

# Prijedlog metode ispitivanja učinka eksploziva na cilindričnom uzorku

---

**Jambrešić, Bruno**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2021**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:168563>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-23**



*Repository / Repozitorij:*

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



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

**PRIJEDLOG METODE ISPITIVANJA UČINKA EKSPLOZIVA NA  
CILINDRIČNOM UZORKU**

Diplomski rad

Bruno Jambrešić

R-240

Zagreb, 2021.



KLASA: 602-04/21-01/4  
URBROJ: 251-70-03-21-2  
U Zagrebu, 08.02.2021.

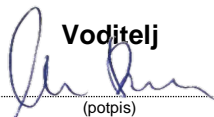
**Bruno Jambrešić, student**

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju Vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/21-01/4, UR. BROJ: 251-70-11-21-1 od 14.01.2021. godine priopćujemo temu diplomskog rada koja glasi:

### PRIJEDLOG METODE ISPITIVANJA UČINKA EKSPLOZIVA NA CILINDRIČNOM UZORKU

Za voditelja ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o diplomskom ispitu prof. dr. sc. Mario Dobrilović redoviti profesor Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

**Voditelj**  
  
(potpis)

Prof. dr. sc. Mario Dobrilović

(titula, ime i prezime)

**Predsjednik povjerenstva za  
završne i diplomske ispite**

  
(potpis)

Doc. dr. sc. Dubravko  
Domitrović

(titula, ime i prezime)

**Prodekan za nastavu i  
studente**

  
(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Dalibor  
Kuhinek

(titula, ime i prezime)

PRIJEDLOG METODE ISPITIVANJA UČINKA EKSPLOZIVA NA CILINDRIČNOM UZORKU

Bruno Jambrešić

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

Sažetak

Korištenje gospodarskih eksploziva za dobivanje mineralnih sirovina jedna je od najbržih i najekonomičnijih metoda koje se danas koriste. Povezivanjem dinamičkih i statičkih svojstava stijena i eksplozivnih procesa odnosno oslobođene energije prilikom detonacije moguće je pretpostaviti i modelirati djelovanje eksploziva na okolnu stijenu. Ekspanzija metalnog cilindra jedna je od metoda za određivanje brizantnosti i radne sposobnosti eksploziva koja se može dovesti u izravnu vezu s ispitivanjem eksploziva na cilindričnom uzorku.

Ključne riječi: svojstva stijene, energija, radna sposobnost eksploziva, detonacijski procesi, ekspanzija metalnog cilindra

Završni rad sadrži: 44 stranice, 12 tablica, 15 slika i 34 reference

Jezik izvornika: hrvatski

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

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

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

Datum obrane: 12. veljače 2021., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu.

PROPOSAL OF TESTING METHOD FOR DETERMINING EXPLOSIVE EFFECT ON CYLINDRICAL  
SAMPLE

Bruno Jambrešić

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

Abstract

Use of commercial explosives for obtaining mineral resources is one of the fastest and most economical methods which we use today. Pairing static and dynamic rock properties with explosive processes and released energy during detonation, it is possible to assume and model effect of explosive on surrounding rock. Expansion of metal cylinder is one of the methods for determining brisance and working capacity of explosives which can be used in direct connection with testing of explosives on cylindrical sample.

Keywords: rock parameters, energy, work capacity of explosives, detonation processes, expansion of metal cylinder

Thesis contains: 44 pages, 12 tables, 15 figures and 34 references

Original in: Croatian

Thesis deposited at: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Supervisor: Full Professor Mario Dobrilović, PhD

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

Date of defense: February 12, 2021, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. STATIČKA I DINAMIČKA SVOJSTVA STIJENE .....	2
2.1. Gustoća .....	2
2.2. Tvrdoća .....	4
2.3. Čvrstoća .....	5
2.3.1. Jednoosna tlačna čvrstoća stijene.....	5
2.3.2. Vlačna čvrstoća stijene.....	7
2.3.3. Posmična čvrstoća stijene.....	8
2.4. Lomna žilavost .....	10
2.5. Dinamička svojstva stijene.....	11
3. ELASTIČNA SVOJSTVA STIJENA.....	14
3.1. Huginot-ova granica elastičnosti .....	14
3.2. Youngov modul elastičnosti i poissonov koeficijent.....	14
4. SVOJSTVA EKSPLOZIVA.....	17
4.1. Energija i radna sposobnost eksploziva .....	18
4.2. Tlak detonacije .....	21
4.3. Tlak plinovitih produkata.....	22
4.4. Tlak u minskoj bušotini .....	23
5. DETONACIJSKI PROCES.....	24
5.1. <i>Chapman - Jouguet</i> -ova hidrodinamička teorija .....	24
5.2. ZND teorija .....	27
6. ISPITIVANJE EKSPANZIJOM METALNOG CILINDRA.....	28
6.1. Ispitivanje deformacijom olovnog cilindra (po Hessu) .....	28

6.2. Ispitivanje deformacijom bakrenog cilindra (po Kastu) .....	29
6.3.1 Načela ispitivanja ekspanzije metalnog cilindra.....	33
6.3.2. Jones-Wilkins-Lee jednadžba stanja .....	34
6.3.3. Gurneyjeva energija .....	34
6.3.4. Rezultati ispitivanja ekspanzije metalnog cilindra.....	35
7. PRIJEDLOG METODE .....	38
8. ZAKLJUČAK.....	40
9. LITERATURA .....	41

## POPIS SLIKA

Slika 2-1: Princip ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće (Hrženjak, 2013).....	6
Slika 2-2: Princip ispitivanja indirektne vlačne čvrstoće (Hrženjak, 2013).....	7
Slika 2-3: Mohr-Coulombov pravac čvrstoće .....	9
Slika 2-4: Shema ispitivanja lomne žilavosti (ISRM, 1988).....	10
Slika 3-1: Nastajanje radijalnih pukotina oko minske bušotine .....	13
Slika 4-1: Huginotova adijabata u p-v dijagramu (Dobrilović, 2008.).....	19
Slika 5-1: Proces detonacije u p-v dijagramu s označenim adijabatama, Rayleigh-ovim pravcem i CJ točkom (Dobrilović, 2008).....	26
Slika 5-2: Pojednostavljeni prikaz ZND detonacijskog modela (Štimac, 2019) .....	27
Slika 6-1: Shema ispitivanja deformacija po Hessu (OZM Research, 2014).....	29
Slika 6-2: Oprema za ispitivanje brizantnosti po Kastu (Sućeska, 1995).....	30
Slika 6-3: Test ekspanzije cilindra (Esen i suradnici, 2005) .....	31
Slika 6-4: Detonacija u ekspanzijskom cilindar testu snimljena brzom kamerom (Topkaroglu, 2014) .....	32
Slika 6-5: Shematski prikaz širenja bakrenog cilindra (Sućeska, 1995).....	33
Slika 7-1: Cilindar pripremljen za ispitivanje i napunjen eksplozivom (Dobrilović, 2021).....	39
Slika 7-2: Cilindar tijekom ispitivanja (Dobrilović, 2021) .....	39



## POPIS TABLICA

Tablica 2-1: Gustoće za pojedinu vrstu stijene (Geopixel, 2013) .....	3
Tablica 2-2: Mohs-ova skala .....	4
Tablica 2-3: Kut unutarnjeg trenja za različite stijene .....	9
Tablica 2-4: Vrijednosti lomne žilavosti za pojedinu vrstu stijena (Whittaker i sr., 1992) .....	10
Tablica 3-1: Statički modul elastičnosti za različite stijene .....	15
Tablica 3-2: Dinamički modul elastičnosti za različite stijene.....	15
Tablica 3-3: Statički Poissonov koeficijent za različite stijene .....	16
Tablica 3-4: Dinamički Poissonov koeficijent za različite stijene.....	16
Tablica 3-5: Koeficijent korelacije i standardna devijacija za zadane brzine širenja vala kroz stijenu .....	17
Tablica 6-1: Rezultati CYLEX testa za amonal (Anderson i sr., 2017).....	36
Tablica 6-2: Iznosi Gurneyjeve energije, energije eksplozije i njihovog međusobnog omjera (Arvantidis i sr., 2004) .....	36
Tablica 6-3 Parametri JWL jednadžbe za ANFO eksplozive (Sućeska i sr., 2020) .....	37

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I ODGOVARAJUĆIH SI JEDINICA

Simbol	Značenje	Jedinica
$\rho$	gustoća	kg/m <sup>3</sup>
$m$	masa	kg
$V$	volumen	m <sup>3</sup>
$p$	tlak plinovitih produkata u trenutku $t$	kPa
$a$	površina na koju djeluju plinoviti produkti u trenutku $t$	m <sup>2</sup>
$M$	masa koja odgovara premještanju izbušenog materijala	kg
$v$	projicirana brzina	m/s
$t_v$	vrijeme u kojem plinoviti produkti djeluju prije nego što se rasprše u atmosferu	s
$\sigma_c$	tlačna čvrstoća	MPa
$F$	sila pri kojoj dolazi do loma	MN
$A$	površina poprečnog presjeka	m <sup>2</sup>
$\sigma_{BTS}$	indirektna vlačna čvrstoća stijene	MPa
$F$	sila sloma uzorka	kN
$D$	promjer uzorka	mm
$t$	debljinja uzorka	mm
$\tau_f$	posmično naprezanje pri slomu	MPa
$c$	kohezija	MPa
$\sigma_n$	naprezanje okomito na kliznu plohu	MPa
$\varphi$	kut unutarnjeg trenja	°
$E$	Youngov modul elastičnosti	N/mm <sup>2</sup>
$\Delta\sigma$	promjena normalnih naprezanja	N
$\Delta\varepsilon$	promjena deformacija	mm <sup>2</sup>
$\nu$	Poissonov koeficijent	-
$\varepsilon_P$	poprečna deformacija	mm
$\varepsilon_U$	udružna deformacija	mm
$V_p$	brzina širenja longitudinalnog vala	m/s

$V_s$	brzina širenja transverzalnog vala	m/s
$E_l$	unutarnja specifična energija stlačene tvari	J/kg
$E_0$	unutarnja specifična energija neporemećene tvari	J/kg
$p_0$	tlak u neporemećenom dijelu tvari	Pa
$p_l$	tlak udarnog vala	Pa
$v_0$	specifični volumen neporemećene tvari	kg/m <sup>3</sup>
$v_l$	specifični volumen tvari stlačene udarnim valom	kg/m <sup>3</sup>
$q$	toplinska energija oslobođena kemijskim reakcijama	J/kg
$Q_t$	izmijenjena toplina	J/kg
$w$	obavljeni rad	J/kg
$C_v$	specifični toplinski kapacitet	J/kgK
$dT$	promjena temperature	K
$P_d$	tlak detonacije	Pa
$P_l$	početni tlak neporemećenog eksploziva	Pa
$v_d$	brzina detonacije	m/s
$u$	brzina tvari iza fronte udarnog vala	m/s
$P_b$	tlak koji djeluje na stjenku bušotine	Pa
$f$	omjer promjera eksplozivnog punjenja i promjera minske bušotine	-
$\phi_c$	promjer eksplozivnog punjenja	mm
$\phi_b$	promjer minske bušotine	mm
$L_e$	duljina eksplozivnog punjenja	mm
$L_b$	duljina minske bušotine	mm
$\mu$	omjer mase cilindra i eksplozivnog punjenja	-

## 1. UVOD

Eksplozivi su primarni izvor energije pri drobljenju stijena u rudnicima, kamenolomima i građevinskoj industriji. Prilikom miniranja mehanički rad koji nastaje izrazito brзом pretvorbom kemijske energije eksploziva uz oslobađanje topline (nekoliko tisuća Kelvina) i tlakova (reda veličine desetak milijuna Pa) razara stijenu na fragmente te ih odbacuje odnosno pomiče stijensku masu. Kasnije se fragmenti stijene otpremaju na daljnju tehnološku obradu. Komercijalni eksplozivi se koriste jer su kompaktni odnosno pogodni za upotrebu, lako se transportiraju te su sigurni za primjenu uz stručno rukovanje.

Mehanički rad koji nastaje djelovanjem plinovitih produkata na okolnu stijenu može se podijeliti na nekoliko učinaka: (1) Rad koji se utroši na nastajanje pukotina (nove površine na fragmentima); (2) Rad udarnog vala, koji se kroz stijenu dalje širi kao plastični i elastični valovi (vibracija tla) te (3) Rad koji služi za odbacivanje odnosno pomicanje fragmenata stijene (očituje se kao kinetička energija predana stijeni).

Djelovanje, odnosno radna sposobnost eksploziva te učinkovitost ovisi o svojstvima stijene te svojstvima eksploziva i uvjetima u kojima se eksplozija odvija. Na taj način, interakcija svojstava stijene i svojstava eksploziva definiraju krajnji efekt miniranja.

Poznavanje svojstva stijena i relevantnih svojstava eksploziva te njihove interakcije značajno je za procjenu djelovanja i odabir povoljnijeg eksploziva za miniranje stijene određenih svojstava.

## 2. STATIČKA I DINAMIČKA SVOJSTVA STIJENE

Stijene imaju određene karakteristike koje su zavisne o njihovom postanku te daljnjim geološkim procesima koji su djelovali na stijenu. Svi procesi koji su djelovali na stijenu rezultiraju posebnom litologijom čija cijelina sadrži i heterogene dijelove, usljed uklopaka polikristalastih agregata i diskontinuiteta unutar stijenskog matriksa. Svojstva stijene koja su značajna za proces miniranja su brojna, a značajnija su niže nabrojana.

### 2.1. Gustoća

Gustoća pripada osnovnim značajkama stijena. Gustoća intaktne stijene definirana je odnosom mase uzorka i njegovim volumenom pri određenim uvjetima tlaka i temperature. Izražava se u  $\text{g/cm}^3$  ili  $\text{kg/m}^3$  prema izrazu:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2-1)$$

Gdje je:

$\rho$  - gustoća ( $\text{kg/m}^3$ )

$m$  - masa (kg)

$V$  - volumen ( $\text{m}^3$ )

Ispitivanje se može provoditi prema preporučenim metodama ISRM-a za određivanje sadržaja vode, poroznosti i gustoće na uzorcima pravilnih oblika (ISRM, 1981).

Raspon gustoća za pojedinačnu vrstu stijenu prikazan je u tablici 2-1.

Tablica 2-1: Gustoće za pojedinu vrstu stijene (Geopixel, 2013)

Vrsta stijene	Raspon gustoća (g/cm <sup>3</sup> )
Magmatske	2.30 - 3.50
Sedimentne	1.20 - 3.20
Metamorfne	2.50 - 3.50

Stijene veće gustoće zahtijevaju veću količinu energije kako bi se postigla željena fragmentacija te odbacivanje odminirane stijenske mase.

Djelovanje plinovitih produkata na stijenu može se opisati impulsom sile (tlaka) plinovitih produkata koja je prema zakonu o očuvanju jednaka količini gibanja odminirane mase prema izrazu:

$$\int_0^{t_v} p \cdot a \cdot dt = M \cdot v \quad (2-2)$$

gdje je:

$p$  - tlak plinovitih produkata u trenutku  $t$  (kPa),

$a$  - površina na koju djeluju plinoviti produkti u trenutku  $t$  (m<sup>2</sup>),

$M$  - masa koja odgovara premještanju izbušenog materijala (kg),

$v$  – projicirana brzina (m/s),

$t_v$  – vrijeme u kojem plinoviti produkti djeluju prije nego što se rasprše u atmosferu (s).

Kod miniranja stijena veće gustoće potrebno je za jednaki volumen stijene, predati joj veću količinu energije u jedinici vremena. To se može postići:

- Povećanjem promjera bušotine,
- Prilagođavanjem količine otpucavanja u istom stupnju paljenja,
- Izvođenem kvalitetnog začepljenja minske bušotine kako bi što veći dio plinovitih produkata u atmosferu izlazio kroz novonastalu slobodnu površinu, a ne kroz čep minske bušotine,

- Korištenjem eksploziva s većom radnom sposobnosti.

Specifičnu potrošnju eksploziva može se izraziti, osim u jedinicama mase eksploziva po jedinici volumena sraslog stanja stijene i u utrošku energije po jedinici volumena, odnosno u  $\text{kg/m}^3$  ili  $\text{MJ/m}^3$ .

## 2.2. Tvrdoća

Tvrdoća je veličina kojom se definira otpor tijela prodiranju drugog tijela u njegovu površinu. Tvrdoća se izražava Mohs-ovom skalom. Pomoću nje se određuje relativna tvrdoća koja svoju primjenu nalazi u mineralogiji. Sastoji se od deset minerala poredanih po tvrdoći, prikazano u tablici 2-2.

Tablica 2-2: Mohs-ova skala

Tvrdoća	Mineral
1	Talk
2	Gips
3	Kalcit
4	Flourit
5	Apatit
6	Ortoklas
7	Kvarc
8	Topaz
9	Korund
10	Dijamant

Tvrdoća materijala se određuje sljedećim ispitivanjima:

- Ispitivanje struganjem (*scratch test*). Primjenjuje se Mohs-ova skala, talk je najmekši mineral ( $H=1$ ), dok je dijamant najtvrdi ( $H=10$ ).

- Ispitivanje utiskivanjem (*indentation test*). Koristi se kugla, piramida ili stožac koji se utiskuje u površinu uzorka. Koriste se Brinell-ova, Vickers-ova, Knoop-ova te Rockwell-ova skala.

Najrašireniju primjenu je pronašlo Rockwell-ovo ispitivanje tvrdoće jer se za mekše materijale koristi utiskivanje čelične kuglice, dok se primjerice za metale i materijale čija tvrdoća prelazi  $785 \text{ N/mm}^2$  koristi dijamantni stožac (Virtual Expo Group, 2020).

- Ispitivanja koja se zasnivaju na mjerenju odskoka (Schmidt-ov čekić i skleroskop). U ove metode pripada i određivanje tvrdoće po Shore-u. Ispitivanje se sastoji od mjerenja elastičnog odskoka određene mase s čeličnim ili dijamantnim vrhom pri padu na ispitni uzorak s određene visine. Visina odskoka je proporcionalna tvrdoći materijala. Tvrdoća prema Shore-u (SH) prikladna je i ne razorna metoda za mjerenje tvrdoće stijena.

Prema Mohs-ovoj skali sedimentne stijene imaju relativnu tvrdoću od 3-4. Većina magmatskih i metamorfnih stijena ima visok udio feldspata, kvarca, piroksena i amfibola te se njihova relativna tvrdoća kreće od 6-7. Iz navedenog proizlazi da korištenje Mohs-ove skale nije baš dobar način za razlikovanje jedne vrste stijene od druge, ali je korisna za identifikaciju minerala u stijeni (Mindat, 2014).

## **2.3 Čvrstoća**

Čvrstoća je maksimalno naprezanje koje materijal može podnijeti, a da ne dođe do sloma za bilo koju vrstu naprezanja. Koristi se kao jedna od osnovnih informacija pri opisu stijena.

Čvrstoća stijene ovisi o mineralno-petrografskim čimbenicima kao mineralnom sastavu, čvrstoći pojedinih minerala koji grade stijenu, koheziji između pojedinih zrna, krupnoći materijala i njihovom međusobnom odnosu, teksturnoj anizotropiji, zatim poroznosti, sposobnosti upijanja vode, raspucalosti i svježini stijene (Maričić, 2014).

Razlikujemo tlačnu (jednoosna ili troosna), vlačnu i posmičnu čvrstoću.

### **2.3.1. Jednoosna tlačna čvrstoća stijene**

Jednoosna tlačna čvrstoća (UCS) stijena definira se kao najveće naprezanje u jednom smjeru uz slobodno bočno širenje kod kojeg dolazi do loma materijala. Prilikom loma dolazi do pucanja, savijanja, pomicanja i deformacije mineralnih zrna i praznog prostora uzorka.

Jednoosna tlačna prikazana je izrazom:



$$\sigma_c = \frac{F}{A} \quad (2-3)$$

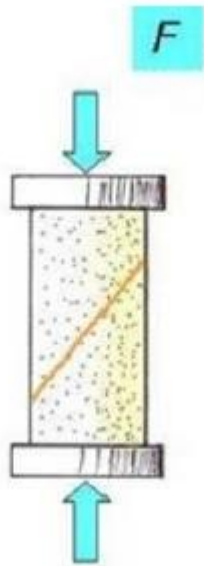
gdje je:

$\sigma_c$  - tlačna čvrstoća (MPa),

F - sila pri kojoj dolazi do loma (MN),

A - površina poprečnog presjeka (m<sup>2</sup>).

Ispitivanja se provode prema preporukama Međunarodnog društva za mehaniku stijena (ISRM) na valjkastim uzorcima određenih dimenzija. Princip ispitivanja prikazan je na slici 2-1.



Slika 2-1: Princip ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće (Hrženjak, 2013)

Raspon vrijednosti jednoosnog tlačnog naprezanja za pojedinu vrstu stijena:

- UCS za sedimentne stijene iznosi od 12 do 130 MPa (Marinos i sr., 2005),
- UCS za magmatske stijene iznosi od 32 do 112 MPa (Dincer i sr., 2004),
- UCS za metamorfne stijene iznosi od 140 do 260 MPa (Miskovsky, 2012).

### 2.3.2. Vlačna čvrstoća stijene

Vlačna čvrstoća stijene definira se kao najveće vlačno naprezanje koje ta stijena može izdržati. Stijene imaju nisku vlačnu čvrstoću, nisku u smislu da vlačna čvrstoća iznosi približno 10% od tlačne čvrstoće stijene. Određivanje vlačne čvrstoće može se provesti izravnim i neizravnim postupcima od kojih je najpoznatiji Brazilski test (Briševac i sr., 2015).

Brazilski test je indirektni postupak određivanja vlačne čvrstoće stijene. Na stijenu se nanosi tlačno opterećenje na način da dođe do vlačnog naprezanja unutar uzorka stijene. Ispitivanja se također provode prema ISRM-ovim standardima. Rezultat brazilskog testa je indirektna vlačna čvrstoća stijene prikazana sljedećim izrazom:

$$\sigma_{BTS} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot t} \quad (2-4)$$

gdje je:

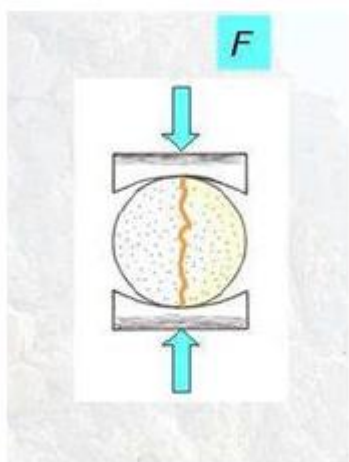
$\sigma_{BTS}$  - indirektna vlačna čvrstoća stijene (MPa),

$F$  - sila sloma uzorka (kN),

$D$  - promjer uzorka (mm<sup>2</sup>),

$t$  - debljinja uzorka (mm).

Princip ispitivanja prikazan je na slici 2-2.



Slika 2-2: Princip ispitivanja indirektna vlačne čvrstoće (Hrženjak, 2013)

Raspon vrijednosti vlačne čvrstoće za pojedinu vrstu stijena:

- vlačna čvrstoća sedimentnih stijena od 1 do 11 MPa (Kumar i sr., 2011),
- vlačna čvrstoća magmatskih stijena od 10 do 30 MPa (Miskovsky, 2012),
- vlačna čvrstoća metamorfnih stijena od 2 do 18 MPa (Abdaqadir & Alshkane, 2018).

### 2.3.3. Posmična čvrstoća stijene

Posmična čvrstoća je vrijednost posmičnog naprezanja u trenutku sloma stijene. Veličine koje opisuju posmičnu čvrstoću su kut unutarnjeg trenja  $\varphi$  i kohezija  $c$ . Prema Mohr-Coulombovom kriteriju čvrstoće koristimo sljedeći izraz:

$$\tau_f = c + \sigma_n \cdot \operatorname{tg}\varphi \quad (2-5)$$

gdje je:

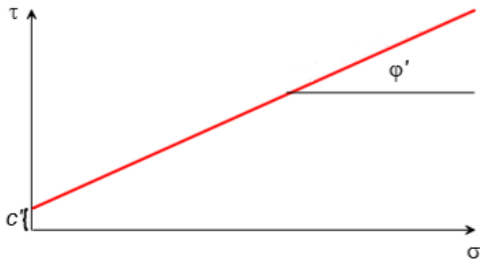
$\tau_f$  - posmično naprezanje pri slomu (MPa),

$c$  - kohezija (MPa),

$\sigma_n$  - naprezanje okomito na kliznu plohu (MPa),

$\varphi$  - kut unutarnjeg trenja ( $^{\circ}$ ).

Mohr-Coulombov pravac čvrstoće prikazan je na slici 2-3.



Slika 2-3: Mohr-Coulombov pravac čvrstoće

Raspon vrijednosti kuta unutarnjeg trenja  $\phi$  za određenu vrstu stijena prema Wyllie-u & Norrish-u, prikazani su u tablici 2-3.

Tablica 2-3: Kut unutarnjeg trenja za različite stijene

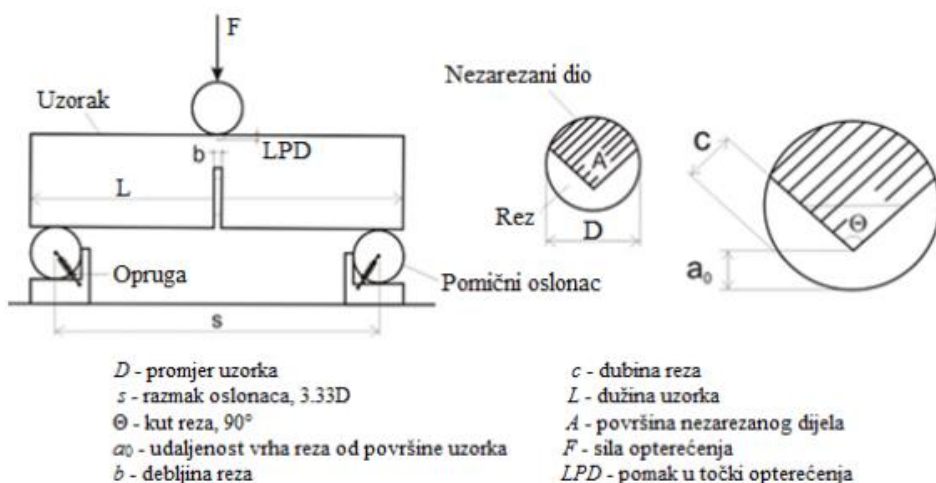
Vrsta stijene	Kut unutarnjeg trenja (°)
Sedimentne	20-27
Magmatske	27-34
Metamorfne	34-40

Vrijednost kohezije  $c$  poprima širok raspon vrijednosti za pojedinu vrstu stijene, sedimentni, osobito gline (montmorilonit, bentonit) imaju koheziju od 0 do 200 kPa, iznimni slučajevi čak do 380 kPa. Metamorfne i magmatske stijene imaju nešto užu raspon kohezije od 0 do 100 kPa (Wyllie & Norrish, 2003). Generalno, stijene koje se sastoje finijih čestica poprimaju veće vrijednosti kohezije i manji kut unutarnjeg trenja i obrnuto.

## 2.4. Lomna žilavost

Lomna žilavost je mjera otpora materijala širenju pukotina, odnosno količina energije potrebna da bi se unutar stijene pojavile nove pukotine. Lomna žilavost je važna za teoretska istraživanja i inženjersku primjenu vezanu za slom stijene. Koristi se kao indeks u procesu sitnjenja prilikom drobljenja i strojnog iskopa tunela te u analizama hidrauličnog i eksplozivnog frakturiranja. Relevantno je smatrati i lomnu žilavost kao stopu potrošnje energije potrebne za nastanak novih površina kako pri strojnom frakturiranju tako i miniranjem (Brown & Reddish, 1997).

Ispitivanja se provode prema uputama ISRM-a na standardiziranom uzorku. Najčešće se koristi metoda ispitivanja savijanjem zarezanog uzorka. Shematski prikaz ispitivanja prikazan je na slici 2-5.



Slika 2-4: Shema ispitivanja lomne žilavosti (ISRM, 1988).

Uobičajene vrijednosti lomne žilavosti za pojedine vrste stijene prikazane su u tablici 2-4.

Tablica 2-4: Vrijednosti lomne žilavosti za pojedinu vrstu stijena (Whittaker i sr., 1992)

Vrsta stijene	Lomna žilavost ( $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ )
Sedimentne	0,2 - 2,50
Magmatske	0,8 - 2
Metamorfne	0,13 - 2,70

## 2.5. Dinamička svojstva stijene

Tlačna i vlačna čvrstoća bili su prvi parametri koji su se koristili kako bi se utvrdilo koliko je neka stijena pogodna za miniranje. Tako je proizašao koeficijent volatilnosti  $R_c/R_t$ , gdje je  $R_c$  (*eng. compressive*) tlačna čvrstoća, a  $R_t$  (*eng. tensile*) vlačna čvrstoća. Veći koeficijent bi značio lakšu fragmentaciju stijene.

U stvarnim problemima prilikom miniranja dinamička svojstva su značajnija od statičkih upravo iz razloga jer su veličine dinamičkih napreznja veća od statičkih od 4 do 12 puta.

Dinamička svojstva stijene dobivena u laboratoriju nažalost nisu reprezentativna zbog heterogenosti i anizotropnosti stijenske mase te nemogućnosti ostvarivanja dovoljno velikog napreznja u izrazito kratkom intervalu koji je često i manji od 0.1 ms.

Dinamična tlačna čvrstoća  $R'_c$  određuje se eksperimentalno te su tako različiti autori došli do različitih izraza, prema Dejianu (2008):

$$R'_c = R_c \cdot \left(1 + \alpha \log\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cs}}\right)\right) \quad (2-6)$$

gdje je:

$R'_c$  - dinamična tlačna čvrstoća materijala određena trenutnim napreznjem (MPa),

$R_c$  - tlačna čvrstoća materijala (MPa),

$\varepsilon_c$  - trenutni iznos povećanja napreznja (1/s),

$\varepsilon_{cs}$  - iznos povećanja napreznja u trenutku sloma (1/s),

$\alpha$  - koeficijent materijala.

Kada intenzitet udarnog vala prijeđe dinamičnu tlačnu čvrstoću ( $R'_c$ ), stijena oko stijenki minske bušotine je izdrobljena usljed razaranja kristalne strukture. Ovaj mehanizam drobljenja stijena

jako malo pridonosti fragmentaciji stijene i uzrokuje značajno smanjenje tlačnog naprezanja; dosiže 30% u poroznoj stijeni.

Preporuča se:

- korištenje eksploziva koji ostvaruju naprazanje na stijenske bušotine koje je manje ili jednako  $R_c$ ,
- za izabrani eksploziv, utjecati na promjenu tlak-vrijeme (p-t) krivulje, iniciranjem eksploziva na dnu bušotine.

Prilikom propagiranja udarnog vala, stijena je izložena izrazitoj kompresiji, usljed koje se razvijaju tangencijalna vlačna naprezanja. Ukoliko naprezanja prijeđu dinamičnu vlačnu čvrstoću stijene ( $R'_t$ ), počinju se formirati radijalne pukotine oko zone loma okružujući bušotinu, prikazano na slici 3-1.

Dinamičnu vlačnu čvrstoću potrebno je odrediti eksperimentalno, što se najčešće izvodi u laboratoriju, primjerice za granit (Iqbal i sr., 2008) utvrdili su sljedeće:

$$R'_t = 8,5 \cdot R_t \quad (2-7)$$

gdje je:

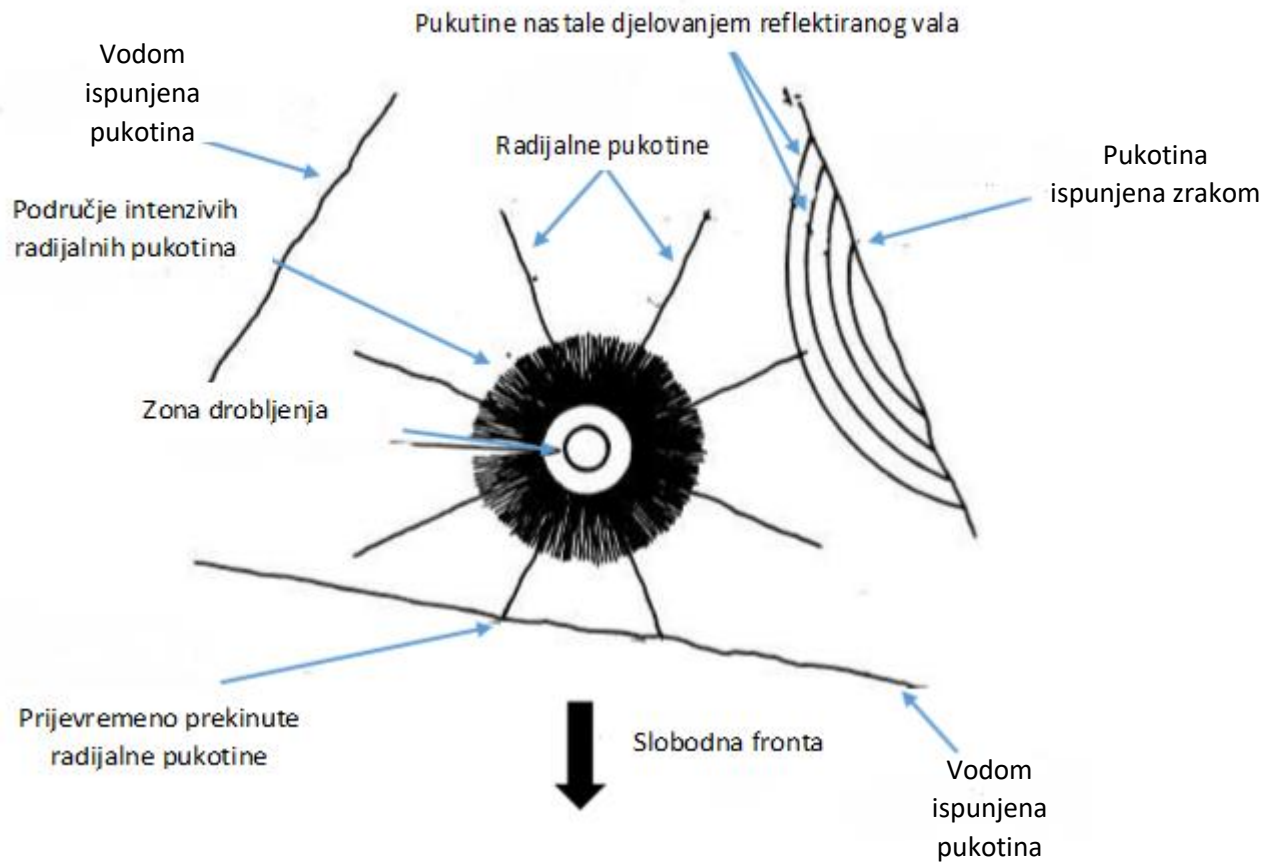
$R'_t$  - dinamična vlačna čvrstoća granita (MPa),

$R_t$  - tlačna čvrstoća granita (MPa).

Linearno povećanje od 8,5 odnosno 85% dobiveno je aritmetičkom sredinom za različiti prirast naprezanja koji je u spomenutom ispitivanju iznosio na različitim uzorcima: 0,06895 MPa/s, 0,13790 MPa/s te 0,20684 MPa/s.

Količina i duljina radijalnih pukotina povećava se s:

- intenzitetom udarnog vala u stijenkama bušotine i vanjskog dijela izdrobljene zone,
- smanjenjem  $R'_t$  i smanjem faktora energije naprezanja.



Slika 3-1: Nastajanje radijalnih pukotina oko minske bušotine

Radijalne pukotine sistematično su raspoređene oko bušotine, šireći se u svim smjerovima. Prisustvo pukotina ili prirodnih diskontinuiteta može prouzrokovati, ovisno o njihovoj orijentaciji, produljenje radijalnih pukotina ili refleksiju udarnog vala te eventualno prekid daljnjeg širenja pukotina.

Iz ovog proizlazi da je dinamična vlačna čvrstoća od određene važnosti te u praksi iznosi od 5-10% dinamične tlačne čvrstoće.



### 3. ELASTIČNA SVOJSTVA STIJENA

Prije same analize elastičnih svojstava potrebno je naglasiti veličine djelovanja eksploziva na stijenu. Tlak koji se oslobađa prilikom eksplozije, poglavito u blizini minske bušotine može biti i veći od 10 GPa. Tlačna čvrstoća većine stijena je reda veličine od 0.1 do 0.4 GPa , dok Youngov modul elastičnosti približno iznosi 50 GPa. U ovim uvjetima, primjena teorije elastičnosti ne bi dala zadovoljavajuće rezultate.

#### 3.1. Huginot-ova granica elastičnosti

U praksi, stijene imaju visoku vrijednost Hugoniot-eve granice elastičnosti. Sva naprezanja koja su ispod ove granice, stijene se ponašaju poput elastičnog materijala te se na njima ne očituju bilo kakve trajne deformacije. Kako ova vrijednost za većinu stijena iznosi od 4 do 11 GPa , pretpostavit će se elastično ponašanje stijena.

#### 3.2. Youngov modul elastičnosti i poissonov koeficijent

Kako bi se utvrdile elastične deformacije koje se događaju usljed miniranja, nužno je uspostaviti elastične module stijene korištenjem dinamičkih metoda, a ne statičkih metoda.

Youngov modul elastičnosti je omjer normalnih napreznja ( $\sigma$ ) i deformacija ( $\varepsilon$ ), prikazan izrazom:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (3-1)$$

gdje je:

$E$  - Youngov modul elastičnosti (N/mm<sup>2</sup>),

$\Delta\sigma$  - promjena normalnih napreznja (N),

$\Delta\varepsilon$  - promjena deformacija (mm<sup>2</sup>).

Vrijednosti Youngovog modula elastičnosti  $E$  u statičkim uvjetima za pojedinu vrstu stijena prikazani su u tablici 3-1.

Tablica 3-1: Statički modul elastičnosti za različite stijeneP

Vrsta stijene	Youngov modul elastičnosti $E_s$ (GPa)
Sedimente	0,7 - 83
Magmatske	60 - 120
Metamorfne	10 - 218

Vrijednosti Youngovog modula elastičnosti  $E$  u dinamičkim uvjetima za pojedinu vrstu stijena prikazani su u tablici 3-2.

Tablica 3-2: Dinamički modul elastičnosti za različite stijene

Vrsta stijene	Youngov modul elastičnosti $E_d$ (GPa)
Sedimente	1,2 - 142
Magmatske	87 - 174
Metamorfne	13 - 283

Poissonov koeficijent je omjer poprečne i uzdužne deformacije, prikazan izrazom:

$$\nu = \frac{\varepsilon_P}{\varepsilon_U} \quad (3-2)$$

gdje je:

$\nu$  - Poissonov koeficijent (-),

$\varepsilon_P$  - poprečna deformacija (mm),

$\varepsilon_U$  - udružna deformacija (mm).

Vrijednosti Poissonovog koeficijenta u statičkim uvjetima za pojedinu vrstu stijena prikazani su u tablici 3-3.

Tablica 3-3: Statički Poissonov koeficijent za različite stijene

Vrsta stijene	Poissonov koeficijent $\nu$
Sedimente	0,03 - 0,46
Magmatske	0,2 - 0,5
Metamorfne	0,09 - 0,30

Vrijednosti Poissonovog koeficijenta u dinamičkim uvjetima za pojedinu vrstu stijena prikazani su u tablici 3-4.

Tablica 3-4: Dinamički Poissonov koeficijent za različite stijene

Vrsta stijene	Poissonov koeficijent $\nu$
Sedimente	0,015 - 0,24
Magmatske	0,1 - 0,27
Metamorfne	0,043 - 0,16

Kako brzine seizmičkog vala ovise o elastičnim svojstvima materijala kroz koji se šire, moguće ih je iskoristiti za izračunavanje elastičnih modula, uz izmjerenu gustoću materijala u laboratoriju. Prikazano izrazima:

$$E = V_S \cdot \frac{[3 \cdot (\frac{V_p}{V_S})^2 - 4]}{[(\frac{V_p}{V_S})^2 - 1]} \quad (3-3)$$

$$\nu = 0,5 \cdot \frac{[\frac{V_p}{V_S})^2 - 2]}{[(\frac{V_p}{V_S})^2 - 1]} \quad (3-4)$$

gdje je:

$V_p$  - brzina širenja longitudinalnog vala (m/s),

$V_s$  - brzina širenja transverzalnog vala (m/s).

U praksi se uzima vrijednost Poissonovog koeficijenta 0.25 te se dobiva izraz:

$$V_p = 1.73 \cdot V_s \quad (3-5)$$

Elastična svojstva magmatskih i metamorfnih stijena imaju određen koeficijent korelacije s gustoćom. Statistički prikaz prema Clarku, 2002. za stijene raspona gustoće od 2600 do 3400 kg/m<sup>3</sup> prikazani su u tablici 3-5.

Tablica 3-5: Koeficijent korelacije i standardna devijacija za zadane brzine širenja vala kroz stijenu

Brzina širenja vala (m/s)	Standardna devijacija (m/s)	Koeficijent korelacije
$V_p=3450-3920$	570	0.85
$V_s=1900-2010$	380	0.83

Kad stijena ima visok Youngov modul elastičnosti, plinoviti produkti prilikom eksplozije nailaze na veći otpor prilikom tlačnog i ekspanzijskog djelovanja na stijenu. Utjecaj Poissonovog koeficijenta je manje značajan, no može se povezati s fragmentacijom stijene. Poissonov koeficijent pokazuje potencijal kojim stijena pohranjuje i otpušta energiju. Tako stijene s većom vrijednosti lakše pohranjuju energiju, nego stijene s manjom vrijednosti Poissonovog koeficijenta. Za neku zadanu energijsku vrijednost, očekivano je da se kod stijene s manjim Poissonovim koeficijentom postigne bolja fragmentacija.

#### 4. SVOJSTVA EKSPLOZIVA

Snaga, energija eksploziva, brizantnost, rad, radna sposobnost te ostale veličine koje su izvedene kako bi se поближе opisalo djelovanje eksploziva u određenim uvjetima te za postizanje određenog cilja, bilo pri rušenju objekata ili dobivanju mineralne sirovine. Pojedina svojstva eksploziva odnose se na empirijske, dok se druga odnose na teorijske veličine, odnosno kombinirane veličine koje izravno ili neizravno opisuju radni učinak eksplozije.

#### 4.1. Energija i radna sposobnost eksploziva

Energija koja se oslobađa prilikom detonacije eksploziva može se iskoristiti za obavljanje mehaničkog rada. Kemijska energija eksploziva eksplozivnim se procesom pretvara u toplinsku energiju predanu produktima eksplozije. Zbog visokih temperatura (nekoliko tisuća K) te ekstremno visokih tlakova (nekoliko milijuna kPa) plinovitih produkata ekspanziji, njihovo djelovanje se može iskoristiti za mehanički rad. Ukupna toplinska teoretska energija može se smatrati mjerom radne sposobnosti, to jest potencijalnom učinkovitosti samog eksploziva. Za opisivanje mehaničkog djelovanja eksplozije koriste se postavke hidrodinamičke teorije detonacije i termodinamički zakoni. Primjenom zakona o očuvanju mase, energije i količine gibanja proizlaze opisi stanja plina koji se mogu primjeniti i na kruti eksploziv; *Rankine - Huginotove* jednadžbe. Skokovita promjena unutarnje energije opisana je Huginotovom jednadžbom udarne adijabate, prikazana izrazom:

$$E_1 - E_0 = \frac{1}{2} \cdot (p_1 + p_0) \cdot (v_0 - v_1) \quad (4-1)$$

gdje je:

$E_1$  - unutarnja specifična energija stlačene tvari (J/kg),

$E_0$  - unutarnja specifična energija neporemećene tvari (J/kg),

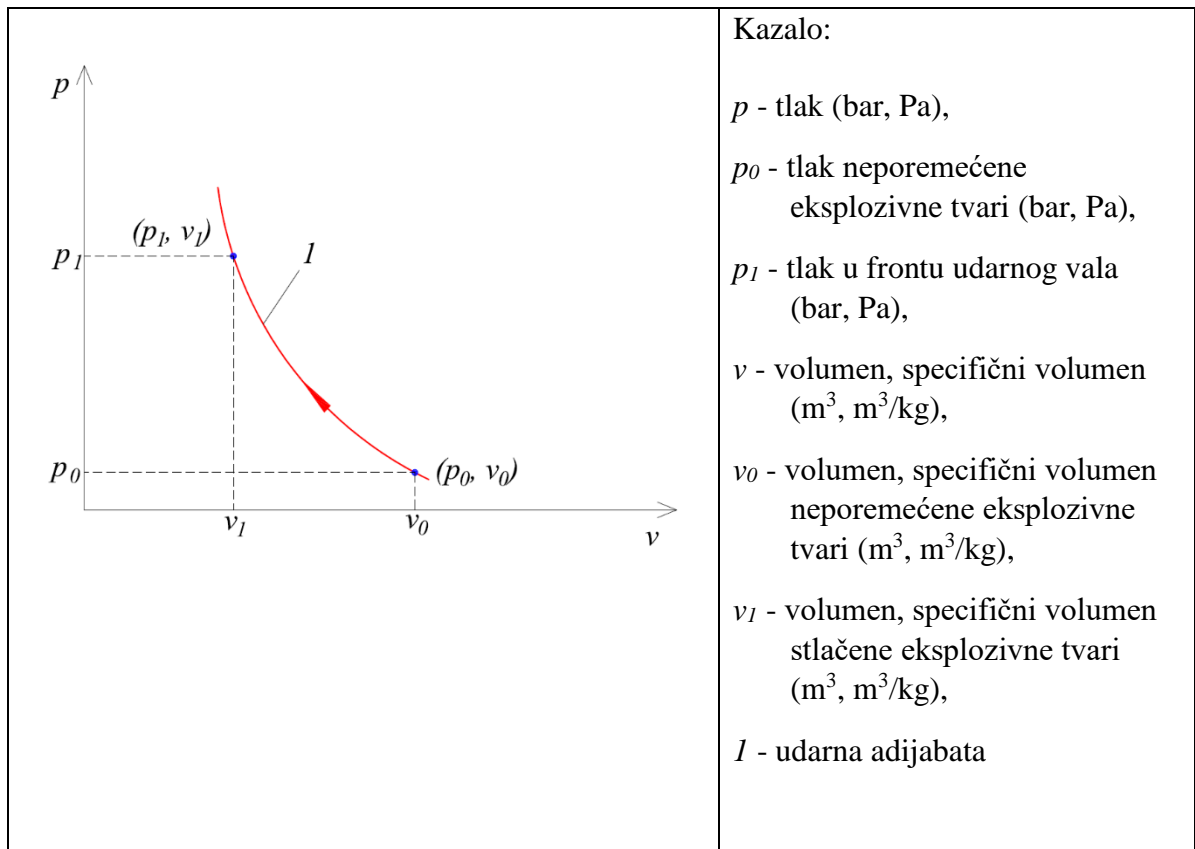
$p_0$  - tlak u neporemećenom dijelu tvari (Pa),

$p_1$  - tlak udarnog vala (Pa),

$v_0$  - specifični volumen neporemećene tvari ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),

$v_1$  - specifični volumen tvari stlačene udarnim valom ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

Huginotova adijabata u p-v dijagramu prikazana je na slici 4-1.



Slika 4-1: Huginotova adijabata u p-v dijagramu (Dobrilović, 2008.)

Promjena unutarnje energije eksploziva prilikom detonacijskog procesa eksplozivne tvari je zbroj povećanja unutarnje energije usljed kompresije u udarnom valu i topline oslobođene kemijskim reakcijama što se opisuje izrazom:

$$E_1 - E_0 = \frac{1}{2} \cdot (p_1 + p_0) \cdot (v_0 - v_1) + q, \quad (4-2)$$

gdje je:

$q$  - toplinska energija oslobođena kemijskim reakcijama (J/kg).

Promatranjem prvog glavnog zakona termodinamike, promjena stanja sustava koja se događa i kod kemijskih reakcija, vrijedi da je promjena unutarnje energije sustava jednaka zbroju količine izmjenjene topline s okolinom i rada obavljenog nad okolinom, prikazano izrazom:

$$\Delta E = Q_t + w \quad (4-3)$$

gdje je:

$Q_t$  -izmijenjena toplina (J/kg),

$w$  - obavljeni rad (J/kg).

Za idealni plin vrijedi:

$$w = p \cdot dv, \quad (4-4)$$

Pretpostavkom da se plinoviti produkti oslobođeni prilikom eksplozivnog procesa ponašaju kao idealni plin te da nema izmjene topline s okolinom, ukupni rad bez gubitaka za adijabatski proces se prema Sućeski, 1995. izražava kao:

$$W_{\max} = \int c_v dT, \quad (4-5)$$

gdje je:

$C_v$  – specifični toplinski kapacitet (J/kgK),

$dT$  – promjena temperature (K).

Ukupni rad je potencijalno najveći rad koji bi plinoviti produkti detonacije mogli obaviti, kad bi se sva njihova unutarnja energija pretvorila u mehanički rad. Maksimalni rad se još naziva i „eksplozivni potencijal“. U stvarnosti ne postoje idealni uvjeti te su prisutni različiti gubici energije te je mehanički rad uvijek manji od eksplozivnog potencijala.

Radna sposobnost se ne može izraziti pomoću samo jednog termokemijskog ili detonacijskog parametra, već je ona definirana s više njih: količina oslobođene topline, količina plinova oslobođena reakcijom te brzina detonacije. Utjecaj pojedinog parametra na određenu vrstu rada ovisi o uvjetima u kojima se proces eksplozije oslobađa.

Pojmovi brizantnost i radna sposobnost (odnosno energija detonacijskih produkata, jačina eksploziva) razlikuju se jer se pod terminom brizantnosti podrazumijeva razorna snaga eksploziva kao posljedica impulsa tlaka, dok radna sposobnost označava mogućnost obavljanja rada eksploziva naknadnom ekspanzijom plinovitih produkata nastalih detonacijskim procesom.

Za određivanje brizantnosti i radne sposobnosti eksploziva koriste se brojne metode od kojih su neke:

- radna sposobnost po Trauzl-u,
- relativna radna sposobnost pomoću balističkog njihala,
- brizantnost eksploziva po Hessu,
- brizantnost eksploziva po Kastu.

#### 4.2. Tlak detonacije

Tlak detonacije jednak je tlaku plinovitih produkata u trenutku kad je ostvarena kemijska i termodinamička ravnoteža. Veliki tlak detonacije rezultat je velike brzine detonacije i količine plinovitih produkata te takav tlak ima i veće udarno djelovanje na okolnu sredinu (Pleše, 1987).

Tlak detonacije je reda veličina od 1GPa do 20 GPa (Ester, 2005).

Tlak detonacije moguće je izmjeriti osjetilima s izrazito brzim odzivom kao što su piezoelektrična osjetila te elektrootporna osjetila ili posrednim metodama mjerenjem tlaka udara metalnih ploča pokrenutih detonacijskim valom, zatim mjerenjem brzine udarnih valova u pojedinim sredinama izazvanih detonacijskim valom, pokusima u vodi, itd.

Prema hidrodinamičkoj teoriji detonacije, tlak detonacije može se izračunati prema sljedećem izrazu:

$$P_d = P_1 + \rho v_d u \quad (4-6)$$

gdje je:

$P_d$  - tlak detonacije (Pa),



$P_1$  - početni tlak neporemećenog eksploziva (Pa),

$\rho$  - gustoća eksplozivne tvari ( $\text{kg/m}^3$ ),

$v_d$  - brzina detonacije (m/s),

$u$  - brzina tvari iza fronte udarnog vala (m/s).

### 4.3. Tlak plinovitih produkata

Tlak plinova, odnosno tlak eksplozije može se definirati kao tlak koje nastaje usljed ekspanzije plinovitih produkata detonacija i to kada bi plinovi zauzimali volumen eksplozivnog punjenja prije detonacije.

Detonacijom eksploziva razvijaju se plinoviti produkti čiji sastav i količina ovise o vrsti eksploziva. Volumen plinova koji nastaje pri detonaciji 1 kg eksploziva izražava se u  $\text{dm}^3$ , a mjeri se pri temperaturi od  $0^\circ\text{C}$  te tlaku od 1 bar. Najveći tlak koji nastaje pri detonaciji 1 kg eksploziva u zatvorenom prostoru volumena  $1 \text{ dm}^3$  naziva se specifični tlak, također se izražava u barima.

Tlak nastalih plinova ovisi o količini razvijenih plinova, temperaturi eksplozije i volumenu u kojem se razvila eksplozija.

Smatra se da tlak eksplozije  $P_e$  ima vrijednost polovice vrijednosti tlaka detonacije gdje taj tlak djeluje na stjenku bušotine te se može prikazati prema sljedećem izrazu (Persson i sr., 1994):

$$P_e = \frac{1}{2} P_d \quad (4-7)$$

Odnosno:

$$P_e = \frac{\rho v_d^2}{8} \quad (4-8)$$

gdje je:

$P_e$  - tlak eksplozije (Pa).

#### 4.4. Tlak u minskoj bušotini

Tlak u minskoj bušotini odnosi se na tlak plinova oslobođenih detonacijom eksplozivnog punjenja u minskoj bušotini koji prelazi na stijenku minske bušotine. Za potpuno napunjene minske bušotine pokazalo se da je tlak koji djeluje na stjenku bušotine jednak tlaku eksplozije (Silva, 2007):

$$P_b = \frac{\rho v_d^2}{8} \quad (4-9)$$

gdje je:

$P_b$  - tlak koji djeluje na stjenku bušotine (Pa).

U slučaju da minske bušotine nisu potpuno napunjene, odnosno ukoliko se koristi eksplozivno punjenje znatno manjeg promjera u odnosu na promjer minske bušotine tada se tlak u minskoj bušotini razlikuje od tlaka eksplozije (Škrlec, 2015). Prema Outcherlony-u slijedi izraz:

$$P_b = P_e f^{2\gamma} \quad (4-10)$$

gdje je:

$f$  - omjer promjera eksplozivnog punjenja i promjera minske bušotine.

Omjer promjera eksplozivnog punjenja i promjera minske bušotine  $f$ , se računa prema izrazu (Outcherlony, 1997):

$$f = \frac{\phi_e}{\phi_b} \quad (4-11)$$

gdje je:

$\phi_c$  - promjer eksplozivnog punjenja (mm),

$\phi_b$  - promjer minske bušotine (mm).

Prema Nielsen-u (1987) koji je predložio sljedeći izraz (Silva, 2007):

$$P_b = P_e \left( \frac{D_e}{D_b} \sqrt{\frac{L_e}{L_b}} \right)^2 \quad (4-12)$$

gdje je:

$L_e$  - duljina eksplozivnog punjenja (mm),

$L_b$  - duljina minske bušotine (mm).

Razmatranjem spomenutih veličina, kad je promjer eksplozivnog punjenja tek neznatno manji od promjera bušotine, izazvana naprezanja u stijeni prvenstveno ovise o brzini detonacije i njegovoj gustoći.

## 5. DETONACIJSKI PROCES

Kako bi se detonacijski proces поближе razumio, tijekom 19. i 20. stoljeća razvijale su se određene teorije koje opisuju detonacijske procese. Teoretsko razlaganje detonacije ima u cilju pojednostavljeno prikazati osnovne fizikalne i kemijske zakone koji najbolje opisuju prirodu detonacijskog procesa. Rezultat je bolje poznavanje procesa, njihovih karakteristika i kvantitativnih učinaka detonacije eksploziva.

Razvijene, opće prihvaćene teorije koje se i danas koriste su CJ i ZND te svojim sadržajem nadopunjuju jedna drugu.

### 5.1. *Chapman - Jouguet*-ova hidrodinamička teorija

Chapman (1899) i Jouguet (1905), vođeni činjenicom da je detonacija zapravo reaktivni udarni val, nezavisno razvijaju klasičnu hidrodinamičku teoriju kasnije prozvanu *Chapman - Jouguetovom* (CJ) teorijom. Jednodimenzionalni model u kojem je kemijska energija trenutačno oslobođena u diskontinuiranoj udarnoj fronti (Ester, 2005) temelji se na pretpostavkama hidrodinamičke prirode stabilne detonacije te opisuje odnose veličina osnovnih termodinamičkih parametara prilikom odvijanja detonacijskog procesa. Bitno je napomenuti kako je interpretacija CJ teorije i danas je zadovoljavajuća osnova opisa detonacijskog procesa, s kojom je podudarnost eksperimentalno dobivenih podataka unutar granica točnosti od 5 % (Dobrilović, 2008).

Interpretaciju pretpostavaka teorije može se podijeliti na tri cjeline (Dobrilović, 2008):

- Ponašanje idealnog plina prilikom nagle adijabatske kompresije,
- Ponašanje produkata raspada (plinova detonacije) tijekom ekspanzije,
- Uvjeti za stvaranje i održanje detonacije (Rayleighov pravac).

Teoretsko razmatranje detonacijskog procesa zahtijeva i određene pretpostavke te ograničenja (Dobrilović, 2008):

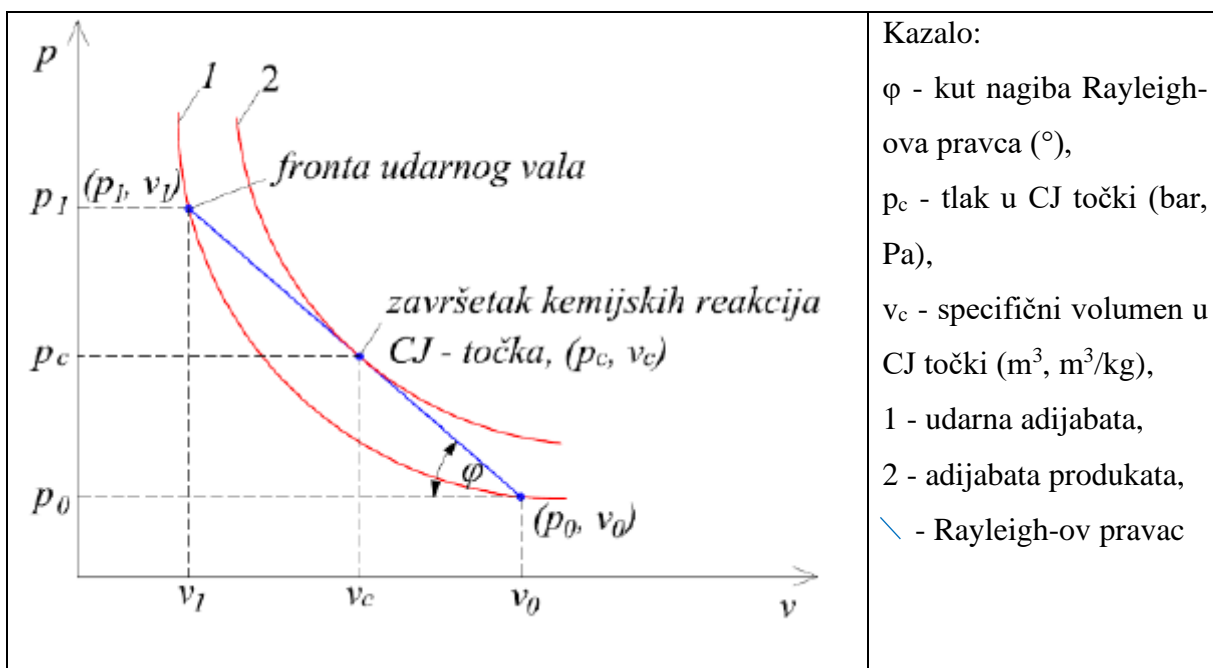
- Udarни val se kroz materijal kreće jednoosno i pravac njegova napredovanja je okomit na valnu frontu,
- Valna fronta je ravnina bez zakrivljenosti, a ujedno je predstavljena i kao diskontinuitet u materijalu,
- Produkti detonacije nalaze se u kemijskoj i termodinamičkoj ravnoteži, iza fronte udarnog (detonacijskog) vala te su u njima kemijske reakcije završene,
- Kemijske reakcije odvijaju se trenutno, odnosno širina zone kemijske reakcije jednaka je nuli,
- Detonacijski proces je stabilan, a detonacijska brzina konstantna. Produkti kemijskih reakcija stabilnog su stanja bez obzira na položaj vala.

Eksploziv je u fronti udarnog vala doveden do stanja optimalnog za početak lančanih egzotermnih kemijskih reakcija. Odvijanje egzotermnih kemijskih reakcija ograničeno je na prostor iza primarno stlačene zone u širini od 1-1,5 nm, a njihovo napredovanje odvija se detonacijskom brzinom. Nakon završene reakcije, produkti detonacije, volumena ( $v_c$ ) i tlaka ( $p_c$ ) nalaze se na adijabati plinovitih produkata. Ova adijabata različita je od adijabate eksploziva koja nastaje zbog kompresije nastale djelovanjem udarnog vala, a opisuje stanje izreagirane eksplozivne tvari. Izreagirana tvar se u pravilu sastoji od plinova detonacije koji se nalaze iza udarne fronte u pojasu od 20 do 100  $\mu\text{m}$ .

Rayleigh-ov pravac u p-v dijagramu, kao poveznica udarne adijabate eksploziva i udarne adijabate produkata reakcije, na sebi sadrži tri točke značajne za proces odvijanja detonacije (Slika 5-1):

- $(p_0, v_0)$ , područje niskog tlaka - nadzvučan proces (udarna adijabata eksploziva)
- $(p_1, v_1)$ , područje visokog tlaka - podzvučan proces (udarna adijabata eksploziva)
- $(p_c, v_c)$ , stanje izreagiranog eksplozivnog materijala, trenutak prije ekspanzije (udarna adijabata produkata reakcije)

Iako su teoretski mogući različiti položaji točke  $(p_c, v_c)$ , odabrana je  $(p_c, v_c)$  koja se nalazi na Rayleigh-ovom pravcu. Točka tog položaja naziva se i *CJ* točkom, a predstavlja jedini mogući stacionarni proces, odnosno stabilnu detonaciju.



Slika 5-1: Proces detonacije u p-v dijagramu s označenim adijabatama, Rayleigh-ovim pravcem i CJ točkom (Dobrilović, 2008)

## 5.2. ZND teorija

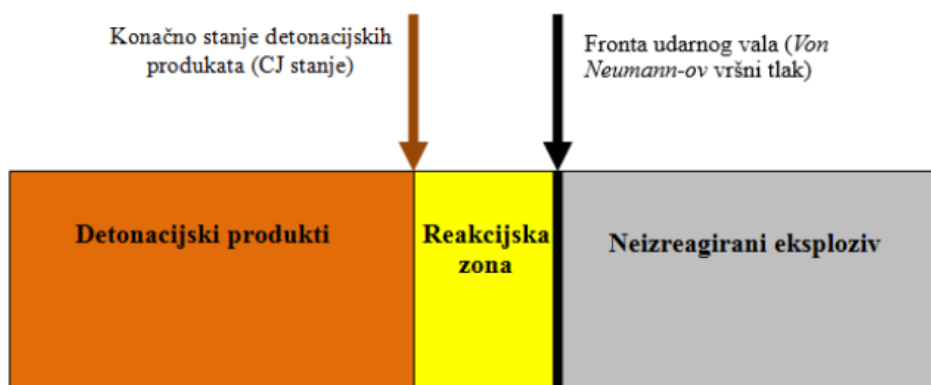
ZND teorija Zeldovich (1940), Von Neuman (1942), Döring (1943) nadopunjava CJ teoriju u vidu njezinog najvećeg nedostatka zanemarivanja zone kemijske reakcije. Trojica autora nezavisnim su radom u svoje teorije uspjeli implementirati interakciju kemijske kinetike s detonacijskim valom, iza kojeg slijedi zona reakcije (Štimac, 2019).

ZND teorija donosi odmak od jedne dimenzije, obrađene u CJ teoriji, na dvije dimenzije. Fronta udarnog vala, sukladno uvedenoj dvodimenzionalnosti, više nije planarni element, nego se sastoji od zakrivljenih segmenata (Ester, 2005).

Jedna od osnovnih prednosti ZND teorije je mogućnost modeliranja detonacijskog vala te se pretpostavlja i konačna širina zone reakcija te njihova konačna brzina (Štimac, 2019).

Zona kemijskih reakcija, sa konačnom širinom iza udarnog vala, dijeli se na dvije zone: induksijsku zonu te zonu oslobođenja energije.

U CJ teoriji kemijske reakcije odvijaju se na fronti udarnog vala, no ZND teorija uvodi načelo po kojemu udarni val najprije komprimira materijal do *von Neumann*-ovog vršnog tlaka (*eng. von Neuman peak*). Tako stlačeni eksplozivni materijal podliježe iniciranju, no reakcije se i dalje ne odvijaju. Sam *von Neumann*-ov vrh označava početak egzotermnih kemijskih reakcija koje zbog očuvanja stacionarnosti i stabilnosti detonacije, završavaju ravnotežom u CJ točki. U reakcijskoj zoni, stanje bilo koje točke spojivo je sa stanjem neizreagiranih materijala zakonima o očuvanju: masa, količine gibanja te energije (Štimac, 2019). Pojednostavljeni ZND detonacijski model prikazan je na slici 5-2.



Slika 5-2: Pojednostavljeni prikaz ZND detonacijskog modela (Štimac, 2019)

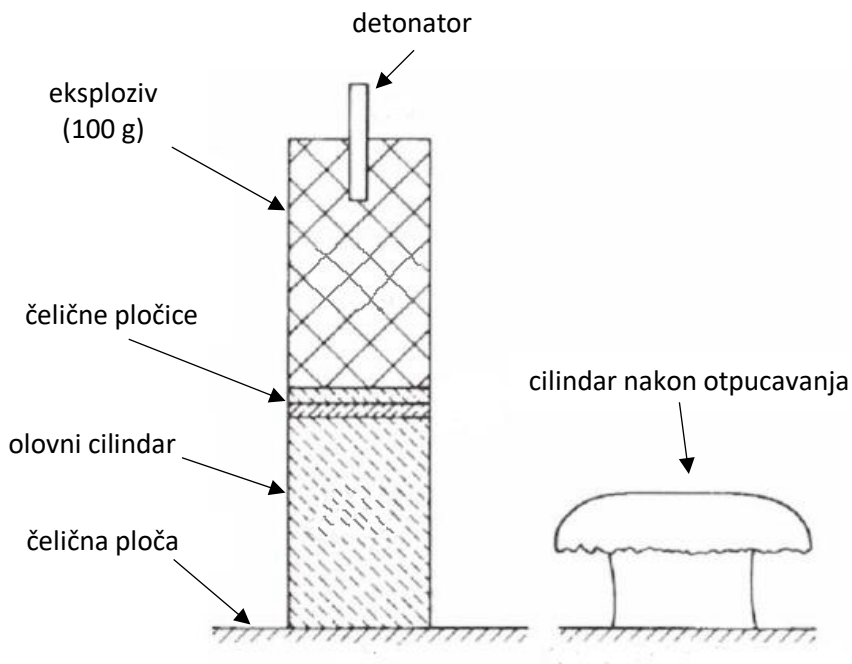
## **6. ISPITIVANJE EKSPANZIJOM METALNOG CILINDRA**

Ispitivanja se provode u svrhu utvrđivanja učinka i efikasnosti pojedine vrste eksploziva. U ovom poglavlju su opisane metode koje se koriste u laboratoriju. Radni učinak eksploziva provodi se na malim uzorcima eksploziva te se dobiveni rezultati koriste u svrhu određivanja relativnog radnog učinka u odnosu na referentni eksploziv.

### **6.1. Ispitivanje deformacijom olovnog cilindra (po Hessu)**

Ovom metodom određuje se brizantnost eksploziva na temelju deformacije (stlačenja) olovnog cilindra uslijed utjecaja udarnog vala prilikom detonacije ispitivanog eksploziva. U ispitivanju se koristi olovni cilindar, sljedećih dimenzija: visina 60 mm te promjera 40 mm koji se postavlja na željezni nakovanj (Sućeska, 1995).

Željezni nakovanj ili kruta čelična ploča koriste se za prijenos udarnog vala na olovni cilindar, njihova debljina ovisi o brizantnosti eksploziva. Usporedbom visine olovnog cilindra prije i nakon detonacije eksploziva, dobivamo izravnu mjeru za određivanje brizantnosti testiranog eksploziva. Dobivena brizantnost ispitivanog eksploziva izražava se kao relativna brizantnost u odnosu na referentni eksploziv, pritom su oba eksploziva testirana u istim uvjetima. Relativna brizantnost predstavlja omjer promjene visine cilindra prilikom detonacije testiranog i referentnog eksploziva (Sućeska, 1995). Shema ispitivanja deformacija s olovnim cilindrom prikazana je na slici 6-1.



Slika 6-1: Shema ispitivanja deformacija po Hessu (OZM Research, 2014)

## 6.2. Ispitivanje deformacijom bakrenog cilindra (po Kastu)

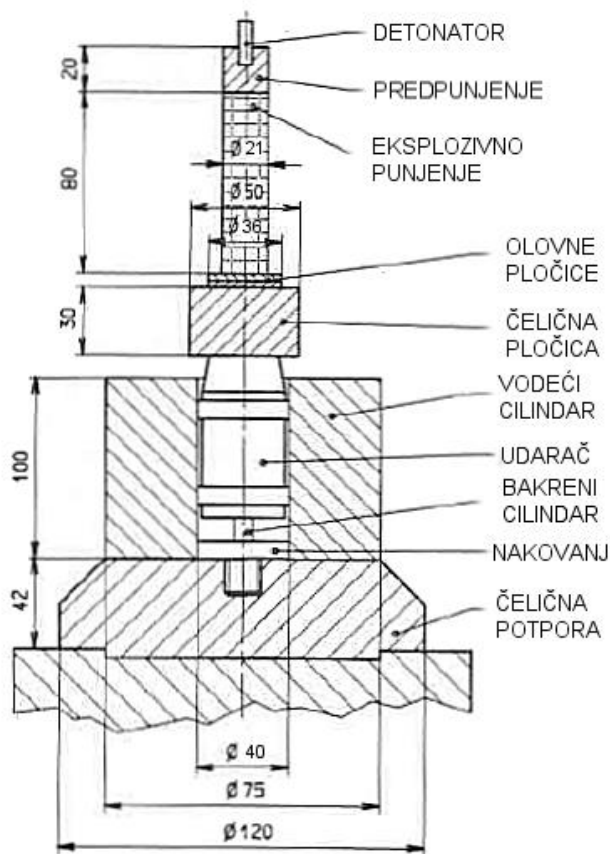
Kao i prethodno spomenuta Hessovova metoda, za određivanje brizantnosti koristi se i Kastova metoda. Brizantnost za ispitivani eksploziv izražava se preko deformacije bakrenog cilindra, odnosno kao relativna brizantnost u odnosu na referentni eksploziv.

Oprema za ispitivanje deformacija po Kastu sastoji se od sljedećih dijelova (Sućeska, 1995):

- čelično postolje (potpora) i vodeći cilindri,
- bakreni cilindar postavljen na nakovanj,
- udarač,
- čelične i olovne pločice,
- pocinčane cijevi s eksplozivnim punjenjem i detonatorom.

Oprema za ispitivanje prikazana je na slici 6-2.





Slika 6-2: Oprema za ispitivanje brizantnosti po Kastu (Sućeska, 1995)

### 6.3. Test ekspanzije cilindra

Ova metoda poznatija i kao CYLEX (*eng. Cylinder Expansion Test*) provodi se u laboratoriju u svrhu određivanja radne sposobnosti i brizantnosti eksploziva. Metoda je razvijena u SAD-u u laboratoriju Lawrence Livermore (Harrier, 2016), te u nacionalnom laboratoriju Los Alamos (Catanach i sr, 1999). Test se primarno razvio kako bi se mogla odrediti ekspanzijska energija, odnosno rad eksploziva i to u vojne svrhe (Brown, 2014).

Cilindar je izrađen od bakra zbog toga što može podnijeti veće deformacije prije što dođe do samog pucanja cilindra. Kako bi se zadovoljili pogodni uvjeti za širenje detonacije fronte i postizanja maksimalne brzine detonacije, minimalni omjer duljine i promjera cilindra iznosi 8:1. Debljina stijenki bakrenih cijevi je oko petine radijusa cilindra (Brown, 2014.)

Koristi se bakar visoke provodljivosti, bez udjela kisika (*Oxygen Free High Conductivity*) koji se dobiva žarenjem bakra u vakuumu, u struji inertnog dušika na otprilike 600 °C u trajanju od najmanje 2 sata; prema normi ASTM F68-05. (Hansson, 2009).

Brzina vanjske površine cilindra obično se mjeri u smjeru pomaka materijala pomoću specijaliziranih kamera, Fabry-Perot interferometra, PDV senzora ili drugih tehnologija (Hansson, 2009). Širenje stijenke cilindra mjeri se i bilježi, na određenim razmacima prateći uzdužnu os samog cilindra. Test ekspanzije cilindra prikazan je na slici 6-3.



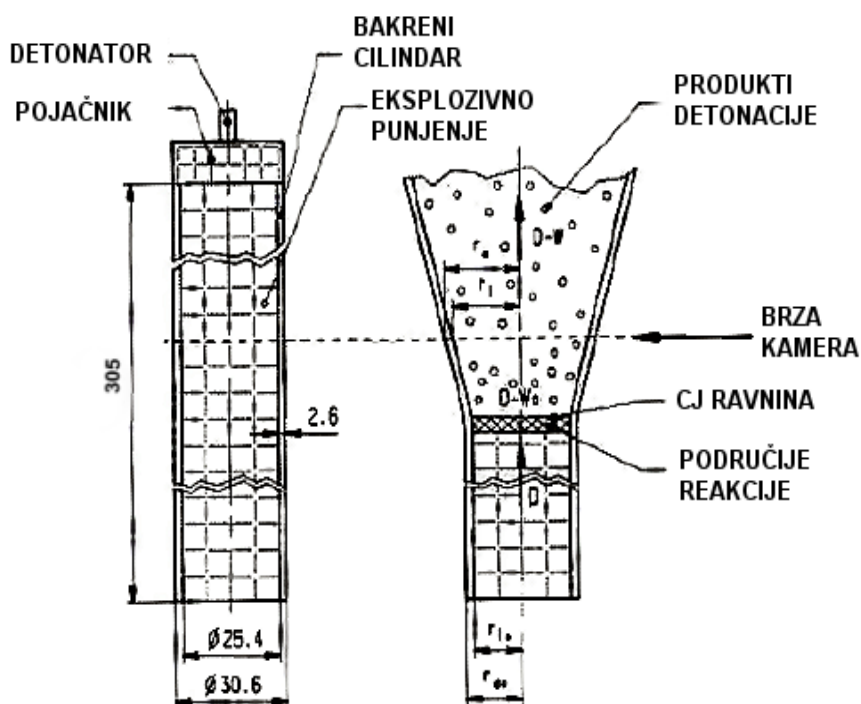
Slika 6-3: Test ekspanzije cilindra (Esen i suradnici, 2005)

Primjer snimanja testa ekspanzije cilindra brzom kamerom prikazan je na slici 6-4.



Slika 6-4: Detonacija u ekspanzijskom cilindar testu snimljena brzom kamerom (Topkaroglu, 2014)

Ispitivani eksploziv smješta se u bakreni cilindar. Standardizirani cilindar ima unutarnji promjer 25,4 mm, duljinu 306 mm te debljinu stijenki 2,6 mm. Iniciranje pripremljenog eksplozivnog punjenja izvršava se na jednom kraju cilindra pomoću detonatora i pojačnika. Ekspanzija cilindra bilježi se određenim uređajima. Shematski prikaz širenja bakrenog cilindra prikazan je na slici 6-5.



Slika 6-5: Shematski prikaz širenja bakrenog cilindra (Sućeska, 1995)

### 6.3.1 Načela ispitivanja ekspanzije metalnog cilindra

Ekspanziju metalnog cilindra autori često opisuju kao kalibrirani test (*cijevna bomba*) kojim je tijekom cijelog procesa uspješno očuvana gustoća energije detonacije. Izlazna vrijednost cilindar testa je funkcijska vrijednost odnosa vremena i brzine detonacije. Kvadratna funkcija brzine proporcionalna je gustoći detonacijske energije ( $E_d$ ) pri specifičnom relativnom volumenu ( $v$ ). Iz opisanih izlaznih podataka težnja je dobiti (Souers & Vitello, 2015):

- 1) odnos brzine u stijenkama bakrenog cilindra s gustoćom detonacijske energije;
- 2) eksperimentalne odnose dobivene putem testa svesti na analitičke;
- 3) dobivene rezultate povezati s JWL (Jones-Wilkins-Lee) jednadžbom stanja za eksplozivne tvari;
- 4) dobiti adekvatne rezultate u prethodnim točkama zbog točnosti pri daljnjim ispitivanjima ove vrste.

Kako je i ranije spomenuto, šuplji bakreni cilindar puni se eksplozivom. Slijedi detonacija eksplozivnog punjenja, dok se širenje samog cilindra i brzine oscilacija mjere i bilježe. Deformacija cilindra i brzine uzrokovane su djelovanjem produkata visokog tlaka koji se izrazito brzo šire te tako deformiraju stijenku cilindra. Brzine na karakteristično određenim mjestima na stijenci cilindra koriste se za proračun Gurneyjeve energije, dok se podaci o širenju (pomaku) stijenci cilindra i njenog ubrzanja koriste za izentropu detonacijskih produkata.

### 6.3.2. Jones-Wilkins-Lee jednadžba stanja

JWL (Jones-Wilkins-Lee) je jednadžba stanja koja se koristi pri modeliranju detonacije eksploziva te opisuje vezu između tlaka, volumena i energije detonacijskih produkata, a glasi:

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) e^{R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) e^{R_2 V} + \frac{\omega E}{V}, \quad (6-1)$$

gdje je:

$A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  i  $\omega$  konstante koje se trebaju utvrditi, ovise o svojstvima ispitivanog eksploziva,

$E$  - energija (J),

$V$  - volumen ( $\text{m}^3$ ).

Upotreba JWL jednadžbe stanja prilikom analize rezultata dobivenih metodom ekspanzije bakrenog cilindra je česta. Ukoliko se poveže s Gurneyjevom energijom osigurava detaljne informacije o svojstvima ispitanog eksploziva te o prijenosu i količini energije oslobođene tim procesom.

### 6.3.3. Gurneyjeva energija

Gurneyjeva energija  $E_g$  (J/kg) je energija pretvorena iz kemijske energije eksploziva u početnom stanju u kinetičku energiju konačnog stanja. Uz pretpostavku da je brzina metala konstantnog

iznosa duž njegove debljine te da su brzine metala i plinova u svakoj točki okomite na uzdužnu os promatranog sustava (Altgilbers i sr., 2011).

Primjerice, ukoliko eksplozivni naboj detonira u metalnom cilindru, uz pretpostavku da je gustoća produkata detonacije konstantna, izraz za Gurneyjevu energiju je sljedeći:

$$2E_g = \mu v_m^2 + \frac{1}{2} \int v_g dV, \quad (6-2)$$

gdje je:

$v_m$  - brzina stijenki materijala (m/s),

$v_g$  - brzina produkata detonacije (m/s),

$\mu$  - omjer mase cilindra i eksplozivnog punjenja.

Gurneyjeva konstanta  $\sqrt{2E_g}$  za pojedini eksploziv može se odrediti na više načina. Postoje različite relacije ovisno o autoru:

- Koch i suradnici (2002):  $\sqrt{2E_g} = \frac{v_d}{3,08}$  gdje je  $\sqrt{2E_g}$  - Gurneyjeva brzina (m/s);  $v_d$  - brzina detonacije eksploziva (m/s).

- Kennedy (1998):  $E_g \approx 0,7 \cdot Q_v$ , gdje je  $Q_v$  detonacijska toplina eksploziva (K).

#### **6.3.4. Rezultati ispitivanja ekspanzije metalnog cilindra**

Za različitu vrstu eksploziva dobivene su i različite vrijednosti kutne brzine, pomaka te energije. Usporedbom rezultata pojedinih ispitivanja ekspanzije bakrenog cilindra, najbolji pokazatelj dobije se upravo usporedbom Gurneyjeve energije.

Rezultati CYLEX ispitivanja za amonal prikazani su u tablici 6-1.

Tablica 6-1: Rezultati CYLEX testa za amonal (Anderson i sr., 2017)

Test	Gustoća amonala	Detonacijska brzina	$v_{\infty}$	Akceleracija $a_0$	Kutna brzina $\omega$	$E_{19}^*$	$tt_{19}^*$
Skala	(g/cm <sup>3</sup> )	(mm/ $\mu$ s)	(mm/ $\mu$ s)	(mm/ $\mu$ s <sup>2</sup> )	(-)	(kJ/g)	(kJ/g)
0.5*	1.023	2.644	804.03	260.23	0.1619	0.211	0.915
0.5*	1.023	2.644	843.28	268.97	0.1439	0.216	0.904
1*	1.023	3.068	947.17	375.00	0.1980	0.306	1.32
2*	1.044	3.673	1037.5	296.84	0.1431	0.384	1.63
2*	1.002	3.486	990.16	335.71	0.1695	0.349	1.54
2	0.968	3.516	1035.4	329.51	0.1591	0.379	1.72
3	0.953	3.824	1036.2	342.05	0.1651	0.401	1.85

$E_{19}$  označava energiju cilindra, dok  $tt_{19}$  označava Gurneyjevu energiju na određenim razmacima od 19 mm (Anderson i sr., 2017).

Rezultati ispitivanja za Anolit prikazani su u tablici 6-2.

Tablica 6-2: Iznosi Gurneyjeve energije, energije eksplozije i njihovog međusobnog omjera (Arvantidis i sr., 2004)

Test	ANFO (%) (Anolit)	Promjernaboja (mm)	$E_G$ (MJ/kg)	$E_G/E_0$	$E_G$ (MJ/dm <sup>3</sup> )
139	0	80	1.65	0.54	1.89
140	0	100	1.73	0.56	1.95
141	0	60	1.83	0.60	2.05
142	0	80	1.78	0.58	2.03
143	0	60	(1.96)	(0.64)	(2.23)
144	0	40	1.79	0.58	2.00
145	0	60	1.81	0.59	2.05
146	20	100	1.77	0.55	2.13
147	20	60	1.67	0.52	2.00
148	20	40	1.74	0.54	2.09
149	20	100	1.75	0.55	2.11
150	20	60	1.64	0.51	1.96

Prema rezultatima, izgledno je kako na Gurneyevu energiju i uporabu energije eksplozije ne utječe promjer naboja u ispitivanom rasponu, 40-100 mm. Vrijednost je 1,74 MJ/kg sa standardnim odstupanjem od oko 0,06 MJ/kg za 11 ispitivanja. Raspon izmjerenih vrijednosti je 1,65-1,83 MJ/kg (Arvantidis i sr., 2004).

Izračunati koeficijenti za JWL jednadžbu za različite vrste ANFO eksploziva prikazani su u tablici 6-3.

Tablica 6-3: Parametri JWL jednadžbe za ANFO eksplozive (Sućeska i sr., 2020)

Parametar	Jedinica	Lambrit	Nagolita	Prilit A	A-U-50
$\rho_0$	g/cm <sup>3</sup>	0,78	0,90	0,85	0,83
A	GPa	45,710002	62,394852	42,057219	42,063696
B	GPa	1,169164	1,430255	0,985142	1,010185
C	GPa	0,683685	0,717596	0,666875	0,676896
R <sub>1</sub>	-	3,993251	3,859844	3,600482	3,666969
R <sub>2</sub>	-	1,044354	0,972008	0,908969	0,935652
$\omega$	-	0,260953	0,256020	0,241440	0,248145
D	Km/s	4,03	4,31	3,85	3,89
P <sub>CJ</sub>	GPa	3,36	4,26	3,23	3,24
E <sub>0</sub> (V → ∞)	kJ/cm <sup>3</sup>	-3,349	-3,833	-3,606	-3,542
E <sub>0</sub> (p=0.1 MPa)	kJ/cm <sup>3</sup>	-2,928	-3,374	-3,108	-3,070
Q <sub>d</sub>	kJ/cm <sup>3</sup>	-2,965	-3,397	-3,169	-3,122
v <sub>s</sub> (7), ispitivanje	Km/s	1,182	1,225	1,114	1,124
v <sub>s</sub> (7), AUTODYN	Km/s	1,190	1,298	1,189	1,222
v <sub>s</sub> (7), po modificiranoj Gurneyjevoj jednakosti	Km/s	1,184	1,269	1,202	1,202

V<sub>s</sub> (7) je terminalna brzina stijenke cilindra, za V/V<sub>0</sub>=7

$$v_s^*(V_r)^* = \frac{\sqrt{2E_G^*(V_r)}}{\sqrt{\left(\frac{M_C}{M_E} + \frac{1}{2}\right)}} \quad \text{Modificirana Gurneyjeva jednakost}$$



Usporedbom raspoložive kemijske energije ANFO eksploziva i Gurneyjeve energije za  $V/V_0=7$  (terminalna brzina stijenske cilindra), proizlazi da je samo 45-60% raspoložive energije pretvoreno u Gurneyjevu energiju, dok primjerice za slučaj PETN ta brojka iznosi oko 75%.

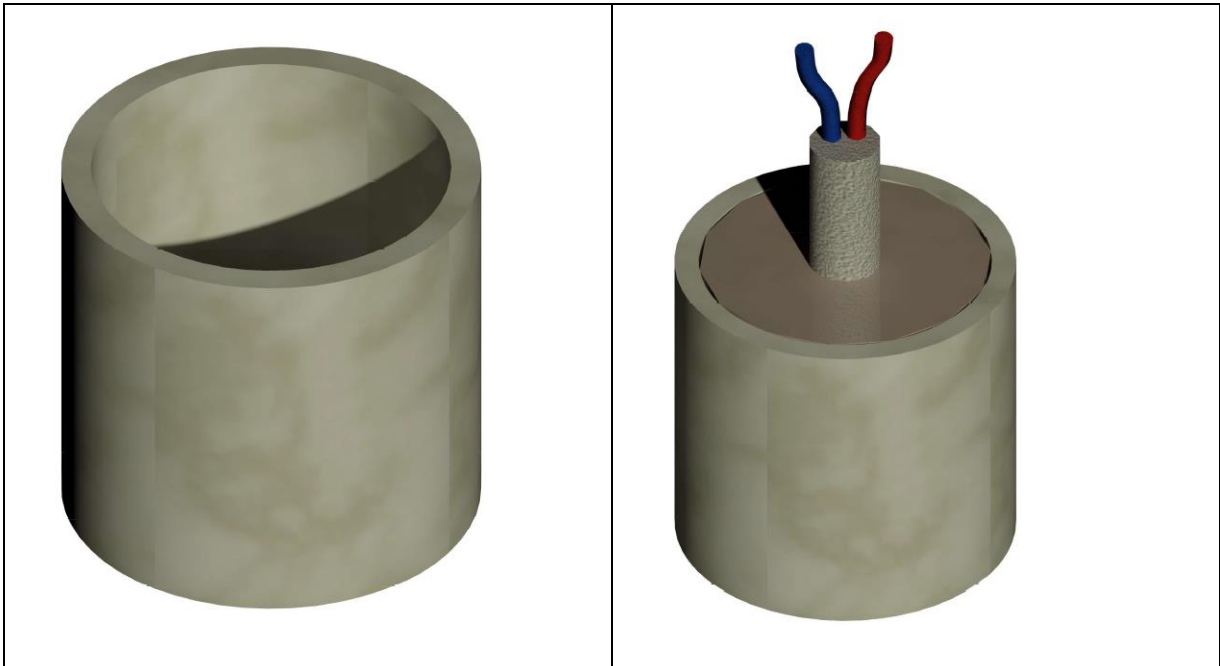
Parametri JWL jednadžbe dobiveni EXPLO5 proračunom kao i AUTODYN metodom predviđene su terminalne brzine s greškom manjom od 6% (75 m/s) za većinu eksploziva te greškom 9% (98 m/s) za neke od njih (Sućeska i sr., 2020).

## **7. PRIJEDLOG METODE**

Uzimajući u obzir postavke metode ispitivanja metalnog cilindra može se predložiti metoda ispitivanja procesa širenja cilindra izrađenog od jezgre stijenskog materijala. Pri na taj način postavljenog ispitivanja moguće bi bilo mjerenje, odnosno praćenje brzine radijalne ekspanzije stijenske cilindra, nastanka fragmenata te mijenjanje veličine fragmenata tijekom procesa ekspanzije, brzine prirasta volumena cilindra te omjer predane kinetičke energije stijenci cilindra prema raspoloživoj kemijskoj energiji- teoretskoj toplini eksploziva.

Ova metoda može doprinijeti u razumijevanju procesa fragmentacije stijene u okolini minske bušotine te uz iznalaženje parametra koji bi realnije povezivao svojstva eksploziva sa svojstima stijene.

Načelan prikaz metode dan je slikama 7-1 i 7-2.



Slika 7-1: Cilindar pripremljen za ispitivanje i napunjen eksplozivom (Dobrilović, 2021)



Slika 7-2: Cilindar tijekom ispitivanja (Dobrilović, 2021)

## **8. ZAKLJUČAK**

U radu su opisane statičke i dinamičke karakteristike stijena, kao i svojstva eksploziva te ukratko detonacijski proces. Korišteni su rezultati ispitivanja ekspanzije metalnog cilindra - CYLEX test od nekolicine autora. Iz rezultats ispitivanja dolazi se do zaključka da deformacija i konačna brzina stijenske metalnog cilindra ovise ponajprije o debljini stijenske metalnog cilindra i vrsti eksploziva (promjena promjera eksplozivnog punjenja nije uzrokovala drastična odstupanja).

Opisana metoda je prema brojnim laboratorijskim istraživanjima vrlo pouzdana za relevantnu usporedbu djelovanja raznih gospodarski eksploziva uz korištenje koncepta Gurneyjeve energije.

Postoji mogućnost za provedbu ispitivanja na cilindričnom uzorku stijene, čiji bi se rezultati vrlo izgledno mogli dovesti u vezu s rezultatima ispitivanja ekspanzije metalnog cilindra. Ostaje odrediti dimenzije samog uzorka u koji bi se stavilo eksplozivno punjenje te pronaći odgovarajući način registriranja samog djelovanja eksploziva na uzorak.

## 9. LITERATURA

1. ABDAQADIR K.Z. i ALSHKANE M.Y., 2018. Physical and Mechanical Properties of Metamorphic Rocks. Scientific study, College of Engineering, University of Sulaimani, Al-Sulaimaniyah, Kurdistan Region, Iraq.
2. ARVANTIDIS, I., NYBERG, U., OUCHTERLONY, F. (2004): *The diameter effect on detonation properties of cylinder test experiments with emulsion E682*. SveBeFo Report 66. Stockholm. ISSN1104-1773
3. ALTGILBERS, L., BAIRD, J., FREEMAN, B., LYNCH, C., SHKURATOV, S. (2011): *Explosive Pulsed Power*. British Library Cataloguing-in-Publication Data. Imperial College Press.
4. ANDERSON, E. K., SHORT, M., JACKSON, S.I. (2017): *Cylinder test wall velocity profiles and product energy for ammonium nitrate and aluminum explosive*. AIP Conference Proceedings 1793, 030018 (2017) URL: <https://doi.org/10.1063/1.4971476> (19.01.2021.)
5. BRIŠEVAC Z., KUJUNDŽIĆ T., ČAJI S., 2015. Sadašnje spoznaje o ispitivanju vlačne čvrstoće stijena uporabom brazilskoga testa , The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin, pp. 115-128
6. BROWN G. J. i REDDISH D. J., 1997. Experimental relations between rock fracture toughness and density. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 34, pp. 153-155
7. BROWN, G. (2014): *High Explosive Science & Technology at Los Alamos National Laboratory*. NavalAcademy. LA-UR-14-27728
8. DEJIAN S. i XILIN L., 2008. EXPERIMENTAL STUDY ON DYNAMIC COMPRESSIVE PROPERTIES OF ROCKS UNDER DIFFERENT STRAIN RATE. Department of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai, China.
9. DINCER I., ACAR A., COBANOGLU I. i URAS Y., 2004. Correlation between Schmidt hardness, uniaxial compressive strength and Young's modulus for adesites, basalts and tuffs. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Springer.

URL:

[https://www.researchgate.net/publication/225387553\\_Correlation\\_between\\_Schmidt\\_hardness\\_uniaxial\\_compressive\\_strength\\_and\\_Young's\\_modulus\\_for\\_andesites\\_basalts\\_and\\_tuffs](https://www.researchgate.net/publication/225387553_Correlation_between_Schmidt_hardness_uniaxial_compressive_strength_and_Young's_modulus_for_andesites_basalts_and_tuffs)

(13.01.2021.)

10. DOBRILOVIĆ, M. (2008): Raspoloživa energija tlačnog udarnog vala udarne cjevčice i njezina primjena u iniciranju elektroničkog detonatora. Doktorska disertacija. Rudarsko - geološko - naftni fakultet. Sveučilište u Zagrebu.

11. ESTER, Z. (2005): Miniranje I. Eksplozivne tvari, svojstva i metode ispitivanja. Udžbenik. Rudarsko - geološko - naftni fakultet. Sveučilište u Zagrebu.

12. GEOPIXEL, 2013. Densities of Typical Rock Types and Minerals  
Link: [http://geopixel.co.uk/lab3/Densities\\_of\\_Typical\\_Rock\\_Types\\_and\\_Minerals.pdf](http://geopixel.co.uk/lab3/Densities_of_Typical_Rock_Types_and_Minerals.pdf)

(11.01.2021.)

13. HANSSON, H. (2009): *Determination of properties for emulsion explosives using cylinder expansion tests and numerical simulation*. Sweden. Luleå University of Technology. ISSN 1653-5006.

14. HARRIER, D. (2016): *Cylinder expansion test and gas gun experiment comparison*. Summer Internship Presentation - Hydro Working Group. LA-UR-16-24737

15. IQBAL J.M., MOHANTY B. i XIA K., 2008. Dynamic Tensile Strength and Model Fracture Toughness in Granitic Rocks. Lasseonde Institute, Univeristy of Toronto, Toronto, Canada.

16. ISRM, 1981. Rock Characterization, Testing and Monitoring, ISRM Suggested Methods. Editor E.T. Brown. Pergamon press.

17. KUMAR R.B., VARDHAN H. i GOVINDARAJ M., 2011. Prediction of Uniaxial Compressive Strength, Tensile Strength and Porosity of Sedimentary Rocks Using Sound Level Produced During Rotary Drilling. Rock Mechanics and Rock Engineering; Volume 44, Issue 5, 2011, Pages 213-220.

18. MARIČIĆ A., 2014. Utjecaj svojstava benkovačkoga prirodnoga kamena na njegovu postojanost. Doktorski rad. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet

19. MARINOS P., MARINOS V. i HOEK E., 2005. Characterisation and engineering properties of tectonically undisturbed but lithologically varied sedimentary rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*; Volume 42, Issue 2, February 2005, Pages 277-285.
20. Mindat Organization, 2014. Mohs' hardness testing of minerals and rocks. Hudson Institute of Mineralogy. Link:  
<https://www.mindat.org/article.php/1925/Mohs%27+hardness+testing+of+minerals+and+rocks> (15.01.2021.)
21. MISKOVSKY K., 2012. Effect of heat on the mechanical properties of selected rock types - A laboratory study. *Lulea University of Technology, Sweden, Envix Nord AB*
22. NIELSEN, K., HELTZEN, A.M., (1987): Recent Norwegian Experience with Polystyrene Diluted ANFO (Isanol), Second international symposium on rock fragmentation by blasting, pp 231-238, Society for Experimental Mechanics: Bethel, Connecticut.
23. OUTCHERLONY, F. (1997): Prediction of Crack Lengths in Rock after Cautious Blasting with Zero Inter-Hole Delay. FRAGBLAST, *International Journal of Blasting and Fragmentation*, 1, pp 417-444.
24. PLEŠE, M. (1987): *Fizika eksploziva*, Štamparija CVTŠ, Zagreb, 309
25. PERSSON, P.A., HOLMBERG. R., LEE, J., (1994): *Rock blasting and explosives engineering*, Boca Raton, London, New York, Washington D.C.: CRC Press.
26. SILVA G.C.O., (2007): *Development, Characterization and Application of a Reactive Bulking Agent for Wall Control*. Dissertation. Queen's University Kingston, Pp 370, Ontario.
27. SUĆESKA, M. (1995): *Test Methods for Explosives*. Springer Science+Business Media New York. ISBN 978-1-4612-0797-9 (e-Book)
28. SUĆESKA M., SERENE Y.H.C., QINGLING Z., DOBRILOVIĆ M. i ŠTIMAC B., 2020. Prediction of Cylinder Wall Velocity Profiles for ANFO Explosives Combining Thermochemical Calculation, Gurney Model and Hydro Core. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, str. 1-10.

29. SOUERS, P.C. & VITELLO, P.A. (2015): *Detonation Energy Densities from the Cylinder Test*. Lawrence Livermore National Laboratory. LLNL-TR-666420

30. ŠKRLEC V., 2015. Analiza primjenjivosti eksploziva smanjenje gustoće za gospodarska miniranja. Disertacija, Rudarsko-Geološko-Naftni fakultet, Zagreb

31. ŠTIMAC, B. (2019): Numeričko modeliranje ANFO eksploziva. Javni seminar. Prvi rezultati istraživanja. Poslijediplomski studij Primjenjene geoznanosti, rudarstvo i naftno inženjerstvo. Rudarsko - geološko - naftni fakultet. Sveučilište u Zagrebu.

32. Virtual Expo Group, 2020. Choosing The Right Hardness Tester

Link: <http://guide.directindustry.com/choosing-the-right-hardness-tester/> (14.01.2021.)

33. WHITTAKER B. N., SINGH R. N. i SUN G., 1992. Rock fracture mechanics: principles, design and applications. Amsterdam: Elsevier.

34. WYLLIE C.D. i NORRISH I.N., 2003. Rock Strength Properties and Their Measurement.

Link: <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr247/sr247-014.pdf> (15.01.2021.)