je kemijska eksplozija prilikom miniranja na površinskom kopu u svrhu pridobivanja mineralnih sirovina.



**Slika 3-2.** Kemijska eksplozija prilikom miniranja (Hustrulid, 2011)

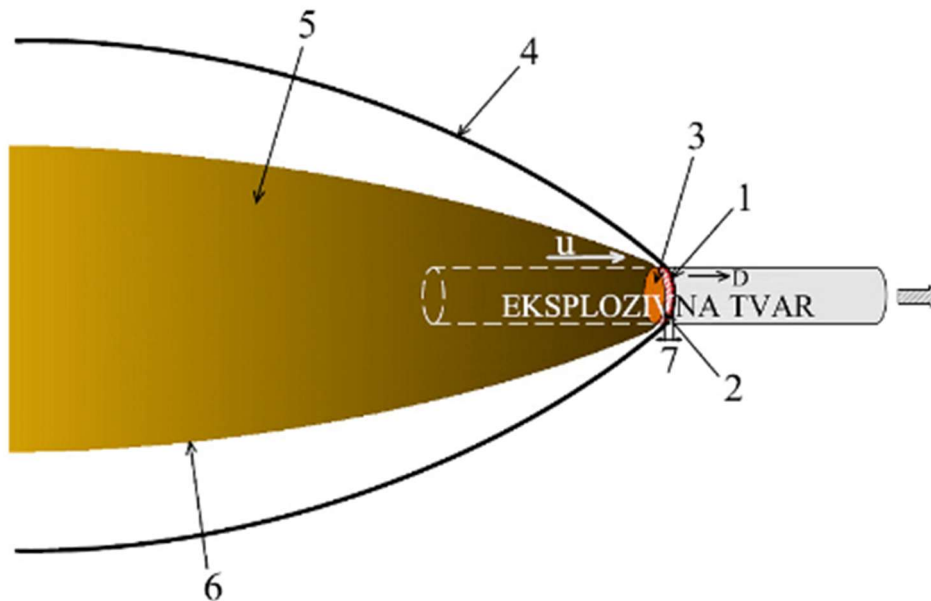
Eksplozija se može odviti na dva načina – detonacijom ili sagorijevanjem. Pojedine eksplozivne tvari ne mogu iz sagorijevanja razviti detonaciju, stoga je potrebno dovesti energiju u obliku inicijalnog impulsa odgovarajuće jačine.

Iniciranje detonacije može nastati na sljedeće načine (Škrlec, 2015):

- Dovođenjem topline eksplozivnoj tvari,
- Prelaskom sagorijevanja u detonaciju (inicijalni eksplozivi),
- Djelovanjem udarnog impulsa i toplim točkama (sekundarni eksplozivi).

Detonacija se širi mehanizmom toplih točaka, defekata ili uključaka u eksplozivnoj tvari koji postaju centri za daljnje širenje reakcije. Fronta udarnog vala, zona visokostlačnog eksplozivnog materijala, prethodi fronti kemijskih reakcija. Reakcija se odvija u vremenu  $10^{-5}$  s.

Na slici 3-3 prikazana je detonacija u patroni eksploziva.



Slika 3-3. Shematski prikaz detonacije u patroni eksploziva (Sućeska, 2001)

Tumač simbola:

- 1 – fronta udarnog vala,
- 2 – zona kemijskih reakcija,
- 3 – Chapman – Jouguetova ravnina,
- 4 – udarni val u okolnom mediju,
- 5 – ekspanzirajući plinoviti produkti,
- 6 – Taylorov val produkata,
- 7 – detonacijski val,
- D – brzina detonacije,
- u – brzina produkata.

### 3.2. Razvoj eksploziva

Barut ili „crni prah“ smatra se prvim eksplozivom u povijesti. Pronalazak baruta posljedica je slučajnosti prilikom oplemenjivanja ruda, odnosno odvajanja zlata i srebra iz pirita ili halkopirita koji sadrže sumpor, inače jedan od sastojaka baruta. Kineski alkemičar dodao je kalijev nitrat u rudu, a potom i drveni ugljen za povećanje temperature i dogodila



se eksplozija (Dobrilović et al, 2019). Dakle, barut je smjesa kalijevog nitrata, sumpora i drvenog ugljena i nalazi se na slici 3-4.



**Slika 3-4.** Crni barut (HIGHBROW, 2022)

Smatra se da se barut isprva koristio kao vatromet isključivo u svrhu zabave, a tek kasnije kao puščani prah i naposljetku u rudarstvu. Već u 17. stoljeću postoje zapisi o upotrebi crnog baruta u rudnicima u Mađarskoj i Njemačkoj, a do početka 18. stoljeća miniranje crnim barutom postala je opće prihvaćena i primjenjivana tehnologija u površinskim i podzemnim rudnicima te izradi tunela (Dobrilović et al, 2019).

Problematika sigurnog paljenja baruta dovela je do otkrića sprogorećeg štapina. William Bickford je stavio barut u cjevčicu od jutenog pletiva s vanjskom zaštitom i poznao je duljinsko vrijeme gorenja štapina, što je omogućilo veću sigurnost pri miniranju.

Christian Schonbein pronašao je nitrocelulozu tretirajući pamuk s dušičnom kiselinom. U jednakim količinama, nitroceluloza bila je razornija i proizvodila je manje dima nego barut.

Ascanio Sobrero prvi je sintetizirao nitroglicerina miješajući glicerina s dušičnom kiselinom.

Veliku ulogu u razvoju modernih eksploziva imao je Alfred Nobel. Nastavio je očevu tradiciju i bavio se razvojem eksplozivnih sredstava. Izumio je prvi detonator koji je kontrolirano mogao navesti nitroglicerina na eksploziju. Sastojao se od izmjerene količine nitroglicerina koji je bio u kontaktu s limenom, zatvorenim spremnikom s barutom, koji je

bio spojen sa štapinom za kontrolirano inciranje. Miješanjem nitroglicerina s glinom bogatom silicijem dobio je eksplozivnu mješavinu neosjetljivu na udarce koja se mogla grijati do topljenja, a detonacijom se oslobađala dvadeset puta veća energija nego kod crnog baruta. Takvu mješavinu nazvao je dinamit i ona je u potpunosti zamijenila barut (Dobrilović et al, 2019).

Valja napomenuti i sljedeće:

- Alfred Nobel je patentirao razornu želatinu 1875,
- H. Julius Smith je 1878. napravio prvu napravu za električno iniciranje detonatora,
- 1884. počinje široka upotreba amonij nitrata za proizvodnju eksploziva,
- 1902. zabilježena prva upotreba detonirajućeg štapina u Europi,
- 1956. prva upotreba ANFO eksploziva i vodoplastičnih eksploziva,
- 1969. prva upotreba emulzijskih eksploziva (Škrlec, 2015).

### 3.3. Svojstva eksploziva

Kada se govori o svojstvima eksploziva, valja krenuti od onih koja ovise o kemijskom sastavu eksploziva:

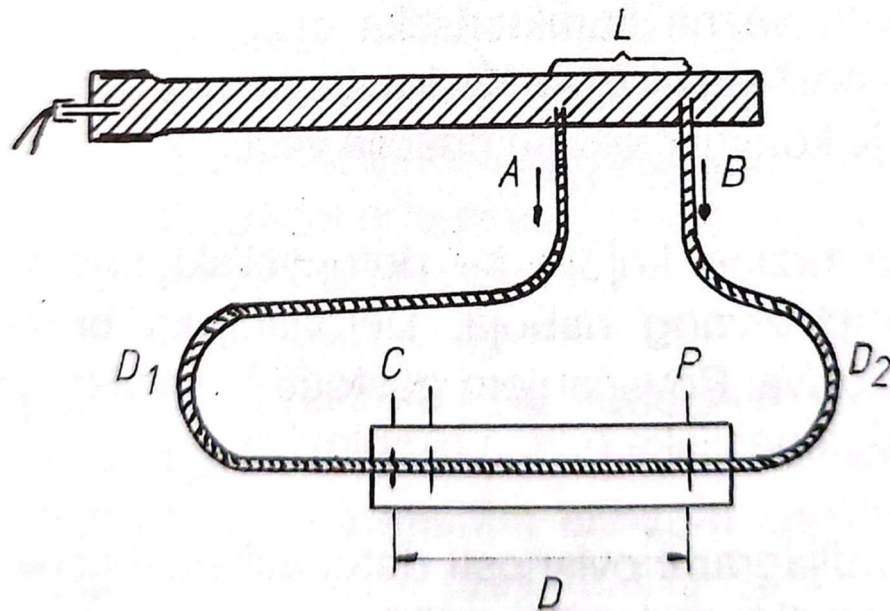
- **Osjetljivost** predstavlja otpornost eksploziva na početni impuls koji dovodi do detonacije. Takvim eksplozivima dodaju se senzibilizatori za povećanje osjetljivosti, a suviše osjetljivima dodaju se flegmatizatori kako bi isti bili sigurni za rukovanje (Krsnik, 1989).
- **Detonabilnost** određena je minimalnom količinom inicijalnog eksploziva s kojom se dotični može dovesti do detonacije. Mjerilo detonacijske sposobnosti je kritični promjer, odnosno kritična masa eksploziva. Odnos detonacijske sposobnosti i kritične mase eksploziva je obrnuto proporcionalan – detonacijska sposobnost je veća, što je kritična masa eksploziva manja (Krsnik, 1989).

Utjecaj **gustoće eksploziva** na brzinu detonacije i tlak udarnog vala izrazito je velik. Uz konstantan promjer patrone, povećavanjem gustoće detonacijska brzina raste do kritične granice, tj. kritične gustoće iznad koje nema mogućnosti detoniranja. Nadalje, bitno je spomenuti da na učinak miniranja bitno utječe gustoća eksplozivnog punjenja i koeficijent punjenja minskog prostora (Krsnik, 1989).

### 3.3.1. Minersko – tehničke karakteristike eksploziva

**Brzina detonacije** je iznimno važna minerska karakteristika. Označava brzinu kojom se detonacijski udarni val širi od mjesta iniciranja do kraja naboja. Brizantnost eksploziva, odnosno razorna snaga ovisi o detonacijskoj brzini. Prilikom veće brzine detonacije, manji su gubici topline, što podrazumijeva veći korisni učinak detonacije (Krsnik, 1989).

Kao što je ranije rečeno, detonacijska brzina ovisi o gustoći i promjeru patrone eksploziva. Jedna od metoda po kojoj se određuje je Dautriche koja se nalazi na slici 3-5.



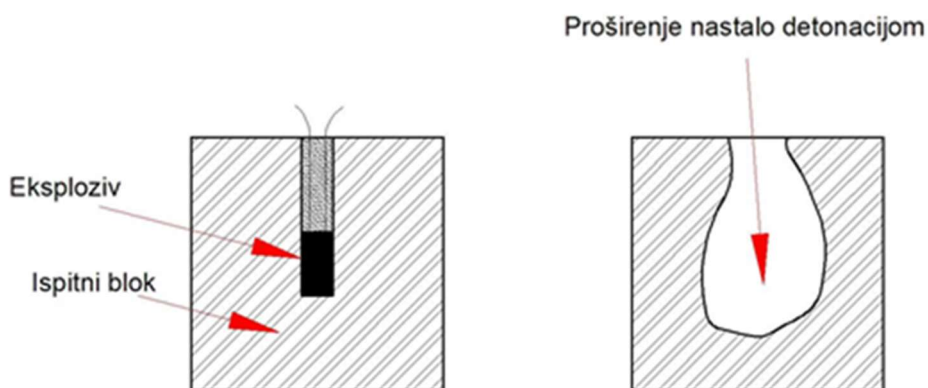
Slika 3-5. Mjerenje brzine detonacije po metodi Dautriche (Krsnik, 1989)

Patrona eksploziva postavi se u cijev određenog promjera i duljine koja je otvorena s obje strane. Na cijevi se nalaze dvije rupe  $A$  i  $B$  na točno određenom razmaku u koje se stave krajevi detonirajućeg štapina, čiji su drugi krajevi međusobno povezani i položeni na olovnu ploču određenih dimenzija koja je smještena na većoj, željeznoj ploči.

Nakon iniciranja, detonacijski udarni val se širi nepoznatom brzinom kroz patronu eksploziva u cijevi. Prilikom nailaska detonacijskog vala na prvu rupu u cijevi, štapin duljine  $D_1$  dovede se do detonacije, a prilikom nailaska na drugu rupu isto se događa sa štapinom duljine  $D_2$ . Na mjestu sudara valova jednog i drugog štapina nastat će vidljiva udubina  $P$ .

Konačno, izmjeri se udaljenost od točke C, odnosno sredine detonirajućih štapina do točke P. Brzina detonacije ispitivanog eksploziva je umnožak poznate brzine detonacije detonirajućeg štapina te omjera duljine L i 2D (Krsnik, 1989).

**Radna sposobnost** eksploziva prema Trauzlu određuje se u olovnom cilindru u kojem se nalazi bušotina. Na dno bušotine stavi se određena količina naboja zajedno s trenutnim električnim detonatorom. Detonacijom eksploziva bušotina će se proširiti, a zatim će se izmjeriti volumen proširenja razlikom volumena bušotine nakon i prije miniranja (slika 3-6).



**Slika 3-6.** Određivanje radne sposobnosti eksploziva Trauzlovom probom (Krsnik, 1989)

**Osjetljivost na udar** od iznimne je važnosti za sigurno rukovanje eksplozivima. Kao što je spomenuto u uvodu poglavlja, osjetljivost eksploziva ovisi o kemijskom sastavu.

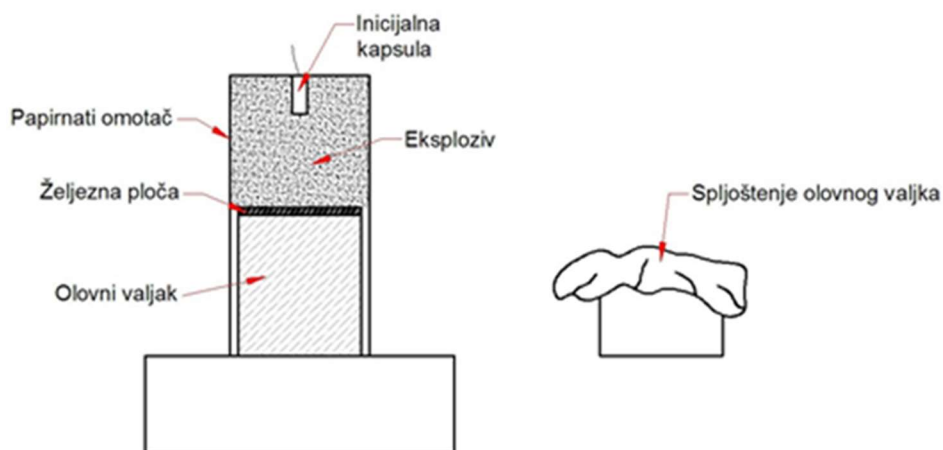
Jedna od metoda kojom se određuje osjetljivost na udar naziva se „*Bam fallhammer*“ metoda. Ispitivanje se provodi spuštanjem utega od 2 kilograma (slika 3-7) u kojem se nalazi eksploziv. Mjerilo osjetljivosti je visina s koje se 6 puta spušta navedeni uteg, a da pritom ne dođe do detonacije.



**Slika 3-7.** Uređaj za određivanje osjetljivosti eksploziva na udar (Mueller instruments, n. d.)

**Prijenos detonacije** je najveći razmak između dvije patrone eksploziva pri kojem se detonacija jedne patrone prenosi na drugu. Ispitivanje se sastoji od polaganja dvaju eksploziva na ravnu, pješčanu podlogu. Patrone moraju ležati na istom pravcu i na razmaku od 4 centimetra. Jedna se patrona dovede do detonacije i ukoliko istu prenese na drugu patronu, postupak se ponavlja sve dok se ne odredi maksimalan razmak prilikom kojeg još uvijek dolazi do detonacije (Krsnik, 1989).

Razorno djelovanje eksploziva naziva se **brizantnost**. Jedna od metoda koje se koriste za određivanje brizantnosti eksploziva zove se Hessova proba. Tanki, čelični cilindar s eksplozivom se stavi na dva olovna valjka. Kao posljedica detonacije, valjci se spljošte i veličina spljoštenosti u milimetrima označava brizantnost (slika 3-8).



Slika 3-8. Hessova proba (Krsnik, 1989)

Bilanca kisika predstavlja odnos količine kisika koju sadrži eksploziv i količine kisika potrebne za potpuno sagorijevanje. Suficit kisika nakon eksplozije podrazumijeva pozitivnu bilancu kisika, a deficit negativnu bilancu. Potrebno je da svi gospodarski eksplozivi imaju malo pozitivnu ili uravnoteženu bilancu.

Plinovi eksplozije prilikom negativne bilance kisika bi sadržavali znatne količine ugljičnog monoksida zbog nepotpunog sagorijevanja. S druge strane, jača pozitivna bilanca kisika podrazumijeva stvaranje dušikovih oksida.

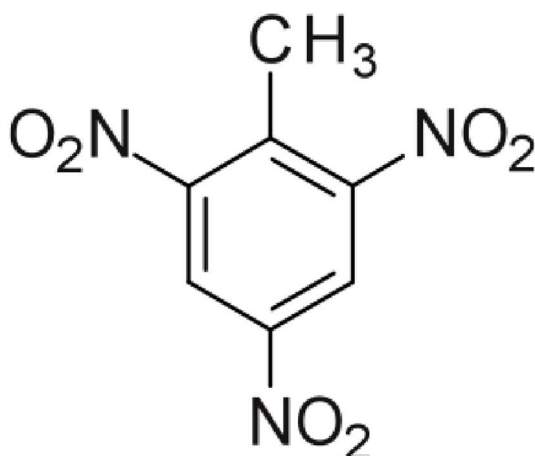
Bitno je naglasiti da prilikom proračuna bilance kisika treba uzeti u obzir kisik potreban za sagorijevanje obloge patrone. Prema tome:

- Uravnotežena bilanca – oslobađanje maksimalne količine energije naboja,
- Negativna bilanca – oslobađanje manje količine energije zbog nepotpunog sagorijevanja,
- Jače pozitivna – trošenje potencijalne energije na endotermne reakcije pri stvaranju otrovnih dušikovih oksida (Krsnik, 1989).

#### 4. KARAKTERISTIKE TNT-A

Trinitrotoluen ili skraćeno TNT izumljen je 1863. godine. Izumio ga je njemački kemičar Julius Wilbrand, iako ga je kasnije proizvelo još nekoliko kemičara. Prvotna namjena mu je bila kao žuto bojilo. Potencijal za korištenje u obliku eksplozivnog sredstva isprva nije bio prepoznat zbog iznimne neosjetljivosti i slabije razornosti od ostalih eksploziva (Brown, 1998). Tridesetak godina kasnije počeo se proizvoditi na industrijskoj razini, a nakon 1901. počeo se koristiti u vojne svrhe. Na slici 4-1. nalazi se strukturna formula TNT-a.

Danas je poznat kao vojni eksploziv i služi kao osnovno punjenje granata i bombi. Zbog male osjetljivosti na udar siguran je za rukovanje i transport. Što se tiče korištenja u industriji, može se koristiti isključivo za površinska miniranja zbog jako negativne bilance kisika (Krsnik, 1989).



Slika 4-1. Strukturna formula TNT-a (Šipek, 2017)

TNT je gotovo netopiv u vodi, a slabo topljiv u alkoholu. Proizvodi se nitracijom toluena s dušičnom i sumpornom kiselinom u nekoliko koraka. U nitraciji sudjeluje samo dušična kiselina, a sumporna upija vodu koja se dobiva kao produkt nitracije (Meyer et al, 2007).

Kemijski je stabilan i ne reagira s metalima. Osim za punjenje granata i bombi, koristi se i kao dodatak amonijsko – nitratnim eksplozivima radi poboljšanja detonacijske sposobnosti i brizantnosti (Krsnik, 1989).

Minersko – tehničke karakteristike trotila navedene su u tablici 4-1.

**Tablica 4-1.** Minersko - tehničke karakteristike TNT-a (Krsnik, 1989)

Gustoća	Radna sposobnost	Osjetljivost na udar	Brzina detonacije	Volumen plinova eksplozije	Temperatura eksplozije	Toplina eksplozije	Bilanca kisika
g/cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	cm	m/s	dm <sup>3</sup> /kg	°C	kJ/kg	%
1,55	305	90	6900	750	2950	4228,7	-74



## 5. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

U ovom poglavlju obaviti će se pregled dosadašnjih relevantnih istraživanja na temu TNT ekvivalenta.

### 5.1. Značajke miniranja i vrijednosti TNT ekvivalenta za neke prizemno detonirane komercijalne eksplozive

U ovom radu analizirane su značajke miniranja i vrijednosti TNT ekvivalenta za 4 različita komercijalna eksploziva prizemno inicirana. TNT ekvivalent je široko primjenjivan za usporedbu učinka naboja energetskog materijala s karakteristikama TNT-a. Ta primjena je proširena s eksplozivnih tvari na eksploziju prašine i oblaka pare, gdje je analogija s TNT ekvivalentom manje prikladna (Formby i Wharton, 1996).

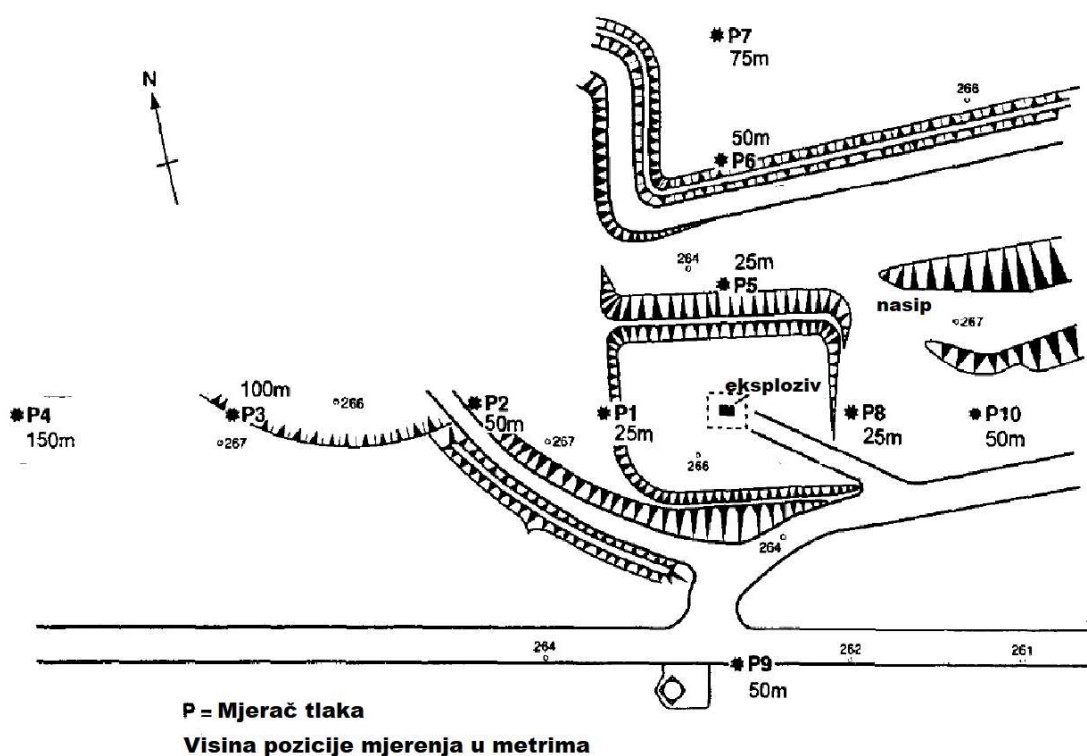
Izvršno tijelo za zdravlje i sigurnost (eng. *Health and Safety Executive*) zainteresirano je za procjenu TNT ekvivalenta, dobivanje zakona skaliranja i proizvodnju tehnika predviđanja za učinke eksplozije bliskog i dalekog polja niza eksploziva i energetskih materijala. Postrojenje za mjerenje pritiska eksplozije nedavno je izgrađeno i pušteno u rad na lokaciji Laboratorija za zdravlje i sigurnost u Buxtonu kako bi se omogućilo provođenje detaljne studije u ovom području. Ispitivanja su se provela na poligonu za miniranje. Pretvarači tlaka postavljeni na površinu korišteni su za praćenje tlakova nastalih iniciranjem četiri komercijalna eksploziva koja se često koriste na razini tla. Ovaj rad predstavlja analizu i interpretaciju eksperimentalnih podataka dobivenih iz navedenih ispitivanja.

Odabrani eksplozivi karakteristični su po širokom rasponu vrijednosti detonacijske brzine i snage balističkog testiranja. Eksplozivi su bili postavljeni unutar hemisferičnih čahura približnog kapaciteta od 7 litara, debljine stijenke od 2 milimetra i unutarnjeg promjera 340 milimetara. Svaka čahura bila je obložena iznutra i izvana s glazurom za osiguravanje stupnja vodonepropusnosti. Dvoustruki naboji su pripremljeni za svaki tip eksploziva, s tim da se masa svakog naboja razlikovala zbog raspona gustoće eksploziva (Formby i Wharton, 1996).

Eksplozivni naboji su bili opremljeni detonatorom Nobel 8 (i pojačivačkim punjenjem ako je potrebno) smještenim u podnožju naboja prije postavljanja ploče 600 mm x 600 mm x 3 mm na vrh plastičnog filma. Sklop naboja je zatim preokrenut i postavljen na podlogu od pijeska koja je izravnata prije svakog ispitivanja (Formby i Wharton, 1996).

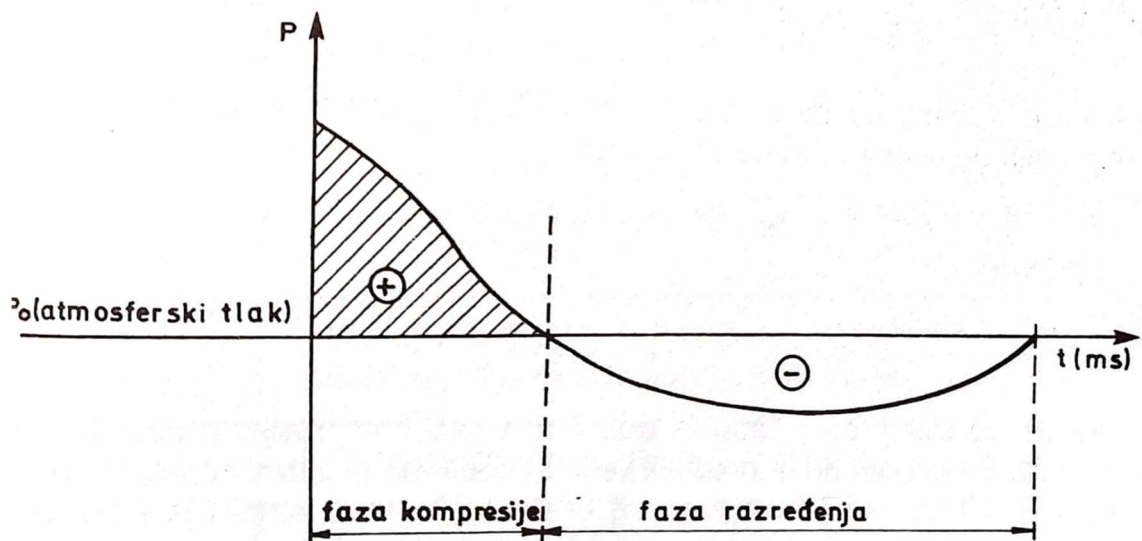
Mjerenja tlaka izvršena su pomoću deset piezoelektričnih mjerača. Mjerači su postavljeni u ravnini s razinom tla na 25, 50, 75, 100 i 150 metara od mjesta iniciranja. Svaka pozicija mjerenja imala je svoje specifičnosti, od nadmorske visine do prirodnih zapreka poput zemljanih nasipa i slično.

Kao što je vidljivo na slici 5-1, mjerači 1 do 4 i 8 te 10 su bili na istoj visini i u horizontalnoj liniji s mjestom iniciranja, dok su mjerači 5, 6, 7 i 9 bili pod pravim kutem, ali na nižoj nadmorskoj visini od mjesta iniciranja. Iako su mjerači na nižim razinama (5, 6, 7 i 9) zadovoljavajući za bilježenje pretlakova iz takvih događaja, od njih bi se očekivalo da daju niske rezultate za eksplozije na razini tla. Također, očekuje se da prisustvo zemljanih nasipa oko mjesta iniciranja može utjecati na rezultate prizemnih mjerača, posebice zbog refleksije udarnih valova od prepreke (Formby i Wharton, 1996).



Slika 5-1. Plan poligona za testiranje (Formby i Wharton, 1996)

Prije nego što se krene u analizu rezultata testiranja, valja se upoznati s pojmom zračnog udarnog vala. Dakle, pri detonaciji eksplozivnog naboja kao posljedica naglog povećanja tlaka plinova nastaje zračni udarni val (slika 5-2).



Slika 5-2. Idealni zračni udarni val (Krsnik, 1989)

Zračni udarni val može se podijeliti na fazu kompresije i fazu razrijeđenja, kao što je vidljivo na prethodnoj slici. U fazi kompresije, odnosno pretlaka, zrak se kreće u pravcu širenja zračnog udarnog vala, dok se u fazi razrijeđenja, odnosno podtlaka, zrak kreće u obrnutom pravcu.

Čimbenici koji utječu na tlak zračnog udarnog vala su:

- Količina i vrsta eksploziva,
- Udaljenost od središta eksplozije,
- Položaj naboja,
- Način iniciranja punjenja,
- Oblik i konfiguracija okolnog terena,
- Vremenski uvjeti u trenutku iniciranja eksplozivnog naboja.

Tlak zračnog udara proporcionalan je količini eksploziva koja detonira u jednom trenutku. Ovisnost tlaka udarnog vala o količini punjenja je eksponencijalna funkcija.

Kada se priča o utjecaju vrste eksploziva, svojstva eksploziva koja utječu na zračni udar su:

- Brzina detonacije,
- Količina energije i volumen plinova po jedinici mase,
- Specifični tlak eksplozije,
- Gustoća eksploziva.

Različite veličine tlaka zračnog udara nastaju kao posljedica različitih svojstava eksploziva. Upravo iz tog razloga praktično je izračunati za svaku vrstu eksploziva ekvivalentnu količinu u odnosu na eksploziju TNT-a:

$$Q_{ekv} = \frac{Q_E}{Q_{TNT}} \times W \quad (5-1)$$

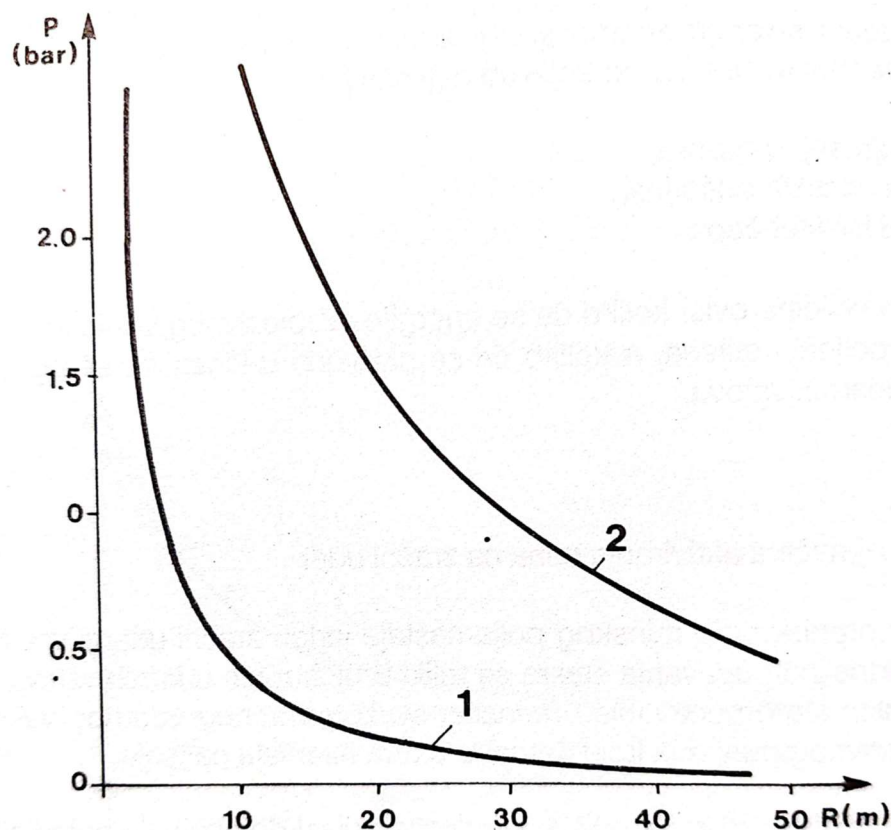
Gdje su:

- $Q_E$  – toplina detonacije po kilogramu eksploziva (kJ/kg)
- $Q_{TNT}$  – količina energije po kilogramu TNT-a (kJ/kg)
- $W$  – količina eksploziva (kg)

Valja se osvrnuti i na ovisnost tlaka udara o udaljenosti od središta eksplozije. Tlak u fronti zračnog, udarnog vala obrnuto je proporcionalan s udaljenošću od središta eksplozije. Dakle, povećavanjem udaljenosti nastaje pad tlaka zbog povećanja količine zraka zahvaćene zračnim udarom i smanjenja energije zračnog udarnog vala koja je potrošena na zagrijavanje i premještanje zraka (Krsnik, 1989).

S obzirom da je napomenuto kako se nalazi nekoliko prepreka u obliku zemljanog nasipa, utjecaj okolnog terena na zračni udar predstavlja važan čimbenik. Razlikuju se uvjeti širenja udarnog vala u podzemnim prostorijama i na površini terena. U podzemlju je znatno smanjeno rasipanje energije, a nastaje međusobno usmjereno djelovanje s valovima odbijenim od zidova prostorije, što povećava tlak u zajedničkom udarnom valu.

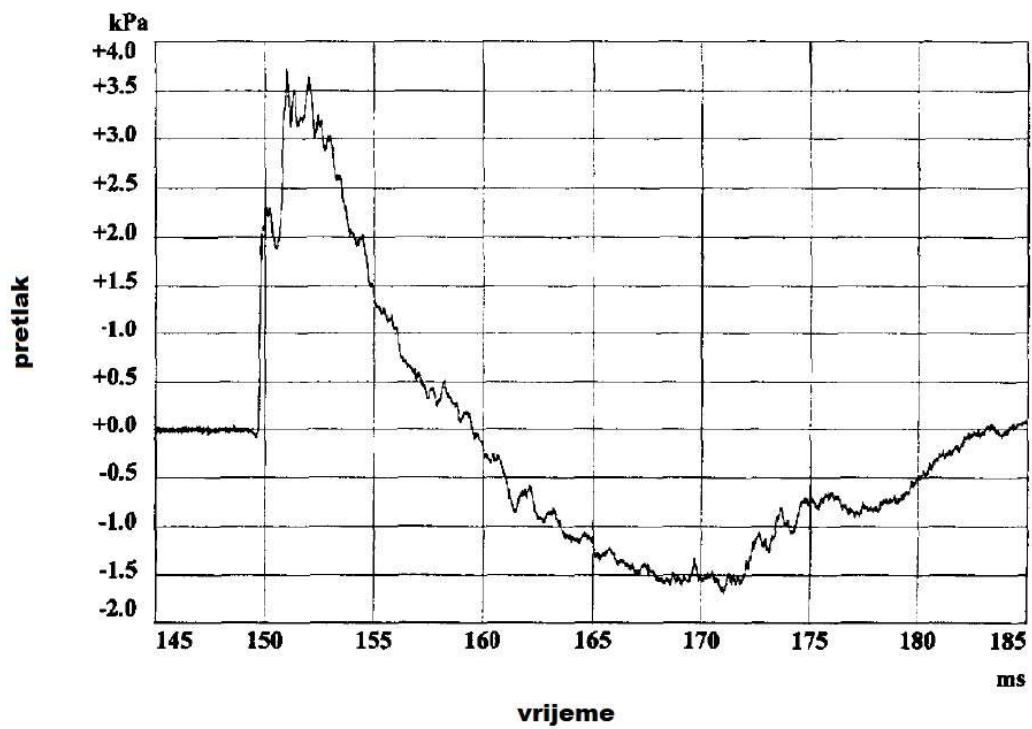
Na slici 5-3 prikazane su krivulje promjene tlaka za različite udaljenosti na površini (1) i u podzemnim prostorijama (2). Vidljivo je kako se na površini terena tlak znatno smanjuje već nakon 10 metara udaljenosti, što nije slučaj za podzemne prostorije.



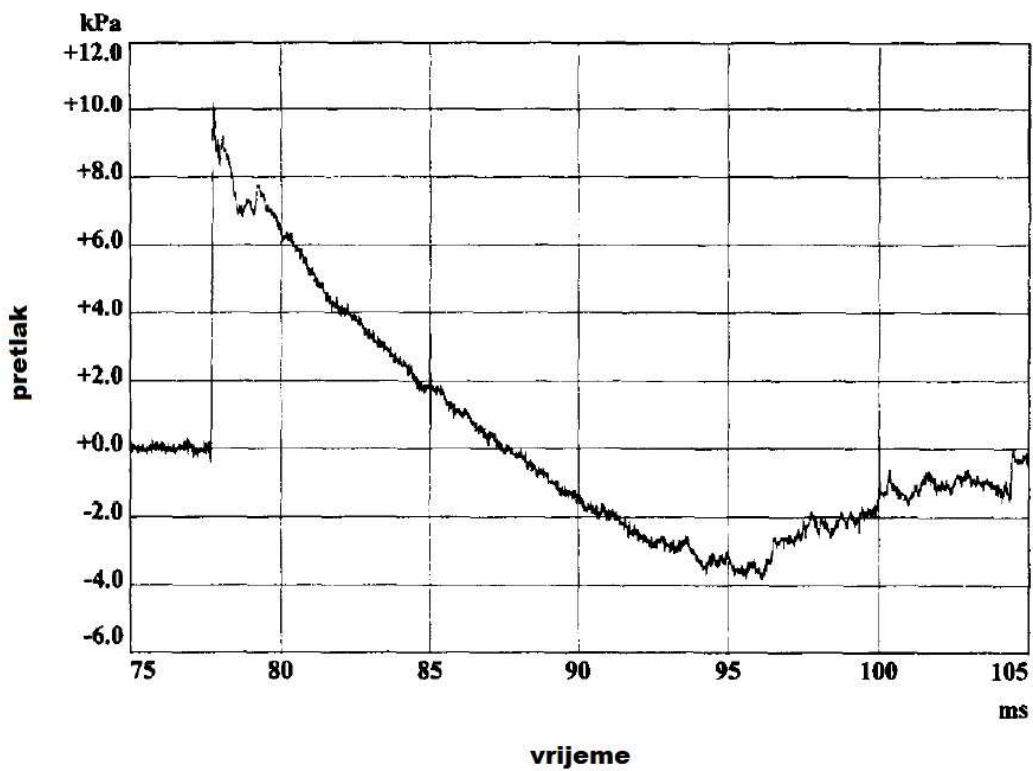
Slika 5-3. Promjene udarnog tlaka u ovisnosti o udaljenosti (Krsnik, 1989)

Rezultati testiranja pokazali su kako mjerači na pozicijama 3, 4, 5, 6, 9 i 10 nisu dali krivulju karakterističnu za idealni zračni udarni val. Razlog tomu je topografija terena, s obzirom da su mjerači na pozicijama 1, 2 i 8 (gdje je manja vjerojatnost smetnji) polučili sličniju krivulju idealnom udarnom valu.

Na slikama 5-4 i 5-5 nalaze se krivulje tlaka netipičnog i tipičnog udarnog vala. Stopa porasta tlaka na netipičnoj krivulji udarnog tlaka manja je nego na tipičnoj. Gradijent udarne fronte je kritičan za rasipanje energije unutar vala dok putuje kroz zrak, budući da je to područje u kojem dolazi do neizentropske kompresije. Kako bi se pružila značajna usporedba između izmjerenih valova eksplozije eksploziva u komercijalnom sektoru i onih objavljenih za TNT, analizirani su samo valovi tlaka koji su imali približno idealne, odnosno tipične oblike krivulja.



Slika 5-4. Krivulja netipičnog udarnog vala (Formby i Wharton, 1996)



Slika 5-5. Krivulja tipičnog udarnog vala (Formby i Wharton, 1996)

Specifičan postupak kojim su se analizirali rezultati ovog ispitivanja ide redom:

1. Konstruirati graf prirodnog logaritma u funkciji pretlaka u odnosu na vrijeme,
2. Postaviti ravnu crtu na gornji dio (15%) stražnjeg nagiba, nakon zabilježenog vrha,
3. Ekstrapolirati prethodno spomenutu crtu natrag na t,
4. Pronaći vrijednost ln (maksimalni pretlak),
5. Svesti maksimalni pretlak na srednju vrijednost na razini mora koristeći Sachs odnos.

Autori kasnije računaju TNT ekvivalent prema formuli:

$$TNT_e = \frac{m_{TNT}}{m_x} \times 100 \quad (5-2)$$

Gdje su:

$m_{TNT}$  – masa TNT eksploziva koji stvara jednak vršni pretlak udarnog vala na istoj udaljenosti

$m_x$  – masa korištenog eksplozivnog naboja

Na kraju rada zaključuje se kako na mjestima mjerača, odnosno senzora nije bilo značajne razlike u obliku udarnog vala kod eksploziva s različitom brzinom detonacije. Očekivalo se da će valovima eksplozije eksploziva sa sporijom stopom oslobađanja energije trebati više vremena da prerastu u udarne valove. Činjenica da to nije uočeno pripisuje se velikim udaljenostima između naboja i mjerača.

Karakteristike terena imale su velik utjecaj na rezultate zahvaljujući nasipima i ostalim preprekama koje ometaju širenje udarnog vala. Pretpostavlja se da bi na širenje udarnih valova utjecala i difrakcija i refleksija valova. Mnoga ispitivanja koja su bila pod smetnjama pokazala su karakteristike neidealnog udarnog vala i takve snimke nisu uzete u obzir. Tragovi signala s lokacija 1, 2 i 8 posjeduju karakteristike slične onima idealnog udarnog vala zbog povoljnijih topografskih uvjeta, odnosno manjka prepreka i takve snimke su korištene u procjeni TNT ekvivalenta. Dakle, potrebno je ravno područje bez prepreka koje bi mogle ometati širenje valova eksplozija kako bi se izvršila relevantna mjerenja. Također, u obzir treba uzeti i tvrdoću tla, s obzirom da je poznato kako udio energije eksplozije u

obliku zračnog udarnog vala ovisi o energiji apsorbiranoj tijekom formiranja kratera i koeficijentu apsorpcije tla.

Autori na kraju zaključuju kako TNT ekvivalent ovisi o tome je li isti procijenjen pomoću podataka o nadtlaku (obično veći iznos) ili impulsu.



## 5.2. Procjena ekvivalentnosti eksploziva termokemijskim pristupom

Autor opisuje procjenu TNT ekvivalenta putem računalnog koda. Opisat će se samo princip rada koda.

Termokemijski računalni kod „Cheetah“ pruža točnu metodu za procjenu TNT ekvivalenta bilo kojeg eksploziva, procijenjenu bilo s obzirom na vršni tlak ili kvazistatički tlak u dugom vremenu u ograničenom volumenu. „Cheetah“ izračunava energiju detonacije i toplinu sagorijevanja eksploziva. Usporedba energije detonacije eksploziva s energijom TNT-a omogućuje procjenu TNT ekvivalenta s obzirom na vršni tlak, dok usporedba topline sagorijevanja omogućuje procjenu s obzirom na kvazistatički tlak.

## 5.3. Analiza kriterija za određivanje TNT ekvivalenta

Glavni cilj ovog rada bila je procjena TNT ekvivalenta određenog putem različitih metoda. Točnije, analizirano je šest metoda za različite eksplozive i oblike naboja.

Autori opisuju TNT ekvivalent kao vrijednost s kojom se masa eksplozivnog naboja mora pomnožiti kako bi se dobilo identično širenje udarnog vala.

Metoda određivanja TNT ekvivalenta prema Cooperu (1994) dana je usporedbom brzina detonacije:

$$TNT_{ekv} = \frac{D_E^2}{D_{TNT}^2} \quad (5-3)$$

Gdje su:  $D_E$  – brzina detonacije eksploziva

$D_{TNT}$  – brzina detonacije TNT-a

Jedna od najčešće korištenih metoda izračuna TNT ekvivalenta je putem topline detonacije i odgovara formuli 5-1.

Modificirana formula 5-1 prema Lockingu (2011):

$$TNT_{ekv} = \frac{Q_E}{(1 - d)Q_{TNT} + m \times Q_E} \quad (5-4)$$

Gdje su:  $d$  – odsječak na y osi krivulje grafa ekvivalenta topline detonacije TNT-a

$m$  – nagib ravne krivulje grafa ekvivalenta topline detonacije TNT

Prema Bajiću (2007), formula za izračun TNT ekvivalenta putem tlaka detonacije glasi:

$$TNT_{ekv} = \frac{p_{CJ} + 20,9}{40} \quad (5-5)$$

Gdje je:  $p_{CJ}$  – tlak detonacije

Sljedeća metoda temelji se na odabiru mase TNT-a tako da su vrijednosti tlaka jednake na određenim udaljenostima:

$$TNT_{ekv} = \left(\frac{Z_E}{Z_{TNT}}\right)^3 \quad (5-6)$$

Gdje je:  $Z$  – reducirana udaljenost od eksploziva, odnosno omjer udaljenosti od eksploziva i trećeg korijena mase naboja

Posljednja jednadžba za određivanje TNT ekvivalenta prema Formby i Wharton (1996):

$$TNT_{ekv} = \left(\frac{m_E}{m_{TNT}}\right)_I \quad (5-7)$$

Gdje su:  $m_{TNT}$  – masa TNT eksploziva koja uzrokuje ekvivalentan impuls tlaka na jednakoj udaljenosti

$m_E$  – masa korištenog eksplozivnog naboja

$I$  – impuls tlaka

Iako je u radu primijenjena i numerička metoda određivanja TNT ekvivalenta, naglasak će biti isključivo na eksperimentalnim metodama.

Za određivanje učinaka udarnog vala na strukturu, korišteno je balističko njihalo. Korišteni su eksplozivi Comp B i Semtex A1 u cilindričkom i sferičnom obliku naboja.

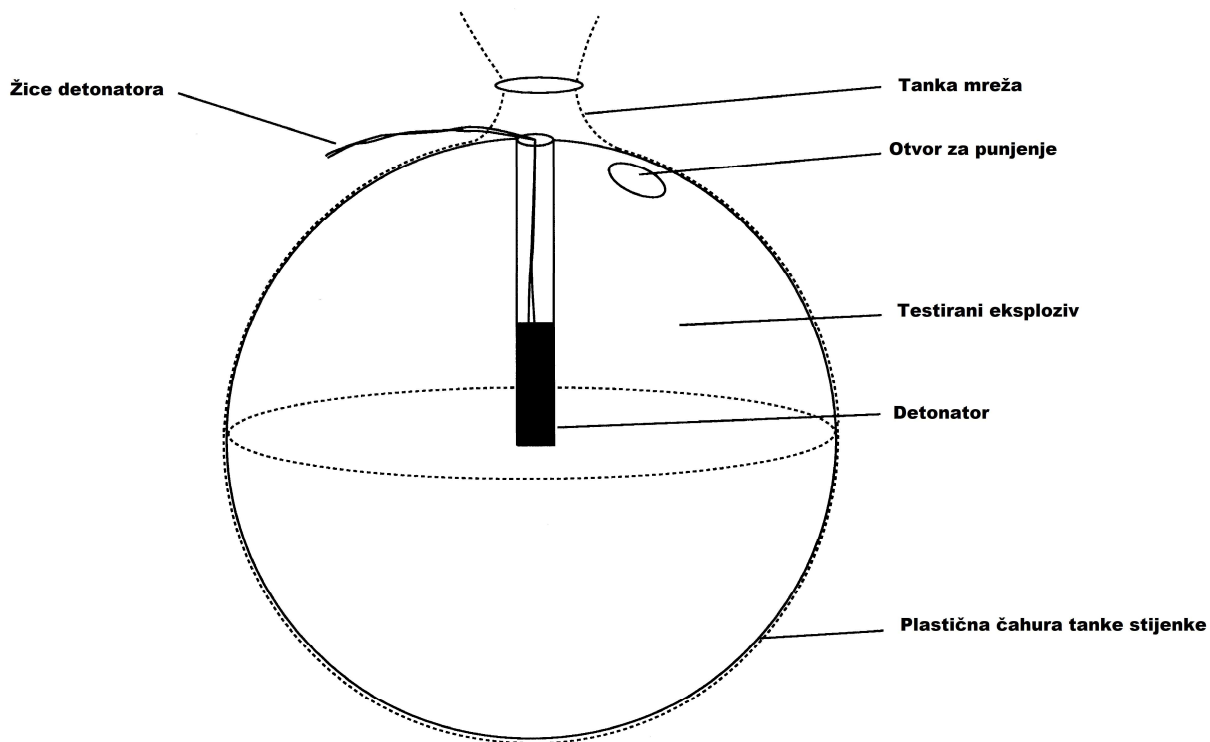
Autori zaključuju da jedino određivanje TNT ekvivalenta putem impulsa tlaka polučuje grešku manju od 20%. Pri korištenju ostalih metoda, greška je iznosila oko 40% (Panowicz et al, 2007).

#### **5.4. Vrijednosti TNT ekvivalenta zračnog udara za niz komercijalnih eksploziva**

Snaga eksploziva često se povezuje s TNT ekvivalentom s obzirom na masu. Time je omogućena usporedba intenziteta učinka miniranja te odnosa štete i udaljenosti različitih izvora eksplozije.

U ovom radu ispitani su udarni valovi prouzročeni nizom komercijalnih eksploziva koji su slobodno inicirani u zraku. Takva ispitivanja svojevrsan su nastavak provedenih ispitivanja koja su opisana u poglavlju 5.2. Nadalje, istražena je mogućnost korištenja metode TNT ekvivalenta za eksplozive s puno nižom brzinom detonacije od TNT-a. U tu svrhu napravljena su eksperimentalna mjerenja parametara miniranja kako bi se utvrdilo jesu li profili tlaka i zavisnost o udaljenosti udarnih valova eksploziva s nižom brzinom detonacije dovoljno slični TNT-ovima da bi metoda bila valjana.

Odabrani su eksplozivi širokog raspona snage balističkog ispitivanja i brzine detonacije. Kako bi se generirali simetrični udarni valovi, potrebno je da naboj bude sferičnog oblika i jednake gustoće. Za zadržavanje eksploziva korištene su krhke, plastične čahure tanke stijenske. Shematski prikaz nalazi se na slici 5-6.

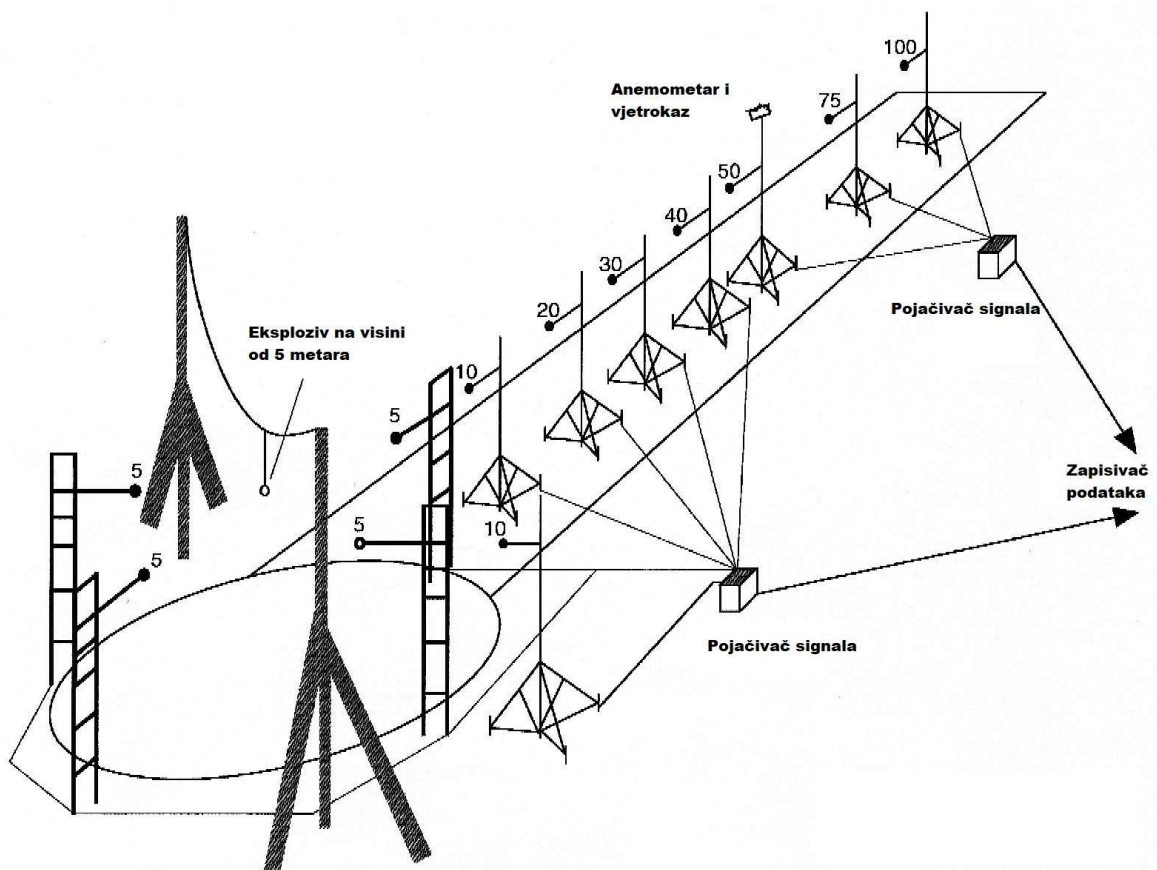


**Slika 5-6.** Shema eksplozivnog naboja (Wharton et al, 2000)

S obzirom da se naboj inicira slobodno u zraku, isti je obješen o tanku mrežu i podignut 5 metara u vis prije iniciranja. Uspoređujući to s ispitivanjima iz poglavlja 5.2, jasno je da se želi izbjeći utjecaj tvrdoće tla na učinak eksplozije. Dakle, u prethodnim ispitivanjima utvrđeno je kako udio energije eksplozije u obliku zračnog udarnog vala ovisi o energiji apsorbiranoj tijekom formiranja kratera i koeficijentu apsorpcije tla. Nadalje, ispitivanja su provedena za usporedbu učinaka miniranja eksploziva s i bez plastične čahure i pokazalo se kako čahura nema značajan utjecaj na udarne valove eksplozije.

Postavljeno je 12 mjerača na visini od 5 metara na udaljenostima 5, 10, 20, 30, 40, 50, 75 i 100 metara od mjesta iniciranja. Metode korištene za mjerenje i analizu eksplozije bile su istovjetne opisanima u poglavlju 5.2.

Plan ispitivanja nalazi se na slici 5-7.



Slika 5-7. Plan ispitivanja (Wharton et al, 2000)

Sudeći prema rezultatima miniranja, odnosno mjerenjima tlaka s mjerča koji su udaljeni više od 20 metara od mjesta iniciranja, faza kompresije udarnog vloga blago je promijenjena zahvaljujući valu koji se reflektira o tlo. Kako bi usporedba udarnih valova komercijalnih eksploziva i TNT-a bila smisljena, zanemarit će se takva mjerenja i uzet u obzir ona na koja reflektirajući val nije imao utjecaj.

Autori zaključuju kako mjerenja tlaka, odnosno profili tlaka ukazuju da su valovi eksplozije ostvarili formu udarnog vala unutar određene skalirane udaljenosti od  $6,9 \text{ m/kg}^{-3}$  od mjesta iniciranja. Dakle, modeli temeljeni na TNT-u su primjenjivi. Zaključci i informacije predstavljene u ovom radu trebale bi biti korisne u smislu procjene štete prilikom nesreća prouzrokovanih eksplozijom i za procjenu potencijalnih opasnosti eksplozija iniciranjem različitih količina komercijalnih eksploziva (Wharton et al, 2000).

## 5.5. Problematika TNT ekvivalenta

Mnogi proračuni miniranja zahtjevaju podatak o TNT ekvivalentu kada se razmatraju učinci visokog eksplozivnog punjenja. Stoga su precizno definirani čimbenici TNT ekvivalenta ključ za pravilno predviđanje učinka i efektivnosti naboja, kao i mjera zaštite. Nažalost, ne postoji univerzalna metoda određivanja i postoje brojna odstupanja.

Cilj ovog rada je potaknuti struku da bude oprezna prilikom primjene vrijednosti TNT ekvivalenta iz literaturnih referenci i ukazati na učestale greške. TNT ekvivalent se kroz godine određivao pokusima i teorijom. Međutim, čini se da je većina objavljenih ispitivanja provedena na nižim razinama, što nije uvijek moguće ekstrapolirati na punu razinu. S druge strane, teorijska predviđanja često ne uzimaju u obzir učinke sekundarnog sagorijevanja, što se uglavnom odnosi na eksplozive koji sadrže aluminij ili one koji proizvode visok stupanj plinova bogatih gorivom, kao npr. TNT, što znači da je TNT loš odabir za referentni eksploziv (Locking, 2011).

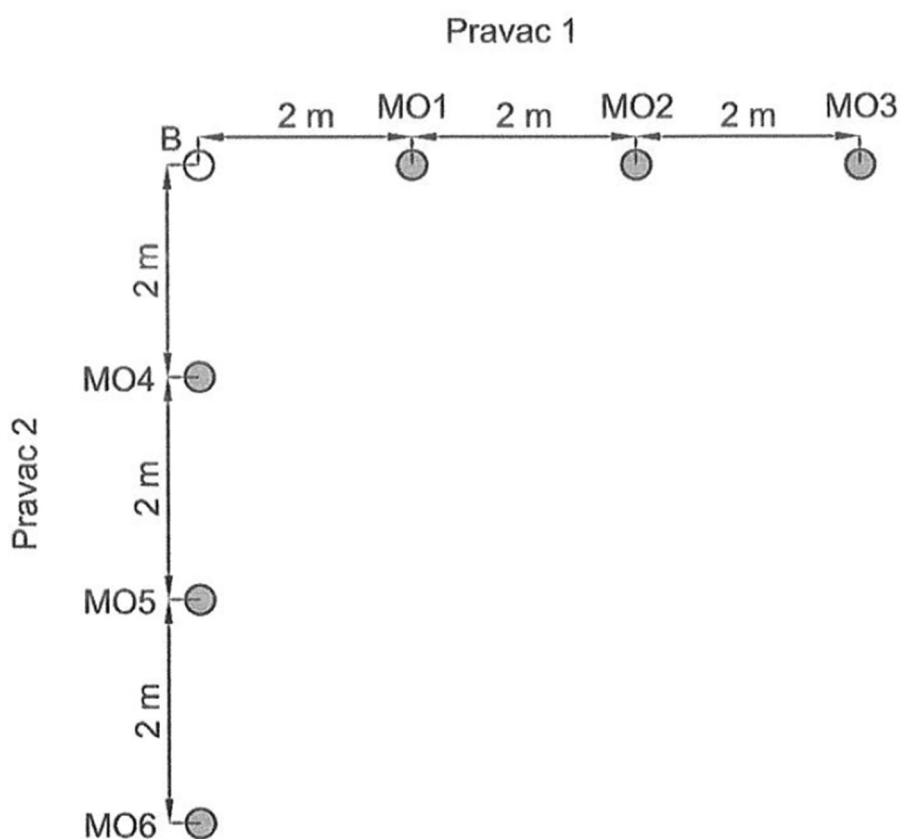
Autor zaključuje kako se pokazalo da su podaci prošlih ispitivanja vrlo varijabilni kada se uspoređuju TNT ekvivalenti za modeliranje eksplozije. Jednostavni teorijski izračuni hidrodinamičkog rada ili indeksa snage mogu se pouzdano koristiti za učinke eksplozije. Indeks snage, koji uzima u obzir i proizvedenu toplinu i raspoloživi rad, smatra se najpouzdanijim za modeliranje učinka eksplozije.

## 6. ISPITIVANJA

Za potrebe ovog rada analizirat će se TNT ekvivalent u smislu brzine oscilacija prilikom miniranja.

Otpucano je ukupno 27 bušotina, po 5 za svaku mješavinu i 5 za emulzijski eksploziv te po 1 bušotina za Pentrit i za ANFO. Pojedinačno su mjerene brzine oscilacija na mjernim mjestima prema rasporedu sa slike 6-1.

Postavljeno je 6 seizmografa, po 3 u dva međusobno okomita pravca na jednakim udaljenostima od 2 metra. Time je omogućen proračun prigušenja amplituda brzina oscilacija i analiza u oba smjera (Škrlec, 2015).



Slika 6-1. Raspored mjerenja (Škrlec, 2015)

Tumač:

- B – bušotina,
- MO – mjesto opažanja.

Tablica 6-1 poslužit će za analizu rezultata i na njoj se nalaze udaljenosti od bušotine do mjesta opažanja, srednja vrijednost PPV i količina korištenog eksploziva.

**Tablica 6-1. Brzine oscilacija**

Pentrit							
	Pravac 1			Pravac 2			Masa eksplozivne tvari (g)
	MO1	MO2	MO3	MO4	MO5	MO6	71,98
Srednja vrijednost PPV (mm/s)	61,30	16,76	8,64	112,70	38,95	8,95	
Udaljenost do MO (m)	2	4	6	2	4	6	
ANFO eksploziv							
	Pravac 1			Pravac 2			Masa eksplozivne tvari (g)
	MO1	MO2	MO3	MO4	MO5	MO6	66,03
Srednja vrijednost PPV (mm/s)	27,06	4,10	3,57	38,20	3,18	2,54	
Udaljenost do MO (m)	2	4	6	2	4	6	
Emulzijski eksploziv							
	Pravac 1			Pravac 2			Masa eksplozivne tvari (g)
	MO1	MO2	MO3	MO4	MO5	MO6	72,81
Srednja vrijednost PPV (mm/s)	39,40	22,16	11,73	33,65	20,03	6,82	
Udaljenost do MO (m)	2	4	6	2	4	6	
Matrica : EPS 50 : 50							
	Pravac 1			Pravac 2			Masa eksplozivne tvari (g)
	MO1	MO2	MO3	MO4	MO5	MO6	42,29
Srednja vrijednost PPV (mm/s)	26,73	13,62	7,66	33,67	10,13	3,91	
Udaljenost do MO (m)	2	4	6	2	4	6	
Matrica : EPS 40 : 60							
	Pravac 1			Pravac 2			Masa eksplozivne tvari (g)
	MO1	MO2	MO3	MO4	MO5	MO6	33,67
Srednja vrijednost PPV (mm/s)	16,60	6,47	4,30	15,00	8,16	2,45	
Udaljenost do MO (m)	2	4	6	2	4	6	
Matrica : EPS 30 : 70							
	Pravac 1			Pravac 2			Masa eksplozivne tvari (g)
	MO1	MO2	MO3	MO4	MO5	MO6	23,60
Srednja vrijednost PPV (mm/s)	12,27	6,04	3,78	14,44	6,24	3,96	
Udaljenost do MO (m)	2	4	6	2	4	6	
Matrica : EPS 20 : 80							
	Pravac 1			Pravac 2			Masa eksplozivne tvari (g)
	MO1	MO2	MO3	MO4	MO5	MO6	15,63
Srednja vrijednost PPV (mm/s)	7,44	3,96	2,86	5,66	4,40	1,16	
Udaljenost do MO (m)	2	4	6	2	4	6	



## 7. SEIZMIČKI UTJECAJ MINIRANJA

Energija prenesena na stijenu prilikom miniranja raspodijelila se na slijedeći način (Berta, 1990):

- lom in situ – < 1%
- deformacija stijenske mase iza bušotine – < 1 %
- lom stijene u blizini bušotine - 1,5-2 %
- odbacivanje stijenske mase – < 1 %
- pomicanje stijenske mase – 4 %
- razlom – 15%
- zračni udarni val – 38-39 %
- seizmički utjecaji – 40%

Prilikom detonacije, dio energije eksplozivnog punjenja pretvara se u kinetičku energiju seizmičkih valova, koji se šire radijalno od mjesta miniranja. Seizmički valovi mogu uzrokovati neželjene i štetne učinke na građevinskim objektima u blizini. Budući da ljudi mogu osjetiti čak i oscilacije koje nisu opasne za konstrukciju objekata, obično se pažljivo procjenjuje njihov utjecaj.

Štetni učinci seizmičkih valova predstavljaju blagi potres, a mjesto eksplozije naziva se epicentar. Inicijacijom minskog polja stvaraju se različite vrste seizmičkih valova koje možemo podijeliti u dvije skupine. Prvu čine primarni (P) i sekundarni (S) valovi koji se šire iz jednog izvora u svim smjerovima kroz unutrašnjost Zemlje. Drugu čine površinski, Rayleigh-ovi i Love-ovi valovi koji se šire približno paralelno s površinom Zemlje, nastali interakcijom unutrašnjih valova s površinom ili zbog razlika u gustoći materijala.

Prolaskom vala kroz materijal može doći do elastičnih deformacija ako je snaga vala manja od elastične čvrstoće materijala. Ako val premaši čvrstoću materijala, može doći do trajnih, plastičnih deformacija. Prolazak seizmičkih valova kroz stijensku masu uzrokuje vibracije tla. Seizmički valovi se na mjestu opažanja pojavljuju s različitom amplitudom i određenim zakašnjenjem. Primarni i sekundarni valovi, koji prolaze unutar stijene, imaju veću brzinu od površinskih valova. Površinski valovi imaju najveću amplitudu pomicanja i najmanju frekvenciju, te predstavljaju izazov za objekte.

Pomicanje tla uzrokovano djelovanjem potresnog vala ovisi o količini eksplozivnog punjenja, vrsti eksploziva i geologiji terena. Veće količine eksplozivnog punjenja izazivaju veće pomake i manje frekvencije. Također, ako je područje gdje se minira kamenito i s tanjim pokrovom, frekvencije će biti manje, a pomaci veći.

Jačina potresa izazvanih postupkom miniranja ovisi o količini i vrsti eksplozivnog punjenja, sredini kroz koju se valovi šire i udaljenosti od mjesta iniciranja, a može se izraziti maksimalnim pomakom, maksimalnom brzinom te maksimalnim ubrzanjem

Domet i brzina rasprostiranja seizmičkih valova ovise o vrsti stijene i prigušenju koje se javlja u stijeni. Prigušenje potresnih valova ovisi o frekvenciji seizmičkih valova i određenim svojstvima stijene kao što su sastav, struktura, porozitet, raspucanost, zasićenost stijene vodom, temperaturi te o rasipanju i disipaciji energije (Dobrilović, 2008). Na temelju najveće rezultantne brzine oscilacija tla određuje se stupanj intenziteta potresa u praksi. Klasifikacija potresa prema kriteriju S.V. Medveda iz 1963. godine temelji se na količini i vrsti oštećenja objekata, uzimajući u obzir odgovarajuću vrijednost rezultantne brzine oscilacija. Različite brzine oscilacija tla uzrokuju raznolika oštećenja, od manjih poput otpadanja žbuke do oštećenja većih razmjera.

Vrednovanje utjecaja seizmičkog djelovanja miniranja na objekte sastoji se od tri koraka (Dowding, 1985):

1. procjena oscilacija tla izazvanih miniranjem u blizini objekta
2. analiza podataka kako bi se dobila procjena reakcije objekta na oscilacije
3. postavljanje graničnih vrijednosti brzina oscilacija, odnosno odaziva objekta kako bi se spriječila oštećenja

## 7.1. Određivanje brzine oscilacija tla

Glavne tri formule koje se koriste su:

**Prema U.S. Bureau of Mines Bulletin 656 (Nichols i dr., 1971):**

$$v = 714 \left( \frac{D}{W^x} \right)^y \text{ (mm/s)} \quad (7-1)$$

gdje je:

$v$  – brzina oscilacija tla (mm/s)

$D$  – udaljenost između minskog polja i mjesta opažanja (m)

$W$  – masa jednovremenog detoniranog eksplozivnog punjenja (kg)

$x$  – eksponent količine punjenja (uzima se 0,5)

$y$  – eksponent faktora stijene (uzima se -1.6)

**Formula za izračun brzine oscilacija prema Sadovskom:**

$$v = k_m \left( \frac{\sqrt[3]{W}}{R} \right)^{n_p} \text{ (cm/s)} \quad (7-2)$$

gdje je:

$v$  – brzina oscilacija tla (cm/s)

$k_m$  – koeficijent načina miniranja

$W$  – masa jednovremenog detoniranog eksplozivnog punjenja (kg)

$R$  – udaljenost između minskog polja i mjesta opažanja (m)

$n_p$  – koeficijent prigušenja seizmičkih valova na putu širenja

**Prema ISEE Blasters Handbook 18th Edition (2011):**

$$v = 1725 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.6} \text{ (mm/s)} \quad (7-3)$$

gdje je:

$v$  – brzina oscilacija tla (mm/s)

$D$  – udaljenost između minskog polja i mjesta opažanja (m)

$W$  – masa jednovremenog detoniranog eksplozivnog punjenja (kg)

## 7.2. Norme za određivanje dozvoljenih brzina oscilacija tla ili stijenskih masa

Najčešće korištene norme su USBM RI8507 i OSMRE, ISO 4866:1990 te DIN 4150 koji je prihvaćen za hrvatsku normu. Osim navedenih normi, još se koriste British Standard 7385 i Swedish Standard SS 4604866. Svaka norma ima različite granične vrijednosti unutar kojih su određene veličine dopuštenih oscilacija za pojedine kategorije građevina (Stanković, 2011). Dozvoljene veličine određuju se na temelju brzine oscilacija tla  $v$  (mm/s) i frekvencije  $f$  (Hz).

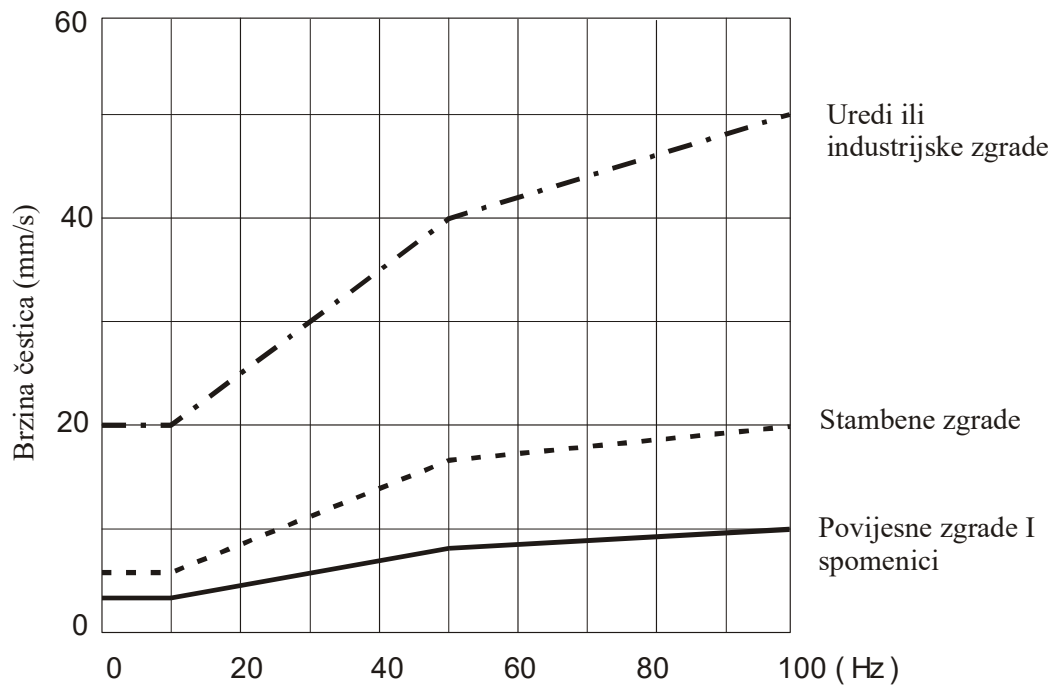
### Norma DIN 4150

Norma DIN 4150 je usvojena kao hrvatski standard. U tablici 4-6 su prikazane granične vrijednosti brzina oscilacija prema ovoj normi. Veličine dozvoljenih brzina oscilacija variraju ovisno o tipu građevine i mjestu mjerenja.

Tablica 7-1. Granične vrijednosti brzina oscilacija prema normi DIN 4150

Kategorija zgrade	Temelji			Pod najvišeg kata u zgradi
	< 10 (Hz)	10 Hz-50 Hz	50 Hz-100 Hz	Bilo koja frekvencija
Uredske/industrijske zgrade	20 mm/s	(20-40) mm/s	(40-50) mm/s	40 mm/s
Stambene zgrade sa žbukanim zidovima	5 mm/s	(5-15) mm/s	(15-20) mm/s	15 mm/s
Povijesne i druge osjetljive zgrade	3 mm/s	(3-8) mm/s	(8-10) mm/s	8 mm/s

Uzimajući u obzir frekvencije koje proizlaze iz izvora vibracija, zaključuje se da povećanjem frekvencije raste i dozvoljena brzina oscilacija tla. Miniranje obično generira frekvencije oscilacija u rasponu od 20-100 Hz, pri čemu su one manje od 10 Hz smatrane najopasnijima. Slika 4-2 prikazuje dijagram dozvoljenih brzina oscilacija, ovisno o frekvenciji, za određenu vrstu konstrukcije.



**Slika 7-1.** Dijagram granica brzina čestica za određene tipove konstrukcija u funkciji frekvenciji prema DIN 4150 (Stanković, 2011)

## 8. REZULTATI

### 8.1. Osnove brzine oscilacija tla uzrokovane detonacijom

Opći oblik jednadžbe regresijske krivulje dobiven mjerenjima tijekom izvođenja procesa miniranja:

$$PPV = H(SD)^{-\beta} \quad (8-1)$$

Gdje je : SD - svedena udaljenost ( $m/kg^{1/2}$ )

H - koeficijent miniranja

$\beta$  - koeficijent prigušenja

Oba koeficijenta su utvrđena testnim miniranjem.

Svedena udaljenost potrebna je za određivanje vršne brzine čestica, kad se mijenjaju i udaljenost i masa eksploziva po stupnju iniciranja, a određuje se formulom:

$$SD = \frac{R}{\sqrt{W}} \quad (8-2)$$

Gdje je: R - udaljenost (m)

W – masa (kg)

Usporedbom učinka detonacijskih svojstava različitih eksploziva na brzinu oscilacije tla izazvanu eksplozijom, tj. vršnu brzinu čestice, s učinkom referentnog eksploziva (obično TNT) izražavamo ekvivalentnu težinu.

$$W_e = W_{exp} \frac{Q_E}{H_{TNT}^d} \quad (8-3)$$

Gdje je:  $W_{exp}$  – masa stvarnog eksploziva (kg)

$Q_E$  – oslobođena toplina pri detonaciji stvarnog eksploziva (MJ/kg)

$H_{TNT}^d$  – oslobođena toplina pri detonaciji TNT-a (MJ/kg)

Osim topline detonacije, neki autori predlažu korištenje brzine detonacije, tlaka detonacije ili energije detonacije za procjenu ekvivalentne mase TNT-a (Cooper, 1994; Panowicz et al., 2017). TNT ekvivalent može se odrediti eksperimentalno (npr. Trauzlov

test, ispitivanje udubljenjem ploče, balističkim testom i ispitivanjem zračnog udara) ili se može procijeniti termokemijskim kodovima ravnoteže (Maienschein, 2002).

S obzirom da su komercijalni eksplozivi neidealni, procjena TNT ekvivalenta nije trivijalan zadatak. U obzir se uzimaju učinci ograničenja i veličine eksplozivnog punjenja na detonacijska svojstva.

Teorijska procjena detonacijskih parametara komercijalnih eksploziva primjenom Wood Kirkwoodove teorije detonacije spojene s termokemijskim kodom EXPLO5 (Štimac et al., 2021) je predmet našeg drugog paralelnog istraživanja koje je u tijeku, a koje bi trebalo pridonijeti pouzdanijoj procjeni detonacijskih parametara komercijalnih eksploziva, a posljedično i ekvivalentnih težina komercijalnih eksploziva potrebnih kod jednadžbe 2 u slučaju upotrebe različitih eksploziva.

## 8.2. Obrada podataka u EXPLO5 termokemijskom kodu

U ovoj studiji izračun detonacijskih parametara je obavljen korištenjem termokemijskog programa EXPLO5 (Sućeska et al, 2021). EXPLO5 je termokemijski računalni program koji teorijski izračunava detonacijska svojstva (npr. brzinu detonacije, tlak, energiju, toplinu i temperaturu) energetskih materijala. Proračun detonacijskih parametara temelji se na Chapman-Jouguetovom (C-J) modelu stacionarne i kemijske ravnoteže u detonacijskim produktima. Ravnotežni sastav produkata detonacije, tj. koncentracija pojedinih produkata, izračunava se primjenom modificirane Whiteove, Johnsonove i Dantzigove metode minimalizacije slobodne energije. EXPLO5 program koristi Becker-Kistiakowsky-Wilson (BKW) jednadžbu stanja za opisivanje stanja detonacijskih produkata u uvjetima visoke temperature i tlaka:

$$\frac{pV}{RT} = 1 + xe^{\beta x} = f(x) \quad (8-4)$$

Gdje su:  $V$  – molarni volumen plinova

$$x = \frac{K}{[V(T + \theta)^\alpha]}$$

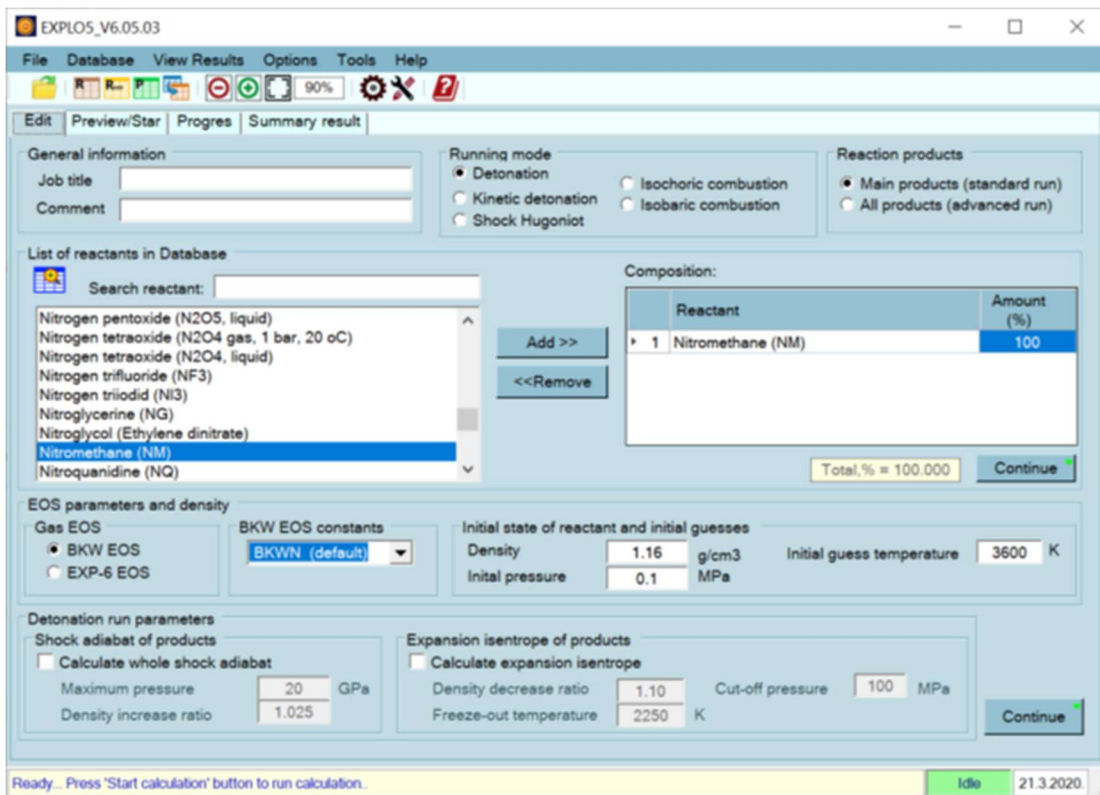
$k_i$  – kovolumen  $i$ -tog produkta detonacije

$$K = \kappa \sum_{i=1}^N x_i k_i$$

$$x_i = \frac{n_i}{n_T}$$

$\alpha, \beta, \kappa, \theta$  - konstante

EXPLO5 je dizajniran tako da omogućuje izračun kemijskog ravnotežnog sastava i termodinamičkih parametara stanja duž udarne adijabate produkata detonacije, C-J stanja i parametara detonacije u C-J točki, kao i parametara stanja duž ekspanzijske izentrope produkata. Program ima ugrađen algoritam za nelinearnu regresijsku analizu i izračunavanje parametara u Jones-Wilkins Lee (JWL) jednadžbi izentropijske ekspanzije, što omogućuje izračun detonacijske energije, tj. energije dostupne za obavljanje mehaničkog rada (Sućeska et al, 2021). Na slici 8-1 nalazi se korisničko sučelje EXPLO5 programa.



Slika 8-1. Korisničko sučelje EXPLO5 (Sućeska et al, 2021)

Standardni proračun EXPLO5 programom uključuje izračunavanje detonacijskih parametara za određeni eksploziv (ili mješavinu eksploziva i drugih reaktanata) pri određenoj gustoći eksploziva. Izborno, detonacijski ciklus također može uključivati i izračun parametara stanja duž ekspanzijske izentrope produkata detonacije, iz čega se mogu izvesti



energija detonacije i Gurneyeva brzina i energija. Standardni proračun se uglavnom koristi za izračunavanje detonacijskih svojstava novih eksploziva i formulacija, dok se druga opcija koristi kada je potrebno više informacija o izlaznoj energiji eksploziva – uključujući njegovu sposobnost pokretanja/odbacivanja okolnog materijala (Sućeska et al, 2021).

Glavni rezultati standardnog proračuna prikazani su u tablici 8-1.

**Tablica 8-1** Detonacijski parametri izračunati putem EXPLO5 koda

Eksploziv	Sastav			Detonacijski parametri ( EXPLO5)					
	Omjer volumena (100)	Omjer mase (%)	VoD (u čeličnoj cijevi), (m/s)	Gustoća (g/cm <sup>3</sup> )	D (m/s)	p (GPa)	Q (kJ/kg)	E <sub>o</sub> (kJ/cm <sup>3</sup> )	T (K)
TNT	100	100	6943	1,64	6772	18,41	4580,83	7,80	3270
Pentrit	100	100	6517	1,148	6032	10,86	5685,08	7,26	4502
Emulzija	100	100	5534	1,175	5559	8,03	2779,78	3,68	2217
ANFO (100%)	100	100	985	0,838	4606	4,60	3768,63	3,53	2968
Emulzija/EPS (50/50)	50/50	97.6/2.4	3051	0,627	3413	2,16	2645,42	1,91	2261
Emulzija/EPS (40/60)	40/60	96.45/3.55	2491	0,437	2785	1,06	2469,27	1,26	2138
Emulzija/EPS (30/70)	30/70	94.58/5.42	2089	0,302	2399	0,59	2284,85	0,81	2012
Emulzija/EPS (20/80)	20/80	91.05/8.95	1710	0,218	2137	0,36	1974,69	0,52	1804

### 8.3. Korelacija rezultata Trauzl testa i detonacijskih parametara

Korelacija rezultata Trauzl testa i pojedinih detonacijskih parametara napravljena je korištenjem vrijednosti detonacijskih parametara izračunatih termokemijskim programom EXPLO5. Proračun je obavljen za stvarnu, odnosno gravimetrijsku gustoću eksploziva.

Uz proračun idealne detonacije, također se radi proračun eksplozije konstantnog volumena budući da prilično dobro oponaša situaciju u kojoj je eksplozivno punjenje ograničeno kućištem ili drugim ograničenim okruženjem. Izračun pretpostavlja da kućište vrijedi za vremensku skalu kemijske ravnoteže. Drugim riječima, ograničenje bi trebalo trajati dovoljno da se zvuk barem jednom proširi preko eksplozivnog punjenja. Izlazni rezultat izračuna je maksimalni tlak, temperatura i sila pri određenoj gustoći opterećenja (Dobrilović et al, 2023).

Eksperimentalni rezultati Trauzl testa korelirani su s detonacijskim parametrima izračunatim na prethodno spomenuti način. Povećanje volumena šupljine olovnog boka (Trauzl test) izražava se kao funkcija pojedinog detonacijskog parametra:

$$\Delta V_T = f(P_{EM}) \quad (8-5)$$

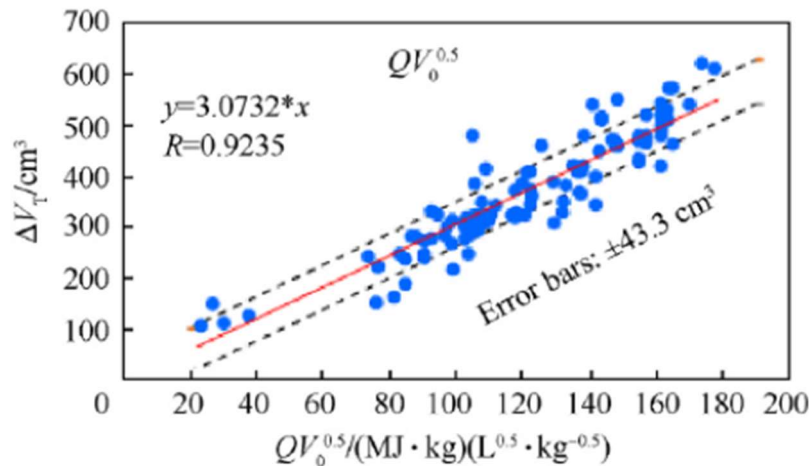
gdje je  $P^{EM}$  - parametar koji se razmatra.

Korelacijska analiza provodi se u dva koraka. U prvom koraku analizirani su eksperimentalni parametri detonacije za idealne eksplozive a u drugom koraku za neidealne eksplozive Time se željelo utvrditi vrijedi li korelacija za različite vrste eksploziva (s obzirom na to da neki istraživači tvrde da je korelacija loša za neidealne eksplozive niske brzine detonacije, dok drugi tvrde da test nije primjenjiv za suvremene eksplozive veće snage (Dobrilović et al, 2023).

Nakon preliminarne analize, a uzimajući u obzir rezultate korelacije drugih istraživača, utvrđeno je da postoji dobra linearna korelacija između Trauzl test rezultata ( $\Delta V_T$ ) i produkta topline detonacije ( $Q$ ) i volumena detonacijskih produkata ( $V_0$ ):

$$\Delta V_T = aQV_0^{0.5} \quad (8-6)$$

Gdje je  $a$  konstanta koja se dobije regresijskom analizom.



**Slika 8-2.** Graf produkta topline detonacije i volumena detonacijskih produkata te rezultata Trauzl testa

Na temelju toga relativna radna sposobnost nekog eksploziva (najčešće u odnosu na TNT kao referenti materijal) može se teorijski izračunati primjenom jednadžbe:

$$TNT_e = \frac{QV_0^{0.5}}{(QV_0^{0.5})_{TNT}} \quad (8-7)$$

gdje je  $QV_0^{0.5}$  toplina detonacije i volumen detonacijskih produkata ispitivanog eksploziva, a  $(QV_0^{0.5})_{TNT}$  toplina detonacije i volumen detonacijskih produkata TNT.

Podaci pokazuju da je najbolja korelacija  $\Delta V_T$  s  $Q$  i  $V_0$  izračunatim korištenjem eksplozivnog modula konstantnog volumena, dok je najlošija korelacija kad je detonacijska toplina na teoretski najvećoj gustoći. Ovo sugerira da bi se korelacija trebala napraviti korištenjem vrijednosti  $Q$  i  $V_0$  pri stvarnoj gustoći eksplozivnog punjenja. Učinak gustoće naboja također se očituje u činjenici da se konstanta prilagodbe  $\alpha_0$ , pri  $\Delta V_T = \alpha_0 Q$  i  $\Delta V_T = \alpha_0 QV_0$ , mijenja za 8,4% odnosno 5,2% kada se gustoća mijenja iz  $\rho_{TMD}$  u  $\rho_{GD}$ . U isto vrijeme konstanta prilagodbe pri  $\Delta V_T = \alpha_0 QV_0^{0.5}$  razlikuje se samo za 1,1%.

U ovom radu smo ponovno razmotrili korelaciju rezultata dobivenih Trauzl ispitivanjem i parametara detonacije. Također smo analizirali učinak gustoće eksplozivnog punjenja i postotak pretvorbe eksploziva koji nisu reagirali u produkte detonacije na rezultate ispitivanja. (1) Rezultati analize potvrdili su da rezultati Trauzl testa najviše koreliraju s toplinom detonacije i volumenom detonacijskih produkata. Utvrđeno je da produkt  $QV_0^{0.5}$ , gdje su  $Q$  i  $V_0$  izračunati metodom eksplozije konstantnog volumena, najbolje korelira s  $\Delta V_T$

za niz testiranih eksploziva. Na temelju ove korelacije  $\Delta V_T$  za idealne eksplozive može se predvidjeti s  $r = 0,9271$ ,  $\sigma = 42,0 \text{ cm}^3$  i  $\text{MAPE} = 9,32\%$  dok se za ne idealne može predvidjeti s  $r = 0,7580$ ,  $\sigma = 52,74 \text{ cm}^3$  i  $\text{MAPE} = 14,52\%$  za neidealne eksplozive . U usporedbi s eksperimentalnom pogreškom, ova pogreška je više od dva puta veća.

#### 8.4. Analiza rezultata

Iz detonacijskih parametara dobivenih putem EXPLO 5 termokemijskog koda izračunato je nekoliko TNT ekvivalenata prema već navedenim formulama, koji su prikazani u tablici 8-2.

**Tablica 8-2** TNT ekvivalent izražen u postotcima

Eksploziv	Omjer	Omjer mase	VoD (u)	Gustoća	TNT ekvivalent (%)			
					Od Q (za TNTek(1))	Od (za TNTek(2))	Od Eo (za TNTek(3))	Od p (za TNTek(4))
TNT	100	100	6943	1,64	100,00	100,00	100,00	100,00
Pentrit	100	100	6517	1,148	124,11	145,22	132,96	58,99
Emulzija	100	100	5534	1,175	60,68	77,10	65,94	43,63
ANFO (100%)	100	100	985	0,838	82,27	107,74	88,60	24,98
Emulzija/EPS (50/50)	50/50	97.6/2.4	3051	0,627	57,75	75,91	63,94	11,72
Emulzija/EPS (40/60)	40/60	96.45/3.55	2491	0,437	53,90	71,66	60,62	5,75
Emulzija/EPS (30/70)	30/70	94.58/5.42	2089	0,302	49,88	67,26	56,63	3,20
Emulzija/EPS (20/80)	20/80	91.05/8.95	1710	0,218	43,11	59,06	50,00	1,94

Iz TNT ekvivalenata navedenih u gornjoj tablici izračunate su ekvivalentne mase prema izrazu 8-3. Navedeni podatci nalaze se u tablici 8-3. Iste ćemo koristiti u izvornoj jednadžbi regresijske krivulje (8-1) za daljnju obradu podataka.

**Tablica 8-3 TNT ekvivalentna težina**

Eksploziv	Omjer	Omjer mase	VoD (u	Prosječn	TNT ekvivalentna težina (We)			
					Od Q (za TNTek(1)	Od TNTek(2)	Od Eo (za TNTek(3)	Od pCJ TNTek(4)
TNT	100	100	6943					
Pentrit	100	100	6517	71,98	89,33	104,53	95,71	42,46
Emulzija	100	100	5534	72,81	44,18	56,14	48,01	31,77
ANFO (100%)	100	100	985	66,03	54,32	71,14	58,50	16,50
Emulzija/EPS (50/50)	50/50	97.6/2.4	3051	42,29	24,42	32,10	27,04	4,96
Emulzija/EPS (40/60)	40/60	96.45/3.55	2491	33,67	18,15	24,13	20,41	1,94
Emulzija/EPS (30/70)	30/70	94.58/5.42	2089	23,60	11,77	15,87	13,36	0,75
Emulzija/EPS (20/80)	20/80	91.05/8.95	1710	15,63	6,74	9,23	7,82	0,30

Nadalje, svi podatci se računaju zasebno za pravac 1 i pravac 2 na kojima su postavljena mjerna mjesta, kako s upotrebom, tako i bez upotrebe TNT ekvivalenta u jednadžbi.

Rezultati za pravac 1 bez uporabe TNT ekvivalenta prikazani su u tablici 8-4, dok su rezultati za isti pravac uz uporabu TNT ekvivalenta prikazani u tablici 8-5.

**Tablica 8-4 Jednadžba bez TNT za pravac 1**

Jednadžba bez TNT za pravac 1										
v=1060,6		R2=0,713				St.Dev.=0.197			SD^-1,341	
Udaljenost	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Težina	0,011	0,043	0,096	0,171	0,268	0,386	0,525	0,686	0,868	1,071

**Tablica 8-5 Jednadžba sa TNT za pravac 1**

Jednadžba sa TNT za pravac 1										
v=919,9		R2=0,711				St.Dev.=0.198			SD^-1,229	
Udaljenost	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Težina	0,008	0,031	0,071	0,126	0,196	0,283	0,385	0,503	0,636	0,786

Rezultati za pravac 2 bez uporabe TNT ekvivalenta su prikazani u tablici 8-6, dok su rezultati za isti pravac uz uporabu TNT ekvivalenta prikazani u tablici 8-7.

**Tablica 8-6** Jednadžba bez TNT za pravac 2

Jednadžba bez TNT za pravac 2										
v=3401,20		R2=0,76				St.Dev.=0.227			SD <sup>-</sup> -1,756	
Udaljenost	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Težina	0,012	0,046	0,104	0,184	0,288	0,414	0,564	0,736	0,932	1,151

**Tablica 8-7** Jednadžba sa TNT za pravac 2

Jednadžba sa TNT za pravac 2										
v=2915,3		R2=0,778				St.Dev.=0.218			SD <sup>-</sup> -1,633	
Udaljenost	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Težina	0,009	0,036	0,081	0,143	0,224	0,322	0,438	0,572	0,725	0,894

Usporedbe dobivenih rezultata za svaki pravac zasebno prikazane su u tablicama 8-8 i 8-9. Tablica 8-8 prikazuje usporedbu za pravac 1, dok tablica 8-9 prikazuje za pravac 2.

**Tablica 8-8** Usporedba rezultata za pravac 1

Pentrit		Emulzija		ANFO 100		50/50		40/60		30/70		20/80	
kg	%	kg	%	kg	%	kg	%	kg	%	kg	%	kg	%
0,006	50,08	0,010	94,33	0,007	67,50	0,011	95,81	0,011	101,49	0,012	108,12	0,014	123,13
0,021	49,64	0,040	93,50	0,029	66,91	0,041	94,97	0,043	100,60	0,046	107,18	0,052	122,06
0,049	50,93	0,092	95,92	0,066	68,64	0,094	97,43	0,099	103,20	0,106	109,95	0,120	125,22
0,087	50,74	0,163	95,57	0,117	68,39	0,166	97,07	0,176	102,82	0,187	109,55	0,213	124,76
0,135	50,36	0,254	94,86	0,182	67,88	0,258	96,34	0,274	102,05	0,291	108,73	0,332	123,82
0,195	50,49	0,367	95,09	0,263	68,05	0,373	96,58	0,395	102,31	0,421	109,00	0,479	124,13
0,265	50,50	0,499	95,11	0,357	68,06	0,507	96,61	0,537	102,33	0,572	109,02	0,652	124,16
0,346	50,49	0,652	95,10	0,467	68,05	0,663	96,59	0,702	102,32	0,748	109,01	0,852	124,14
0,438	50,46	0,825	95,03	0,590	68,01	0,838	96,52	0,887	102,25	0,946	108,93	1,077	124,06
0,541	50,54	1,019	95,19	0,730	68,11	1,035	96,68	1,097	102,41	1,169	109,11	1,331	124,26
<b>sr. vrij.</b>	<b>50,42</b>		<b>94,97</b>		<b>67,96</b>		<b>96,46</b>		<b>102,18</b>		<b>108,86</b>		<b>123,97</b>

**Tablica 8-9** Usporedba rezultata za pravac 2

Pentrit		Emulzija		ANFO 100		ANFO 23,6		50/50		40/60		30/70		20/80	
kg	%	kg	%	kg	%	kg	%	kg	%	kg	%	kg	%	kg	%
0,006	51,65	0,012	97,28	0,008	69,61	0,069	577,21	0,012	98,80	0,013	104,66	0,013	111,50	0,015	126,98
0,025	53,89	0,047	101,50	0,033	72,64	0,277	602,31	0,047	103,10	0,050	109,21	0,054	116,35	0,061	132,50
0,056	53,63	0,105	101,02	0,075	72,29	0,623	599,41	0,107	102,60	0,113	108,68	0,120	115,79	0,137	131,87
0,098	53,52	0,185	100,80	0,133	72,13	1,101	598,12	0,188	102,38	0,200	108,45	0,213	115,54	0,242	131,58
0,154	53,56	0,291	100,88	0,208	72,19	1,724	598,59	0,295	102,46	0,313	108,53	0,333	115,63	0,379	131,69
0,222	53,56	0,418	100,88	0,299	72,19	2,478	598,59	0,424	102,46	0,449	108,53	0,479	115,63	0,545	131,69
0,302	53,48	0,568	100,72	0,407	72,08	3,371	597,68	0,577	102,30	0,611	108,37	0,651	115,46	0,742	131,49
0,394	53,52	0,742	100,80	0,531	72,13	4,402	598,12	0,754	102,38	0,798	108,45	0,850	115,54	0,968	131,58
0,499	53,57	0,940	100,89	0,673	72,20	5,580	598,68	0,955	102,48	1,012	108,55	1,078	115,65	1,228	131,71
0,616	53,49	1,160	100,74	0,830	72,09	6,880	597,77	1,178	102,32	1,248	108,39	1,329	115,47	1,514	131,51
<b>sr. vrij.</b>	<b>53,39</b>		<b>100,55</b>		<b>71,95</b>		<b>596,65</b>		<b>102,13</b>		<b>108,18</b>		<b>115,26</b>		<b>131,26</b>

## 9. ZAKLJUČAK

Seizmički utjecaj miniranja od iznimnog je značaja za sigurnost okoline i pravilno rukovanje eksplozivima. Iz tog razloga vrlo je važno poznavati navedeni parametar i o čemu ovisi.

Dakle, dobiveni podaci pokazuju da ukoliko se na određenoj lokaciji minira s različitim vrstama eksploziva, korisna je upotreba TNT ekvivalenta prema kojem se korigiraju izračunate veličine maksimalne dozvoljene mase eksploziva po stupnju paljenja u odnosu na udaljenost štícene infrastrukture ili okoline.

Iz priloženih tablica vidljivo je da kad se koristi TNT ekvivalent za određivanje maksimalne količine eksploziva po stupnju paljenja u odnosu na udaljenost od štíčenog objekta, dobijemo od 50,42 % do 123,97% vrijednosti u odnosu na rezultat bez uporabe TNT ekvivalenta za pravac 1, odnosno od 53,39% do 131,26% za pravac 2.

Prilikom ispitivanja smo koristili vrlo male količine eksploziva te je preporuka za daljnja istraživanja postepeno povećanje mase eksploziva sve do količina za masovna miniranja na otvorenim kopovima.

## 10. LITERATURA

- AGRAWAL, J.P. 2010: *High Energy Materials – Propellants, Explosives and Pyrotechnics*. Wiley-VCH. 495 pp, Padstow, Cornwall.
- BAJIĆ, Z., 2007. *Determination of TNT Equivalent for Various Explosives*. MSc thesis. Beograd: Tehnološko – metalurški fakultet.
- BERTA, G. 1990. *Explosives: An engineering tool*. Milano: Italesplosivi.
- BROWN, G. I., 1998. *The Big Bang: a History of Explosives*. Sutton Publishing. pp. 151–153.
- COOPER, P. W., 1994. *Comments on TNT equivalence*. Albuquerque, NM (SAD): Sandia National Labs.
- DOBRILOVIĆ, I., DOBRILOVIĆ, M. AND SUĆESKA, M., 2023. *Revisiting the theoretical prediction of the explosive performance found by the Trauzl test*.
- DOBRILOVIĆ, M. 2008. *Raspoloživa energija tlačnog udarnog vala udarne cjevčice i njezina primjena u iniciranju elektroničkog detonatora*. Doktorska disertacija. Zagreb: RGN fakultet.
- DOBRILOVIĆ, M. 2008. *Raspoloživa energija tlačnog udarnog vala udarne cjevčice i*
- DOBRILOVIĆ, M., BOHANEK, V., ŠKRLEC, V., 2019. *Eksplozivi i razvoj društva*. Annual of the Croatian Academy of Engineering, str 104-120.
- DOWDING, C.H. 1985. *Blast vibration monitoring and control*. Evanston, Illinois: *effects on structures*. United States Bureau of Mines, Bulletin 656.
- ESTER Z., DOBRILOVIĆ M., 2016. *Digitalni udžbenik: Rušenje objekata*. Zagreb, RGN fakultet.
- ESTER, Z., 2005. *Miniranje I - Eksplozivne tvari, svojstva i metode ispitivanja*. Zagreb: RGN fakultet.
- Explosives Engineers.
- FORMBY, S. A., WHARTON, R. K., 1996. *Blast characteristics and TNT equivalence values for some commercial explosives detonated at ground level*. Journal of Hazardous materials, 50(2-3), 183-198.
- ISEE, 2011. *Blasters Handbook 18th Edition*. Cleveland, Ohio: International Society of
- KRSNIK, J., 1989. *Miniranje*. Zagreb: RGN fakultet, Institut za rudarstvo, geotehniku i naftu.



- LOCKING, P.M., 2011. *The trouble with TNT equivalence*. 26th International Ballistics Symposium, p. 143-154.
- MAIENSCHEIN, J. L., 2002. *Estimating equivalency of explosives through a thermochemical approach*. (No. UCRL-JC-147683). Livermore, CA (SAD): Lawrence Livermore National Lab.
- MEYER R., KÖHER J., HOMBURG A., 2007. *Explosives*. 6. izdanje. Wiley-VCH VerlagGmbH. Weinheim.
- miniranje*. Doktorska disertacija. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
- NICHOLLS, H.R., JOHNSON, C.F., DUVALL, W.I. 1971. *Blasting vibrations and their Northwestern University*.
- njezina primjena u iniciranju električnog detonatora*. Doktorska disertacija. Zagreb:
- PANOWICZ, R., KONARZEWSKI, M., TRYPOLIN, 2017. *Analysis of criteria for determining a TNT equivalent*. Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering, 63(11), 666-672.
- Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
- SIMOENS, B., LEFEBVRE, M. H., MINAMI, F., 2011. *Influence of Different Parameters on the TNT-Equivalent of an Explosion*. Central European Journal of Energetic Materials, 8(1), 53-67.
- STANKOVIĆ, S. 2011. *Određivanje ovisnosti brzina oscilacija tla o parametrima*
- SUCESKA, M., STIMAC TUMARA, B. AND KÜNZEL, M., 2021. *Using thermochemical code EXPLO5 to predict the performance parameters of explosives*. Materiały Wysokoenergetyczne, 13.
- SUĆESKA, M., 2001. *Eksplodije i eksplozivi: njihova mirnodopska primjena*. Zagreb, Brodarski institut.
- ŠIPEK, M., 2017. *Vojni eksplozivi*. Završni rad. Karlovac: Veleučilište u Karlovcu.
- ŠKRLEC, V. 2015. *Analiza primjenjivosti eksploziva smanjene gustoće za gospodarska miniranje*. Doktorska disertacija. Zagreb: RGN fakultet.
- ŠKRLEC, V. 2015. *Eksplodivi*. Seminarski rad. Zagreb: RGN fakultet.
- ŠTIMAC, B., ŠKRLEC, V., DOBRILOVIĆ, M., SUĆESKA, M., 2021. *Numerical modelling of non-ideal detonation in ANFO explosives applying Wood-Kirkwood theory coupled with EXPLO5 thermochemical code*. Defence Technology, 17(5), pp.1740-1752.

HUSTRULID, W.A., 2011. *Blasting*. Encyclopedia Britannica. URL: <https://www.britannica.com/technology/blasting> (20.8.2023.)

MUELLER INSTRUMENTS, n. d. *Improved bam fall hammer (impact tester)*. URL: [https://mueller-instruments.de/fileadmin/Downloads/instrumentsmedien/PDS\\_BFH\\_12.pdf](https://mueller-instruments.de/fileadmin/Downloads/instrumentsmedien/PDS_BFH_12.pdf)