

Učinak eksplozivnog punjenja u betonskim elementima

Vukšić, Andrija

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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:169:324734>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-20**



Repository / Repozitorij:

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



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

UČINAK EKSPLOZIVNOG PUNJENJA U BETONSKIM ELEMENTIMA

Diplomski rad

Andrija Vukšić

R294

Zagreb, 2022.



KLASA: 602-01/22-01/220
URBROJ: 251-70-11-22-2
U Zagrebu, 14.12.2022.

Andrija Vukšić, student

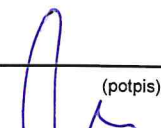
RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/22-01/220, URBROJ: 251-70-11-22-1 od 14.12.2022. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

Učinak eksplozivnog punjenja u betonskim elementima

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


Voditelj



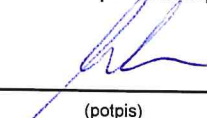
(potpis)
Prof.dr.sc. Mario Dobrilović

(titula, ime i prezime)

Suvoditelj


.....
(potpis)
Doc.dr.sc. Siniša Stanković
.....
(titula, ime i prezime)

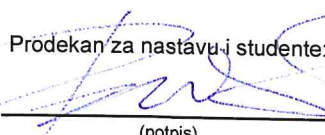
Predsjednik povjerenstva za
završne i diplomske ispite:



(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)

Učinak eksplozivnog punjenja u betonskim elementima

Andrija Vukšić

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

Sažetak

Rudarstvo je temeljna grana gospodarstva. S obzirom da se za pridobivanje mineralnih sirovina koriste eksplozivne tvari, rudarstvo je bitno utjecalo na njihov razvoj. Najznačajnije primjene eksploziva su u vojnoj industriji, građevinarstvu te rušenju ili uklanjaju objekata. U ovom radu analiziran je učinak eksploziva u betonskim elementima. Ispitivanja su provedena u realnim uvjetima na betonskim pločama i betonskim cijevima debljine 6 centimetara na poligonu za miniranje Laboratorija za ispitivanje eksploziva Rudarsko – geološko naftnog fakulteta.

Ključne riječi: Eksplozivi, rušenje objekata, betonski elementi

Završni rad sadrži: 33 stranice, 1 tablicu, 21 sliku i 25 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentori: Dr. sc. Mario Dobrilović, redoviti profesor RGNF
Dr. sc. Siniša Stanković, Docent RGNF

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

Effect of explosive charge in concrete elements

Andrija Vukšić

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

Abstract

Mining is a fundamental branch of the economy. Since explosive substances are used for the extraction of mineral raw materials, mining has significantly influenced their development. The most significant applications of explosives are in the military industry, construction and the demolition or removal of objects. This paper analyzes the effect of explosives in concrete elements. The tests were carried out under real conditions on concrete slabs and concrete pipes with a thickness of 6 centimeters at the blasting range of the Explosives Testing Laboratory of the Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering.

Keywords: Explosives, demolition, concrete elements

Thesis contains: 33 pages, 1 table, 21 figures and 25 references.

Original in: Croatian

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

Supervisors: PhD Mario Dobrilović, Full Professor
PhD Siniša Stanković, Assistant Professor

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

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. CILJEVI RADA	2
3. EKSPLOZIJE I EKSPLOZIVI	4
3.1. Eksplozija	4
3.2. Eksplozivi.....	7
3.3. Sustavi iniciranja	8
4. KARAKTERISTIKE BETONA	10
4.1. Komponente sastava betona	10
4.1.1. Cement	10
4.1.2. Agregat.....	11
4.1.3. Voda i dodatci betonu	12
4.2. Svojstva betona	12
4.3. Karakteristike ispitivanog uzorka.....	15
5. RUŠENJE OBJEKATA	16
5.1. Mehaničke metode	16
5.1.1. Mehaničko rušenje pomoću građevinskih strojeva	16
5.1.2. Mehaničko rušenje hidrauličnim klinovima	17
5.1.3. Rezanje elemenata konstrukcije dijamantnim alatima.....	17
5.1.4. Metode taljenjem materijala.....	18
5.1.5. Metode s ekspandirajućim materijalima	18
5.1.6. Metoda razaranja visokim tlakom vode i visokim tlakom CO ₂	18
5.1.7. Metoda usitnjavanja betona primjenom pirotehničkih i barutnih punjenja	19
5.2. Rušenje upotrebom eksploziva.....	19
6. PREGLED PRETHODNIH ISPITIVANJA	21
6.1. Analiza utjecaja čimbenika miniranja pri rušenju betonskih i ciglenih dimnjaka	21
6.2. Zavisnost učinka naboja u betonskim elementima tanke stijenke o minerskim parametrima	22
7. PLAN ISPITIVANJA	24
8. ANALIZA REZULTATA	25
9. ZAKLJUČAK	31
10. LITERATURA	32

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Primjer narušene statičke stabilnosti objekta (Stanzi, 2021)	2
Slika 2-2. Betonski dimnjak tanke stijenke srušen eksplozivnim nabojem (Vukšić i Kosović, 2022).....	3
Slika 3-1. Shema eksplozije (Dobrilović, 2008).....	4
Slika 3-2. Detonacija u patroni eksploziva (Sućeska, 2001)	6
Slika 4-1. Proces proizvodnje cementa (Construction cost, n.d.).....	11
Slika 4-2. Uzorak za terenska ispitivanja	15
Slika 5-1. Rušenje objekta pomoću građevinskog stroja (Volvo, 2020).....	16
Slika 5-2. Dijamantno rezanje betonske ograde (Cro-rez, n.d.)	17
Slika 6-1. Učinak eksploziva (Katalinić et al, 2021).....	21
Slika 6-2. Djelomično neuspjelo rušenje dimnjaka (Katalinić et al, 2021).....	22
Slika 6-3. Prijedlog rasporeda za 4 bušotine malog promjera (8 i 10 mm) za emulzijski eksploziv (Vukšić i Kosović, 2022)	23
Slika 6-4. Prijedlog rasporeda za 4 bušotine većeg promjera (12 i 16 mm) za emulzijski eksploziv (Vukšić i Kosović, 2022)	23
Slika 8-1. Redoslijed radnji prilikom miniranja	25
Slika 8-2. Ishod miniranja koristeći trokutasti raspored 50x100 mm.....	25
Slika 8-3. Ishod miniranja koristeći trokutasti raspored 100x200 mm.....	26
Slika 8-4. Betonska cijev prije i nakon miniranja	27
Slika 8-5. Mjerenje radijusa ljevkastog i čistog odloma	27
Slika 8-6. Mjerenje duljine razmaka između kratera.....	28
Slika 8-7. Učinak naboja koristeći raspored 75x150 mm.....	29
Slika 8-8. Učinak naboja koristeći raspored 50x100 mm.....	29
Slika 8-9. Učinak naboja koristeći raspored 25x50 mm.....	30

POPIS TABLICA

Tablica 4-1. Tehničke karakteristike betonskih cijevi (Samoborka, 2016).....	15
--	----

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
P	N	Maksimalna sila
A_c	mm ²	Nominalna ploština
f_{cm}	MPa	Srednja tlačna čvrstoća
E_b	GPa	Modul elastičnosti
σ	GPa	Naprezanje
ε	-	Deformacija
CO_2	-	Ugljikov dioksid
q	kg/m ³	Specifična potrošnja eksploziva
ϕ	mm	Promjer bušotine
m_e	kg	Masa eksploziva
T	K	Temperatura
t	°C	Temperatura
p	bar	Tlak
v	kg/dm ³	
Q	kJ/g, kJ/kg	Energija

1. UVOD

Rudarstvo je temeljna grana gospodarstva koja obuhvaća radove na istraživanju, pridobivanju i oplemenjivanju mineralnih sirovina (Vujec, 1996). Razvoj ljudske civilizacije ovisi o dostupnosti prirodnih izvora energije te mogućnosti njihove upotrebe. Porastom broja svjetskog stanovništva i naglim razvojem tehnologije stvorila se potreba za pridobivanjem sve većih količina mineralnih sirovina, što je direktno motiviralo upotrebu eksploziva u rudarskoj industriji i njihov razvoj u cjelini, budući da su eksplozivi zamijenili spor i slabo učinkovit proces otkopavanja sirovine ručnim alatima. 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).

Danas postoje razne primjene eksplozije i eksplozivnih tvari, počevši od očitih primjena u vojnoj, rudarskoj i građevinskoj industriji te poljoprivredi, sve do primjena u borbi protiv elementarnih nepogoda, u sustavu za katapultiranje pilota, u sustavu za zaštitu vozača automobila zračnim jastukom, u metalurgiji za obradu metala, medicini i slično (Sućeska, 2001). U kontekstu ovog rada, najznačajnija primjena je prilikom rušenja ili uklanjanja objekata. Rathi i Khandve (2014) navode kako rušenje podrazumijeva uništavanje, rastavljanje ili urušavanje dotrajalih objekata.

Na primjeru nedavnog uklanjanja dimnjaka ciglane Črnomerec mogu se otkriti dva osnovna motiva za uklanjanje objekata:

- narušena statička stabilnost kao posljedica potresa u Zagrebu i Petrinji (slika 2-1.),
- dobivanje i prenamjena prostora uklanjanjem objekata koji pripadaju ugaslom industrijskom pogonu (Čančar, 2021).

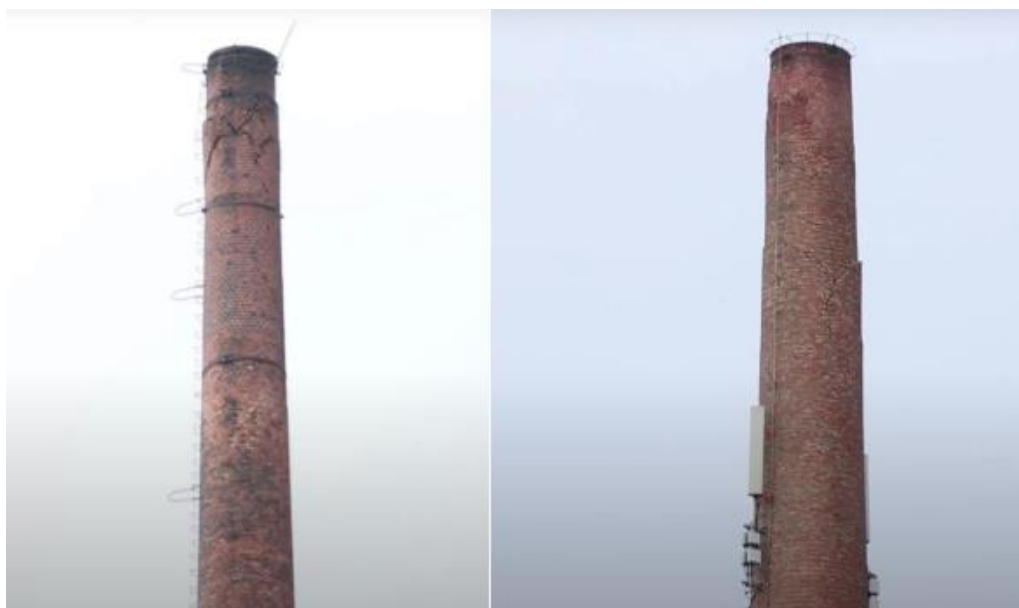
Osim ciglenih, postoje i betonski dimnjaci. Debljina stijenke betonskog dimnjaka je relativno mala, stoga se za takve elemente kaže da su tanke stijenke. Prethodna ispitivanja i iskustva u izvedenim projektima ukazuju da je iznimno zahtjevno uspješno izvesti rušenje objekata izgrađenih od takvih elemenata, stoga je potrebno temeljito analizirati i proučiti problematiku tog procesa.

2. CILJEVI RADA

Ovaj diplomski rad može se promatrati kao svojevrstan nastavak istraživanja na temu zavisnosti učinka naboja u betonskim elementima tanke stijenke o minerskim parametrima. Povod za istraživanja javio se prilikom neuspješnog rušenja modela dimnjaka kao posljedica nepravilnog odabira minerskih parametara.

Betonski elementi tanke stijenke nemaju točno određenu graničnu debljinu. Okvirno, debljina stijenke ne prelazi 15 centimetara. Najpoznatija primjena takvih elemenata je za izradu dimnjaka. Prema tome, ukoliko je potrebno takve objekte ukloniti, iznimno je zahtjevno takve plitke minske bušotine izbušiti u određenom rasporedu i u potrebnoj dubini, a zatim napuniti odgovarajućom količinom eksplozivnog naboja. Na slici 2-1 nalazi se dimnjak uklonjen iz sigurnosnih razloga, a na slici 2-2 prikazano je rušenje betonskog dimnjaka.

Dakle, u ovom radu ispitano je nekoliko predloženih rasporeda minskih bušotina u prethodnom ispitivanju te je analiziran i uspoređen rezultat miniranja betonskih ploča, a zatim i betonskih cijevi kako bi se eliminirao utjecaj konačnosti ploča i stvaranje odloma na rubovima odnosno slobodnim površinama. Nadalje, ponuđene su smjernice za daljnja istraživanja. Sva terenska ispitivanja provedena su na poligonu za miniranje Laboratorija za ispitivanje eksploziva Rudarsko – geološko – naftnog fakulteta u općini Ljubešćica u Varaždinskoj županiji.



Slika 2-1. Primjer narušene statičke stabilnosti objekta (Stanzi, 2021)



Slika 2-2. Betonski dimnjak tanke stijenke srušen eksplozivnim nabojem (Vukšić i Kosović, 2022)

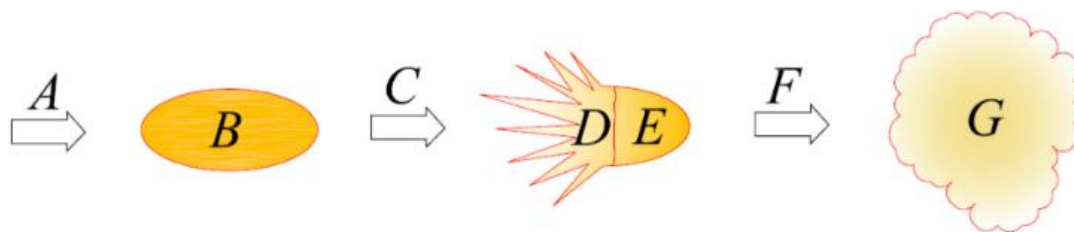
3. EKSPLOZIJE I EKSPLOZIVI

Za bolje razumijevanje rušenja objekata upotrebom eksploziva nužno je poznavati tehniku miniranja te osnovne pojmove kao što su eksplozija i eksplozivne tvari.

3.1. Eksplozija

Eksplozija se može definirati kao proces pri kojem dolazi do naglog prijelaza ili oslobađanja energije. Također, eksplozija je fizikalni proces koji se pojavljuje kao posljedica prirodnog djelovanja (grmljavina ili erupcija vulkana) ili ljudskih aktivnosti (Škrlec, 2015).

Na slici 3-1 nalazi se shematski prikaz eksplozije.



Slika 3-1. Shema eksplozije (Dobrilović, 2008)

Tumač:

- A – inicijalni impuls,
- B – neporemećena eksplozivna tvar ($t \approx 20$ °C, $v \approx 0,2-1,5$ kg/dm³, $p \approx 1$ 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/dm³, $p \approx 105$ bar, $Q \approx 3,5-7,5$ kJ/g).

Dva ključna čimbenika koja karakteriziraju eksploziju su količina oslobođene energije i vrijeme. Primjerice, pri eksploziji jednog kilograma gospodarskih eksploziva oslobađa se 3000 – 6000 kJ/kg i to se definira kao snažna eksplozija jer se događa u nekoliko

milisekundi. S druge strane, sagorijevanjem jednog kilograma ugljena oslobađa se otprilike 39000 kJ/kg, ali tijekom dužeg vremenskog perioda (Savić, 2000).

Po svojoj prirodi, eksplozije se dijele na:

- Fizikalne,
- Nuklearne,
- Kemijske.

Fizikalne eksplozije prilikom pretvorbe početne tvari uključuju fizikalne procese kod kojih uslijed povećanja tlaka dolazi do nagle ekspanzije. Konkretno, kod fizikalnih eksplozija isključivo dolazi do fizikalnog oslobađanja ili pretvorbe jednog oblika energije u drugi bez ostalih reakcija koje bi utjecale na promjenu kemijskog sastava tvari. Primjeri takvih eksplozija su eksplozije pare u kotlu ili ekspanzije jako stlačenog plina u spremniku.

Nuklearne eksplozije su procesi pretvaranja nuklearne energije u toplinsku. Takve eksplozije događaju se spontano u svemiru, ali i na Zemlji kao posljedica ljudskog djelovanja.

Kemijske eksplozije su procesi naglog kemijskog razlaganja eksplozivne tvari pri čemu se odvija pretvorba u plinovito stanje uz oslobađanje toplinske energije. Ovakvi procesi se događaju prilikom miniranja stijenskog materijala eksplozivnim tvarima čija se potencijalna energija koristi za dobivanje mehaničkog rada. Valja napomenuti kako različite brzine razlaganja tvari daju različitu količinu oslobođene energije, odnosno različitu snagu eksplozije.

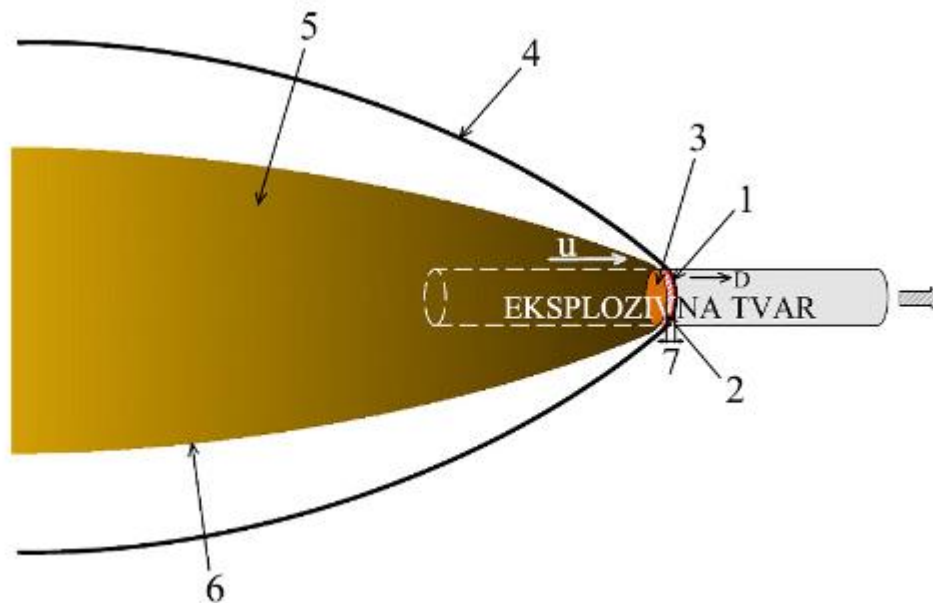
Dakle, eksplozija se može odvijati na dva načina: sagorijevanje ili detonacija. Obje reakcije koriste se za dobivanje korisnog rada. Prema Škrlecu (2015), iniciranje detonacije u praksi primjene eksplozivnih tvari može nastati na sljedeće načine:

- Dovođenjem topline eksplozivnom materijalu,
- Prelaskom sagorijevanja u detonaciju – inicijalni eksplozivi,
- Djelovanjem udarnog impulsa i toplim točkama – sekundarni eksplozivi.

Pojedine eksplozivne tvari ne mogu iz sagorijevanja razviti detonaciju ni u kojim uvjetima, stoga im je za razvijanje stabilne detonacije potrebno dovesti energiju u obliku inicijalnog impulsa odgovarajuće jačine. Detonacija je redovito nadzvučni proces u eksplozivnoj tvari. Širi se mehanizmom toplih točaka, defekata ili uključaka u eksplozivnoj tvari koji postaju centri za daljnje širenje reakcije. Ispred fronte kemijskih reakcija nalazi se

fronta udarnog vala, zona visokostlačenog eksplozivnog materijala pripremljenog za reakciju. Cijela reakcija obavi se u redu veličine vremena ns do μs (Sućeska, 2001).

Na slici 3-2 nalazi se shematski prikaz detonacije u patroni eksploziva.



Slika 3-2. Detonacija u patroni eksploziva (Sućeska, 2001)

Tumač:

- 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. Eksplozivi

Eksplozivne tvari ili eksplozivi su kemijski spojevi ili smjese koje imaju sposobnost da pod utjecajem vanjskog energetskeg impulsa detoniraju, odnosno kemijski se razlažu u vrlo kratkom vremenu pritom oslobađajući znatnu količinu topline i plinova (Krsnik, 1989).

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).

Danas postoji velik broj eksploziva koji se razlikuju po sastavu, fizičko – kemijskim i eksplozivnim svojstvima, stoga se nameće potreba za racionalnom klasifikacijom.

Jedna od osnovnih podjela je prema osjetljivosti i namjeni (Krsnik, 1989):

- Inicijalni,
- Brizantni,
- Rudarski,
- Specijalni eksplozivi.

Inicijalni eksplozivi služe za iniciranje manje osjetljivih brizantnih eksploziva zbog svoje velike osjetljivosti na udar, trenje i temperaturu. Dakle, pod djelovanjem određenog vanjskog impulsa ovakvi eksplozivi detoniraju, stoga se koriste kao inicijalno punjenje rudarskih kapica i električnih detonatora.

Brizantni eksplozivi su manje osjetljivi na prethodno navedene impulse od inicijalnih. U dodiru s plamenom lagano sagorijevaju bez detonacije. Razorna snaga ovakvih eksploziva vrlo je velika i zbog toga su važna komponenta u proizvodnji rudarskih eksploziva.

Rudarski eksplozivi zapravo predstavljaju sve eksplozive koji se upotrebljavaju za miniranje u rudarstvu, građevinarstvu, šumarstvu, poljoprivredi i drugim privrednim granama.

U skupinu **specijalnih** eksploziva spadaju eksplozivi koji su namijenjeni za miniranje u specijalne svrhe i pod posebnim uvjetima, kao npr. metanski eksplozivi (ugljenokopi), eksplozivi za geofizička ispitivanja, nuklearni eksplozivi i drugi (Krsnik, 1989).

Podjela prema kemijskom sastavu je također vrlo bitna (Škrlec, 2015):

- Amonij – nitratno praškasti eksplozivi,
- ANFO eksplozivi,
- Plastični eksplozivi,
- Vodoplastični ili slurry eksplozivi,
- Emulzijski eksplozivi.

Potrebno je poznavati svojstva eksploziva kako bi se odabrao onaj optimalan za potrebe određenog projekta. Najvažnija svojstva gospodarskih eksploziva su brzina i stabilnost detonacije, snaga, gustoća, vodootpornost, osjetljivost na iniciranje, sigurnost pri upotrebi i dr.

3.3. Sustavi iniciranja

Zadatci sredstava za iniciranje eksplozivnih punjenja u tehnologiji miniranja su sljedeći:

- Pouzdanost u smislu uspješnosti iniciranja,
- Sigurno iniciranje eksplozivnog punjenja sa stanovišta izvođača miniranja,
- Omogućiti željeni redoslijed otpucavanja pojedinih punjenja,
- Omogućiti željeni vremenski razmak između otpucavanja, odnosno interval kašnjenja.

Sustav za iniciranje čine različita sredstva i predstavljaju kombinaciju eksplozivnih sredstava i dodatnih komponenti namijenjenih da prenesu inicijalni impuls i iniciraju minsko polje. Sva primijenjena sredstva se međusobno povezuju u mrežu za paljenje s točno određenom funkcijom. Potrebno je razlikovati sredstva za zadavanje inicijalnog impulsa (sredstva za aktiviranje minskog polja), sredstva za prijenos impulsa, usporivače i inicijatore (Savić, 2000).

Najpoznatiji sustavi iniciranja su:

- Sustav iniciranja sporogorećim štapinom i rudarskom kapicom br. 8,
- Sustav iniciranja detonirajućim štapinom,
- Sustav iniciranja električnim detonatorima,
- Neelektrični sustav iniciranja (NONEL sustav),

- Elektronički sustav iniciranja.

Poseban naglasak bit će na posljednja tri sustava, obzirom da se ista danas najčešće koriste.

Neelektrični sustav iniciranja danas je najčešće korišten sustav. Zove se još i sustav „udarne cijevi“. Prednosti su u neosjetljivosti na lutajuće struje i statički elektricitet, jednostavnosti rukovanja, mehaničkoj čvrstoći i nosivosti cjevčice, nerazaranju čepa minske bušotine i neizazivanju zračnog udarnog vala. Isto tako, za razliku od električnih detonatora, nemaju ograničenja broja bušotina u minskom polju, kad gledamo seizmički utjecaj miniranja. S druge strane, osnovna mana je nemogućnost provjere ispravnosti mreže nakon spajanja.

Električni sustav iniciranja je najjeftiniji sustav, te je i dalje dosta korišten sustav u privredi. Ispitivanja u sklopu ovog diplomskog rada obavila su se upravo koristeći ovaj sustav iniciranja minskog polja. Glavne prednosti električnih detonatora su kontrola povezanosti minskog polja mjerenjem električnog otpora, istovremenost iniciranja svih detonatora u mreži i neosjetljivost na prekide uzrokovane mehaničkim djelovanjem dijela odminirane stijenske mase. Glavni nedostatak električnih detonatora je rizik od preranog pokretanja, tj. neželjenog pokretanja, bilo od radiofrekvencijskih prijenosa, magnetskih polja od visokonaponskih kabela ili od grmljavinskih oluja.

Posljednjih godina *elektronički detonatori* postali su dostupniji, a novi sustavi neprestano se razvijaju. Prednosti su u tome što se postižu točna vremena kašnjenja u relativno dugim vremenskim razdobljima, sustav se može provjeriti i imun je na slučajno iniciranje. Elektronički sustavi posebno su korisni prilikom rušenja višekatnih zgrada jer omogućuju bolju kontrolu gomile krhotina od bilo koje druge metode (Ester i Dobrilović, 2016). Nedostatak elektroničkih sustava je u tome što uz veće troškove svakog detonatora, svaki sustav zahtjeva i pomoćnu opremu specifičnu za sustav za programiranje te aktiviranje detonatora uz visoke troškove nabave i potrebne obuke.

4. KARAKTERISTIKE BETONA

Obzirom da se ispituje zavisnost učinka naboja u betonskim elementima, u ovom poglavlju pojašnjena su osnovna svojstva betona te svojstva njegovih komponenata. Također, dan je kratak opis karakteristika ispitivanog uzorka.

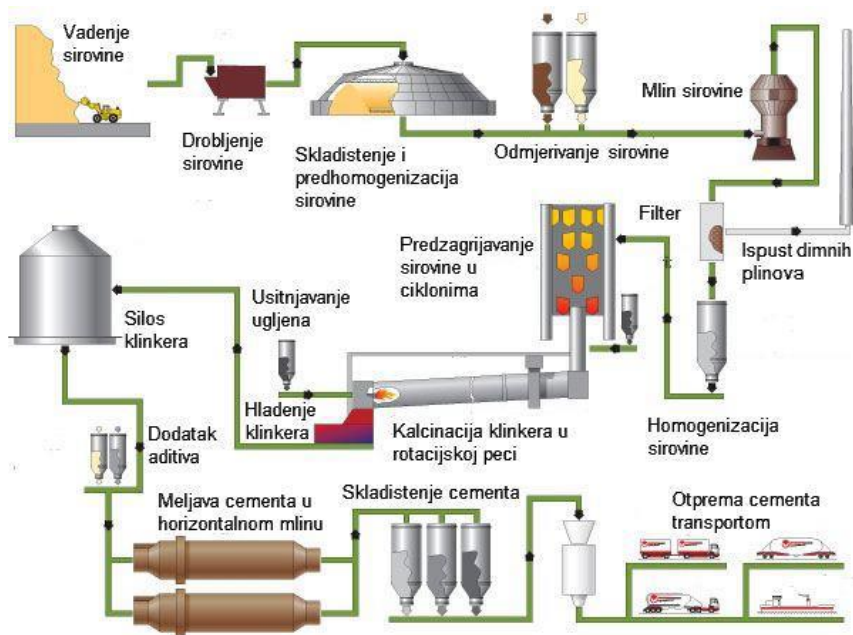
4.1. Komponente sastava betona

4.1.1. Cement

Cement podrazumijeva hidraulično, građevno vezivo koje očvrstne na zraku i pod vodom. Portlandski cement jest hidraulični cement proizveden mljevenjem klinkera koji sačinjavaju hidraulični kalcijevi silikati uz istovremeno mljevenje i homogenizaciju uz dodatak sadrovca ili anhidrita. Smatra se jednim od najčešće upotrebljivanih materijala u svijetu (Bjegović et al, 2013).

Glavni sastojci portlandskog cementa su kalcijev oksid CaO i silicijev dioksid SiO_2 . Izvor kalcija su najčešće vapnenci, lapori i krede, dok izvor silicija najčešće predstavljaju gline i škriljac. Proces proizvodnje cementa iziskuje velike količine sirovina i veliku potrošnju energije, ali je relativno jednostavan. Prije izlaganja visokim temperaturama, sirovine je potrebno homogenizirati, što se postiže predrobljavanjem i miješanjem. Nakon homogenizacije, sirovina se transportira u izmjenjivač topline koji predzagrijava sirovinu prije ulaska u rotacijsku peć, gdje se događa ključni dio proizvodnje. Prolaskom kroz peć, dolazi do fizičkih i kemijskih promjena na visokim temperaturama (slika 4-1):

- sušenje,
- pregrijavanje,
- kalciniranje,
- klinkeriranje (Bjegović i Štirmer, 2015).



Slika 4-1. Proces proizvodnje cementa (Construction cost, n.d.)

4.1.2. Agregat

Agregat čini 60 do 80% volumena betona (Rached et al, 2009). U pravilu je inertan materijal. Značajna svojstva za upotrebu u betonu su granulometrijski sastav, oblik i tekstura zrna, gustoća, vlažnost, apsorpcija i poroznost. Nabrojana svojstva značajna su za beton u svježem stanju, ali utječu i na svojstva očvrnulog betona. Primjerice, mineraloški sastav i poroznost utječu na otpornost agregata na drobljenje, tvrdoću i modul elastičnosti.

Za upotrebu u betonu najčešće se upotrebljava prirodni mineralni agregat koji se pridobiva iz različitih vrsta stijena. S druge strane, upotrebljavaju se i različite vrste umjetnog agregata dobivene industrijskim procesima, kao i različite vrste recikliranog agregata. Tehnološki proces eksploatacije riječnog agregata iz prirodnih ležišta šljunka i pijeska te eksploatacije drobljenog agregata u kamenolomu razlikuju se prilikom pridobivanja i oplemenjivanja mineralne sirovine. Pridobivanje mineralne sirovine na kamenolomima se pretežito obavlja miniranjem stijenske mase, dok se u šljunčarama to odvija plovnim bagerom s košarom. Nadalje, oplemenjivanje mineralne sirovine na kamenolomu se uglavnom odvija suhim postupkom. S druge strane, suhi postupak nije učinkovit kod uklanjanja glinovitih primjesa prilikom oplemenjivanja riječnog agregata, stoga se koristi mokri postupak.

Zaključno, tehnološki proces proizvodnje sastoji se od sljedećih faza:

- Pridobivanje mineralne sirovine,

- Transport,
- Sitnjenje,
- Klasiranje (Bjegović i Štirmer, 2015).

4.1.3. Voda i dodatci betonu

Utjecaj vode vidljiv je u različitim fazama proizvodnje i primjene betona. Količina i kvaliteta vode bitna je za svojstva u očvrslom i svježem stanju kao što su vrijeme vezivanja, obradivost, udio pora, čvrstoća i trajnost. Veća količina vode pozitivno utječe na obradljivost i povećava tečenje betona, ali može utjecati i na pojavu segregacije i izdvajanja vode. Također, sadržaj vode u betonu usko je povezan i promatra se u odnosu na granulometrijski sastav agregata. (Mindess et al, 2003)

Beton se uglavnom proizvodi upotrebom pitke vode. Ostale vrste voda koje se mogu upotrijebiti za izradu betona su povratne vode iz procesa industrije betona, voda iz podzemnih izvora, prirodna površinska voda i industrijska otpadna voda ukoliko zadovoljavaju uvjete za upotrebu. Primjerice, kod armiranobetonskih struktura ne preporuča se upotreba morske vode koja može imati štetan utjecaj na trajnost konstrukcije.

Tvari koje se dodaju prije ili za vrijeme miješanja betonske mješavine nazivaju se dodatci betonu. Njihova svrha je poboljšanje svojstava svježeg ili očvrslulog betona. Svojstva koja se mogu poboljšati su obradljivost, otpornost na cikluse smrzavanja i odmrzavanja, smanjenje segregacije i izdvajanja vode, usporenje ili ubrzanje vezivanja i dr.

Glavna podjela dodataka betonu je na mineralne, koji su obično praškasti i dodaju se u većim količinama, i kemijske koji su uglavnom u tekućem stanju i doziraju se u manjim količinama (Bjegović i Štirmer, 2015).

4.2. Svojstva betona

Kada govorimo o betonskim konstrukcijama, misli se na beton u očvrslom stanju. Upravo zato će se u ovom poglavlju govoriti isključivo o svojstvima očvrslulog betona. Očvrsluli beton sastoji se od morta koji se sastoji od sitnih čestica agregata, cementne paste i pora te agregata i šupljina. U ovom poglavlju opisat će se nekoliko osnovnih svojstava betona koja imaju najznačajniju ulogu prilikom rušenja betonskih elemenata – čvrstoća, deformabilnost (modul elastičnosti) i trajnost betona.

Čvrstoća je mehaničko svojstvo materijala koje predstavlja sposobnost odupiranja djelovanjima. Ilyushin i Lensky (1967) navode kako je čvrstoća proučavanje čvrstih tijela pod djelovanjem vanjskih sila te njihove otpornosti na deformacije. Čvrstoća se određuje kao maksimalno opterećenje pri kojem dolazi do razaranja materijala. Dakle, može se reći da je čvrstoća mjera otpornosti na slom. Obzirom da je beton heterogeni materijal koji se sastoji od krupnog agregata i morta koji se sastoji od sitnog agregata u cementnoj matrici s porama i mikropukotinama, slom je vrlo složen.

Konkretno, *tlačna čvrstoća* je osnovno svojstvo betona. Definirana je kao omjer maksimalne sile i nominalne ploštine poprečnog presjeka uzorka betona:

$$f_c = \frac{P}{A_c} \quad (4-1)$$

gdje su:

f_c – tlačna čvrstoća betona (N/mm²)

P – maksimalna sila (N)

A_c – nominalna ploština poprečnog presjeka uzorka (mm²)

Unutar mnogih konstrukcija i nosivih elemenata beton je izložen vlačnim naprezanjima, stoga se vlačna čvrstoća upotrebljava kao direktan parametar tijekom projektiranja. *Vlačna čvrstoća* predstavlja otpor kojim se materijal suprotstavlja odvajanju na jedinicu ploštine. Ispituje se direktnim vlakom, savijanjem ili cijepanjem. Najčešće se prikazuje kao funkcija tlačne čvrstoće ukoliko se radi o običnim betonima. Vrijednost vlačne čvrstoće je u odnosu na tlačnu mnogo promjenjivija. Budući da beton ima vrlo malo vlačnu čvrstoću (otprilike 10% tlačne čvrstoće), stavlja se armatura koja preuzima vlačna naprezanja unutar konstrukcija.

Posmična čvrstoća koristi se kod proračuna prionjivosti betona i armature, kvalitete sidrenja armature te prijenosa posmičnog opterećenja u pukotinama. Važan je čimbenik kod određivanja otpornosti na djelovanje poprečnih sila (Bjegović i Štirmer, 2015).

Deformacija predstavlja promjenu dimenzije tijela po jedinici duljine uslijed djelovanja vanjske sile. Prilikom kratkotrajnih opterećenja (unutar dopuštenih naprezanja) beton se ponaša gotovo elastično, a pod stalnim opterećenjem puže i deformacija se s vremenom

povećava. Ukupna deformacija pod kratkotrajnim opterećenjem je sačinjena od elastičnog i plastičnog dijela.

Modul elastičnosti (Youngov modul) je fizikalna veličina koja opisuje svojstvo materijala (u ovom slučaju betona) da pretrpi deformacije uzrokovane opterećenjem, kao i njegovu krutost (The constructor, 2019). Ispitivanje statičkog modula elastičnosti provodi se naizmjeničnim opterećivanjem i rasterećivanjem betonskog uzorka pod djelovanjem jednoosnog tlačnog naprezanja. Uzorak se opterećuje u području u kojem su naprezanja i deformacije proporcionalni i statički modul elastičnosti se izračunava kao omjer naprezanja i deformacija:

$$E_b = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (4-2)$$

Gdje su:

- E_b – modul elastičnosti betona (GPa)
- $\Delta\sigma$ – razlika naprezanja (GPa)
- $\Delta\varepsilon$ – razlika deformacija (-)

Obzirom da se radi o heterogenom materijalu, elastičnost betona ovisi o udjelu, gustoći i modulu elastičnosti osnovnih sastojaka te o karakteristikama sučeljka.

Sposobnost konstrukcije da uslijed projektiranog opterećenja iz okoliša tijekom uporabe zadrži zahtijevanu razinu sigurnosti i uporabljivosti te odgovarajući izgled naziva se **trajnost**. Betonske konstrukcije su izložene različitim klimatskim uvjetima, utjecaju atmosferilija i raznim mehaničkim oštećenjima. Dakle, životni vijek istih više ovisi o izdržljivosti betona prema takvoj okolini, nego o tlačnoj čvrstoći. Trajnost betona predstavlja njegovu otpornost na kemijske, fizikalne, biološke i mehaničke procese razaranja. Prema tome, betonske konstrukcije moraju biti projektirane, izvedene i održavane da pod utjecajima okoliša njihova svojstva budu odgovarajuća i ekonomski prihvatljiva tijekom životnog vijeka građevine.

4.3. Karakteristike ispitivanog uzorka

U prijašnjim, ali i ovom ispitivanju, koristio se identičan tankostijeni betonski element. Radi se o betonskim cijevima debljine 60 mm i dužine 1 meter (slika 4-2). Model dimnjaka na kojem se analizirao utjecaj čimbenika miniranja pri rušenju betonskih i ciglenih dimnjaka sastojao se od pet međusobno zalijepljenih cijevi, a ispitivane betonske ploče su zapravo fragmenti navedenih betonskih cijevi.



Slika 4-2. Uzorak za terenska ispitivanja

Inače, cijev se sastoji od cementa, pijeska i aditiva, a osnovna namjena je za izgradnju kućne i dvorišne kanalizacije, propusta, slivnika, bunara i slično (Samoborka, 2016).

Osnovne karakteristike betonskih cijevi nalaze se u tablici 4-1.

Tablica 4-1. Tehničke karakteristike betonskih cijevi (Samoborka, 2016)

unutarnji promjer (mm)	građevinska dužina (mm)	debljina zida (mm)	masa/kom (kg)	razred čvrstoće (kN/m)
600	1000	60	367	35

5. RUŠENJE OBJEKATA

Rušenje objekata provodi se putem dvije grupe metoda, odnosno mehaničkim metodama bez upotrebe eksploziva i tehnikom miniranja. U ovom poglavlju navest će se i kratko opisati pojedina metoda.

5.1. Mehaničke metode

5.1.1. Mehaničko rušenje pomoću građevinskih strojeva

Rušenje objekata pomoću građevinskih strojeva sastoji se od segmentnog rušenja građevine odozgo prema dolje. Upotrebljavani građevinski strojevi su modificirani, a najčešće se radi o primjeni bagera koji na hidrauličnoj grani sadrži hidraulični čekić ili hidraulične čeljusti. Također, ukoliko se radi o armiranoj konstrukciji, upotrebljavaju se hidraulične škare kojima se režu željezni elementi.

Iako ne postoji određena granica, smatra se da se objekti viši od 30 metara ne ruše ovom metodom zbog velikih troškova, ali i ograničenja stroja. Prednost u odnosu na upotrebu eksploziva krije se u sigurnosti izvedbe. S druge strane, nedostatak ove metode je smanjena kontrola tijekom rušenja i smjera pada u slučaju viših objekata, dugotrajnost i iznimna sposobnost rukovatelja (Ester i Dobrilović, 2016). Na slici 3-1 prikazano je rušenje zgrade pomoću bagera s hidrauličnom čeljusti.



Slika 5-1. Rušenje objekta pomoću građevinskog stroja (Volvo, 2020)

5.1.2. Mehaničko rušenje hidrauličnim klinovima

Metoda rušenja upotrebom hidrauličnih klinova primjenjuje se za izdvajanje masivnih betonskih konstrukcija, primjerice temelja i ploča. Kao kod građevinskih strojeva, primjena na višim dijelovima objekta nije preporučljiva obzirom na izostanak kontrole tijekom rušenja.

Princip metode se sastoji od potiskivanja klinova u bušotine. Na taj način se osigurava djelovanje klina u pravcu okomitom na os bušotine i tako nastaje pukotina među bušotinama. Beton puca u pravcu koji spaja bušotine jer nastaju vlačna naprezanja na površini.

Mobilnost pri radu i jednostavnost pristupa različitim terenima glavne su prednosti ove metode. Dugotrajnost i mogućnost rada jedino na osnovnoj etaži jedni su od nedostataka (Ester i Dobrilović, 2016).

5.1.3. Rezanje elemenata konstrukcije dijamantnim alatima

Navedena metoda podrazumijeva rezanje pojedinih dijelova konstrukcije diskovima s dijamantnim oštricama. Najčešće se režu beton i kamen, posebice arhitektonsko - građevni. Prednosti metode se nalaze u radu bez buke i prašine. Naprotiv, nedostaci metode su potreba dodatnog prostora za pripremu i postavljanje uređaja za rezanje, potreba korištenja dizalica za spuštanje izdvojenih komada betona, potrošnja velikih količina vode za hlađenje alata i skupo te zahtjevno održavanje (Ester i Dobrilović, 2016).

Na slici 3-2 nalazi se prikaz rezanja betona diskom s dijamantnim oštricama.



Slika 5-2. Dijamantno rezanje betonske ograde (Cro-rez, n.d.)

5.1.4. Metode taljenjem materijala

Djelomična razgradnja i odvajanje dijelova zidova i ploča moguće je provesti stvaranjem rezova u materijalu koji nastaju taljenjem materijala pod djelovanjem vrućeg fluida. „Intrafix“ metoda se nerijetko primjenjuje, a princip rada je u djelovanju topline koja se postiže taljenjem elektrode. Zatim rastaljena elektroda pod tlakom predaje toplinu materijalu, tali ga i formira bušotinu. Bušotine se izrađuju jedna do druge u liniji reza. Metoda se primjenjuje u betonu, armiranom betonu, čeliku, željezu i kamenu.

Sustav se sastoji od kisika u bocama pod tlakom, spojnih crijeva te čeličnih cijevi ispunjenih elektrodama. Prednost rezanja taljenjem materijala je izostanak buke, ali se prilikom rada oslobađaju značajne količine vrućih plinova i postupak je dugotrajan i neekonomičan (Ester i Dobrilović, 2016).

5.1.5. Metode s ekspandirajućim materijalima

Za primjenu metode potrebno je izraditi bušotine, a zatim se u iste postavlja praškasti materijal kojem se dodaje udio vode. Nakon nekog vremena, materijal reagira s vodom i povećava mu se volumen, pri čemu ostvaruje tlačnu silu na stijenku bušotine. Za učinkovitu primjenu, potrebno je poštivati odgovarajući raspored.

Izostanak buke i prašine glavne su prednosti ove metode. Međutim, potreba za većim brojem bušotina, dugotrajnost procesa i visoki troškovi čine ovu metodu neisplativom (Ester i Dobrilović, 2016).

5.1.6. Metoda razaranja visokim tlakom vode i visokim tlakom CO₂

Princip rada metode razaranja visokim tlakom vode temelji se na kinetičkoj energiji struje vode pod utjecajem visokog tlaka. Metoda nije naišla na značajnu primjenu zbog ograničene mogućnosti korištenja samo za temelje, ploče i pojedinačne blokove te zbog visokih troškova uz veliku potrošnju vode.

Metoda razaranja visokim tlakom ugljičnog dioksida temelji se na nagloj ekspanziji tekućeg CO₂ u plinovito stanje, čime se oslobađa energija tlačnog djelovanja na stijenu bušotine. Unatoč tomu, metoda se ne smatra eksplozivnom jer ne dolazi do kemijske promjene ugljikovog dioksida. Valja napomenuti kako je metoda razvijena u svrhu pridobivanja mineralnih sirovina.

Za primjenu potrebno je izraditi bušotine u koje se postavljaju čelične cijevi s patronama tekućeg ugljičnog dioksida. Ispred patrone nalazi se pločica metala, a iza patrone tuljak s pirotehničkim sredstvom, odnosno grijačem. Pirotehnička smjesa koja generira vrlo visoke temperature se pripaljuje električnim impulsom i uzrokuje pretvorbu CO₂ u plinovito stanje. Porastom tlaka u cijevi puca pločica ispred patrone i kroz otvor u cijevi plin prodire u bušotinu. Volumen plinovitog ugljičnog dioksida je 800 puta veći, čime se tlači stijenke bušotine (Ester i Dobrilović, 2016). Najpoznatije izvedbe ove metode su Cardox i Conotex sustavi.

5.1.7. Metoda usitnjavanja betona primjenom pirotehničkih i barutnih punjenja

Kod navedene metode kao izvor energije koriste se patrone punjene pirotehničkim sredstvima i barutom koje se postavljaju u bušotine. Metoda se ne smatra eksplozivnom jer se koriste deflagrirajući, a ne detonirajući energetski materijali. Deflagrirajući materijali sagorijevanjem razvijaju značajnu količinu plinova koji se inicijalno nalaze pod visokim tlakom te u bušotini proizvode bočni tlak koji uzrokuje naprezanja na stijenama bušotine. Budući da proces ne generira udarni val, primjena im je ograničena na materijale koji sadrže pukotine i slojne plohe. One se djelovanjem tlaka plinova proširuju i nastupa fragmentiranje betona (Ester i Dobrilović, 2016).

5.2. Rušenje upotrebom eksploziva

Rušenje miniranjem je najmanje popularna metoda zahvaljujući iracionalnom strahu od djelovanja eksploziva. Međutim, brzina i ekonomičnost procesa su nezanemarive prednosti u odnosu na ostale metode rušenja.

Eksplozivom se mogu rušiti objekti svih veličina i konstrukcija – od temelja i masivnog betona do visokih i kompleksnih objekata. Ideja iza rušenja miniranjem viših objekata je da

se ruše glavne nosive konstrukcije kako bi se objekt srušio pod djelovanjem vlastite težine. To znači da se uz pomoć energije eksploziva za rušenje u glavnini koristi mehanička potencijalna energija, odnosno kinetička energija mase građevine oslobođena slobodnim padom (Langefors i Kihlstroem, 1967). Prilikom rušenja element konstrukcije koji se minira mora biti potpuno razbijen, usitnjen i izmaknut iz konstrukcije.

Eksplozivom je moguće uklanjati objekte izgrađene od različitih materijala. Obzirom da se u ovom radu ispituje učinak u betonskim elementima, detaljnije će se opisati rušenje istih.

U pravilu, beton se razbija minskim bušotinama malog promjera. Najčešći promjer bušotina je 32 mm, dok u slučaju masivnog betona promjer bušenja može biti i 65 mm. Prilikom miniranja betonskih elemenata teško je utvrditi opća pravila za razaranje jer je njihova čvrstoća promjenjiva, posebice tokom vremena pod utjecajem atmosfere. Iz tog razloga svako miniranje je specifično, pa se primjenjuje probno miniranje. Mjesto izvođenja probnog miniranja potrebno je pažljivo odabrati jer se ne smije poremetiti statika objekta koji se ruši. Cilj probnog miniranja je korekcija proračunate mase eksplozivnog punjenja ukoliko postoji potreba za istom (Ester i Dobrilović, 2016).

6. PREGLED PRETHODNIH ISPITIVANJA

6.1. Analiza utjecaja čimbenika miniranja pri rušenju betonskih i ciglenih dimnjaka

Navedeno ispitivanje izvršeno je na modelima betonskih dimnjaka. Kao što je ranije spomenuto, model dimnjaka sastoji se od 5 međusobno zalijepljenih betonskih cijevi, visine 5 metara, debljine stijenke 60 milimetara te promjera 0,6 metara.

Za rušenje navedenih dimnjaka odabran je eksploziv Riodin HE uz sljedeće minerske parametre:

- Promjer bušotine $\phi = 16$ mm,
- Masa eksploziva $m_e = 5,8$ g/bušotini,
- Trokutni raspored bušenja dimenzija 250x250 mm,
- Specifična potrošnja eksploziva $q = 2,5$ kg/m³.

Rušenje dimnjaka bilo je neuspješno na dva od tri modela (slika 6-2). Kao što je vidljivo na slici 6-1, krateri nakon eksplozije nisu se spojili, što dovodi do zaključka da je potrebno povećati koncentraciju eksplozivnog punjenja, odnosno smanjiti razmak između bušotina (Katalinić et al, 2021).



Slika 6-1. Učinak eksploziva (Katalinić et al, 2021)



Slika 6-2. Djelomično neuspjelo rušenje dimnjaka (Katalinić et al, 2021)

6.2. Zavisnost učinka naboja u betonskim elementima tanke stijenske o minerskim parametrima

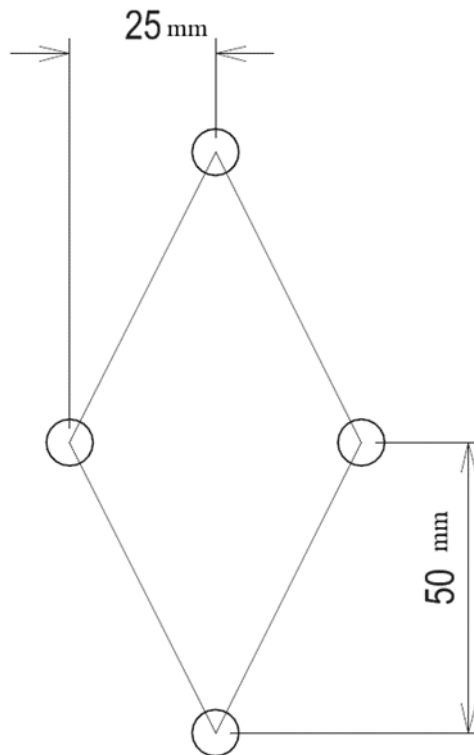
Obzirom na neuspješno rušenje betonskog dimnjaka i nespajanje kratera nakon eksplozije u prethodnom ispitivanju, provedena su ispitivanja za određivanje učinka naboja u betonskim pločama (ostatcima betonskih cijevi) jednake debljine od 60 mm.

Jedan od ciljeva ovog ispitivanja bio je odrediti optimalan raspored minskih bušotina. Ispitivanje relevantno za ovaj rad koristilo je sljedeće minerske parametre:

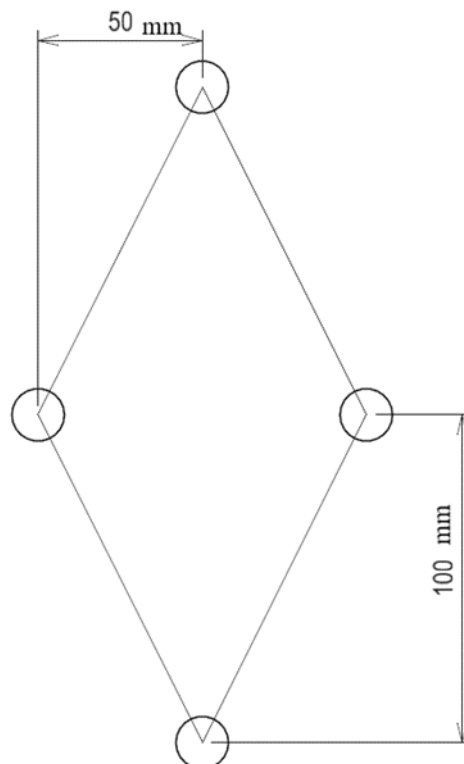
- Promjer bušotine $\phi = 8, 10, 12$ i 16 mm,
- Duljina punjenja 10 mm.

Osim usporedbe učinka emulzijskih i želatinoznih eksploziva, ponuđeno je nekoliko rasporeda minskih bušotina za pojedine eksplozive te smjernica za daljnja istraživanja. Dakle, zaključeno je da je kod betona tanke stijenske potrebno značajno povećati specifičnu potrošnju eksploziva. Dodatno, budući da provedena ispitivanja nisu u potpunosti kvantificirala parametre bušenja i punjenja već su dala generalne zavisnosti, potrebno je provesti ispitivanja na modelima betonskih cijevi kako bi se eliminirao utjecaj konačnosti ploča i stvaranje odloma na slobodnim površinama (Vukšić i Kosović, 2022).

Na slikama 6-3 i 6-4 nalaze se prijedlozi rasporeda minskih bušotina za emulzijski eksploziv koji su se iskoristili u ovim ispitivanjima.



Slika 6-3. Prijedlog rasporeda za 4 bušotine malog promjera (8 i 10 mm) za emulzijski eksploziv (Vukšić i Kosović, 2022)



Slika 6-4. Prijedlog rasporeda za 4 bušotine većeg promjera (12 i 16 mm) za emulzijski eksploziv (Vukšić i Kosović, 2022)

7. PLAN ISPITIVANJA

Kao što je spomenuto u drugom poglavlju, cilj je ispitati nekoliko predloženih rasporeda minskih bušotina te analizirati i usporediti rezultat miniranja betonskih ploča, a zatim i betonskih cijevi kako bi se eliminirao utjecaj konačnosti ploča i stvaranje odloma na rubovima, odnosno slobodnim površinama. Dimenzije i karakteristike testiranih uzoraka opisane su u poglavlju 4.3. Dodatno, da bi se osigurala precizna količina eksplozivnog punjenja, ispitivanje se izvodilo isključivo s nabojem u samom detonatoru.

Prvo ispitivanje provelo se na betonskim pločama. Cilj prvog ispitivanja je isključivo provjeriti točnost, odnosno učinak naboja koristeći predložene rasporede bušenja.

Korišteni su sljedeći parametri:

- Trokutasti raspored bušenja 25 mm x 50 mm, 50 mm x 100 mm i 100 mm x 200 mm,
- Promjer bušotine $\phi = 8$ mm.
- Električni sustav iniciranja trenutnim električnim detonatorom.

Drugo ispitivanje provelo se na cjelovitim betonskim cijevima. Cilj drugog ispitivanja malo je kompleksniji – provjeriti učinak naboja koristeći predložene rasporede bušenja, ali i usporediti odstupanja u odnosu na učinak naboja u betonskim pločama. Takvim pristupom pokušat će se izraziti utjecaj konačnosti ploča.

Za drugo ispitivanje korišteni su sljedeći parametri:

- Trokutasti raspored bušenja 25 mm x 50 mm, 50 mm x 100 mm, 75 mm x 150 mm i 100x200 mm,
- Promjer bušotine $\phi = 8$ mm.
- Električni sustav iniciranja trenutnim električnim detonatorom.

8. ANALIZA REZULTATA

Prvo miniranje izvelo se na betonskoj ploči koristeći raspored sa slike 6-3, dakle trokutasti raspored bušenja 25x50 mm. Na slici 8-1 vidljiv je redosljed izvođenja radnji unutar procesa miniranja – bušenje minskih bušotina, punjenje i spajanje minskog polja te iniciranje.



Slika 8-1. Redosljed radnji prilikom miniranja

Kao što je vidljivo na gornjoj slici, betonska ploča razlomila se na 6 podjednakih dijelova, što predstavlja zadovoljavajući rezultat miniranja. Obzirom na takav ishod, drugo miniranje obavilo se koristeći veći razmak – 50 mm x 100 mm.

Na slici 8-2. prikazan je ishod drugog miniranja.



Slika 8-2. Ishod miniranja koristeći trokutasti raspored 50 mm x 100 mm

Betonska ploča ovog puta se razlomila na 4 podjednaka dijela. Obzirom da je došlo do spajanja kratera, ovo također predstavlja zadovoljavajući rezultat. Međutim, vidljivo je da je došlo do slabijeg fragmentiranja ploče, što je zapravo i logično obzirom da se povećavanjem razmaka između minskih bušotina smanjuje koncentracija eksplozivnog naboja.

Sukladno tome, treće miniranje izvedeno je s još većim razmakom – 100 mm x 200 mm. Cilj povećavanja razmaka je pronaći raspored pri kojem rezultat miniranja nije zadovoljavajući, odnosno pri kojem ne dolazi do spajanja kratera uzrokovanih miniranjem, kao u slučaju miniranja modela dimnjaka (slika 6-1).

Na slici 8-3 vidljiv je ishod trećeg miniranja.



Slika 8-3. Ishod miniranja koristeći trokutasti raspored 100 mm x 200 mm

Iz slike 8-3 može se izvući nekoliko zaključaka. Naboj donje minske bušotine se nije aktivirao. Razlog može biti u tehničkoj neispravnosti detonatora, ali i neispravno spojenom minskom polju. Nadalje, unatoč značajnijoj fragmentaciji gornjeg dijela ploče, vidljivo je da sredina nije u potpunosti otpucana, što nije bio slučaj kod prethodna dva miniranja. Točnije, nisu se spojili krateri nakon eksplozije. Dakle, može se reći da je optimalan raspored minskih bušotina prilikom miniranja betonskih ploča 50 mm x 100mm.

Drugo ispitivanje provelo se na betonskim cijevima. Korišten je trokutasti raspored bušenja 100 mm x 200 mm. Na sredini slike 8-4 nalazi se betonska cijev prije, a lijevo i desno nakon miniranja s pogledom na učinak naboja izvana, odnosno iznutra.



Slika 8-4. Betonska cijev prije i nakon miniranja

Krateri nastali nakon eksplozije nisu se spojili. To se moglo očekivati obzirom da učinak naboja u betonskim pločama prilikom korištenja istog rasporeda nije u potpunosti dao zadovoljavajući rezultat. Dakle, već na prvom primjeru vidljiv je utjecaj konačnosti ploča.

Na slici 8-5 prikazano je mjerenje veličine ljevkastog i čistog odloma.



Slika 8-5. Mjerenje radijusa ljevkastog i čistog odloma

Čisti odlom predstavlja unutarnji krater gdje je došlo do potpunog izbijanja, a ljevkastu odlom je vanjski krater gdje je došlo do djelomičnog izbijanja materijala. Prosječna veličina radijusa čistog odloma iznosi 12 mm, a ljevkastog 80 mm. Ove rezultate moguće je usporediti s učinkom naboja u betonskim pločama.

Na slici 8-6 nalazi se mjerenje duljine razmaka između kratera.



Slika 8-6. Mjerenje duljine razmaka između kratera

Prosječna duljina razmaka između dijagonalnih kratera je 72 mm, duljina razmaka između horizontalnih kratera je 30 mm, dok je duljina razmaka između vertikalnih kratera 250 mm. Takav ishod je logičan i proporcionalan je razmaku između bušotina – što je razmak manji, manja je i duljina razmaka između kratera.

Sljedeće miniranje izvelo se koristeći trokutasti raspored 75 mm x 150 mm. Učinak naboja vidljiv je na slici 8-7.



Slika 8-7. Učinak naboja koristeći raspored 75 mm x 150 mm

Na slici je uočljivo kako su se ljevkasti odlomi dvije srednje bušotine preklopili. Također, radijusi njihovih ljevkastih i čistih odloma iznose 80 mm i 12 mm, što je otprilike isti učinak kao kod prošlog miniranja. Međutim, osim što je došlo do zatajenja jednog detonatora, učinak naboja u gornjoj bušotini je slabiji nego u prethodnim primjerima. Tako radijus ljevkastog odloma gornje bušotine iznosi tek 40 mm, a do čistog odloma nije došlo. Uzevši u obzir da je duljina razmaka između gornjeg i dva horizontalna kratera 30-ak mm, ljevkasti odlomi bi se spojili ukoliko bi učinak naboja gornje bušotine bio istovjetan ostalima.

Iduće miniranje provelo se uz raspored 50 mm x 100 mm. Takav raspored minskih bušotina bio je optimalan prilikom miniranja betonskih ploča. Na slici 8-8 vidljiv je ishod miniranja.



Slika 8-8. Učinak naboja koristeći raspored 50 mm x 100 mm

Došlo je do spajanja ljevkastih odloma, ali ne do potpunog izbivanja materijala, za razliku od betonskih ploča gdje je došlo do fragmentacije. Ovo je čvrsti dokaz utjecaja mase nadležecog betona kod cijevi, odnosno utjecaja konačnosti kod betonskih ploča.

Posljednje miniranje izvedeno je uz raspored 25 mm x 50 mm (slika 8-9).



Slika 8-9. Učinak naboja koristeći raspored 25 mm x 50 mm

Kao što je vidljivo na slici, došlo je do potpunog izbivanja materijala i spajanja odloma kod dvije horizontalne bušotine. Međutim, učinak naboja u vertikalnim bušotinama nije uzrokovao potpuno izbivanje materijala i nije došlo do kompletnog preklapanja odloma.

9. ZAKLJUČAK

Miniranje je postupak razaranja i drobljenja stijena, materijala i objekata energijom eksploziva. Primjenjuje se u raznim industrijama i djelatnostima, ali najčešće u rudarskoj industriji u svrhu pridobivanja mineralnih sirovina. Motiv za izvođenje ovih ispitivanja je kompleksnost izvođenja miniranja u betonima tanke stijenske.

Predloženi raspored minskih bušotina 25 mm x 50 mm uzrokovao je potpuni odlom betonske ploče. Zatim se razmak između bušotina postupno povećavao. Optimalan raspored minskih bušotina je onaj s najvećim razmakom među bušotinama, a da pritom rezultat miniranja bude zadovoljavajući. Stoga je razmak potrebno povećavati do prvog neučinkovitog miniranja. Prema tome, optimalan razmak za rušenje betonskih ploča tanke stijenske jest 50 mm x 100 mm (slika 8-2).

U ispitivanju zavisnosti učinka eksplozivnog naboja u betonskim elementima tanke stijenske dani su prijedlozi rasporeda minskih bušotina. Glavni orijentir za takve prijedloge je veličina radijusa odloma te njihovo preklapanje sa susjednim bušotinama u svrhu stvaranja zone drobljenja. Može se zaključiti da je takav pristup prilično točan za betonske ploče, ali zahtjeva korekciju ukoliko se radi o elementima koji se nalaze u uklještenim uvjetima. Nadalje, prilikom nekoliko miniranja vidljivo je da se učinci naboja u vertikalnim bušotinama nisu preklapili s učincima horizontalnih bušotina (slike 8-7 i 8-9). Objašnjenje bi moglo biti u tome što je razmak između horizontalnih i vertikalnih bušotina hipotenuza trokuta, dakle nešto veći od veličine radijusa odloma koja je služila kao orijentir određivanja razmaka između bušotina (slike 6-3 i 6-4).

Trokutasti raspored bušotina 50 mm x 100 mm nije uzrokovao odlom prilikom miniranja betonskih cijevi, što je izravan dokaz utjecaja mase nadležecog betona kod cijevi, odnosno utjecaja konačnosti kod betonskih ploča. S druge strane, trokutasti raspored 25 mm x 50 mm uzrokovao je djelomičan odlom. Daljnja istraživanja potrebno je usmjeriti prema ispitivanju utjecaja nadležecog objekta orijentirajući se na njegovu masu, tj. ispitati utjecaj uklještenja u kakvima se objekti često nalaze. To bi se moglo učiniti na način da se analizira učinak naboja prilikom miniranja dvije, tri, četiri i pet međusobno zalijepljenih betonskih cijevi. Obzirom da je masa cijevi poznata i pretpostavljajući da se radi o homogenom uzorku, odnosno pravilnoj raspodjeli mase, može se dobiti ovisnost učinka naboja o masi nadležecog objekta.

10. LITERATURA

- AGRAWAL, J.P. 2010: *High Energy Materials – Propellants, Explosives and Pyrotechnics*. Wiley-VCH. 495 pp, Padstow, Cornwall.
- BJEGOVIĆ, D., RAJZER, R., VULELIJA, Z., 2013. *History of concrete application in Croatia. International Conference on Advances in Cement and Concrete Technology in Africa*. Berlin: BAM Federal Institute for Materials Research and Testing.
- BJEGOVIĆ, D., ŠTIRMER, N., 2015. *Teorija i tehnologija betona*. Zagreb: Građevinski fakultet.
- ČANČAR, L. 2021. *Metode rušenja dimnjaka miniranjem – primjeri potresom oštećenih dimnjaka*. Diplomski rad. Zagreb: RGN fakultet.
- DOBRILOVIĆ, M. 2008. *Raspoloživa energija tlačnog udarnog vala udarne cjevčice i njezina primjena u iniciranju elektroničkog detonatora*. Doktorska disertacija. Zagreb: RGN fakultet.
- DOBRILOVIĆ, M., BOHANEK, V., ŠKRLEC, V., 2019. *Eksplozivi i razvoj društva*. Annual of the Croatian Academy of Engineering, str 104-120.
- ESTER Z., DOBRILOVIĆ M., 2016. *Digitalni udžbenik: Rušenje objekata*. Zagreb: RGN fakultet.
- ILYUSHIN, A.A., LENSKY, V.S., 1967. *Strength of materials*. Prvo izdanje. Amsterdam: Elsevier.
- KATALINIĆ, M., PINTERA, A., PLEŠE, P., POLIĆ, K., PRŽIĆ, V., RUKAVINA, L., 2021. *Analiza utjecaja čimbenika miniranja pri rušenju betonskih i ciglenih dimnjaka*. Seminarski rad. Zagreb: RGN fakultet.
- KRSNIK, J., 1989. *Miniranje*. Zagreb: RGN fakultet, Institut za rudarstvo, geotehniku i naftu.
- LANGFORS, U., KIHLSSTROEM, B., 1967. *The Modern Technique of Rock Blasting*. Almqvist&Wiksell. Stockholm.
- MINDESS, S., YOUNG, F.J., DARWIN, D., 2003. *Concrete*. Drugo izdanje. New Jersey: Prentice Hall.
- RACHED, M., DE MOYA, M., FOWLER, D.W., 2009. *Utilizing aggregates characteristics to minimize cement content in Portland cement concrete*. Austin: University of Texas, ICAR 401.

- RATHI, S. O., & KHANDVE, P. V. 2014. Demolition of buildings – an overview. *International Journal of Advance Engineering and Research Development*, 1(6).
- SAVIĆ, M. 2000. *Miniranje na površinskim kopovima*. Institut za bakar Bor.
- ŠKRLEC, V. 2015. *Analiza primjenjivosti eksploziva smanjene gustoće za gospodarska miniranja*. Doktorska disertacija. Zagreb: RGN fakultet.
- ŠKRLEC, V. 2015. *Eksplozivi*. Seminarski rad. Zagreb: RGN fakultet.
- VUJEC, S. (1996). Rudarstvo u Hrvatskoj. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 8(1), 11-17.
- VUKŠIĆ, A., KOSVIĆ, K. 2022. *Zavisnost učinka naboja u betonskim elementima tanke stijenke o minerskim parametrima*. Rektorova nagrada. Zagreb: RGN fakultet.

WWW IZVORI:

CONSTRUCTION COST – CEMENT PRODUCTION PROCESS

URL:<http://www.constructioncost.co/cement-production-process.html>

(11.10.2022.)

CRO REZ – REZANJE BETONA

URL: <https://www.cro-rez.hr/usluge/rezanje-betona/> (10.10.2022.)

GORAN STANZI

URL:<https://www.tportal.hr/vijesti/clanak/u-podne-se-ruse-dimnjaci-ciglane-crnomerec-evo-sto-trebate-znati-foto-20210221> (15.10. 2022)

MODULUS OF ELASTICITY OF CONCRETE – DETERMINATION AND IMPORTANCE IN DESIGN.

URL:<https://theconstructor.org/concrete/properties/modulus-elasticity-concrete/32035/> (2.6.2022.)

SAMOBORKA – TEHNIČKA UPUTA PROIZVODA

URL:https://www.samoborka.hr/upload/proizvodi/tup_betonske_cijevi_1000mm_1_53634.pdf (25.6.2022.)

VOLVO BLOG – DEMOLITION EXCAVATORS

URL:<https://volvoceblog.com/demolition-excavators-how-processing-can-increase-your-profits/> (10.10.2022.)