

# Djelovanje eksploziva na betonske konstrukcije

---

**Marić, Krešimir**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2018**

*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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:399826>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-29**



*Repository / Repozitorij:*

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



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

**DJELOVANJE EKSPLOZIVA NA BETONSKE KONSTRUKCIJE**

Diplomski rad

Krešimir Marić

R 174

Zagreb, 2018.

## DJELOVANJE EKSPLOZIVA NA BETONSKE KONSTRUKCIJE

Krešimir Marić

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

### Sažetak

U posljednjih par desetljeća javlja se sve veća potreba analiziranja udarnog djelovanja eksploziva na konstrukcije od armiranog i mikroarmiranog betona. Pri detonaciji se stvara udarni val kojeg karakterizira nagli porast tlaka do vršnog tlaka, pri kojemu su moguća oštećenja ili popuštanje betonskih konstrukcija. S obzirom na dostupnost potrebnih materijala i jednostavnost izrade eksploziva kućne radinosti, postoji zabrinutost za sigurnost ljudi i pojedinih građevina uslijed terorističkih aktivnosti. Istraživanje djelovanja eksploziva važno je zbog razvoja materijala i zaštitnih elemenata otpornih na detonaciju, ali također i za otkrivanje slabih točaka na strukturama te za sprječavanje progresivnog kolapsa. U radu je dan pregled različitih ispitivanja djelovanja eksploziva na građevine od betona.

Ključne riječi: eksplozija, udarno djelovanje, mikroarmirani beton, terorizam, eksplozivi kućne radinosti, odlamanje fragmenata, popuštanje konstrukcije

Završni rad sadrži: 38 stranica, 14 tablica, 24 slike i 16 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

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

Mentori: Dr.sc. Vječislav Bohanek, docent RGNF

Ocjenjivači: Dr.sc. Vječislav Bohanek, docent RGNF  
Dr.sc. Muhamed Sućeska, redoviti profesora RGNF  
Dr.sc. Vinko Škrlec, docent RGNF

## EFFECTS OF BLAST LOADING ON CONCRETE STRUCTURES

Krešimir Marić

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

### Abstract

Over the recent decades, many papers have been published on the behaviour of regular and fiber reinforced concrete under blast loading. Explosive detonations create a blast wave, characterized by an almost instantaneous rise of atmospheric pressure to a peak overpressure, which might damage the building, or even cause structural failure. Considering the availability of required materials and the simplicity of manufacturing certain improvised explosive devices, there is a growing concern for the safety of the general population and for the safety of the infrastructure of a nation amidst terrorist activities. Analysing the effects of blast loading is not only essential for developing new materials and protective elements, but is also crucial for detecting any weak points a structure may have and preventing progressive collapse. This paper presents current studies on the effects of blast loading on concrete structures.

Keywords: explosion, blast loading, fiber reinforced concrete, terrorism, improvised explosive devices, explosive spalling, structural failure

Thesis contains: 38 pages, 14 tables, 24 figures and 16 references.

Original in: Croatian

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

Supervisors: PhD Vječislav Bohanek, Assistant Professor

Reviewers: Associate Professor, Muhamed Sućeska, PhD  
Assistant Professor, Vječislav Bohanek, PhD  
Assistant Professor, Vinko Škrlec, PhD

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. EKSPLOZIVI .....	2
2.1. Vrste eksploziva.....	2
2.1.1. Inicijalni eksplozivi.....	3
2.1.2. Brizantni eksplozivi .....	3
2.1.3. Gospodarski eksplozivi.....	4
2.2. Eksplozivi kućne radinosti.....	6
2.3. Procjena efekta eksploziva pomoću ekvivalentne mase TNT-a .....	6
3. UDARNI VAL .....	9
3.1. Karakteristike idealnog udarnog vala .....	9
3.2. Refleksija udarnog vala .....	12
3.3. Utjecaj udaljenosti i različitih tipova djelovanja eksplozije .....	14
3.4. Strukturna oštećenja.....	16
4. BETON I TEHNOLOGIJE PROIZVODNJE BETONA .....	19
4.1. Čelik za armiranje.....	21
4.2. Betoni visoke čvrstoće .....	23
4.3. Mikroarmirani betoni.....	24
5. UTJECAJ EKSPLOZIJE NA BETONSKE ELEMENTE.....	27
5.1. Kontaktna detonacija .....	27
5.2. Djelovanje fragmenata na konstrukciju .....	30
5.3. Utjecaj eksploziva na ljuštenje betona.....	32
6. ZAKLJUČAK .....	36
7. LITERATURA.....	37

## POPIS SLIKA

Slika 3-1. Tipičan oblik krivulje tlak-vrijeme (FEMA, 2003) .....	10
Slika 3-2. Stvaranje reflektiranog pritiska (Korpar, 2015).....	12
Slika 3-3. Utjecaj kuta upada udarnog vala na iznos koeficijenta reflektiranog tlaka za veće iznose vršnog tlaka (Karlos i Solomos, 2013).....	13
Slika 3-4. Utjecaj kuta upada udarnog vala na iznos koeficijenta reflektiranog tlaka za manje iznose vršnog tlaka (Karlos i Solomos, 2013).....	14
Slika 3-5. Utjecaj udaljenosti detonacije na pozitivnu fazu krivulje tlak-vrijeme (Karlos i Solomos, 2013).....	15
Slika 3-6. Osnovni tipovi vanjskih eksplozija: (a) detonacije u „slobodnom“ zraku, (b) detonacije u zraku i (c) površinske detonacije (Karlos i Solomos, 2013).....	16
Slika 3-7. Djelovanje udarnog vala na strukturu (FEMA, 2003).....	18
Slika 4-1. Promjena čvrstoće betona starenjem (Gukov, 2017) .....	20
Slika 4-2. Različiti oblici čelične armature (Gukov, 2017).....	22
Slika 4-3. Dijagram ovisnosti modula elastičnosti betona visokih čvrstoća o tlačnoj čvrstoći i modulu elastičnosti krupnog agregata (Skazlić i Tomičić, 2006).....	24
Slika 4-4. Različiti oblici čeličnih vlakana korištenih za mikroarmiranje (Netinger Grubeša, 2017).....	26
Slika 5-1. Shematski prikaz kontaktne detonacije (Zircher i dr., 2017).....	27
Slika 5-2. Prikaz postavljenog eksplozivnog naboja na testnoj betonskoj ploči (Zircher i dr., 2017).....	28
Slika 5-3. Prikaz neopterećene strane betonske ploče izrađene od betona bez vlakana (Zircher i dr., 2017) .....	29
Slika 5-4. Prikaz neopterećene strane betonske ploče izrađene od betona sa vlaknima (Zircher i dr., 2017) .....	29
Slika 5-5. Prikaz presjeka ploče bez vlakana (Zircher i dr., 2017).....	30
Slika 5-6. Prikaz presjeka ploče sa vlaknima (Zircher i dr., 2017) .....	30
Slika 5-7. Neoštećena betonska ploča (Grisaro i dr., 2017) .....	31
Slika 5-8. Prednje strane betonskih zidova opterećenih eksplozivom sa udaljenosti od 2 i 3 m (Grisaro i dr., 2017) .....	31
Slika 5-9. Prikaz izovela prije i poslije detonacije na uzorku od nearmiranog betona (Štoller i Dvorak, 2017).....	33

Slika 5-10. Prikaz izovela prije i poslije detonacije na uzorku od mikroarmiranog betona (Štoller i Dvorak, 2017).....	33
Slika 5-11. Prikaz nearmirane betonske ploče razreda C70/85 nakon djelovanja 70 g plastičnog eksploziva (Štoller i Dvorak, 2017) .....	34
Slika 5-12. Prikaz mikroarmirane betonske ploče razreda C80/95 nakon djelovanja 70 g plastičnog eksploziva (Štoller i Dvorak, 2017) .....	34
Slika 5-13. Odnos između volumena odlomljenih fragmenata i količine eksploziva za običan i mikroarmiran beton (Štoller i Dvorak, 2017).....	35

## POPIS TABLICA

Tablica 2-1. Minersko-tehničke karakteristike često upotrebljivanih eksploziva (Krsnik, 1989).....	4
Tablica 2-2. Minersko-tehničke karakteristike često upotrebljivanih eksploziva (Krsnik, 1989).....	4
Tablica 2-3. Minersko-tehničke karakteristike pojedinih praškastih eksploziva .....	5
Tablica 2-4. Minersko-tehničke karakteristike AN-FO eksploziva.....	5
Tablica 2-5. Minersko-tehničke karakteristike plastičnog eksploziva .....	5
Tablica 2-6. Prikaz često korištenih eksploziva pri izradi eksploziva kućne radinosti ( <i>Department of Homeland Security</i> ).....	6
Tablica 2-7. Prikaz oslobođene topline detonacije u ovisnosti o vrsti eksploziva (Karlos i Solomos, 2013).....	7
Tablica 2-8. Faktor ekvivalentne mase TNT-a za vršni tlak i impuls u ovisnosti o vrsti eksploziva (Karlos i Solomos, 2013).....	8
Tablica 2-9. Procijenjena masa eksploziva u ovisnosti o vrsti prijevoznog sredstva (Karlos i Solomos, 2013).....	8
Tablica 4-1. Prikaz čvrstoće betona dobivene preko valjaka i kocki u ovisnosti o klasi betona (Gukov, 2017).....	19
Tablica 4-2. Vlačne čvrstoće betona (Gukov, 2017).....	20
Tablica 4-3. Moduli elastičnosti betona (Gukov, 2017).....	21
Tablica 4-4. Uobičajeni sastojci za izradu mikroarmiranih betona (Netinger Grubeša, 2017) .....	25
Tablica 5-1. Maksimalna sila i moment i efektivna visina za ispitivane uzorke (Grisaro i dr., 2017).....	32



## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I SI JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
$P_{so}$	Pa	vršni statički tlak
$t$	s	vrijeme
$i_s$	Pa s	impuls
$R$	m	udaljenost od izvora detonacije
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	gustoća
$v$	m/s	brzina detonacije
$W_e$	kg	ekvivalentna masa TNT-a
$H$	MJ/kg	toplina oslobođena pri detonaciji eksploziva
$f_{cm}$	N/mm <sup>2</sup>	srednja tlačna čvrstoća betona
$f_{ctm}$	N/mm <sup>2</sup>	srednja vlačna čvrstoća
$E_{cm}$	N/mm <sup>2</sup>	modul elastičnosti betona
$F$	N	sila

## 1. UVOD

Eksplozivi su izvor koncentrirane energije čija je primarna upotreba u civilne i vojne svrhe. Međutim, osim navedenih upotreba, eksplozivi su zbog svojih svojstava najčešće sredstvo terorista. Porastom terorističkih aktivnosti u novije vrijeme dolazi do potrebe razvijanja sustava i otkrivanja materijala otpornijih na djelovanje eksploziva.

Posljednjih desetljeća izrađene su ekstenzivne studije u području djelovanja eksploziva na konstrukcije. Istraživanje opterećenja uzrokovanog eksplozivima bitno je za razumijevanje štete uzrokovane eksplozijom, ali također i za predviđanje „ranjivosti“ ljudi ili objekata te za razvoj zaštitnih elemenata i materijala otpornih na djelovanje eksploziva. Stoga je ključno zaštititi nosive stupove na pročeljima zgrada kako bi se spriječio progresivni kolaps (Codina i dr., 2017).

Tipičan primjer ekstremnog opterećenja na strukture uključuje kombinaciju detonacije udarnog vala i zabijanje fragmenata. Uslijed nepredvidive prirode kombiniranog djelovanja, pri modeliranju se obično razdvojeno promatraju utjecaji vršnog tlaka i udara fragmenata. Istraživanjima je utvrđeno da se razdvajanjem djelovanja fragmenata i eksplozije uzrokuju manja oštećenja na strukturi nego njihovim zajedničkim djelovanjem, a njihov sinergijski utjecaj još nije istraživao. Određene studije su utvrdile da je glavni razlog povećanog oštećenja zaštitnih struktura od armiranog betona, izloženih utjecaju eksplozije i fragmenata, penetracija fragmenata koja se u većini slučajeva događa prva (Grisaro i dr., 2017).

Problematika otpornosti struktura na opterećenje od eksploziva se istražuje već mnogo godina i poprilično je napredovala u vojnom području, što je također i razlog zašto većina tih istraživanja nije dostupno javnosti već je ograničeno na vojnu upotrebu. U okviru Eurokoda EN 1991-1-7 spominju se slučajna opterećenja i eksplozije, ali pod tim se primarno misli na sudare kamiona, vlakova i općenito vozila. Također se spominju i eksplozije plinova u zatvorenim prostorima, međutim, ne postoji standardiziran pristup dizajniranju struktura na vanjsko opterećenje uslijed eksplozivnog djelovanja. Razvoj postupka kojim će se dobivati praktična projektantska rješenja je nužno za projektiranje novih ili naknadno opremanje postojećih struktura kako bi bile sposobne izdržati djelovanje eksploziva (Carlos i Solomos, 2013).

## 2. EKSPLOZIVI

Eksplozivi su kemijski spojevi koji imaju sposobnost da pod utjecajem određenog vanjskog impulsa detoniraju, tj. kemijski se razlažu, razvijajući pritom znatnu količinu plinova i topline. Proces razlaganja eksploziva odvija se po određenim kemijskim reakcijama, u ovisnosti o kemijskom sastavu eksploziva i uvjeta pod kojima je izvršena detonacija. Za potpuno sagorijevanje eksplozivi u svom sastavu moraju imati kemijske elemente koji međusobno izgaraju, kao što su ugljik, vodik u reakciji sa kisikom. Primjera radi, u molekulama nitroglikola  $C_2H_4(ONO_2)_3$  i nitroglicerina  $C_3H_5(ONO_2)_3$  zastupljena su sva tri potrebna elementa. Kisik je zastupljen u dovoljnoj količini tako da se odvija potpuno sagorijevanje. Međutim, postoji i grupa eksploziva koji u svom sastavu nemaju kisika, kao na primjer olovni azid  $Pb(N_3)_2$ , a također detoniraju vrlo velikom brzinom. (Krsnik, 1989)

Za dovođenje eksploziva do detonacije potreban je početni impuls, tj. potrebno mu je dovesti određenu količinu energije u obliku toplotnog i mehaničkog impulsa, te udarnog vala. Inicirajuća sposobnost inicirajućeg eksploziva ocjenjuje se prema minimalnoj količini eksploziva potrebnoj da inicira dotični brizantni eksploziv.

### 2.1. Vrste eksploziva

Pod zajedničkim pojmom eksplozivi podrazumijevaju se:

- Inicirajuće eksplozivne tvari
- Brizantne eksplozivne tvari (vojne i gospodarske)
- Pirotehnička sredstva
- Baruti

Eksplozivi se najčešće klasificiraju prema kemijskom sastavu, fizikalnim svojstvima i agregatnom stanju, konzistenciji te načinu djelovanja, brzini razlaganja i namjeni. Prema kemijskom sastavu eksplozivi mogu biti čisti kemijski spojevi ili mehaničke smjese kemijskih spojeva. Prema fizikalnim svojstvima i agregatnom stanju eksplozivna sredstva mogu biti u čvrstom stanju, smjese čvrstih i tekućih spojeva, tekuće eksplozivne smjese, eksplozivne smjese čvrstih i tekućih spojeva s plinovima te eksplozivne smjese u plinovitom stanju. Prema konzistenciji, eksplozivi mogu biti praškasti, plastični, vodoplastični, poluplastični, prešani i granulirani. Eksplozivi se generalno mogu razvrstati u dvije kategorije, „jaki“ eksplozivi (*High Explosives*) i „slabi“ (*Low Explosives*). U „jake“ eksplozive spadaju inicirajući i brizantni i njih karakterizira generiranje snažnog udarnog vala pri detonaciji. Tu spadaju TNT, C-4, Semteks, nitroglicerina, dinamit i AN-FO, itd.

„Slabi“ eksplozivni sagorijevaju i samo u određenim uvjetima mogu generirati znatno slabiji udarni val. U ovu skupinu spadaju baruti i pirotehničke mješavine (npr. mješavina na bazi nafte/petroleja, molotovljev koktel). Teroristi u svojim diverzijama primjenjuju sve što im je na raspolaganju – i jake i slabe eksplozive za punjenje improviziranih eksplozivnih naprava koje mogu izazvati različite ozljede ljudi i oštećenja objekata (Božić i dr., 2014).

#### 2.1.1. Inicijalni eksplozivi

Zbog velike osjetljivosti na udar, trenje i temperaturu ovi eksplozivi služe za iniciranje manje osjetljivih brizantnih eksploziva. Pod djelovanjem određenog vanjskog impulsa ti eksplozivi detoniraju, te se zbog toga koriste kao inicijalno punjenje rudarskih kapsli i električnih detonatora. Zbog osjetljivosti na udar i trenje ne mogu se upotrebljavati kao samostalni eksplozivi za miniranje u rudarstvu i građevinarstvu. Detonacijom inicijalnog punjenja dovede se do detonacije glavno punjenje, za koje se upotrebljavaju brizantni eksplozivi. Inicijalno punjenje rudarskih kapsli dovodi se do detonacije plamenom sporogorućeg štapina, a kod električnih detonatora plamenom zapaljive glavice. Za izradu rudarskih kapsli i električnih detonatora upotrebljavaju se živin fulminat  $\text{Hg}(\text{CNO})_2$ , olovni azid  $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$  i olovni trinitrorezorcinat  $\text{C}_6\text{HN}_3\text{O}_8\text{Pb}$  kao inicijalni eksplozivi.

#### 2.1.2. Brizantni eksplozivi

Brizantni eksplozivi su manje osjetljivi na udar i trenje od inicijalnih eksploziva. Ako se pripale plamenom mogu sagorijevati, bez detonacije. Do detonacije se dovode detonacijom inicijalnih eksploziva. Razorna snaga brizantnih eksploziva je vrlo velika i zbog toga predstavljaju važnu komponentu u proizvodnji rudarskih eksploziva, detonirajućeg štapina, bezdimnog baruta i detonatora.

Za proizvodnju navedenih eksplozivnih sredstava uglavnom se koriste nitroglicerini  $\text{C}_3\text{H}_5(\text{ONO}_2)_3$ , dinitroglikol  $(\text{CH}_2\text{ONO}_2)_2$ , trotil  $\text{CH}_3\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_3$ , pentrit  $\text{C}(\text{CH}_2\text{ONO}_2)_4$ , heksogen  $\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_3(\text{NO}_2)_3$  i nitroceluloza  $(\text{C}_6\text{H}_7(\text{NO}_2)_3\text{O}_5)_n$ . U tablicama 2-1 i 2-2 prikazane su minersko tehničke karakteristike navedenih brizantnih eksploziva.

**Tablica 2-1.** Minersko-tehničke karakteristike često upotrebljivanih eksploziva (Krsnik, 1989)

EKSPLOZIVI	GUSTOĆA	RADNA SPOSOBNOST	OSJETLJIVOST NA UDAR	DETONACIJSKA BRZINA
	g/cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	cm	m/s
Nitroglicerín	1.60	590	6	8000
Dinitroglikol	1.39	-	-	-
Trotil	1.55	305	90	6900
Pentrit	1.60	500	28	8400
Heksogen	1.62	490	29	8300
Nitroceluloza	1.30	-	-	6950

**Tablica 2-2.** Minersko-tehničke karakteristike često upotrebljivanih eksploziva (Krsnik, 1989)

EKSPLOZIVI	VOLUMEN PLINOVA EKSPLOZIJE	TEMPERATURA EKSPLOZIJE	TOPLINA EKSPLOZIJE	BILANCA KISIKA
	dm <sup>3</sup> /kg	°C	kJ/kg	%
Nitroglicerín	715	4100	4856.7	+3.5
Dinitroglikol	1028	-	4421.3	0
Trotil	750	2950	4228.7	-74.0
Pentrit	790	4000	5945.3	-10.1
Heksogen	890	3800	5476.3	-21.6
Nitroceluloza	-	-	4438.0	-

### 2.1.3. Gospodarski eksplozivi

U gospodarske eksplozive spadaju svi eksplozivi koji se upotrebljavaju za miniranje u rudarstvu, građevinarstvu, šumarstvu, poljoprivredi i drugim privrednim granama. Među najčešće korištenim gospodarskim eksplozivima su amonijsko-nitratni praškasti eksplozivi, amonijsko-nitratni uljni eksplozivi, plastični eksplozivi, vodoplastični eksplozivi te vodoplastični metalizirani eksplozivi.

Amonijsko nitratni-praškasti eksplozivi su izrađeni na osnovi amonijskog nitrata i trotila ili nitroglicerina kao senzibilizatora uz dodatak organskih gorivih tvari i sredstava za zaštitu od vlage i stvrdnjavanja. U tablici 2-3 dane su minersko tehničke karakteristike praškastih eksploziva koje prodaje tvrtka Interpromet d.o.o.

**Tablica 2-3.** Minersko-tehničke karakteristike pojedinih praškastih eksploziva

Osobine	Amonex 1	Amonex 2
Gustoća patrone (kg/l)	1,02-1,07	1,02-1,07
Bilanca kisika %	0,87	0,44
Volumen plinova (l/kg)	978,4	986,4
Energija eksplozije (kJ/kg)	4094,3	4088,2
Detonacijska brzina (m/s)	3900-4400	3800-4200
Temperatura eksplozije (°C)	2475,9	2454,3

Amonijsko-nitratni uljni eksplozivi (AN-FO) sastoje se od amonijskog nitrata i dizel ulja. Dizel ulje se dodaje amonijskom nitratu kako bi mu se povećala osjetljivost na početni impuls. U tablici 2-4 dane su minersko tehničke karakteristike uljnih eksploziva u proizvodnji tvrtke Eksplo-promet d.o.o.

**Tablica 2-4.** Minersko-tehničke karakteristike AN-FO eksploziva

Osobine	Amonit-6
Gustoća (g/m <sup>3</sup> )	0,82±0,02
Bilanca kisika (%)	+1,5
Volumen plinova (l/dm <sup>3</sup> )	1050
Energija eksplozije (kJ/kg)	3597
Temperatura eksplozije (°C)	2191
Detonacijska brzina (m/s)	3598

Plastični eksplozivi su najjači gospodarski eksplozivi velike gustoće i brizantnosti. Osnovna komponenta u kemijskom sastavu plastičnih eksploziva je želatinizirana smjesa nitroglicerina dinitroglikola s nitrocelulozom. Pored toga, ovi eksplozivi sadrže amonijev, kalijev i natrijev nitrat te manje količine organskih i neorganskih tvari. U tablici 2-5 dane su minersko tehničke karakteristike plastičnog eksploziva.

**Tablica 2-5.** Minersko-tehničke karakteristike plastičnog eksploziva

Osobine	Vitezit V20
Gustoća patrone (kg/l)	1,5
Bilanca kisika %	+4
Volumen plinova (l/kg)	856
Energija eksplozije (kJ/kg)	4157
Detonacijska brzina (m/s)	6000
Temperatura eksplozije (°C)	2639

## 2.2. Eksplozivi kućne radinosti

U terorističkim akcijama koriste se različite vrste eksploziva i eksplozivnih mješavina. Primjerice, često korišteni vojni eksplozivi su plastični eksplozivi naziva C4 i Semtex, te drugi vojni i gospodarski brizantni eksplozivi (npr. TNT, smjese na bazi amonijeva nitrata, itd.). Isto tako, u terorističkim akcijama se koristi i niz inicirajućih eksploziva iz kućne radinosti. Lista je velika, a upute kako ih pripremiti lako je pronaći na internetu (Božić i dr., 2014).

Improvizirane eksplozivne naprave koriste eksplozive kućne radinosti, a sastoje se od različitih komponenti koje uključuju inicijalni eksploziv, prekidač, glavni eksplozivni naboj, izvor struje i oklop (spremnik). U eksplozive se može staviti i dodatnih materijala poput čavala, stakla i metalnih fragmenata kako bi se povećala količina šrapnela prilikom detonacije (Department of Homeland Security).

Mnogi lako dostupni materijali, poput gnojiva, baruta, i vodikovog peroksida mogu se koristiti kao eksplozivni materijali u proizvodnji eksploziva kućne radinosti, kao što je prikazano u tablici 2-6. Eksplozivi moraju sadržavati gorivo i oksidirajuće sredstvo koje će održavati reakciju. Tipičan primjer je AN-FO, mješavina amonij nitrata i dizel ulja.

**Tablica 2-6.** Prikaz često korištenih eksploziva pri izradi eksploziva kućne radinosti (*Department of Homeland Security*)

	Tipična primjena	Tipično stanje	Prijašnja upotreba
Brizantni eksplozivi			
Jaki eksplozivi			
ANFO	rudarstvo	Kruto	Napadi u Oklahoma City
Triaceton triperoksid	nema	Kruto	Londonski napadi, 2005
Semtex C-4	vojna	plastično	IRA bombardiranja
Etilenglikol dinitrat	Komponenta dinamita	tekuće	Milenijski bombaš. 1999
Amonij nitrat	gnojivo	Kruto	WTC 1993
Slabi eksplozivi			
Bezidimni barut	municija	kruto	Napadi u Olympic parku

## 2.3. Procjena efekta eksploziva pomoću ekvivalentne mase TNT-a

Prvi korak u projektiranju zgrade sposobne izdržati opterećenja od udarnog vala je definirati tip i snagu eksploziva na koji se projektira. Postoji nekoliko tipova eksploziva dostupnih koji bi se mogli koristiti za napad na određenu strukturu. U većini slučajeva koriste

se improvizirane eksplozivne naprave zbog jednostavne proizvodnje i mogućnosti transporta i postavljanja (Karlos i Solomos, 2013).

Širok spektar eksploziva koji bi se mogao koristiti je doveo do usvajanja univerzalnog standarda koji se koristi za proračun svih potrebnih parametara eksplozije te je odabran TNT (trinitrotoluen) zbog sličnosti udarnih svojstava sa većinom krutih tipova eksploziva. Ekvivalentna masa TNT-a računa se prema jednadžbi (1) koja povezuje masu eksploziva sa oslobođenom toplinom tijekom detonacije:

$$W_e = W_{exp} \cdot \frac{H_{exp}^d}{H_{TNT}^d}, \quad (1)$$

gdje su:  $W_e$  – ekvivalentna masa TNT-a (kg),  
 $W_{exp}$  – masa korištenog eksploziva (kg).  
 $H_{exp}^d$  – toplina detonacije korištenog eksploziva (MJ/kg),  
 $H_{TNT}^d$  – toplina detonacije TNT-a (MJ/kg)

U tablici 2-7 prikazane su vrijednosti oslobođene topline detonacije nekih često korištenih eksploziva, a pomoću jednadžbe 1 moguće je izračunati ekvivalentnu vrijednost TNT-a.

**Tablica 2-7.** Prikaz oslobođene topline detonacije u ovisnosti o vrsti eksploziva (Karlos i Solomos, 2013)

Eksploziv	Toplina oslobođena pri detonaciji [MJ/kg]
TNT	4.10-4.55
C4	5.86
RDX	5.13-6.19
PETN	6.69
PENTOLIT 50/50	5.86
NITROGLICERIN	6.30
NITROMETAN	6.40
NITROCELULOZA	10.60
AMONIJ-NITRATNI EKSPLOZIVI	1.59

U tablici 2-8 prikazane su unaprijed određene ekvivalentne vrijednosti impulsa i vršnog tlaka TNT-a za neke eksplozive. Ovi se faktori mogu koristiti za proračun mase TNT-a koja će prouzročiti udarni val sličnih parametara kao neki drugi eksploziv različite mase.



**Tablica 2-8.** Faktor ekvivalentne mase TNT-a za vršni tlak i impuls u ovisnosti o vrsti eksploziva (Karlos i Solomos, 2013)

Eksploziv	Faktor ekvivalentne mase TNT-a	
	Vršni tlak	Impuls
TNT	1.00	1.00
C3	1.08	1.01
C4	1.37	1.19
CYCLOTOL	1.14	1.09
OCTOL75/25	1.06	1.06
TETRYL	1.07	1.05
HMX	1.02	1.03
AMATOL	0.99	0.98
RDX	1.14	1.09
PETN	1.27	1.11

U tablici 2-9 prikazane su procijenjene vrijednosti mase eksploziva koje bi se mogle očekivati u određenim transportnim sredstvima. Uslijed velikih nesigurnosti oko procijenjenih vrijednosti, preporuča se korištenje faktora sigurnosti od 20% pri projektiranju.

**Tablica 2-9.** Procijenjena masa eksploziva u ovisnosti o vrsti prijevoznog sredstva (Karlos i Solomos, 2013)

Prijenosno sredstvo	Masa eksploziva (kg)
Kofer	10
Auto srednje veličine	200
Veliki auto	300
Kamionet	1400
Kombi	3000
Kamion	5000
Kamion sa prikolicom	10000

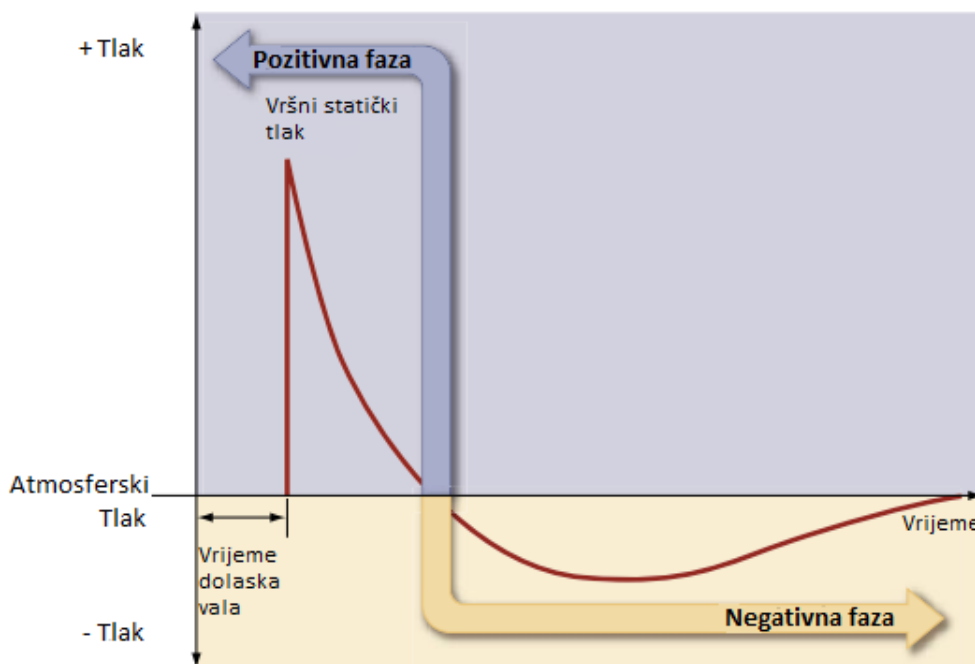
### 3. UDARNI VAL

Kvalificiranje i kvantificiranje djelovanja eksploziva na betonske konstrukcije nije moguće bez poznavanja karakteristika udarnog vala, načina širenja i njegovog djelovanja na okolne objekte.

#### 3.1. Karakteristike idealnog udarnog vala

Kad se inicira eksplozivni naboj dolazi do naglog odvijanja egzotermne kemijske reakcije. Kako reakcija napreduje, kruti ili tekući eksplozivni materijal se pretvara u vrlo zagrijan, gusti plin pod visokim tlakom. Produkti eksplozije inicijalno ekspandiraju vrlo velikim brzinama u nastojanju postizanja ravnoteže sa okolnim zrakom, stvarajući pritom udarni val. Udarni val se sastoji od skoka tlaka u mediju koji je u kontaktu s eksplozivom koji se radialno širi od izvora nadzvučnim brzinama. Kod nekih eksploziva (poznatih pod nazivom „neidealni“ eksplozivi) ne oslobodi se sva raspoloživa energija do tzv. Chapman-Jouguetove točke (kod koje počinje širenje produkata na okolinu) nego se dobar dio energije oslobađa i tokom ekspanzije u reakciji mješavine detonacijskih produkata i zraka. Taj proces izgaranja ima zanemariv utjecaj na udarni val ali ima značajan utjecaj na ukupni učinak eksploziva. Kako se udarni val širi, tlak naglo opada (sa kubom udaljenosti) zbog geometrijske divergencije i trošenja energije na zagrijavanje okolnog zraka. Tlak također naglo opada s vremenom (t.j. eksponencijalno) i obično su vrlo kratkog trajanja, mjereno tipično u milisekundama (FEMA, 2003).

Detonacijom eksploziva stvara se trenutačni udarni val, s karakterističnim, gotovo trenutnim porastom tlaka od ambijentalnog do vršnog tlaka kao što se može vidjeti na slici 3-1. Kako udarna fronta vala napreduje, vrijednost tlaka opada do ambijentalnog te se javlja negativna faza tlaka koja obično traje dulje od pozitivne faze.



Slika 3-1. Tipičan oblik krivulje tlak-vrijeme (FEMA, 2003)

Slijedeći oblik Friedlanderove jednadžbe često se koristi kako bi se opisao takav pad tlaka:

$$P_s(t) = P_{so} \cdot \left(1 - \frac{t}{t_0}\right) \cdot e^{-b \cdot \frac{t}{t_0}}, \quad (2)$$

- gdje su:
- $P_{so}$  – vršni statički tlak (MPa),
  - $t_0$  – trajanje pozitivne faze (s),
  - $b$  – koeficijent slabljenja vala,
  - $t$  – ukupno proteklo vrijeme, mjereno od nailaska udarnog vala (s)

Osim vršnog tlaka, važan parametar udarnog vala u projektiranju je impuls jer opisuje raspodjelu ukupne sile (po jedinici površine) po strukturi. Iznos impulsa odgovara površini ispod krivulje tlak-vrijeme (slika 3-1), a može se izračunati prema slijedećoj jednadžbi:

$$i_s = \int_{t_a}^{t_a+t_0} P_s(t) dt, \quad (3)$$

- Gdje su:
- $i_s$  – pozitivni dio impulsa udarnog vala (MPa s),
  - $t_a$  – vrijeme nailaska (s),
  - $t_0$  – trajanje pozitivne faze (s),
  - $P_s$  – vršni statički tlak (MPa)

Impuls je mjerilo količine energije koja je prenesena na konstrukciju. I negativna i pozitivna faza doprinose impulsu, iako je pri projektiranju puno bitnija pozitivna faza, a iznosi i raspodjela opterećenja na strukturi najviše ovise o nekoliko faktora:

- eksplozivna svojstva (vrsta i količina eksploziva),
- udaljenost detonacije od strukture i
- pojačavanje tlakova interakcijom sa tlom ili strukturom (refleksijama).

Kada udarni val djeluje na strukturu koja nije paralelna smjeru kretanja vala, on se reflektira i pojačava, pritom stvarajući reflektirani tlak. Reflektirani tlak je uvijek veći od direktnog udarnog tlaka na istoj udaljenosti od eksplozije. Iznos reflektiranog tlaka ovisi o kutu upada udarnog vala, pritom se maksimalni iznos postiže pri okomitom upadu, a minimalni kada je struktura paralelna smjeru napredovanja udarnog vala. Osim kuta upada, na iznos reflektiranog tlaka utječe i iznos vršnog tlaka koji je funkcija ukupne mase eksploziva i udaljenosti od mjesta detonacije (FEMA, 2003).

Reflektirani tlak i reflektirani impuls su sile koje u konačnici djeluju na strukturu. Te sile su dinamične i variraju u ovisnosti o udaljenosti detonacije od strukture i parametrima površine strukture izložene djelovanju detonacije, stoga je potrebno utvrditi najopasniju lokaciju pri analiziranju ponašanja strukture na djelovanje specifičnog eksploziva. Za razliku od ostalih mogućih opasnosti (poput potresa, vjetrova i poplava), napadi eksplozivima su specifični zbog slijedećih karakteristika:

- Intenziteti tlakova koji djeluju na ciljanu konstrukciju mogu biti i do nekoliko magnituda veći nego u ostalim navedenim slučajevima. Nije neuobičajeno da tlakovi u udarnom valu iznose i preko 700 kPa u urbanim okruženjima, a pri takvim razinama očekuju se velika oštećenja i popuštanje konstrukcije.
- Tlakovi eksplozije opadaju naglo sa udaljenošću od izvora, stoga se može očekivati značajno veća oštećenja na strani konstrukcije okrenutoj izvoru. Međutim, u urbanim okruženjima, uslijed refleksije valova i tlakova od okolnih zgrada, moguća je povećana šteta na suprotnoj strani.
- Trajanje događaja je kratko, mjereno u milisekundama. Zbog kratkog trajanja, masa same konstrukcije ima vrlo ublažavajuće djelovanje na reakciju konstrukcije, jer je potrebno vrijeme da se mobilizira velika masa. Dok se masa mobilizira, opterećenje je već prestalo.

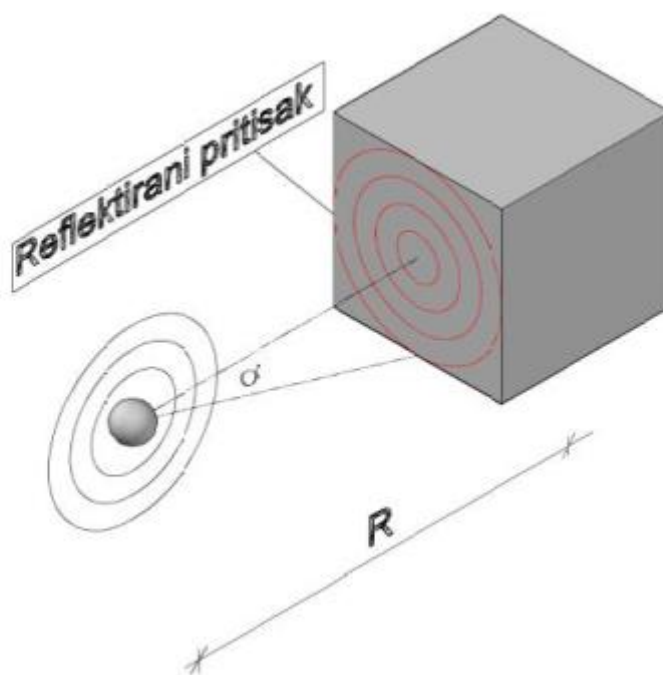
### 3.2. Refleksija udarnog vala

Pri kontaktu udarnog vala i krute površine, stvara se reflektirani val koji je po iznosu veći od vršnog tlaka prikazanog na slici 3-1. Val pri propagaciji pomiče čestice zraka koje se sudaraju sa površinom. U idealnom slučaju, čestice bi se mogle slobodno odbijati od krute površine te bi pritom reflektirani tlak bio jednak vršnom tlaku, a naprezanja na strukturi bi se udvostručila. Pri snažnom udarnom valu, refleksija čestica zraka je onemogućena nadolazećim česticama pri čemu se javljaju reflektirani valovi značajno većih iznosa.

Prema (Karlos i Solomos, 2013), moguća su tri različita tipa refleksije udarnog vala u ovisnosti o kutu između reflektirajuće površine i smjera širenja vala:

- kada je površina okomita na smjer širenja vala,
- kada smjer širenja vala nailazi na konstrukciju pod kutom
- pojava tzv. Machova vala, kada val nailazi na strukturu pod određenim kutom.

Na slici 3-2 prikazan je reflektirani val za slučaj eksplozije u slobodnom zraku bez amplifikacije vala. Iznos reflektiranog tlaka je maksimalan na udaljenosti  $R_a$  između izvora detonacije i površine. Povećanjem kuta  $\alpha$  smanjuje se vrijednost reflektiranog tlaka te postiže svoj minimum za vrijednost  $\alpha = 90$  stupnjeva.



Slika 3-2. Stvaranje reflektiranog pritiska (Korpar, 2015)

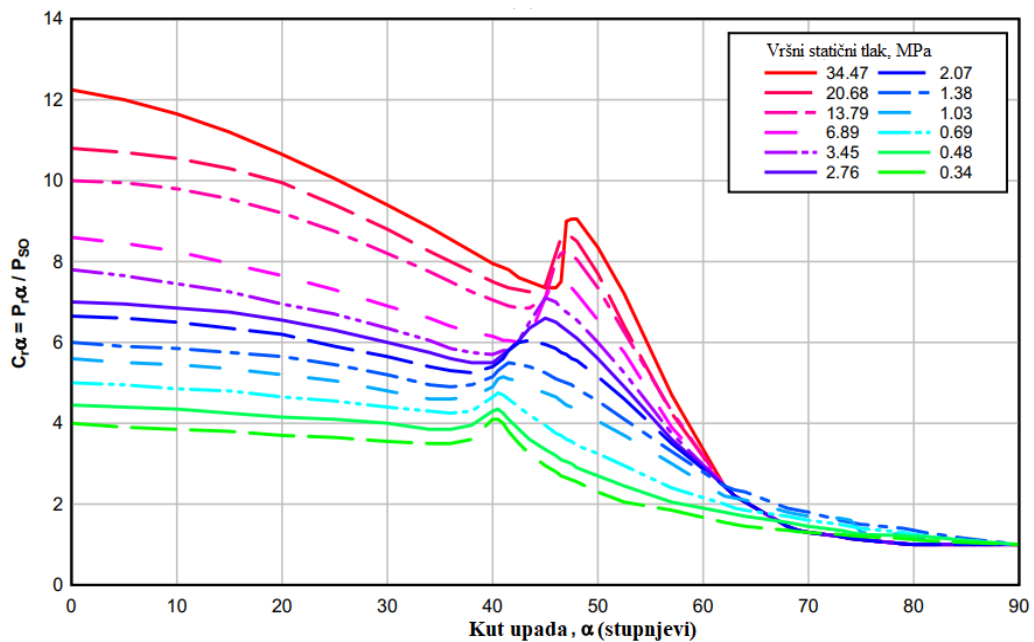
Iznos vršnog reflektiranog tlaka za kut od 0 stupnjeva može se izračunati pomoću slijedeće jednadžbe:

$$P_r = 2P_{so} \frac{4P_{so} + 7P_o}{P_{so} + 7P_o}, \quad (4)$$

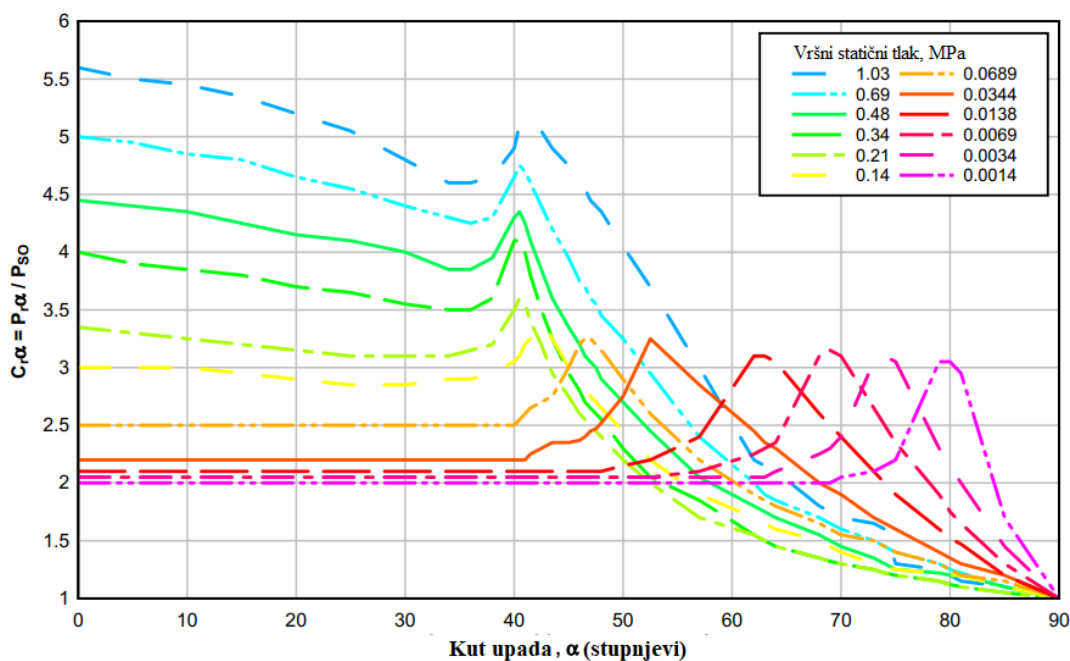
gdje su:  $P_r$  – vršni reflektirani tlak,  
 $P_{so}$  – vršni statični tlak,  
 $P_o$  – ambijentalni tlak (okolni, atmosferski)

Pretpostavka za jednadžbu je da se eksplozija odvija u standardnim uvjetima na razini površine mora te da je omjer specifičnih toplina plinova 1.4. Prema jednadžbi, iznosi reflektiranih tlakova mogu biti 2 do 8 puta veći od vršnog tlaka za male i velike eksplozije, respektivno. Međutim, eksperimentalno su utvrđeni i veći iznosi reflektiranog tlaka, što je rezultat nepredvidivog ponašanja zraka u uvjetima eksplozije.

Ako postoji kut upada  $\alpha$  između smjera širenja vala i površine, proces refleksije vala i opterećenja na konstrukciju je drugačiji. Omjer reflektiranog tlaka i vršnog pritiska naziva se koeficijentom refleksije, a na slikama 3-3 i 3-4 prikazana je promjena koeficijenta refleksije u odnosu na kut upada za veće i manje iznose vršnog tlaka, respektivno. Iz slika je vidljivo da se kut upada može zanemariti te da je normalni (okomiti) reflektirani tlak mjerodavan za promatranje strukture, pogotovo ako je vršni tlak visok. Za male ili osrednje iznose vršnog tlaka (0.01 – 3.50 MPa) pri kutovima upada od 40 do 55 stupnjeva, reflektirani tlak bi se mogao podcijeniti ukoliko se procjena opterećenja strukture radi na temelju normalne (okomite) refleksije vala.



**Slika 3-3.** Utjecaj kuta upada udarnog vala na iznos koeficijenta reflektiranog tlaka za veće iznose vršnog tlaka (Karlos i Solomos, 2013)

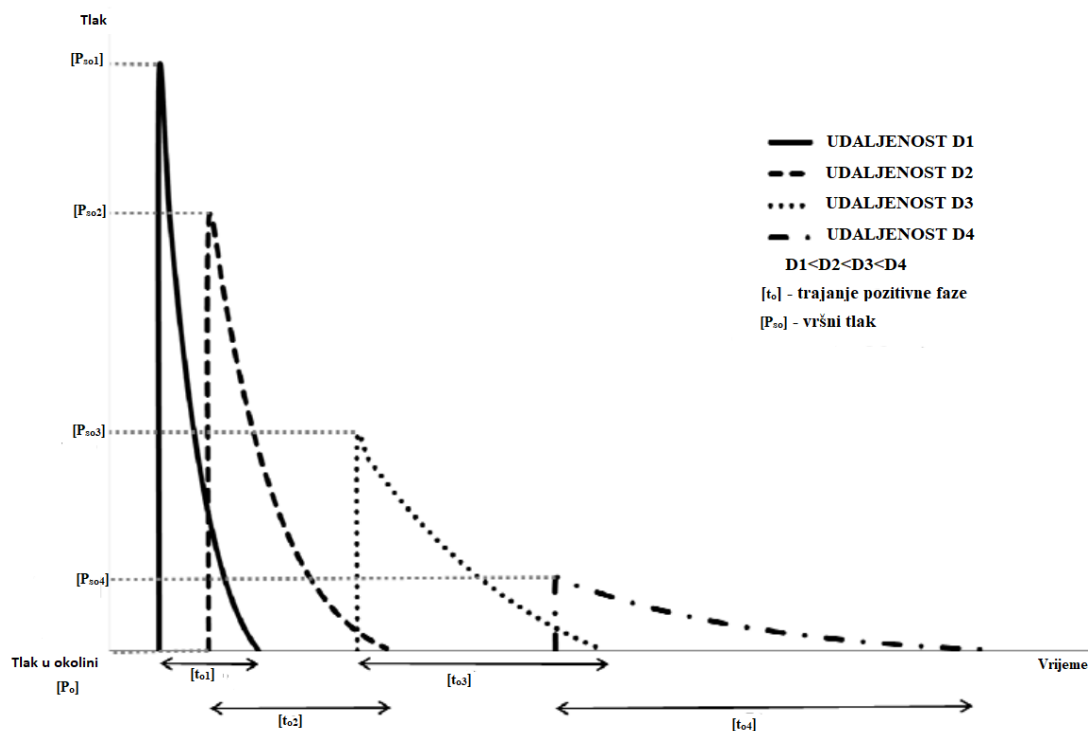


**Slika 3-4.** Utjecaj kuta upada udarnog vala na iznos koeficijenta reflektiranog tlaka za manje iznose vršnog tlaka (Karlos i Solomos, 2013)

Razlog za takvo ponašanje reflektiranog vala pri kutovima od 40 – 55 stupnjeva opisano je stvaranjem Mach fronte. Za kutove manje od 40 stupnjeva, udarni val je ispred reflektiranog vala i odvija se tipična refleksija. Za veće kutove upada dolazi do međudjelovanja udarnog i reflektiranog vala i stvaranja Machovog vala, a iznosi tlakova mogu biti značajno veći nego kod normalno reflektiranih valova (Karlos i Solomos, 2013).

### 3.3. Utjecaj udaljenosti i različitih tipova djelovanja eksplozije

Jedan od kritičnih parametara pri projektiranju građevina na djelovanje eksplozije je udaljenost eksplozije od objekta. Vršni tlak i brzina udarnog vala opadaju naglo sa udaljenošću od izvora, kao što se vidi na slici 3-5, na kojoj su prikazane samo pozitivne faze impulsa udarnih valova čija trajanja se povećavaju sa udaljenošću od izvora detonacije.



Slika 3-5. Utjecaj udaljenosti detonacije na pozitivnu fazu krivulje tlak-vrijeme (Karlos i Solomos, 2013).

Utjecaj udaljenosti na karakteristike udarnog vala može se utvrditi korištenjem jednažbi za skaliranje. Ideja skaliranja jest da će se detoniranjem dva eksplozivna naboja istog eksploziva i geometrija ali različitih masa (snaga), na skaliranim udaljenostima, proizvesti isti udarni valovi na promatranoj točki, pod uvjetom da se nalaze pod istim atmosferskim uvjetima. Najčešće korištene jednadžbe skaliranja su Hopkinson-Cranz-ova i Sachs-ova, a razlikuju se što je potonja prigodna za korištenje u različitim atmosferskim uvjetima. Prema Hopkinson-Cranz-ovom zakonu, dimenzionalno skaliranje udaljenosti opisano je izrazom:

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}}, \quad (5)$$

gdje su:  $R$  – udaljenost od izvora detonacije (m),

$W$  – masa eksploziva (kg)

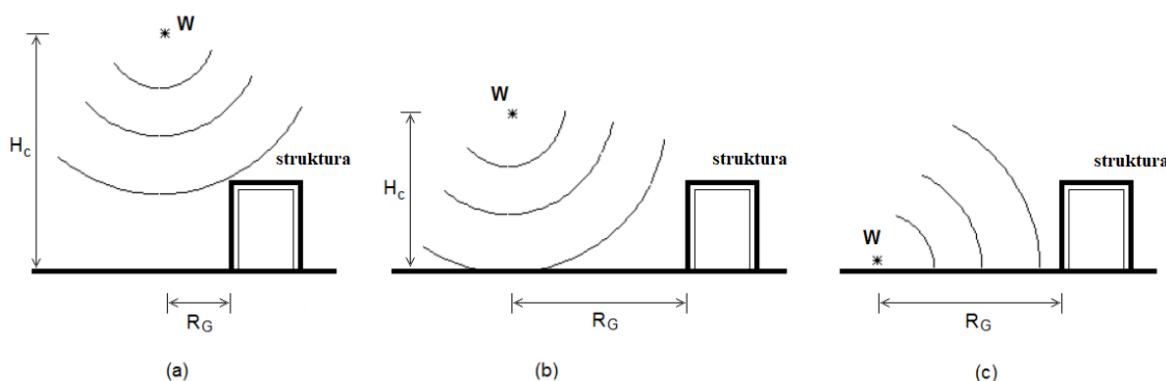
Ako pretpostavimo da eksplozivni naboj mase  $W_1$ , karakteristične veličine  $d_1$ , na udaljenosti  $R_1$  proizvodi vršni tlak  $P$ , impuls  $i_1$ , u trajanju  $t_{01}$ , sa vremenom dolaska  $t_{a1}$  i da je  $R_1/\sqrt[3]{W_1} = z$ . Tada, prema zakonu skaliranja, možemo očekivati da će drugi eksplozivni naboj,  $W_2$ , karakteristične dimenzije  $d_2 = z d_1$ , na udaljenosti  $R_2 = z R_1$  proizvesti udarni val identičnog vršnog tlaka u promatranoj točki. Također, zbog različitosti u masi eksplozivnog



naboja i udaljenosti detonacije, u promatranoj točki bismo imali impuls  $i_2=zi_1$ , trajanje  $t_{02}=zt_{01}$  i vrijeme dolaska  $t_{a2}=zt_{a1}$  (Karlos i Solomos, 2013).

Na slici 3-6 prikazana su tri osnovna tipa vanjskih eksplozija u ovisnosti o relativnoj poziciji izvora eksplozije i promatrane strukture, odnosno u ovisnosti o visini  $H$  na kojoj se detonira naboj mase  $W$  te o horizontalnoj udaljenosti  $R_g$  od promatranog objekta. Tri tipa eksplozija su:

- a) detonacije u „slobodnom“ zraku – eksplozivni naboj detonira se u zraku, udarni val se širi sferično i direktno udara na objekt
- b) detonacije u zraku - eksplozivni naboj se detonira u zraku, udarni valovi se šire sferično, ali prvo ostvaruju kontakt sa tlom a tek zatim sa objektom. Dolazi do nastajanja fronte Mach vala.
- c) površinske detonacije - eksplozivni naboj nalazi se na tlu ili vrlo blizu tlu, udarni valovi gotovo odmah ostvaruju kontakt s tlom i šire se hemisferično prema objektu.



**Slika 3-6.** Osnovni tipovi vanjskih eksplozija: (a) detonacije u „slobodnom“ zraku, (b) detonacije u zraku i (c) površinske detonacije (Karlos i Solomos, 2013).

### 3.4. Strukturna oštećenja

Tipičan primjer terorističkog napada uključuje vozilo napunjeno eksplozivom detonirano pomoću daljinskog ili vremenskog okidača. S obzirom na malu udaljenost, dolazi do trenutne interakcije između tla i udarnog vala u takozvanoj hemisfernoj površinskoj detonaciji te se udarni val odmah reflektira od tla što dovodi do povećanih vrijednosti tlaka.

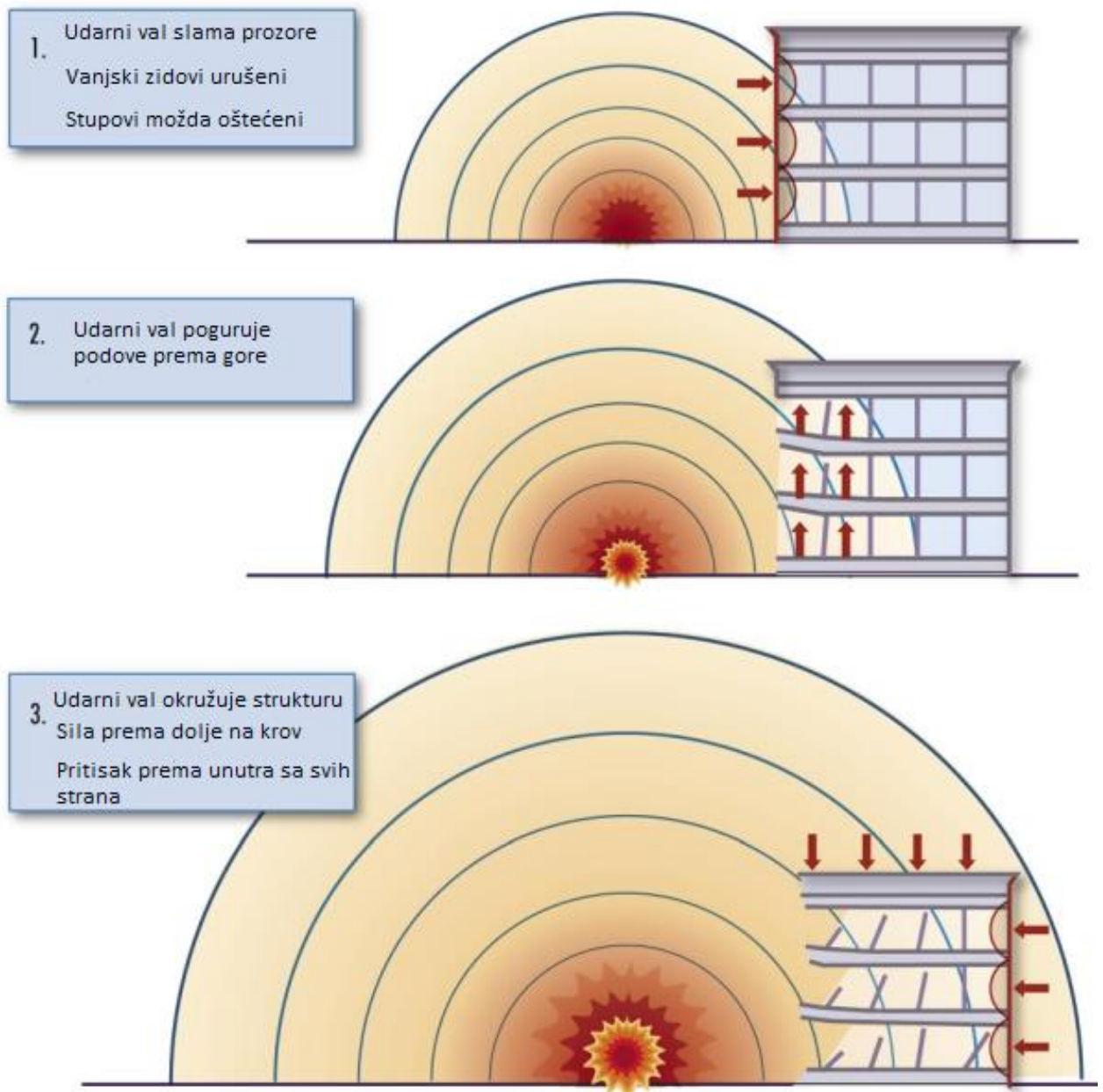
Kada bi tlo bilo idealno kruto, prouzročeni tlakovi bili bi dvostruko veći od detonacija u „slobodnom“ zraku. To saznanje omogućuje procjenjivanje vrijednosti tlaka površinskih detonacija koristeći detonacije u „slobodnom“ zraku, tako što se udvostruči masa eksplozivnog naboja. U stvarnosti, ovisno o vrsti tla i tipu eksploziva, određeni dio energije

se apsorbira pri formiranju kratera, pa je faktor kojim se masa eksploziva množi približno 1.7 do 1.8 (Karlos i Solomos, 2013).

Uzrokovane ozljede i oštećenja uslijed eksplozije ne mogu se predvidjeti sa potpunom sigurnošću. Unatoč nesigurnostima, moguće je dati nekakve generalne smjernice o očekivanoj razini štete i ozljeđenih ljudi na temelju jakosti i udaljenosti eksplozije te pretpostavkama o konstrukciji u pitanju.

Zračni udarni val je najveći uzrok oštećenja u eksploziji. Tlakovi koji se javljaju pri kontaktu sa površinama zgrada su nekoliko magnituda veći od onih na koje su zgrade projektirane. Udarni val također može djelovati u smjeru koji nije predviđen projektiranjem, poput uzdizanja podova, kao što je prikazano na slici 3-7. Eksplozija tlačno djeluje na vanjske zidove pri niskim katovima i može uzrokovati popuštanje zidova i pucanje prozora. Širenjem, udarni val prodire u strukturu te djeluje i prema gore i prema dolje na podove.

Popuštanje podova je uobičajeno kod napada sa velikim količinama eksploziva, s obzirom da tipično imaju relativno veliku površinu i malu debljinu. Od trenutka detonacije do trenutka kad udarni val okruži strukturu i nastaju direktna oštećenja obično prođe od nekoliko desetaka do nekoliko stotina milisekundi. Ako je započeto progresivno rušenje (kolaps), do njega obično dođe nakon nekoliko sekundi (FEMA, 2003).



Slika 3-7. Djelovanje udarnog vala na strukturu (FEMA, 2003).

#### 4. BETON I TEHNOLOGIJE PROIZVODNJE BETONA

Beton je građevinski materijal izrađen mješanjem veziva (cement), vode i agregata (pijesak, šljunak, drobljenac). Osim tih obaveznih komponenti, u sastav betona mogu ulaziti i dodaci (aditivi) koji mu daju posebna svojstva (zaptivači, aeranti, plastifikatori, regulatori vezivanja, sredstva protiv mraza...). Za gustoću nearmiranog betona uzima se  $\rho=2400 \text{ kg/m}^3$ , a armiranog  $\rho = 2500 \text{ kg / m}^3$  (Gukov, 2017).

Glavne mehaničke karakteristike betona jesu njegove čvrstoće (tlačna, vlačna i posmična) i deformabilnost. Na ova mehanička svojstva betona utječe veliki broj čimbenika, od kojih su najvažniji:

- kakvoća cementa,
- kakvoća i granulometrijski sastav ispune,
- vodocementni faktor,
- konstrukcija smjese betona,
- prirodne primjese u ispuni i vodi, te posebni dodaci cementu ili betonskoj smjesi da bi se postigla posebna svojstva,
- način pripreme i ugradnje betona u konstrukciju i
- njega betona

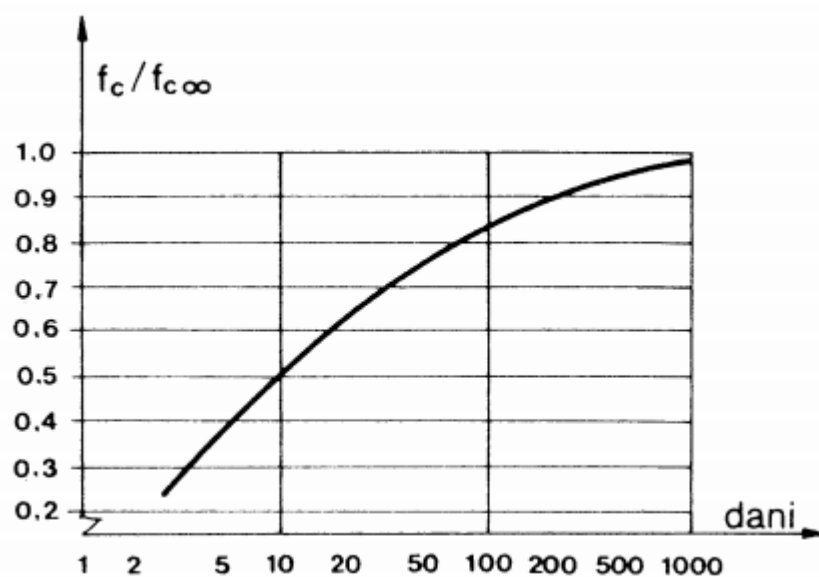
U tablici 4-1, prikazani su razredi betona prema karakterističnoj tlačnoj čvrstoći dobivenoj preko valjaka  $f_{ck}$  i preko kocki  $f_{ck,cube}$ . Ako je potrebno poznavati srednju tlačnu čvrstoću betona, ona se može približno odrediti pomoću izraza:

$$F_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ (N/mm}^2\text{)}, \quad (6)$$

**Tablica 4-1.** Prikaz čvrstoće betona dobivene preko valjaka i kocki u ovisnosti o klasi betona (Gukov, 2017)

Razredi betona	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
$f_{ck}(\text{N/mm}^2)$	12	16	20	25	30	35	40	45	50
$f_{ck,cube}$	15	20	25	30	37	45	50	55	60
$f_{cm}$	20	24	28	33	38	43	48	53	58

Čvrstoća betona starosti do 1000 dana u odnosu na konačnu  $f_{c\infty}$  može se približno odrediti korištenjem dijagrama prikazanog na slici 4-1.



**Slika 4-1.** Promjena čvrstoće betona starenjem (Gukov, 2017)

Vlačna čvrstoća betona definirana je prema obliku uzorka i metodi ispitivanja na vlak. Tako se razlikuje:

$f_{ct,ax}$  – vlačna čvrstoća dobivena ispitivanjem uzorka na središnji vlak,

$f_{ct,sp}$  – vlačna čvrstoća dobivena cijepanjem i

$f_{ct,fl}$  – vlačna čvrstoća dobivena savijanjem uzorka.

Budući da vlačna čvrstoća u pravilu jako varira za neku klasu betona, a može biti značajna u analizi sigurnosti i trajnosti, uvodi se srednja vrijednost za vlačnu čvrstoću između donje granice za karakterističnu čvrstoću  $f_{ctk,0.05}$  i gornje granice  $f_{ctk,0.95}$ , odnosno one s 5%-tnim i 95%-tnim fraktilom (Gukov, 2017). U tablici 4-2 prikazane su vlačne čvrstoće u ovisnosti o klasi betona.

**Tablica 4-2.** Vlačne čvrstoće betona (Gukov, 2017)

Klasa betona	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
$f_{ct,m}$	1.6	1.9	2.2	2.6	2.9	3.2	3.5	3.8	4.1
$f_{ctk,0.05}$	1.1	1.3	1.5	1.8	2.0	2.2	2.5	2.7	2.9
$f_{ctk,0.95}$	2.0	2.5	2.9	3.3	3.8	4.2	4.6	4.9	5.3

Također daje se približni izrazi za procjenu srednje vlačne čvrstoće te karakterističnih:

$$f_{ct,m} = 0.30 f_{ck}^{2/3}$$

$$f_{ctk,0.05} = 0.70 f_{ct,m}$$

$$f_{ctk,0.95} = 1.3 f_{ct,m}$$

Kada se određuje deformacija betona pod opterećenjem, koristi se sekantni modul elastičnosti između naprezanja  $\sigma_c = 0$  i  $\sigma_c = 0.4 f_{ck}$ , a označuje se za beton normalne gustoće kao  $E_{cm}$ . U tablici 4-3 prikazani su moduli elastičnosti ovisno o klasi betona. Ako nema točnijeg podatka za sekantni modul elastičnosti betona, dopušta se približni izraz za njegovo prognoziranje:

$$E_{cm} = 9500 \sqrt[3]{f_{ck} + 8} \text{ (N/mm}^2\text{)}, \quad (7)$$

**Tablica 4-3.** Moduli elastičnosti betona (Gukov, 2017)

Klasa betona	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
$E_{cm}$ (N/mm <sup>2</sup> )	26000	27500	29000	30500	32000	33500	35000	36000	37000

#### 4.1. Čelik za armiranje

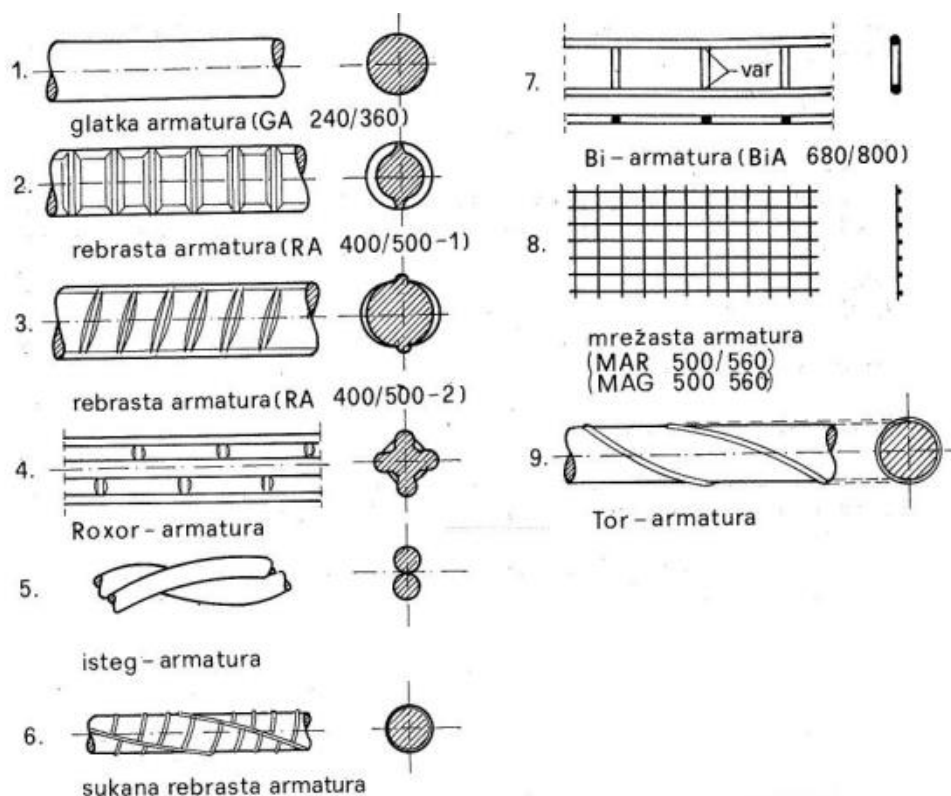
Za armiranje betonskih konstrukcija rabe se čelici pod nazivom betonski čelik ili čelik za armiranje. Betonski čelik dijeli se prema:

- profilu, na žice  $\phi \leq 12$  mm i šipke  $\phi > 12$  mm;
- mehaničkim karakteristikama (granica popuštanja, vlačna čvrstoća i rastezljivost pri slomu probnog uzorka na dijelu dužine  $10\phi$ ), na visoko i normalno duktilne čelike;
- zavarljivosti, na nezavarljiv, zavarljiv pod određenim uvjetima i zavarljiv;
- površinskoj obradi pri izvlačenju na glatki i rebrasti, uključujući i zavarene mreže;
- vrsti obrade, na toplo valjan, toplo valjan i hladno obrađen i termički poboljšani čelik.

Jedan od glavnih uvjeta armiranobetonskih konstrukcija je potpuno sprezanje između betona i čelika, što znači da ne smije nastupiti klizanje armature u betonu. Pri malim posmičnim naprezanjima između armature i betona zadovoljava glatki okrugli presjek. S izradom kvalitetnijeg čelika rasla je sila u armaturi, pa je sve više prijetila opasnost da se čelik odijeli od betona. Sprečavanje klizanja postiže se upotrebom rebrastih ili sukanih profila te sukano rebrastih profila. Rebrasti čelici imaju znatno bolju prionljivost od glatkih čelika pa dopuštaju upotrebu većih naprezanja s tim da se mogu očekivati pravilno raspoređene pukotine u betonu manjih širina. Od čelika za armiranje zahtijeva se i velika rastezljivost, tj. veliko relativno produljenje prije sloma. Ona je potrebna u prvom redu radi izravnavanja naprezanja u pojedinim šipkama armature na mjestu pukotina. Svojstvo velike rastezljivosti poželjno je i za nekontrolirano preopterećenje konstrukcije, kad velika rastezanja armature izazivaju u betonu široke pukotine i upućuju na opasnost od sloma (Gukov, 2017).

Čelik koji se rabi za armaturu dobavlja se u šipkama, kolotovima i mrežama raznih oblika i presjeka, raznih duljina, a i raznih kvaliteta. Na slici 4-2 prikazano je nekoliko oblika armatura koje se upotrebljavaju u armiranom betonu:

- glatka armatura je od prirodnog čelika B240, B220 (GA 240/360),
- rebrasta armatura je od visokovrijednoga prirodno tvrdog čelika dobivenoga prikladnim legiranjem, B400, B500 (RA 400/500, RA 500/550),
- sukani profili su hladno obrađeni čelici,
- mrežasta armatura je također od hladno obrađenih glatkih i rebrastih žica koje se zavaruju točkasto elektrootporom u krutu mrežu MAG 500/560 i MAR 500/560 i
- bi-armatura sastoji se od dvije hladno obrađene žice međusobno spojene poprečnim šipkama od prirodnog čelika i zavarene. Nije dopuštena za dinamičko opterećene konstrukcije i konstrukcije koje moraju biti nepropusne za vodu B680 (BiA – 680/800)



**Slika 4-2.** Različiti oblici čelične armature (Gukov, 2017)

Prema važećim hrvatskim normama čelici za armiranje dijele se u razrede s obzirom na granicu popuštanja i duktilnost samog čelika. Oznake za čelik za armiranje jesu: B500A, B500B i B450C pri čemu je B oznaka da se radi o betonskom čeliku, 500 i 450 su vrijednosti

karakteristične granice popuštanja u N/mm<sup>2</sup>, A, B i C su razredi duktilnosti pri čemu A razred ima najmanju, a C razred najveću duktilnost.

#### 4.2. **Betoni visoke čvrstoće**

U betone običnih čvrstoća svrstavaju se svi betoni do najvećeg razreda tlačne čvrstoće C50/60. Razredi tlačnih čvrstoća koji odgovaraju betonima visokih čvrstoća su od C55/67 do C100/115. Betoni s razredom tlačne čvrstoće većim od C100/115 nazivaju se i betonima ultravisoke čvrstoće.

Betoni visokih čvrstoća imaju i poboljšana svojstva trajnosti u odnosu na betone običnih čvrstoća, stoga postoji veliko zanimanje širom svijeta za građenje nosivih, duktilnih i uporabivih armiranobetonskih konstrukcija od betona visokih čvrstoća.

Od nedostataka elemenata od betona visokih čvrstoća, napreznih savijanjem sa uzdužnom silom ili bez nje, može se navesti pad duktilnosti s porastom tlačne čvrstoće već iznad 55 N/mm<sup>2</sup>, te rano i brzo odlamanje i drobljenje zaštitnog sloja u području plastičnih zglobova. Međutim, najnoviji rezultati pomiču graničnu tlačnu čvrstoću od 55 N/mm<sup>2</sup> na 75 N/mm<sup>2</sup>, poslije koje daljnjim povećanjem tlačne čvrstoće betona opada duktilnost elementa. Isto tako, novija su istraživanja pokazala da se rano i brzo odlamanje zaštitnog sloja može uspješno spriječiti primjenom diskontinuiranih čeličnih vlakana ugrađenih u beton (mikroarmirani beton) (Skazlić i Tomičić, 2006).

Sastojci betona visokih čvrstoća su cement, agregat, voda, kemijski i mineralni dodaci te vlakna. Njihov odabir ovisi prvenstveno o svojstvima koje želimo postići u svježem i očvrslom stanju te vrsti konstrukcije. Problem koji se često pojavljuje kod betona visokih čvrstoća, a nije karakterističan za obične betone, jest kompatibilnost između odabranog cementa te kemijskih i mineralnih dodataka.

Betoni visokih čvrstoća imaju u svom sastavu veću količinu veziva (400 kg/m<sup>3</sup>) i niži vodovezivni omjer. Granulometrijski je sastav karakterističan po manjem maksimalnom zrnju agregata i većem udjelu sitnih frakcija. Obradivost betona osigurava se upotrebom superplastifikatora. Prema potrebi, mogu se dodavati i drugi kemijski dodaci kao, primjerice, aeranti za poboljšanje otpornosti na smrzavanje. Od mineralnih dodataka najučinkovitija je silikatna prašina. Ona reagira sa slobodnim vapnom iz cementa stvarajući CSH gel, a uz to poboljšava i cementni kamen na sučeljku s agregatom.

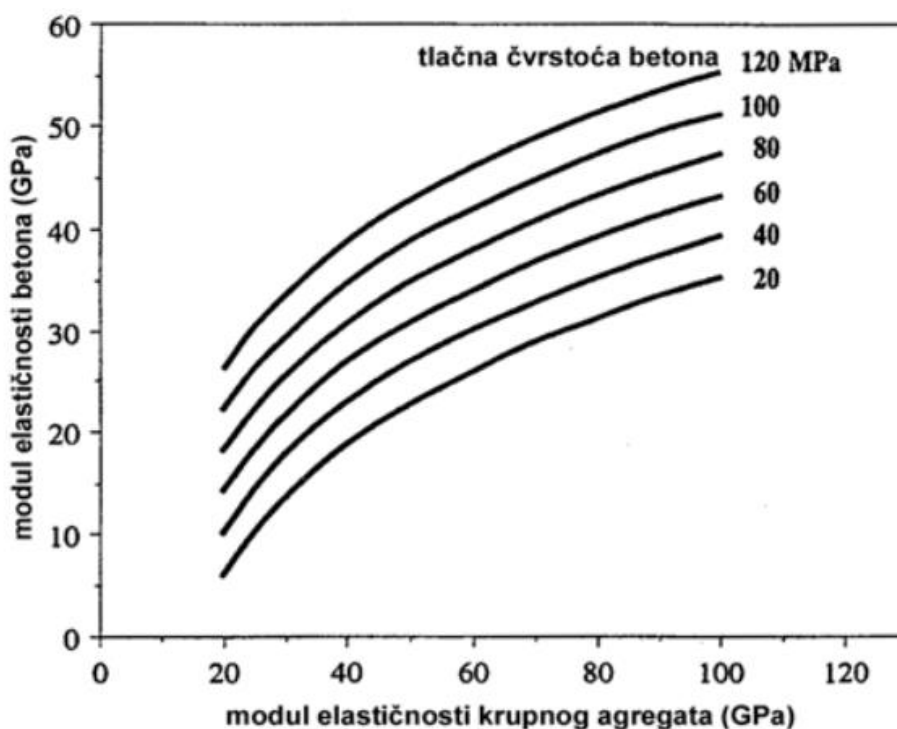
Krhkost betona raste s povećanjem njegove tlačne čvrstoće, a može se riješiti dodavanjem vlakana. Intenzitet poboljšanja mikroarmiranjem vlaknima ovisi o količini i vrsti vlakana, prionljivosti vlakana i cementne matrice te kvaliteti same cementne matrice. Za poboljšanje



duktilnosti i drugih svojstava betona visokih čvrstoća u očvrnulom stanju rabe se uglavnom čelična vlakna. Za sprečavanje raspucavanja mladog betona i poboljšanje otpornosti na djelovanje požara upotrebljavaju se polimerna vlakna.

U usporedbi s običnim betonom, beton visokih čvrstoća jest homogeniji materijal. Njegov je radni dijagram, zbog većeg modula elastičnosti, strmiji i linearan do blizu vrijednosti tlačne čvrstoće. Iako je modul elastičnosti veći nego kod betona običnih čvrstoća, on se ne povećava u istoj mjeri kao i tlačna čvrstoća, stoga kod većih naprezanja u uporabi vitkih elemenata dolazi i do većih deformacija (Skazlić i Tomičić, 2006).

Na slici 4-3 prikazan je dijagram iz kojeg se može procijeniti modul elastičnosti na temelju poznatih vrijednosti tlačne čvrstoće betona i modula elastičnosti krupnog agregata.



**Slika 4-3.** Dijagram ovisnosti modula elastičnosti betona visokih čvrstoća o tlačnoj čvrstoći i modulu elastičnosti krupnog agregata (Skazlić i Tomičić, 2006)

#### 4.3. Mikroarmirani betoni

Običan beton je relativno krhak te njegova vlačna čvrstoća tipično doseže samo desetinu vrijednosti tlačne čvrstoće, stoga mu se uglavnom dodaju čelične šipke ili mreže kao armatura. U novije vrijeme sve je učestalija pojava betona armiranih sitnim, nasumično raspoređenim vlaknima, čija glavna svrha je povećati sposobnost upijanja energije i izdržljivost materijala, ali također i povećati vlačnu čvrstoću te čvrstoću na savijanje.

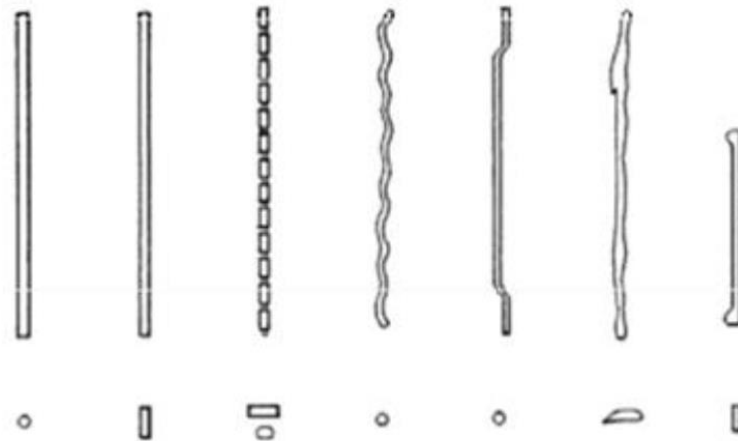
Mikroarmirani betoni imaju značajno bolja svojstva nakon formacija pukotina od običnih betona te pritom zadržavaju veliku količinu originalne nosivosti. Dodavanje bilo kakvih vlakana običnom betonu otežava rukovanje njime (Nemati, 2015).

Mikroarmirani beton (MAB) se sastoji od hidrauličkog cementa, vode, sitnog ili krupnog i sitnog agregata te nasumično raspoređenih vlakana. Vlakna su različitih oblika i dimenzija, a najčešće se koriste čelična vlakna, vlakna od bezalkalnog stakla, polimerna-polipropilenska vlakna te vlakna od biljnog porijekla (celuloza, pamuk, konoplja, bambus i sl.). U tablici 4-4 prikazan je tipičan sastav mikroarmiranog betona (Netinger Grubeša, 2017).

**Tablica 4-4.** Uobičajeni sastojci za izradu mikroarmiranih betona (Netinger Grubeša, 2017)

Sastav betonske mješavine	Masa		Gustoća	Volumen
	%	kg	kg/dm <sup>3</sup>	dm <sup>3</sup>
Cement		350,00	3,09	113,27
Voda		160,00	1,00	160,00
v/c omjer = 0,46				
Superplastifikator		1,80	1,06	1,69
Agregat 0-4 mm	60	1080,00	2,55	423,71
4-8 mm	40	720,00	2,55	282,48
Čelična vlakna		30,00	7,80	3,85
Zrak	1,50			15,00
Suma		2340,80	2,34	1000,00

Betoni sa čeličnim vlaknima se najčešće primjenjuju te se obično dozira 20-50 kg/m<sup>3</sup>, odnosno manje od 1% volumena ugrađenog betona. Čelična vlakna dodaju se kako bi se betonu povećala otpornost na savijanje, vlačna čvrstoća (i do 50%), žilavost, poslijepukotinska nosivost te otpornost na udarno i abrazijsko opterećenje. Na slici 4-4 prikazani su neki od oblika čeličnih vlakana. (Netinger Grubeša, 2017).



**Slika 4-4.** Različiti oblici čeličnih vlakana korištenih za mikroarmiranje (Netinger Grubeša, 2017)

Beton mikroarmiran polimernim vlaknima sastoji se od mikrosintetičkih polipropilenskih vlakana u dozama od 0,6-2,0 kg/m<sup>3</sup>. Polimerna vlakna ne mogu zamijeniti uobičajenu armaturu te im je glavna svrha reduciranje izdvajanja vode i plastičnog skupljanja betona te segregacije agregata. Prednosti se također očituju kroz povećanje žilavosti, otpornosti na udar i poslijepukotinske nosivosti.

Beton mikroarmiran makrosintetičkim vlaknima sadrži vlakna od polietilena i polipropilena u dozama od 5-9 kg/m<sup>3</sup> te u potpunosti zamjenjuju uobičajenu armaturu. Uslijed rizika od pojave mikropukotina, koriste se u kombinaciji sa mikrosintetičkim (polipropilenskim) vlaknima, a neke od prednosti uključuju nepostojanje rizika korozije te povećanje žilavosti i poslijepukotinske nosivosti

Beton mikroarmiran staklenim nitima koristi stakloplastiku (fiberglas) za armiranje, a staklene niti također pomažu pri toplinskoj izolaciji, te za razliku od čeličnih vlakana, ne ometaju radio signale. Staklene niti pomažu spriječiti nastajanje pukotina uslijed mehaničkog ili toplinskog naprezanja. Staklene niti imaju vrlo visoku vlačnu čvrstoću od 1020 do 4080 N/mm<sup>2</sup>.

U slučaju betona mikroarmiranog azbestnim vlaknima, vlačna čvrstoća azbesta je u rasponu od 560 do 980 N/mm<sup>2</sup>, a cementna pasta od azbesta ima značajno veću čvrstoću na savijanje od paste od portlandskog cementa.

Prema (Ragavendra i dr., 2017), neka od svojstava mikroarmiranih betona su:

- čvrstoća na savijanje do 2.5 puta veća pri 4% volumnog sadržaja vlakana,
- tvrdoća je između 10 i 40 puta veća nego kod običnih betona,
- vlačna čvrstoća razdvajanja do 2.5 puta veća pri 3% volumnog sadržaja vlakana,
- otpornost na udarce od 5-10 puta veća, ovisno o postotku vlakana i
- posmična čvrstoća greda i do 100% veća nego kod običnih betona.

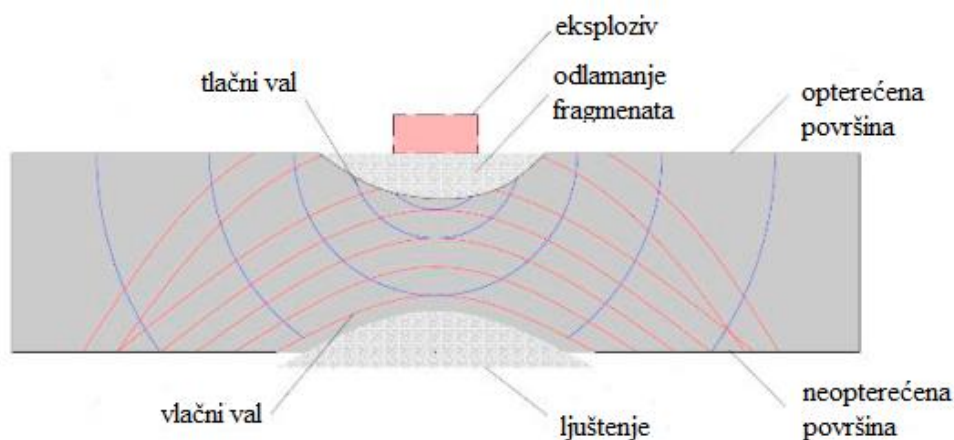
## 5. UTJECAJ EKSPLOZIJE NA BETONSKE ELEMENTE

Armirani beton je najčešće korišteni materijal pri dizajniranju građevine na utjecaj eksploziva, zbog svoje dostupnosti, relativno niske cijene, mase te fleksibilnosti pri proizvodnji i ugradnji. Inicijalno ubrzanje strukture uslijed detonacije je inverzno proporcionalno masi strukture, stoga materijal velike gustoće poput betona ima prednost pri opiranjju opterećenja od detonacije. Kako bi se postiglo prihvatljivo ponašanje strukture na utjecaj eksplozivnog opterećenja, nužno je pažljivo pristupiti dizajniranju elemenata od armiranog betona. Prema (Kalman, 2010), generalne smjernice za dizajniranje su:

- ne koristiti beton tlačne čvrstoće veće od 34,48 MPa,
- dizajnirati na preokretanje opterećenja,
- omjer vlačne čvrstoće armature naprema čvrstoći popuštanja treba biti veći od 1.25,
- spojeve armature treba držati izvan zglobne regije elementa i
- spojeve armature treba dizajnirati kao vlačne spojeve.

### 5.1. Kontaktna detonacija

U slučaju kontaktne detonacije, eksploziv se nalazi direktno na uzorku a proizvedena opterećenja su uglavnom destruktivna. Na malim udaljenostima od eksploziva beton se razara uslijed velikih tlačnih i posmičnih naprezanja. Tlačni val proizveden detonacijom se kreće kroz betonsku ploču i reflektira se kao vlačni val sa suprotne površine. Kada vlačna naprezanja premaše vlačnu čvrstoću betona dolazi do ljuštenja i odlamanja fragmenata sa suprotne strane betonske ploče kao što je prikazano na slici 5-1. Dodavanje čeličnih vlakana mješavini značajno umanjuje količinu fragmenata (Zircher i dr., 2017).



Slika 5-1. Shematski prikaz kontaktne detonacije (Zircher i dr., 2017)

Istraživanjem vojnog sveučilišta u Njemačkoj promatran je utjecaj kontaktne detonacije na betonske elemente napravljene od betona niske čvrstoće (C25/30) kako bi se simulirala kvaliteta betona napravljenih od lokalnih materijala dostupnih u vojnim područjima. Testne ploče proizvedene su na vojnom sveučilištu u Munchenu, a čelična vlakna su unaprijed dodana u betonsku mješavinu sa sadržajem od 1.0 Vol.-% (78,5 kg/m<sup>3</sup>). Proizvedeno je 15 različitih ploča, sa različitim mješavinama betona, čeličnim vlaknima, sustavom armiranja te različitih debljina. Eksplozivni naboj sastoji se od 850 g PETN eksploziva smještenog u plastičnu cijev visine 62 mm i unutarnjeg radijusa 103,6 mm smještene u središtu opterećene površine, prikazano na slici 5-2.

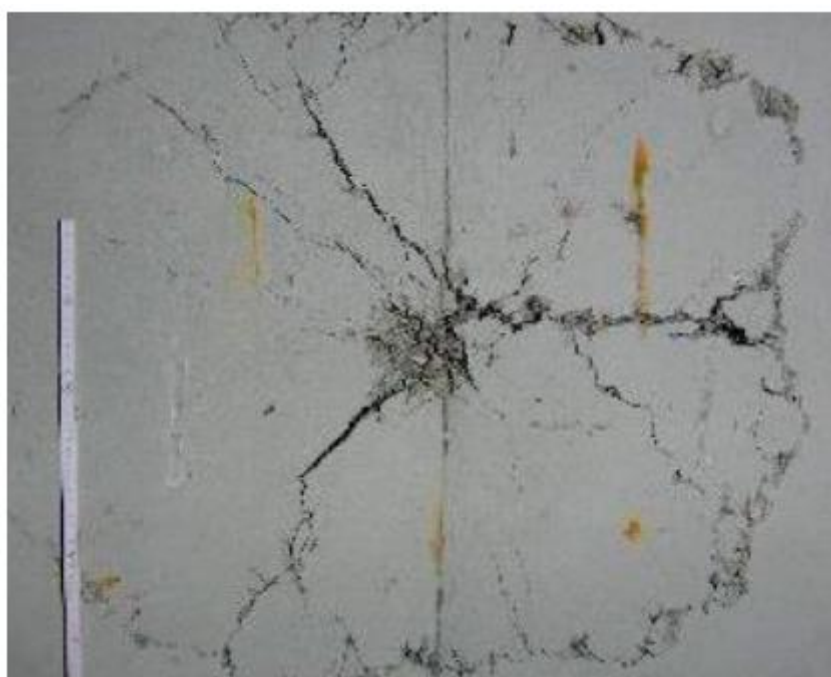


**Slika 5-2.** Prikaz postavljenog eksplozivnog naboja na testnoj betonskoj ploči (Zircher i dr., 2017)

Prva ispitivanja sa kontaktnom detonacijom pokazala su kako je značajno manje odlamanje fragmenata na neopterećenoj strani na pločama sa čeličnim vlaknima nego bez vlakana. Za ploče bez čeličnih vlakana, masa fragmentiranih dijelova je iznosila i do 50 kg. Za ploče sa čeličnim vlaknima, masa fragmenata bila je između 0.70 i 3.1 kg, neovisno o tipu korištenih čeličnih vlakana (Zircher i dr., 2017). Na slikama 5-3 i 5-4 prikazani su rezultati ispitivanja za betonske ploče bez i sa čeličnim vlaknima.

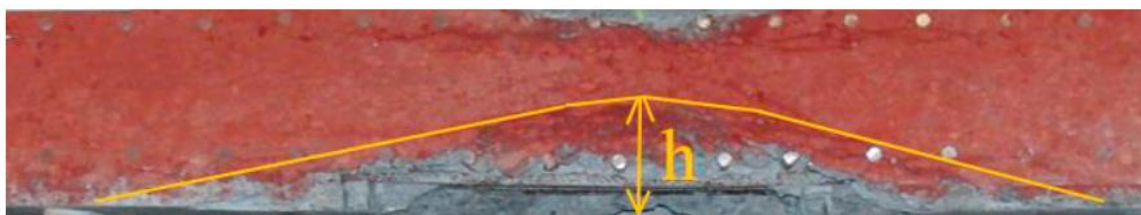


**Slika 5-3.** Prikaz neopterećene strane betonske ploče izrađene od betona bez vlakana (Zircher i dr., 2017)

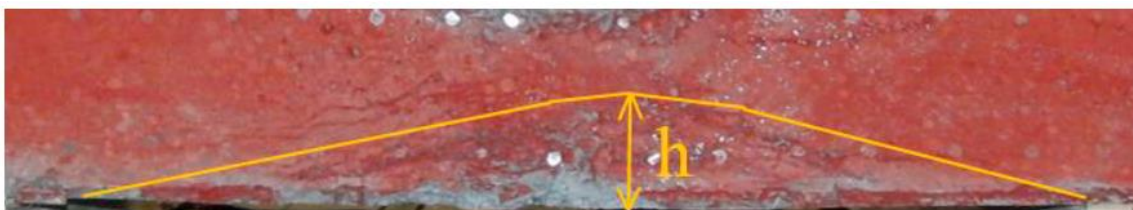


**Slika 5-4.** Prikaz neopterećene strane betonske ploče izrađene od betona sa vlaknima (Zircher i dr., 2017)

Nakon procjene leta fragmenata i 3D skeniranja, ploče su prerezane posred kratera kako bi se točno utvrdila razina oštećenja, kao što je prikazano na slikama 5-5 i 5-6. Iz poprečnih presjeka se može uočiti da razina oštećenja ne ovisi o čeličnim vlaknima, s obzirom da popuštanje betona ovisi o vlačnoj čvrstoći. Međutim, dodavanje vlakana značajano umanjuje odlamanje i let fragmenata.



**Slika 5-5.** Prikaz presjeka ploče bez vlakana (Zircher i dr., 2017)



**Slika 5-6.** Prikaz presjeka ploče sa vlaknima (Zircher i dr., 2017)

Prema Zircher i dr., za potpuni numerički model koji ispravno opisuje volumen i površinu kratera, unutar statističke nesigurnosti, potrebno je slijedeće:

- definirati model opterećenja koji ispravno prikazuje povijest kontaktnog opterećenja
- definirati model sloma betona u ovisnosti o vlačnoj čvrstoći  $f_{ct}$
- uzeti u obzir nesigurnosti parametara materijala (poissonov omjer, youngov modul elastičnosti, gustoća i vlačna čvrstoća betona,  $f_{ct}$ )

## 5.2. Djelovanje fragmenata na konstrukciju

Ispitivanja su izvedena od strane Švedske agencije za obrambena istraživanja pri kojima su ploče malih dimenzija izložene detonaciji eksploziva sa prethodno formiranim fragmentima. Nakon detonacije, mehanička svojstva ploča su ispitana, a pretpostavljeno je da fragmenti nailaze na betonski element prvi i nanose inicijalno oštećenje, stoga bi se pri analizi eksplozivnog opterećenja trebala uzeti u obzir unaprijed oštećena struktura (Grisaro i dr., 2017).

Armirano betonske ploče izložene su djelovanju eksploziva u cilindričnim metalnim patronama. Detonacija eksploziva je probila patrone i formirali su se fragmenti koji su došli do betonskih ploča prije udarnog vala. U jednom od ispitivanja, postavljeni eksploziv nije imao patronu, te su pritom izmjereni veći udarni tlakovi (nema disipacije energije na probijanje patrone). Unatoč većim tlakovima, na betonskoj ploči nije uočena nikakva šteta, čime se potvrđuje da je glavno strukturalno oštećenje pri ovim ispitivanjima uslijed penetracije fragmenata. Na slici 5-7 prikazana je neoštećena betonska ploča, a na slici 5-8 prikazane su ploče nakon detonacije eksploziva sa udaljenosti od 2 i 3 m.



**Slika 5-7.** Neoštećena betonska ploča (Grisaro i dr., 2017)



2-m



3-m

**Slika 5-8.** Prednje strane betonskih zidova opterećenih eksplozivom sa udaljenosti od 2 i 3 m (Grisaro i dr., 2017)



Pri ispitivanju uzoraka nakon detonacije eksploziva, u svim uzorcima je zabilježen lom pri savijanju. Međutim, zbog malog udjela armature (0.2%) i njenog loma pri relativno maloj deformaciji (~2%), popuštanje ploča nije bilo uslijed drobljenja betona nego loma uzdužnih čeličnih šipki. Pri ispitivanju uzorka koji nije bio izložen djelovanju eksploziva, uočeno je stvaranje pukotina pri sili od ~55 kN.

Ispitivanjem je potvrđeno kako uzorci izloženi djelovanju eksploziva imaju manju nosivost od neoštećenog uzorka, kao što je vidljivo iz tablice 5-1. Uslijed djelovanja eksploziva i fragmenata, očekivano je kako će barijera od armiranog betona biti oštećena uslijed penetracije fragmenata, stoga je pri analizi potrebno uzeti umanjeni (reducirani) poprečni presjek te je usvojena efektivna visina poprečnog presjeka kao procjena maksimalne sile koju element može izdržati.

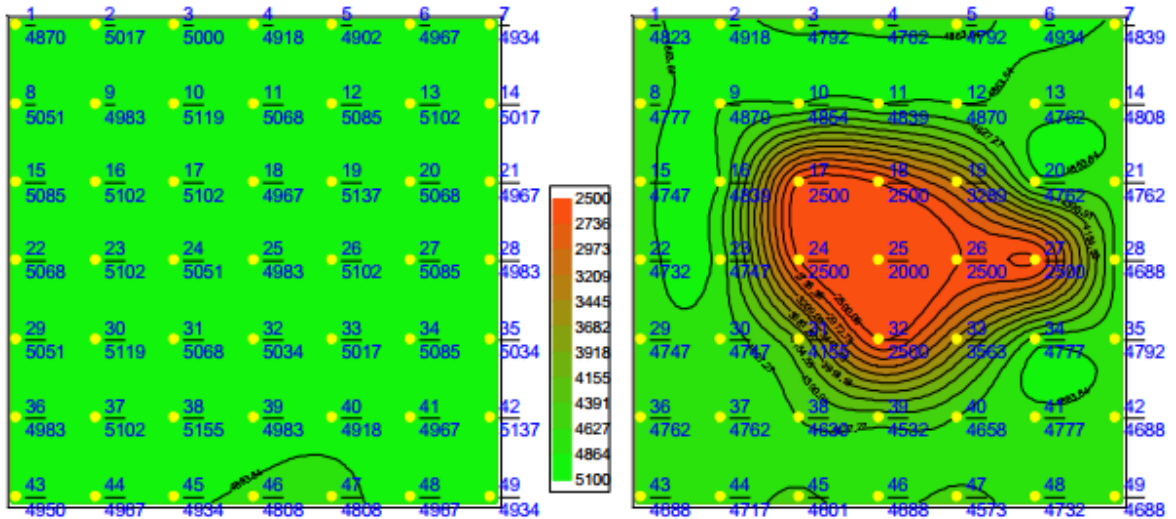
**Tablica 5-1.** Maksimalna sila i moment i efektivna visina za ispitivane uzorke (Grisaro i dr., 2017)

Udaljenost od eksploziva (m)	Max. sila $F_{max}$ (kN)	Max. moment $M_{max}$ (kNm)	$F_{max}/F_{neoštećeno}$	Efektivna visina (mm)
Neoštećen	99.9	40.0	1.00	198.4
3	83.3	33.3	0.83	170.6
2	73.0	29.2	0.73	153.4

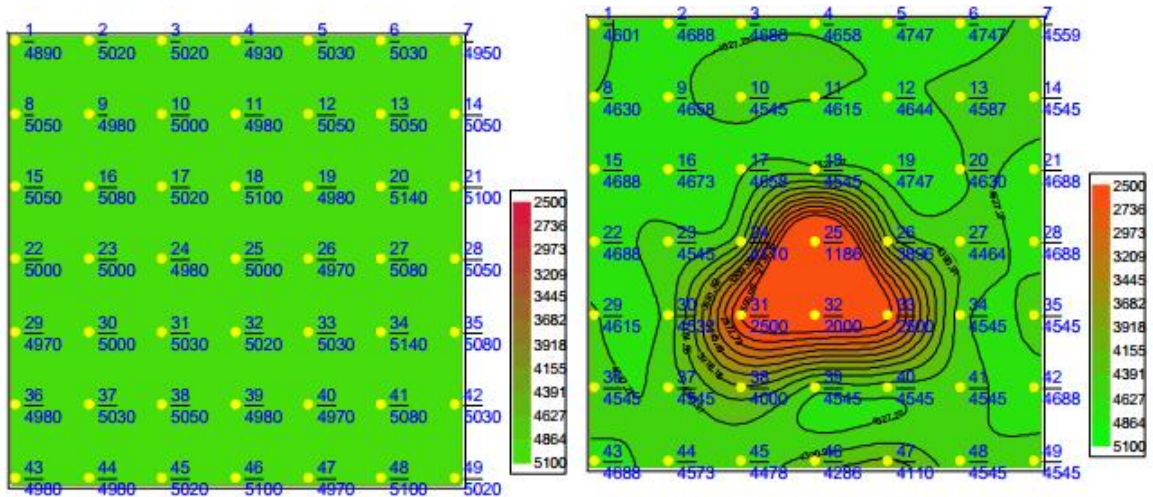
### 5.3. Utjecaj eksploziva na ljuštenje betona

Štoller i Dvorak su napravili istraživanje eksplozivnog opterećenja mikroarmiranih i nearmiranih betona. Betoni su visoke čvrstoće, klase C70/85 i C80/95, a dodano je 30 kg čeličnih vlakana po  $1\text{ m}^3$ . Korišten je plastični eksploziv PIHx 30.

Kvaliteta betonskih elemenata prije i nakon eksplozivnih opterećenja, provjerena je pomoću ultrazvuka prema standardu ČSN 73 1371, a na slikama 5-9 i 5-10 prikazani su rezultati mjerenja. Nearmirana ploča napravljena je od betona klase C70/85, a ploča armirana čeličnim vlaknima od betona klase C80/95. Dodavanjem 30 kg čeličnih vlakana po  $1\text{ m}^3$  mješavine betona, značajno je povećana elastičnost mikroarmiranih ploča a pritom su oštećenja pri kontaktnoj detonaciji značajno manja. Djelovanje eksploziva na ploče prikazano je na slikama 5-11 i 5-12.



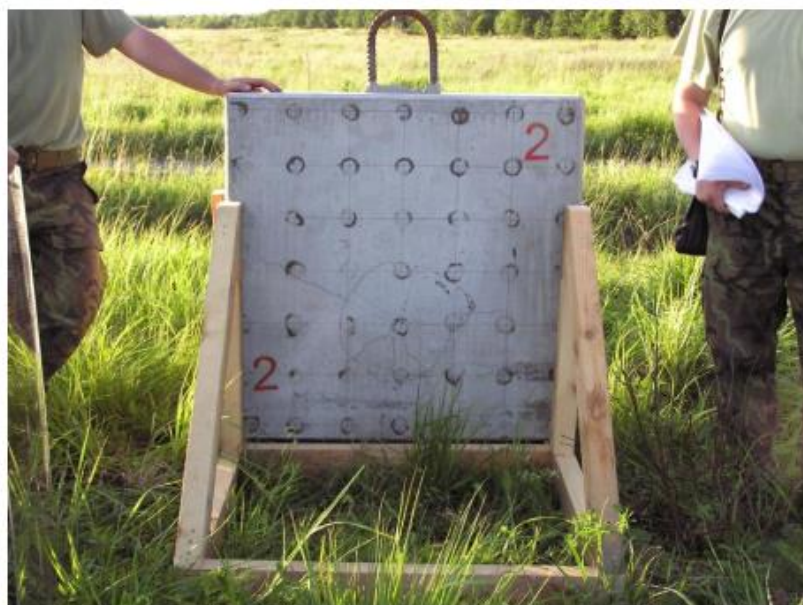
Slika 5-9. Prikaz izovela prije i poslije detonacije na uzorku od nearmiranog betona (Štoller i Dvorak, 2017)



Slika 5-10. Prikaz izovela prije i poslije detonacije na uzorku od mikroarmiranog betona (Štoller i Dvorak, 2017)



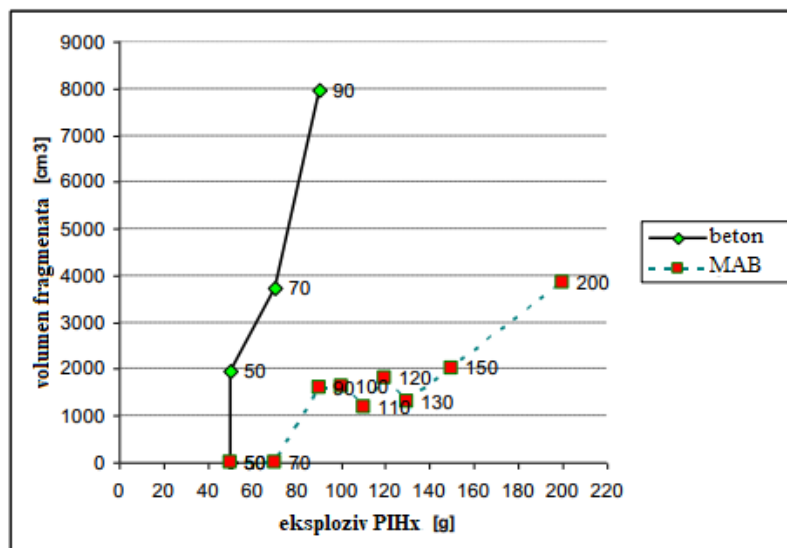
**Slika 5-11.** Prikaz nearmirane betonske ploče razreda C70/85 nakon djelovanja 70 g plastičnog eksploziva (Štoller i Dvorak, 2017)



**Slika 5-12.** Prikaz mikroarmirane betonske ploče razreda C80/95 nakon djelovanja 70 g plastičnog eksploziva (Štoller i Dvorak, 2017)

Na slici 5-13 prikazana je ovisnost volumena fragmenata o količini upotrebljenog eksploziva za nearmirani i mikroarmirani beton. Kada je uzorak nearmiranog betona opterećen sa 50 g plastičnog eksploziva, nije došlo do ljuštenja (odlamanja fragmenata), već samo stvaranja nekolicine pukotina i pojave sitnih fragmenata na površini ploče. Do ljuštenja je došlo pri slijedećim ispitivanjima, kada je uzorak opterećivan sve većim naprezanjima uslijed detonacije. U slučaju uzorka od mikroarmiranog betona, pri masama eksploziva od 50 i 70 g došlo je samo do pojavljivanja mikropukotina (50 g) i pukotina sa sitnim

fragmentima (70 g). Povećanjem mase eksploziva nije dolazilo do značajnog povećanja odlamanja fragmenata.



**Slika 5-13.** Odnos između volumena odlomljenih fragmenata i količine eksploziva za običan i mikroarmiran beton (Štoller i Dvorak, 2017)

## 6. ZAKLJUČAK

Armirani beton je poželjan materijal pri dizajniranju strukture na djelovanje eksploziva, te je pritom nužno posvetiti pažnju pojedinostima eksplozivnog opterećenja te sukladno povećati količinu armature u područjima koja bi mogla biti vlačno opterećena uslijed promjene smjera opterećenja. Prioritet pri dizajniranju je sprječavanje kolapsa strukture, a utvrđeno je da se dodavanjem čeličnih vlakana betonu pospješuje njegovo ponašanje nakon pojava pukotina.

Iz ispitivanja sa kontaktnom detonacijom jasno se da zaključiti kako se količina odlomljenih fragmenata na suprotnoj strani od djelovanja eksploziva može značajno umanjiti korištenjem mikroarmiranih betona. Različite geometrije čeličnih vlakana nemaju značajan utjecaj na odlamanje fragmenata.

Potrebno je naglasiti kako nije izgledno da će mikroarmirani beton zamijeniti konvencionalnu armaturu i pojačanja koja se koriste za zaštitu struktura na djelovanje eksploziva. Međutim, u usporedbi sa običnim betonom, mikroarmirani betoni su otprilike trostruko otporniji na djelovanje eksploziva, te se predlaže korištenje mikroarmiranih betona i konvencionalne armature i pojačanja za konstrukcije koje je potrebno zaštititi.

## 7. LITERATURA

Božić, B., Lukić, I., Petrović, N. 2014. *Eksplozivi u terorističkim napadima*. Pregledni rad. Velika Gorica: Veleučilište Velika Gorica.

Codina, R., Ambrosini, D., de Borbon, F. 2017. *Alternatives to prevent progressive collapse protecting reinforced concrete columns subjected to near field blast loading*. *Procedia Engineering* 199 (2017) str. 2445–2450.

Department of Homeland Security and the National Academies. *IED attack*. URL: [https://www.dhs.gov/xlibrary/assets/prep\\_ied\\_fact\\_sheet.pdf](https://www.dhs.gov/xlibrary/assets/prep_ied_fact_sheet.pdf) (27.11.2018.).

FEMA. 2003. *Reference manual to mitigate potential terrorist attacks against buildings*. 231-249.

Grisaro, H.Y., Benamou, D., Dancyger, A.N., 2017. *Effects of fragments impact on reinforced concrete protective elements*. *Procedia Engineering* 210 (2017) str. 306–311.

Gukov, I. 2017. *Betonske konstrukcije I*. Predavanja. Zagreb: Građevinski fakultet.

Kalman, D. 2010. *Use of steel fiber reinforced concrete for blast resistant design*. Izvještaj. Manhattan: Kansas State University.

Korpar, D. 2015. *Modeliranje djelovanja eksplozija na građevinske konstrukcije*. Diplomski rad. Osijek: Građevinski fakultet.

Krsnik, J. 1989. *Miniranje*. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

Nemati, K.M. 2015. *Fiber reinforced concrete (FRC)*. Predavanja. Washington: University of Washington.

Netinger Grubeša, I. 2017. *Mikroarmirani beton*. Predavanja. Osijek: Građevinski fakultet.

Ragavendra, S., Reddy, I. P., Dongre, A. 2017. *Fibre reinforced concrete – a case study*. Studija. Hyderabad: Vidya Jyothi Institute of Technology.

Skazlić, M., Tomičić, I. 2006. *Armiranobetonski elementi od betona visokih čvrstoća naprezani savijanjem*. Građevinar, 58(8), str. 631-640.

Štoller, J., Dvorak, P. 2017. *Experimental ballistic loading of steel fiber reinforced concrete slabs and unreinforced concrete slabs by plastic explosives*. Studija. Brno, Republika Češka: Vojno sveučilište.

Karlos, V., Solomos, G. 2013. *Calculation of blast loads for application to structural components*. Luksemburg: European laboratory for structural assesment.

Zircher, T., Keuser, M., Burbach, A., Lehmann, S. 2017. *Protective components made of steel fiber reinforced concrete under contact detonation*. Procedia Engineering 199 (2017) str. 2525–2530.