

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*

*Janova 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
telefon (01) 47 68 500  
faks (01) 42 50 681  
fgg@fgg.uni-lj.si*



Visokošolski program Gradbeništvo,  
Smer operativno gradbeništvo

Kandidat:

**Tomaž Pajntar**

# **Poenostavljena metoda za oceno vpliva eksplozije na gradbeno konstrukcijo**

**Diplomska naloga št.: 421**

**Mentor:**

doc. dr. Vlatko Bosiljkov

**Somentor:**

David Antolinec

Ljubljana, 27. 5. 2011

**POPRAVKI:**

**Stran z napako**

**Vrstica z napako**

**Namesto**

**Naj bo**

## IZJAVA O AVTORSTVU

Skladno s 27. členom Pravilnika o diplomskem delu UL Fakultete za gradbeništvo in geodezijo,

Podpisani Tomaž Pajntar izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:

**»Poenostavljena metoda za oceno vpliva eksplozije na gradbeno konstrukcijo«**

Izjavljam, da prenašam vse materialne avtorske pravice v zvezi z diplomsko nalogo na UL, Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo.

Noben del tega zaključnega dela ni bil uporabljen za pridobitev strokovnega naziva ali druge strokovne kvalifikacije na tej ali na drugi univerzi ali izobraževalni inštituciji.

Ljubljana, 24.05.2011

---

(podpis kandidata)

## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

- UDK:** 620.178.7:624.012.45:623(043,2)
- Avtor:** Tomaž Pajntar
- Mentor:** doc. dr. Vlatko Bosiljkov
- Somentor:** univ. dipl. inž. grad. David Antolinec
- Naslov:** Poenostavljena metoda za oceno vpliva eksplozije na gradbeno konstrukcijo
- Obseg in oprema:** 76 str., 16 pregl., 55 sl., 35 en.
- Ključne besede:** vpliv eksplozije, udarni val, lokalni in globalni odziv konstrukcije, nelinearna analiza

### **Izvleček:**

Improvizirana eksplozivna sredstva so najpogostejše teroristično orožje, s katerim želijo teroristične organizacije napraviti določeno škodo. V večini primerov prihaja do tovrstnih terorističnih napadov v bližini objektov kjer se ljudje zbirajo. Eksplozija v bližini objekta ima lahko na objekt katastrofalne učinke, lahko poškoduje ali uniči zunanje in notranje dele objekta. Vpliv eksplozije lahko povzroči veliko razbitin, ogenj in dim, vse to pa je smrtno nevarno za ljudi, ki se v času eksplozije zadržujejo v objektu ali njeni okolici. Nevarnost ob tako ekstremni obtežbi, kot je obtežba eksplozije je v zadnjih desetletjih povzročila razvoj metod za analiziranje in dimenzioniranje gradbenih konstrukcij glede na obtežbo, ki jo povzroča eksplozija. Uporaba teh metod pa zahteva razumevanje učinka eksplozije in odziva gradbene konstrukcije v odvisnosti od oddaljenosti vira eksplozije in količine eksplozivnega sredstva. Z namenom prezentacije uporabe teh metod sem analiziral štiri etažno poslovno stavbo izpostavljeno eksploziji. Pred pričetkom analize na primeru pa sem pojasnil vse dogodke pri eksploziji, kakor tudi vse parametre eksplozije in odziv konstrukcije obremenjene z obtežbo eksplozije. V primeru štiri etažne stavbe sem določil, da se zgodi eksplozija določene mase polnitve eksploziva TNT, katerega sem postavljaj na različne pozicije okrog stavbe. Glede na pozicijo eksplozije sem s programom A.T.-blast izračunal parametre za določanje obtežbe, ki jo povzroči eksplozija. Z numeričnim programom SAP2000 pa sem na osnovi statične in modalne analize, določal kdaj pride do globalne porušitve objekta v odvisnosti od količine in oddaljenosti vira eksplozije.

## **BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

**UDC:** 620.178.7:624.012.45:623(043,2)

**Author:** Tomaž Pajntar

**Supervisor:** Assistant Prof. Doctor Vlatko Bosiljkov, PhD.

**Co-Supervisor:** MEng. David Antolinec

**Title:** Simplified method for the assessment of the blast effects on buildings

**Notes:** 76 p., 16 tab., 55 fig., 35 eq.

**Key words:** blast effects, blast wave, local and global structural response, non-linear analysis

### **Abstract:**

Improvised explosive devices are the most common terroristic weapons used nowadays in terroristic attacks. Human casualties are the main goals of terrorist attacks, and buildings where the people are gathering represent their primary goal. Blast in the vicinity of any structure may represent catastrophic event for any building by destroying its outer envelope and load bearing structural elements. Due to secondary effects such as debris, fire and smoke, risk due to blast effects may rise human casualties to higher extent. Following these events awareness among designers rose the development of new methods for the analysis and design of civil engineering structures due to blast event has emerged. Application of these methods requires understanding of both blast effect and structural response of buildings depending from the amount of explosive and its distance from the target. In order to apply these methods, a common four storeys high RC frame building was analyzed. In the first part of this work, parameters for determining blast loading were evaluated. Chosen building was then analyzed by placing different amounts of TNT at different locations and distance from the building. Main parameters of blast loading were evaluated by means of A.T.-blast computer software. Structural response of the structure (both static and dynamic) was evaluated by means of SAP2000 programme. Here both local and global response of the structure were evaluated depending from the amount of explosive device and its distance from the target.

## **ZAHVALA**

Za strokovno pomoč ter vodenje pri izdelavi diplomske naloge se zahvaljujem mentorju doc.dr. Vlatku Bosiljkovu in somentorju Davidu Antolincu.

Staršema Zdravku in Mariji se zahvaljujem za ves trud, ki sta ga vložila v to, da mi v mladosti ni nikoli ničesar manjkalo in mi omogočila lepo prihodnost.

Za razumevanje, vzpodbudo in stanje ob strani, v trenutkih, ko sem jo najbolj potreboval, se zahvaljujem moji Meliti.

**HVALA**

## KAZALO VSEBINE

<b>1</b>	<b>UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OBTEŽBA ZARADI EKSPLOZIJE.....</b>	<b>3</b>
2.1	SPLOŠNO O EKSPLOZIJI.....	3
2.2	EKSPLOZIVNA SNOV .....	5
2.3	TEHNIČNE LASTNOSTI EKSPLOZIVOV .....	6
2.4	ZAKON O EKSPLOZIVIH.....	8
2.5	PARAMETRI UDARNEGA VALA EKSPLOZIJE.....	9
2.6	INTERAKCIJA UDARNEGA VALA EKSPLOZIJE.....	11
2.7	DELOVANJE EKSPLOZIJE KOT ZUNANJA OBTEŽBA .....	15
2.8	PRIMERJAVA OBTEŽBE EKSPLOZIJE TER POTRESNE OBTEŽBE.....	17
<b>3</b>	<b>DIMENZIONIRANJE IN GLOBALEN ODZIV STAVB .....</b>	<b>19</b>
3.1	PROTITERORISTIČNI STANDARDI S PODROČJA STAVB – DOD.....	19
3.2	ODZIV OBJEKTA OBREMENJENEGA Z OBTEŽBO EKSPLOZIJE.....	22
3.3	DIMENZIONIRANJE ARMIRANOBETONSKIH ELEMENTOV OBREMENJENIH Z OBTEŽBO ZARADI EKSPLOZIJE.....	25
3.3.1	Namen dimenzioniranja.....	25
3.3.2	Določitev obtežbe .....	25
3.3.3	Obnašanje armiranega betona obremenjenega z obtežbo eksplozije.....	26
3.3.4	Odziv AB objekta obremenjenega z obtežbo eksplozije.....	28
3.3.5	Dimenzioniranje armiranobetonskega elementa – impulzen odziv.....	28
3.3.6	Dimenzioniranje armiranobetonskega elementa pri dinamičnem ali kvazi- statičnem odzivu elementa.....	31
3.4	prikaz delovanja eksplozije na stavbo .....	33
3.4.1	Opis obravnavane stavbe .....	33

3.4.2	Modeliranje obtežbe.....	35
3.4.3	Izbira lokacije vira eksplozije .....	36
3.4.4	Uporaba računalniškega programa A.T. Blast za izračun obtežbe eksplozije ...	37
3.4.5	Določanje obtežbe eksplozije na model objekta.....	40
3.4.6	Modeliranje konstrukcije .....	45
3.4.7	Modeliranje lastne, stalne teže in spremenljive obtežbe.....	46
3.4.8	Modeliranje plastičnih členkov .....	47
3.4.9	Modalna analiza obravnavanega objekta .....	49
3.4.10	Določitev varnostne razdalje med virom eksplozije in obravnavanim objektom. .....	50
3.4.11	Nelinearna statična analiza.....	52
3.5	REZULTATI.....	53
3.5.1	Rezultati modalne analize .....	53
3.5.2	Varnostna razdalja med virom eksplozije in obravnavanim objektom.....	53
3.5.2.1	Kombinacije porušenih stebrov, katere vodijo v progresivno rušenje stebrov .....	53
3.5.2.2	Mejni momenti stebrov v prvi etaži ( $M_{rd}$ ).....	63
3.5.2.3	Določitev varnostne razdalje za eksploziv mase polnitve 25 kg TNT .....	64
3.5.2.4	Določitev varnostne razdalje za eksploziv mase polnitve 250 kg TNT .....	65
3.5.2.5	Določitev varnostne razdalje za eksploziv mase polnitve 1250 kg TNT .....	67
3.5.3	Rezultati analize globalnega odziva obravnavanega objekta na obtežbo eksplozije .....	69
3.5.3.1	Globalen odziv obravnavanega objekta – impulzna obtežba .....	69
3.5.3.2	Globalen odziv obravnavanega objekta – dinamična obtežba .....	71
3.5.3.3	Primerjava rezultatov analize globalnega odziva za obtežbo eksplozije 25 kg TNT na razdalji 12 m in obtežbe eksplozije 250 kg TNT na razdalji 30 m.....	72



<b>4</b>	<b>ZAKLJUČEK</b> .....	<b>73</b>
	<b>VIRI</b> .....	<b>75</b>

## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 2.1: Odvisnost fizikalnih, termokemijskih in eksplozivnih lastnosti od gostote polnjenja nekaterih eksplozivov.....	7
Preglednica 3.1: Varnostna razdalja za nove in obstoječe objekte. ....	21
Preglednica 3.2: Tabela povzeta iz knjige Blast effects on buildings s pomočjo katere določimo koeficient $K_{LM}$ za sistem z eno prostostno stopnjo. ....	33
Preglednica 3.3: Prikaz rezultatov A.T. Blast v tabeli. ....	38
Preglednica 3.4: Rezultati obtežbe za vse ploskve v prvi etaži. ....	41
Preglednica 3.5: Rezultati obtežbe za vse ploskve v drugi etaži. ....	42
Preglednica 3.6: Rezultati obtežbe za vse ploskve v tretji etaži. ....	42
Preglednica 3.7: Rezultati obtežbe za vse ploskve v tretji etaži. ....	43
Preglednica 3.8: Sodelujoča širina plošče pri določenih prečkah, ki so označene na sliki 3.25. ....	54
Preglednica 3.9: Mejni momenti v prečkah, prečke so označene na sliki 3.25. ....	54
Preglednica 3.10: Rezultati analize za eksplozijo na severni ali južni strani objekta. ....	64
Preglednica 3.11: Rezultati analize za eksplozijo na vzhodni ali zahodni strani objekta. ....	64
Preglednica 3.12: Rezultati analize za eksplozijo na severni ali južni strani objekta. ....	65
Preglednica 3.13: Rezultati analize za eksplozijo na vzhodni ali zahodni strani objekta. ....	66
Preglednica 3.14: Rezultati analize za eksplozijo na severni ali južni strani objekta. ....	67
Preglednica 3.15: Rezultati analize za eksplozijo na vzhodni ali zahodni strani objekta. ....	68

## KAZALO SLIK

Slika 2.1: Časovni raspored tlakov eksplozije .....	4
Slika 2.2: Oblike objektov, katere povečajo učinek udarnega vala eksplozije. ....	11
Slika 2.3: Oblike objektov, katere zmanjšajo učinek udarnega vala eksplozije.....	11
Slika 2.4: Tlak eksplozije pri kotu $\alpha_1 0^\circ$ .....	12
Slika 2.5: Tlak eksplozije pri kotu $\alpha_1 90^\circ$ .....	13
Slika 2.6: Običajen odboj udarnega vala eksplozije.....	13
Slika 2.7: Machov odboj udarnega vala eksplozije .....	13
Slika 2.8: Učinek kota odboja na odbojni koeficient - vrednosti poleg krivulj nam podajajo najvišji pozitivni tlak $p_s$ (bar). ....	14
Slika 2.9: Delovanje udarnega vala eksplozije na objekt. ....	16
Slika 2.10: Primerjava obtežbe zaradi eksplozije in potresne obtežbe.....	18
Slika 3.1: Sistem z eno prostostno stopnjo elastičnega objekta izpostavljenega obtežbi eksplozije.....	22
Slika 3.2: Kvazi – statična obtežba.....	23
Slika 3.3: Impulzna obtežba .....	24
Slika 3.4: Dinamična obtežba.....	24
Slika 3.5: Odpornostno – deformacijska krivulja upogibno obremenjenega AB elementa. ....	26
Slika 3.6: Prerez armiranobetonskega elementa, na zgornji sliki je prerez tipa 2, na spodnji sliki pa prerez tipa2.....	27
Slika 3.7: Graf odpornost – deformacija .....	28
Slika 3.8: Graf obtežbe eksplozije.....	29
Slika 3.9: Graf za odčitavanje koeficienta F, za prerez za katerega se predvideva, da je zaščitni sloj porušen na obeh straneh. ....	30
Slika 3.10: Graf za odčitavanje koeficienta F, za prerez za katerega se predvideva, da je zaščitni sloj porušen na natezni coni. ....	32
Slika 3.11: Tloris tipične etaže. ....	34
Slika 3.12: Prečni prerez.....	34
Slika 3.13: Delovanje obtežbe eksplozije na ploskev.....	35
Slika 3.14: Lokacije postavitve vira eksplozije za vir eksplozije 25 kilogramov TNT.....	36

Slika 3.15: Primer delovanja eksplozije na točko T1, prikazan je kot $\alpha$ med eksplozijo in izpostavljeno ploskvijo. ....	37
Slika 3.16: Grafični prikaz tlakov eksplozije 25 kilogramov TNT.....	39
Slika 3.17: Grafični prikaz impulza eksplozije 25 kilogramov TNT.....	39
Slika 3.18: Fasada razdeljena na označene ploskve.....	40
Slika 3.19: Obtežba na fasado objekta.....	44
Slika 3.20: Obtežba na stebre in prečke. ....	44
Slika 3.21: Slika konstrukcije v programu SAP2000. ....	45
Slika 3.22: Oblika deformacijske krivulje plastičnega členka.....	48
Slika 3.23: Varnostna razdalja med virom eksplozije in objektom na katerega eksplozija deluje.....	50
Slika 3.24: Prikaz okvirjev na katerih bo po končani analizi prikazano stanje plastičnih členkov.....	52
Slika 3.25: Tloris obravnavanega objekta, na katerem so označene prečke in stebri, prečke so označene z črko P, stebri pa z črko S.....	54
Slika 3.26: Tloris stavbe, označena sta porušena oba stebra S2. ....	55
Slika 3.27: Prerez A - A, prikaz momentov, statične analize brez dveh stebrov S2.....	55
Slika 3.28: Prerez B - B, prikaz momentov, statične analize brez dveh stebrov S2. ....	56
Slika 3.29: Tloris stavbe, označena sta porušena stebra S1 in S2.....	57
Slika 3.30: Prerez A - A, prikaz momentov, statične analize brez dveh stebrov S2 in S1. ....	57
Slika 3.31: Prerez B-B, prikaz momentov, statične analize brez dveh stebrov S2 in S1.....	58
Slika 3.32: Prerez C - C, prikaz momentov, statične analize brez dveh stebrov S2 in S1.....	58
Slika 3.33: Tloris stavbe, označena sta porušena stebra S3.....	59
Slika 3.34: Prerez A - A, prikaz momentov, statične analize brez dveh stebrov S3.....	60
Slika 3.35: Prerez A - A, prikaz momentov, statične analize brez dveh stebrov S3.....	60
Slika 3.36: Tloris stavbe, označena sta porušena stebra S3 in S1.....	61
Slika 3.37: Prerez A - A, prikaz momentov, statične analize brez dveh stebrov S3 in S1. ....	62
Slika 3.38: Prerez B - B, prikaz momentov, statične analize brez dveh stebrov S3 in S1.....	62
Slika 3.39: Prerez C - C, prikaz momentov, statične analize brez dveh stebrov S3 in S1.....	63
Slika 3.40: Varnostno območje, za eksplozijo avto bombe 250 kilogramov TNT.....	66
Slika 3.41: Varnostno območje, za eksplozijo avto bombe 250 kilogramov TNT.....	68
Slika 3.42: Dosežena stanja poškodovanosti v plastičnih členkih, OK 2. ....	70

Slika 3.43: Dosežena stanja poškodovanosti v plastičnih členkih, OK 1.....	70
Slika 3.44: Dosežena stanja poškodovanosti v plastičnih členkih, OK 2.....	71
Slika 3.45: Dosežena stanja poškodovanosti v plastičnih členkih, OK 1.....	72



## 1 UVOD

Zgradbe so vse od časov modernega vojskovanja izpostavljene bombnim eksplozijam, v zadnjih letih pa smo priča, ko zaradi groženj terorističnih napadov na zgradbe največjo nevarnost predstavljajo morebitni bombni napadi. Teroristične organizacije največkrat za doseg svojih ciljev uporabljajo improvizirana eksplozivna sredstva. Vse več je pobud za raziskave odpornosti gradbenih konstrukcij obremenjenih z obtežbo eksplozije. Poleg tega potekajo številne raziskave in projekti z namenom razvoja mehanizmov in sistemov za zmanjšanje posledic tovrstnih napadov, katerih glavni cilj teh je zagotovitev varnost ljudi v zgradbah. Eden izmed glavnih principov zagotavljanja zadostne robustnosti zgradb je preprečevanje progresivnega rušenja zgradbe izpostavljene eksploziji. Iz gradbenega vidika je potrebno zagotoviti konstrukcijski sistem, ki lahko prenese teroristični bombni napad brez poškodb ali z minimalno škodo. Objekti, kateri bi morali biti grajeni tako, da bi prenesli obtežbo eksplozije so predvsem objekti državnega pomena, kateri morajo služiti svojemu namenu tudi po bombnem napadu. Gradnja takih objektov zahteva veliko količino finančnih sredstev, poleg tega pa se za doseg takih ciljev lahko zelo spremeni zunanji videz objektov, v nekaterih primerih pa tudi notranja funkcionalnost objekta. Civilni objekti tako visokih stroškov ne prenesejo, vendar pa obstaja tudi zelo majhna verjetnost, da bo prišlo do terorističnega napada na tovrstne objekte. Na osnovi nekaterih študij (Bosiljkov et al., 2009 in Hinman, 2009 ) se je izkazalo, da imajo ukrepi za zagotovitev potresne odpornosti armiranobetonskih objektov, lahko (ni pa nujno) za posledico tudi pozitivne učinke pri objektih izpostavljenih eksplozijam.

Eksplozija, kot izjemna obremenitev, ob dogodku ustvari na konstrukcijo določeno obtežbo, ki je po nekaterih svojih lastnostih primerljiva z nam bolj poznano, potresno obtežbo. Pri teh dveh obtežbah gre za dve povsem različni ekstremni sili, zaradi katerih lahko pride do porušitve konstrukcije, pri obeh obtežbah pa gre za dinamično obtežbo, dinamičen pa je tudi odziv konstrukcije. Pri obtežbi eksplozije udarni val ustvari direktno obtežbo na konstrukcijo, pri potresu pa se ustvari obtežba, ki je produkt tresenja tal. Tudi v primeru eksplozije prihaja do tresenja tal, vendar je ta komponenta obtežbe proporcionalno zanemarljiva. Obtežba eksplozije v primerjavi s potresno obtežbo traja zelo kratek čas. Učinek delovanja eksplozije v

primerjavi s potresom je lokalni. Sposobnost ohranjanja lokalnih poškodb brez popolne porušitve je ključna podobnost med seizmično odpornostjo konstrukcij in odpornostjo konstrukcij pri delovanju eksplozije.



## 2 OBTEŽBA ZARADI EKSPLOZIJE

### 2.1 SPLOŠNO O EKSPLOZIJI

Poznamo fizikalne, jedrske, električne in kemične eksplozije. V nadaljevanju bom obravnaval le kemične eksplozije, saj so eksplozivne snovi kemične substance ali pa zmesi kemičnih substanc.

Kemijska eksplozija je proces zelo hitrega zgorevanja kemične substance, pri katerem nastanejo velike količine plinastih produktov segretil do visokih temperatur zaradi česar se v okolju nastale eksplozije zelo poveča tlak. V zelo kratkem času se sprosti veliko toplotne energije, ki se spremeni v mehansko delo. Pri detonaciji eksploziva si sledijo naslednji dogodki. Eksplozivna reakcija ustvari vroče pline kateri so lahko pod pritiskom od 10000 MPa do 30000 MPa in dosegajo temperaturo od 3000 °C do 4000 °C. Nato pride do širitve teh plinov in zrak v okolici je prisiljen da se umakne. Posledica tega procesa je plast stisnjenga zraka (udarni val). Udarni val eksplozije se formira pred temi plini in vsebuje večino energije sproščene pri eksploziji. Udarni val se nato sferično širi navzven od vira eksplozije, tlaki na mestu eksplozije pa padejo na raven tlaka atmosfere. Z naraščajočo razdaljo pada tudi tlak stisnjenga zraka na čelu udarnega vala. Plin se še naprej razširja, poleg tega se tudi ohlaja in tlak v okolici vira eksplozije pade malo pod atmosferski tlak. Rezultat prekomerne širitve plinov je sprememba smeri toka vala eksplozije, saj se ta zaradi majhne razlike v atmosferskem tlaku in tlaku plinov začne gibati v smeri proti viru eksplozije. To obdobje imenujemo negativna faza udarnega vala eksplozije. Potiskanje zraka in plinov stran od vira eksplozije se nato preneha in sčasoma se razmere povrnejo v ravnovesje.

Na spodnjem grafu je prikazana časovna sprememba tlakov eksplozije kjer so:

$t$ ..... čas

$t_a$ .....čas prihoda čelnega udarnega vala

$p_s$ .....pozitiven tlak eksplozije

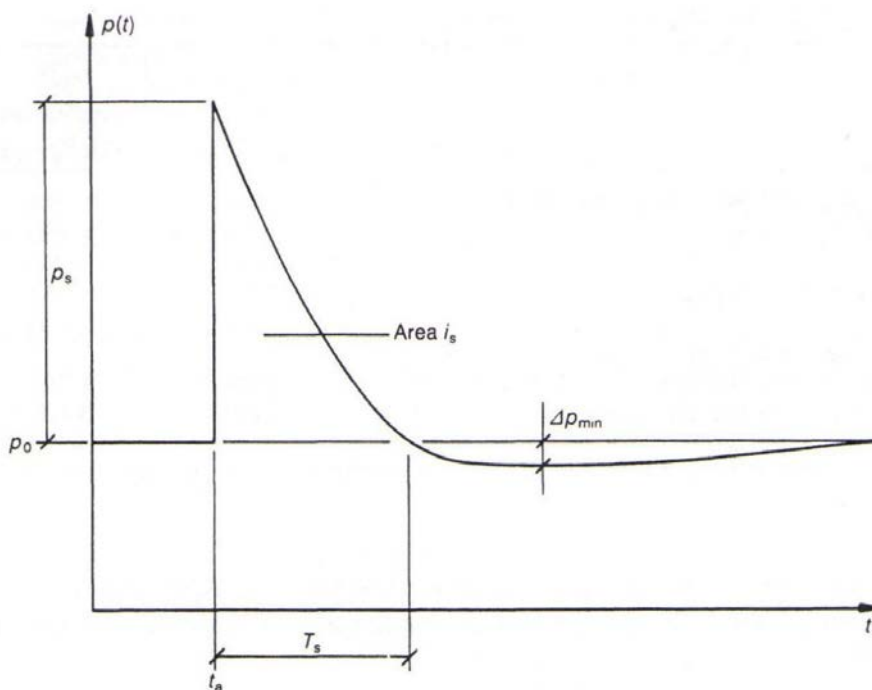
$\Delta p_{min}$ ... negativen tlak eksplozije

$T_s$ .....trajanje pozitivne faze eksplozije

$p_0$ .....atmosferski tlak

$i_s$ .....specifičen stranski impulz vala

$b$ ..... parameter udarnega vala eksplozije



Slika 2.1: Časovna sprememba tlakov eksplozije (Mays G., Smith P., 1995, str. 30)

Časovni potek tlakov zaradi eksplozije je opisan z Friedlanderjevo (Mays, Smith, 1995) enačbo.

$$p(t) = p_s \left[ 1 - \frac{t}{T_s} \right] \exp \left\{ -\frac{bt}{T_s} \right\} \quad (2.1)$$

## 2.2 EKSPLOZIVNA SNOV

Da bi lahko govorili o neki kemični substanci, da je ta eksplozivna snov mora zadovoljiti določenim kriterijem. Proces kemične reakcije se mora odvijati z veliko hitrostjo, proces zgorevanja mora spremljati sproščanje toplotne energije in proces zgorevanja mora spremljati nastanek plinastih produktov.

Eksplozivne snovi delimo na osnovi hitrosti zgorevanja eksplozivne snovi in s tem povzročenih učinkov. Poznamo več vrst delitev eksplozivnih snovi. Eksplozivne snovi se običajno delijo glede na sestavo, praktično uporabo in dano energijo. Prva skupina eksplozivov, ki jih delimo po sestavi so eksplozivi take kemične snovi, katerih molekule vsebujejo vse potrebno za eksplozijo. To so lahko čiste kemične spojine ali mehanične zmesi več čistih kemičnih spojin. Druga skupina eksplozivov, ki jih delimo po sestavi pa so eksplozivne snovi iz zmesi delcev, sestavljenih iz različnih molekul. Glede na praktično uporabo imamo potisne, rušilne in inicialne eksplozive. Potisne ali fugasne eksplozive se uporablja v obliki dimnega in brezdimnega smodnika za polnjenje pehotnega streliva in raket. Rušilna ali brizantna eksploziva se uporablja za rušenje različnega materiala. Za brizantne eksplozive je značilno, da so manj občutljivi na okolico ter, da se proces zgorevanja ne prenaša z termično prevodnostjo, temveč z detonacijskim valom. Inicialni eksplozivi so eksplozivne snovi, ki pod vplivom blagega udara detonirajo, ali če se vžgejo, po zelo kratkem zgorevanju naglo detonirajo. Uporabljajo se kot primarni eksplozivi, katerih udarni val lahko pripravi sekundarne eksplozive v režim detonacije. Inicialne eksplozive se uporablja za izdelavo vžigalnih kopic in vžigalnikov. Pri delitvi eksplozivov glede na dano energijo imamo eksplozive običajnih moči. To so običajno brizantni eksplozivi, pri katerih potisni učinki niso veliki. Eksplozivi povečane moči imajo visoke rušilne in slabe fugasne učinke. Eksplozivi zmanjšane moči imajo slabe rušilne učinke in visoke fugasne učinke.

### 2.3 TEHNIČNE LASTNOSTI EKSPLOZIVOV

Pri izbiri in uporabi eksplozivov se le ti ocenjujejo po fizikalnih in kemičnih lastnostih. V nadaljevanju so opisane nekatere najpomembnejše lastnosti eksplozivov. Pri eksplozivih je najpomembnejša gostota polnitve (enota  $\text{g/cm}^3$ ), ki predstavlja razmerje med celotno maso eksplozivne polnitve eksplozivne snovi in celotno prostornino, vključno z nezapolnjeno prostornino med posameznimi kristali eksplozivne snovi. Gostota neposredno vpliva na rušilno delovanje in hitrost detonacije. Če je večje eksplozivno sredstvo lahko sprejme večjo količino eksplozivne snovi, kar poveča rušilno moč, oziroma z gostoto raste tudi hitrost detonacije. Ena izmed najpomembnejših lastnosti eksplozivov je tudi hitrost detonacije (enota  $\text{m/s}$ ), ki neposredno vpliva na njegovo rušilnost. To je hitrost, s katero se širi detonacijski val od mesta vžiga do neomejene količine eksploziva. Termokemijska lastnost eksploziva je temperatura eksplozije, to je temperatura (enota  $^{\circ}\text{C}$ ) v središču detonacije. Pri gospodarskih razstrelivih je ta temperatura med  $1800^{\circ}\text{C}$  do  $4200^{\circ}\text{C}$ . Med pomembne lastnost spada tudi detonacijski pritisk, ta izraža pritisk plinov pri eksploziji in je pri gospodarskih razstrelivih od  $2600\text{ MPa}$  do  $15000\text{ MPa}$ . Večina eksplozivov ima lastnost občutljivosti na mraz, običajni eksplozivi normalno eksplodirajo v kolikor je temperatura večja od minus  $-20^{\circ}\text{C}$ . Toplota detonacije (enota  $\text{kJ/kg}$ ) oziroma toplota zgorevanja je toplota reakcij in je termokemijska lastnost eksplozivov. Pri eksploziji je pomemben volumen plinastih produktov, imenujemo ga specifičen volumen plinastih produktov (enota  $\text{dm}^3/\text{kg}$ ) in je volumen produktov enega kilograma eksplozivne snovi pri temperaturi  $0^{\circ}\text{C}$  pri tlaku  $0,1\text{ MPa}$ .

Preglednica 2.1: Odvisnost fizikalnih, termokemijskih in eksplozivnih lastnosti od gostote polnjenja nekaterih eksplozivov.

Ime	Gostota g/cm <sup>3</sup>	Tlak Mpa	Temperatura eksplozije °K	Količina plinov dm <sup>3</sup> /kg	Hitrost detonacije m/s
TNT	1,00	7607,5	3328	709,4	5116
	1,20	10420,2	3189	606,3	5646
	1,40	13972,0	3097	529,5	6211
	1,60	18559,5	2954	468,6	6808
	1,65	21972,0	2969	440,0	6971
Tetrit	1,00	9030,2	3751	705,6	5539
	1,20	12533,9	3517	598,0	6082
	1,40	16715,8	3392	522,3	6664
	1,60	21708,9	3183	466,3	7310
	1,73	25327,9	2997	438,0	7774
Heksogen	1,00	10758,6	3624	704,9	6038
	1,20	14729,9	3483	599,9	6619
	1,40	19877,7	3281	521,6	7256
	1,60	25834,0	2979	465,8	7960
	1,82	34969,4	2564	414,0	8832
Oktogen	1,00	10743,4	3618	705,0	6035
	1,20	14711,3	3478	600,0	6617
	1,40	19855,5	3276	512,7	7253
	1,60	25808,6	2973	465,8	7958
	1,80	34147,7	2601	417,8	8746
	1,91	39549,1	2364	396,0	9219
Pentrit	1,00	9930,4	3795	709,6	5847
	1,20	14348,3	3488	598,8	6518
	1,40	19312,4	3351	518,8	7093
	1,60	25338,6	3105	468,2	7745
	1,77	31367,6	2798	422,0	8368
Nitroglicerín	1,59	24744,6	3110	460,0	7654

## 2.4 ZAKON O EKSPLOZIVIH

Zakon določa pogoje za proizvodnjo, promet, prenos, skladiščenje in uporabo eksplozivov. V tem zakonu je navedeno kaj vse spada med eksplozive. V splošnem so to vse snovi in njihove izpeljanke, ki dosegajo eksploziven učinek. Vse te snovi pa predstavljajo nevarnost za okolico. Natančna definicija eksplozivov je navedena v tretjem členu zakona o eksplozivih (ZE Uradni list RS, št. 96/02 z dne 14.11.2002). V nadaljevanju je naveden tretji člen zakona o eksplozivih.

### 1. Eksplozivi so:

- razstreliva,
- smodniki,
- eksplozivne snovi,
- inicialna in vžigalna sredstva,
- izdelki, polnjeni z eksplozivi,
- pirotehnične zmesi,
- pirotehnični izdelki.

2. Razstrelivo je: eksploziv, ki zgoreva z udarnim valom in je primarno namenjen razstreljevanju.

3. Smodnik je: eksploziv, ki zgoreva s termično prevodnostjo in je primarno namenjen potisku izstrelka.

4. Eksplozivne snovi so: druge snovi za doseganje eksplozivnega učinka.

5. Inicialna in vžigalna sredstva so: sredstva, ki so namenjene za aktiviranje in iniciranje eksploziva.

6. Izdelki polnjeni z eksplozivi, so: izdelki, ki so polnjeni oziroma vsebujejo eksploziv in je njihov učinek odvisen od te snovi.

7. Pirotehnične zmesi so: snovi, katerih osnovni namen je, da pri izgorevanju dosegajo svetlobni, toplotni, dimni ali zvočni učinek.

8. Pirotehnični izdelki so: izdelki, ki vsebujejo pirotehnično zmes in so razvrščeni v razrede: I, II, III in IV ter T1 in T2.

## 2.5 PARAMETRI UDARNEGA VALA EKSPLOZIJE

Udarni val je posledica eksplozije. Pri eksploziji se v zelo kratkem času sprosti veliko toplotne energije, ki se spremeni v mehansko delo. Posledica tega procesa je plast stisnjenega zraka, ki z visoko hitrostjo potuje po ozračju in jo imenujemo udarni val eksplozije. Udarni val eksplozije vsebuje večino energije sproščene pri eksploziji in povzroči delovanje velike sile v zelo kratkem času. Velikost udarnega vala eksplozije je obratno sorazmerna z oddaljenostjo od središča eksplozije.

Hitrost s katero udarni val potuje po ozračju imenujemo hitrost čelnega udarnega vala eksplozije (enote m/μs). Hitrost čelnega udarnega vala eksplozije ( $U_s$ ) se računa po enačbi 2.2.

$$U_s = \sqrt{\frac{6p_s + 7p_0}{7p_0}} \cdot \alpha_0 \quad (2.2)$$

kjer je

$p_s$ ..... tlak eksplozije

$p_0$ ..... atmosferski tlak

$\alpha_0$ .....kot delovanja eksplozije na ploskev

Najvišji tlak udarnega vala ( $p_s$ ) pri detonaciji eksploziva, ki je postavljen na tleh se izračuna po enačbi 2.3 ali 2.4 in se ga izrazi v barih. To enačbo in njene parametre sta z analizo določila Baker in Brode (Mays, Smith, 1995). Izračun temelji na normirani razdalji ( $Z$ ) med virom eksplozije ter površino na katero tlak deluje in se jo določi po enačbi 2.5.

$$p_s = \frac{6,7}{Z^3} + 1bar \quad (p_s > 10 \text{ bar}) \quad (2.3)$$

$$p_s = \frac{0,975}{Z} + \frac{1,455}{Z^2} + \frac{5,85}{Z^3} - 0,019bar \quad (0,1 < p_s < 10 \text{ bar}) \quad (2.4)$$

$$Z = R/W^{1/3} \quad (2.5)$$

kjer je

$R$  .....razdalja od centra eksplozije do površine na katero tlak deluje izraženega v metrih

$W$ .....masa polnitve izražena v kilogramih TNT-ja

Pri dimenzioniranju določenih elementov je poleg tlaka eksplozije potrebno upoštevati tudi rezultirajoči impulz eksplozije. Impulz udarnega vala eksplozije je vsa energija eksplozije (enote kPa μs) . Odvisen je od tlaka eksplozije in časa trajanja obtežbe. Izračuna se ga po enačbi 2.6.

$$i_s = \int_{t_a}^{t_a+T_s} p_s(t) dt \quad (2.6)$$

kjer so

$T_s$ ..... trajanje pozitivne faze udarnega vala

$t_a$ ..... čas do prihoda čelnega udarnega vala

$p_s$ ..... tlak eksplozije

Pri tlaku eksplozije in impulzu eksplozije je bila do sedaj obravnavana, le pozitivna faza eksplozije, pri kateri sta tlak in impulz veliko višja od tlaka in impulza v negativni fazi. Tlak v negativni fazi eksplozije se izračuna po enačbi 2.7, impulz v negativni fazi eksplozije pa po enačbi 2.8.

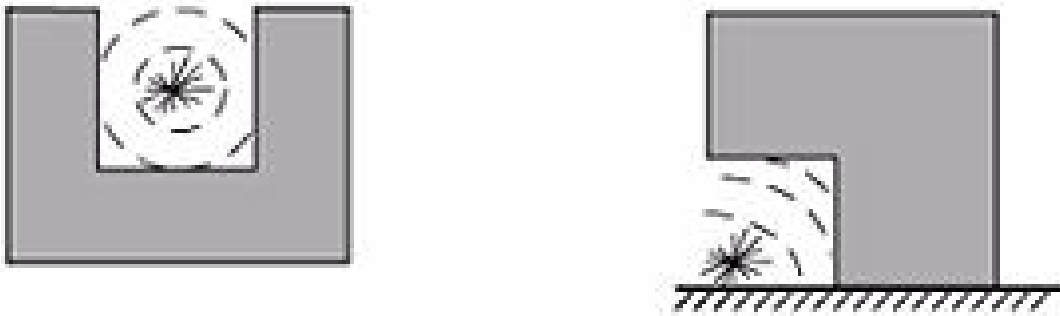
$$\Delta p_{\min} = -\frac{0,35}{Z} \quad (Z > 1,6) \quad (2.7)$$

$$i^- \approx i_s \left[ 1 - \frac{1}{2Z} \right] \quad (2.8)$$

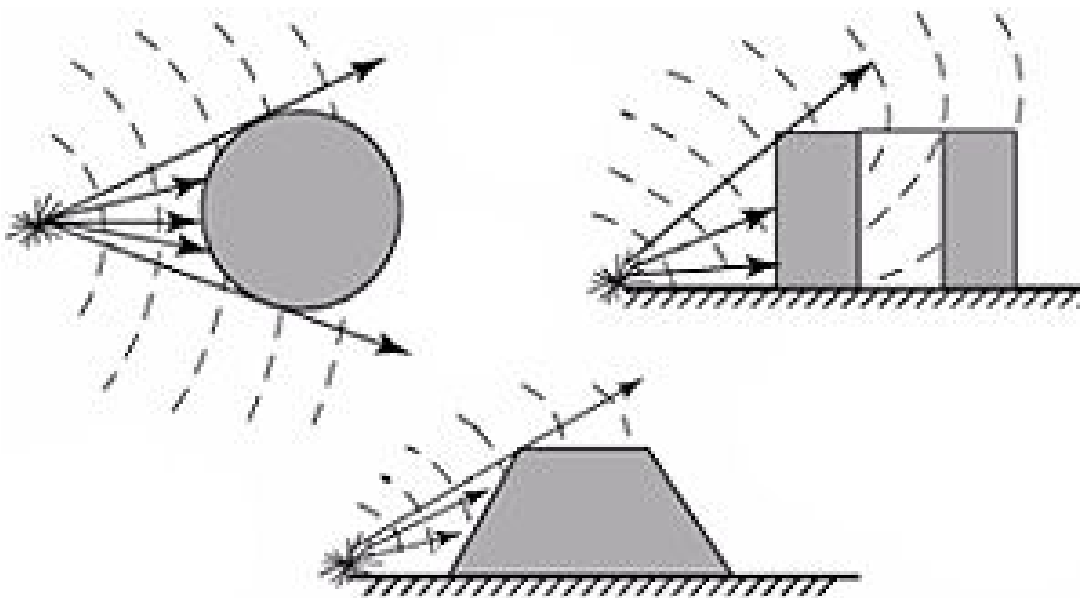


## 2.6 INTERAKCIJA UDARNEGA VALA EKSPLOZIJE

Pri srečanju udarnega vala z neskončno trdno površino, se bo le ta od trdne površine odbil in odvisno od geometrije in velikosti objekta je kako se bo udarni val odbil. Nekatere geometrijske oblike objektov lahko tako le še povečajo učinek udarnega vala eksplozije, obstajajo pa tudi geometrijske oblike objektov, ki ta učinek zmanjšajo.



Slika 2.2: Oblike objektov, katere povečajo učinek udarnega vala eksplozije



Slika 2.3: Oblike objektov, katere zmanjšajo učinek udarnega vala eksplozije

Najbolj preprost primer, ko imamo opravka z odbojem udarnega vala je, kadar imamo neskončno togo steno ob katero trči udarni val eksplozije pod vpadnim kotom nič. V tem primeru čelni udarni val potuje s hitrostjo  $U_s$  in je podvržen odboju. Molekule zraka napredujejo v udarni val, takrat so le te še bolj stisnjene kar se kaže v še povečanem tlaku na steni. Odbojni tlak ( $p_r$ ) eksplozije se izračuna z enačbo 2.9.

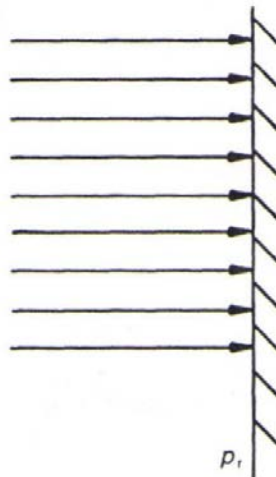
$$p_r = 2p_s \left[ \frac{7p_0 + 4p_s}{7p_0 + p_s} \right] \quad (2.9)$$

kjer so

$p_0$ ..... tlak atmosfere

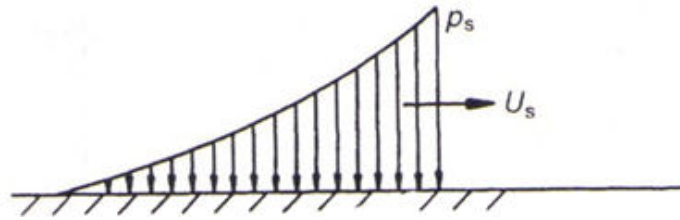
$p_s$ ..... tlak eksplozije

V prejšnji razlagi je bil vpadni kot udarnega vala na površino cilja enak nič, kot prikazuje spodnja slika. V nadaljevanju je obravnavan odboj udarnega vala eksplozije pod kotom, ki je različen od nič.



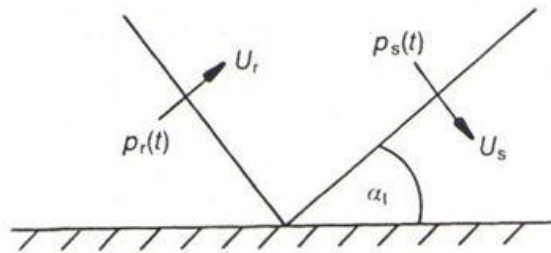
Slika 2.4: Tlak eksplozije pri kotu  $\alpha_1=0^\circ$  (Mays G., Smith P., 1995, str. 36)

Kadar je kot  $\alpha_1=90^\circ$  ne pride do nobenega odboja. Udarni val zdrsne po površini, ki je vzporedna z udarnim valom eksplozije.



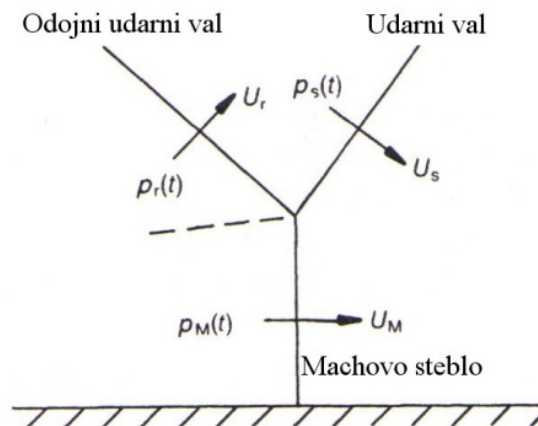
Slika 2.5: Tlak eksplozije pri kotu  $\alpha_1=90^\circ$  (Mays G., Smith P., 1995, str. 36)

Običajen odboj udarnega vala eksplozije se pojavi, kadar udarni val deluje nekje med kotoma  $0^\circ$  ter približno  $40^\circ$ .



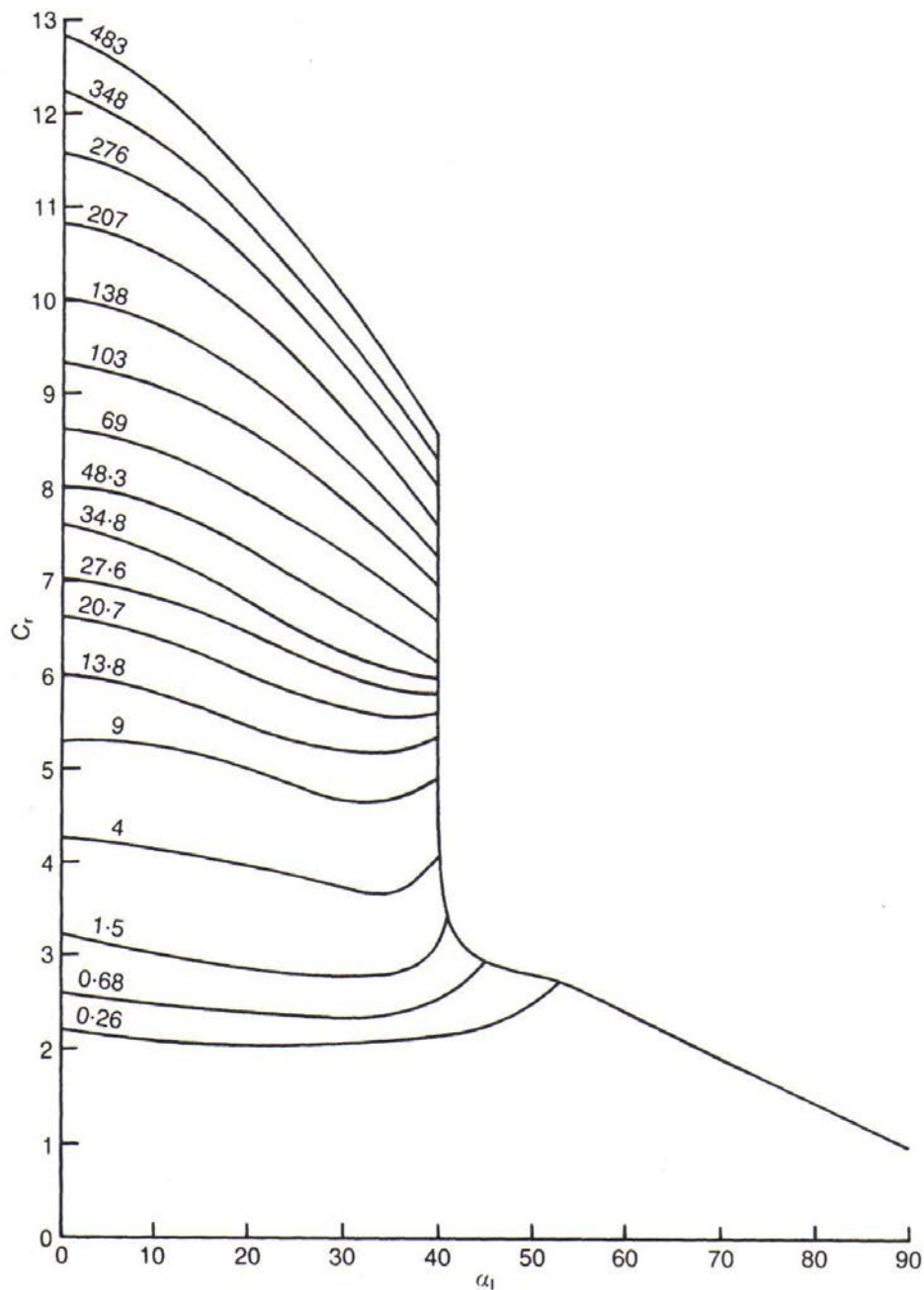
Slika 2.6: Običajen odboj udarnega vala eksplozije (Mays G., Smith P., 1995, str. 36)

Po kotu  $40^\circ$  se pojavi tako imenovan Machov odbojni efekt. Machov efekt je zapleten proces kadar udarni val »zdrsne« po površini cilja in se ne odbije kot pri primerih za kot med  $0^\circ$  in  $40^\circ$ . Rezultat tega procesa je, da odbojni val ujame prvotni udarni val ter se z njim združi na neki toči nad površjem cilja in tvori tretji udarni val imenovan Machovo steblo.



Slika 2.7: Machov odboj udarnega vala eksplozije (Mays G., Smith P., 1995, str. 36)

Na sliki 2.8 je prikazan graf, ki je namenjen odčitavanju vrednosti koeficienta  $C_r$ . Ta koeficient določa za koliko se bo udarni val povečal ob stiku z površino pod določenim kotom. Iz grafa je razvidno da se tlak eksplozije pri odboju lahko poveča tudi do trinajstkrat.



Slika 2.8: Učinek kota odboja na odbojni koeficient - vrednosti poleg krivulj nam podajajo najvišji pozitivni tlak  $p_s$  (bar). (Mays G., Smith P., 1995, str. 37)

## 2.7 DELOVANJE EKSPLOZIJE KOT ZUNANJE OBTEŽBE

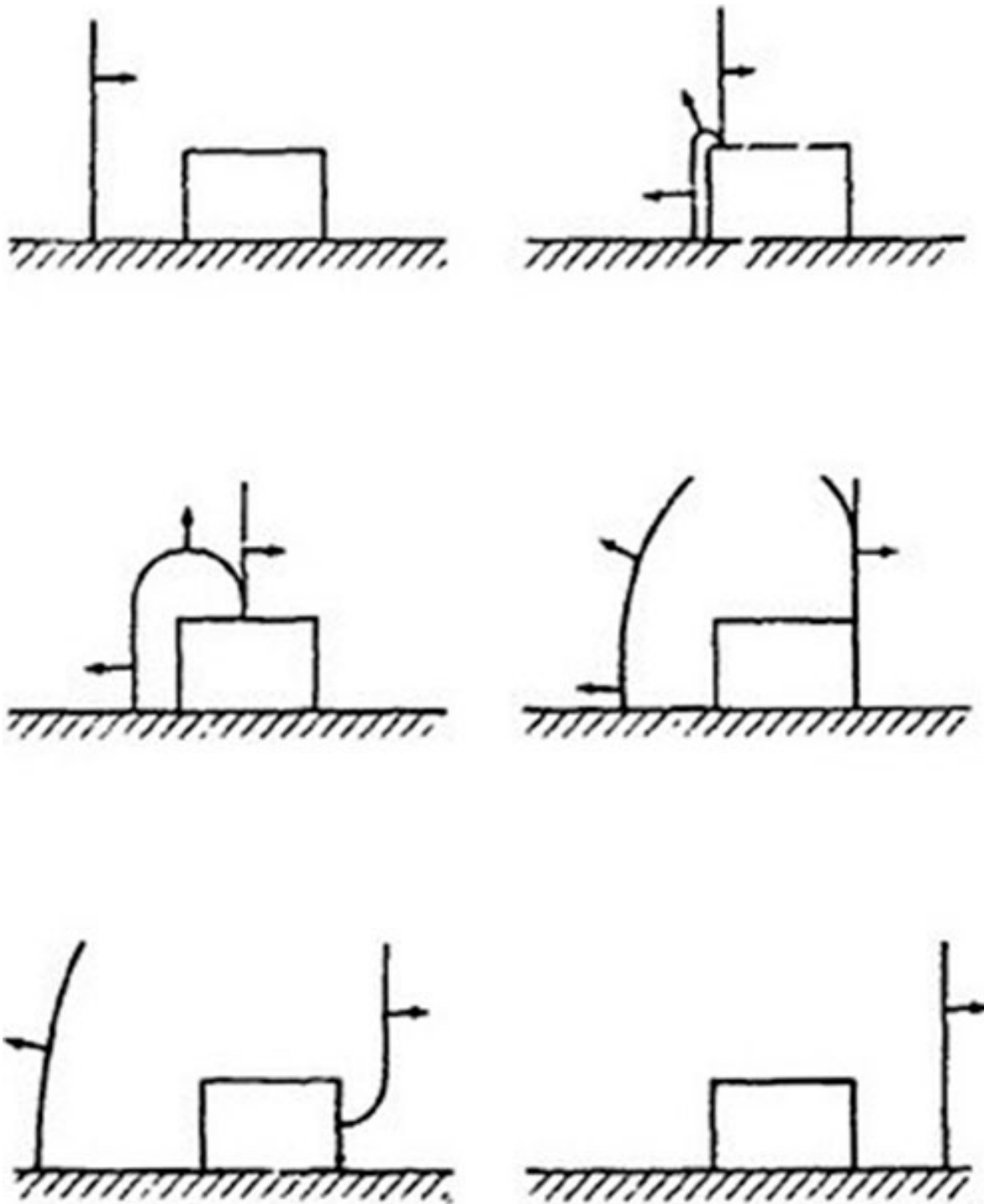
V predhodnem poglavju je bilo obravnavano delovanje udarnega vala na površino, ki je neskončnih dimenzij in je neskončno toga. V primeru, ko pa ima cilj udarnega vala eksplozije določene dimenzije pa sta Mays in Smith (1995) v knjigi *Blast effects on buildings*, opisala tri kategorije.

V prvi kategoriji delovanja eksplozije je objekt uničen, prisotna je sila, katera deluje tako, da poskuša premakniti celoten objekt (vlečna sila) vendar ga je zaradi njegove konstrukcije in vpetja nemogoče premakniti. To obremenitev imenujemo upogibna obtežba.

V drugi kategoriji delovanja eksplozije udarni val eksplozije deluje na manjše objekte (primer: vozilo), tudi v tej kategoriji bo objekt v celoti uničen. Prisotna je sila, katera poskuša objekt v celoti premakniti, ta sila deluje dovolj dolgo, da objekt dejansko tudi premakne. Del škode, ki bo napravljena na objektu bo posledica tega premika objekta.

Pri tretji kategoriji delovanja eksplozije, gre za detonacijo manjše polnitve eksploziva. Pri analizi objekta moramo v tej kategoriji obravnavati vsak del objekta posebej, ker so komponente objekta obremenjene sekvenčno.

Na sliki 2.9 imamo prikazano delovanje udarnega vala na objekt. Udarni val eksplozije se približuje objektu in ga prvo zadane s sprednje čelne strani objekta. Vpliv udarnega vala bo deloval na izpostavljeno površino. Udarni val eksplozije bo na objekt deloval tako, da bo pritiskal na površino v smeri delovanja udarnega vala eksplozije, vse dokler bo udarni val deloval na sprednjo čelno stran objekta. Udarni val se nato odbije od sprednje čelne strani objekta, del udarnega vala, ki pa preide objekt ob strani in ob vrhu objekta, nato na zadnji strani objekta deluje tako, da povzroča srk.



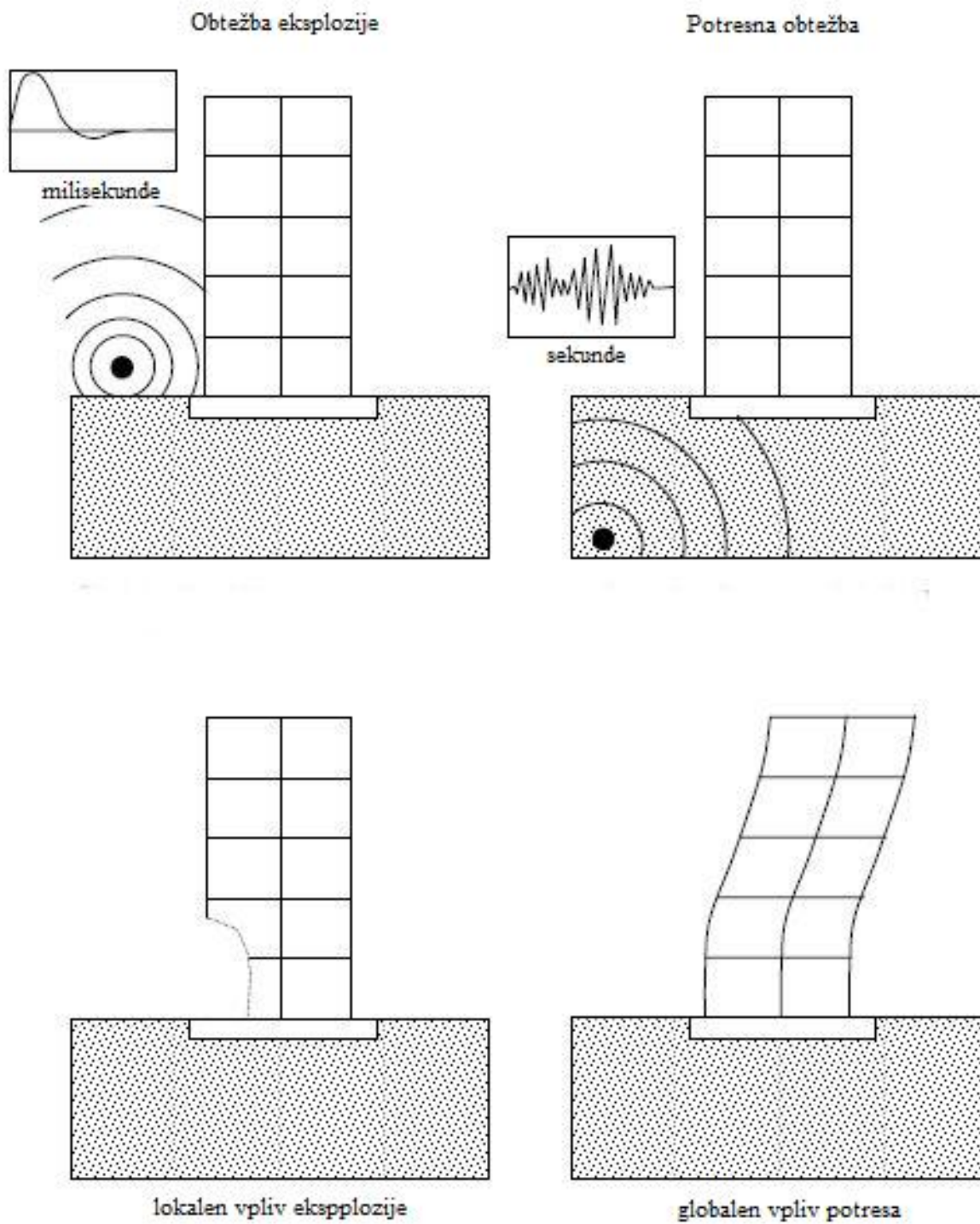
Slika 2.9: Delovanje udarnega vala eksplozije na objekt. (Glasstone, Dolan, 1977)

## 2.8 PRIMERJAVA OBTEŽBE EKSPLOZIJE TER POTRESNE OBTEŽBE

Udarni val eksplozije in seizmična obtežba sta dve povsem različni ekstremni sili, zaradi katerih lahko pride do porušitve konstrukcije. Obtežba zaradi udarnega vala eksplozije je posledica eksplozije, potresna obtežba pa je posledica tresenja tal. Eksplozija deluje na manjšem območju, ker se tlak z razdaljo znižuje. Trajanje obeh obtežb je zelo različno, obtežba eksplozije traja zelo kratek čas (nekaj  $\mu\text{s}$ ) v primerjavi s trajanjem potresne obtežbe (od nekaj sekund do nekaj minut). Količino obtežbe zaradi delovanja udarnega vala eksplozije je težje predvideti in jo ne moremo napovedati tako kot pri potresu na podlagi geografskega položaja in projektne pospeška tal. Udarni val ustvarja direktno obtežbo na konstrukcijo, pri potresu pa se ustvari obtežba, ki je produkt tresenja tal. Obe obtežbi pa imata tudi nekaj skupnih lastnosti. Potresna obtežba je dinamična in je odziv objekta odvisen od njegovih dinamičnih lastnosti, prav tako je lahko v določenih primerih tudi odziv objekta na obtežbo eksplozije dinamičen. Projektiranje je pri obeh obtežbah osredotočeno na varnost uporabnikov in ne za preprečevanje poškodb na konstrukciji.

Močnejše eksplozije povzročijo tudi tresenje tal. V takem primeru na objekt deluje obtežba zaradi udarnega vala eksplozije, kot tudi seizmična obtežba, ki jo povzroči eksplozija. Obtežba tresenje tal, ki jo povzroči eksplozija, je v primerjavi z obtežbo udarnega vala eksplozije povzročenega od iste eksplozije, tako majhna, da jo v primerih analize objekta obremenjenega z eksplozijo lahko zanemarimo.

Na sliki 2.10 imamo prikazano delovanje obtežbe zaradi eksplozije in potresne obtežbe. Lepo je razvidno, da je učinek delovanja obtežbe zaradi eksplozije v primerjavi z potresno obtežbo bolj lokalni. V kolikor bi bila eksplozija oddaljena dlje od stavbe, pa bi tudi ta obtežba povzročala bolj globalen učinek na stavbo.



Slika 2.10: Primerjava obtežbe zaradi eksplozije in potresne obtežbe (Carino N., Lew H., 2001, str. 4)



### 3 DIMENZIONIRANJE IN GLOBALEN ODZIV STAVB

V okviru Evrokodov ni nobenih standardov za izračun odpornosti konstrukcije glede na obremenitev zaradi eksplozije. Eksplozije so (SIST EN 1991-1-7) definirane kot nezgodno projektno stanje. Poleg tega malega/načelnega, je tudi nekaj o zagotavljanju robustnosti konstrukcije v primeru eksplozij plinskih jeklenk. Pri tovrstnih dogodkih je potrebno zagotoviti, da lokalna porušitev konstrukcijskega elementa ne povzroči progresivne porušitve celotne konstrukcije.

#### 3.1 PROTITERORISTIČNI STANDARDI S PODROČJA STAVB – DOD

Standardi so bili razviti v Združenih državah Amerike, na oddelku za obrambo Združenih držav Amerike (UFC 4-010-01, 2003). Vključujejo merila in kriterije na področju načrtovanja, projektiranja, gradnje, posodobitve in obnove stavb. Ti standardi so kombinacija zahtev in predpisov. Merila in kriteriji so postavljeni z namenom ublažitve posledic bombnih terorističnih napadov. Večinoma obstoječih stavb nudi majhno zaščito pred bombnimi napadi. Z uporabo teh standardov, zmanjšamo materialno škodo in preventivno obvarujemo človeška življenja. Pri načrtovanju zgradb, pred uničujočim delovanjem eksplozije je potrebno upoštevati osnovna navodila za načrtovanje takšnih objektov.

- Zagotoviti zadostno razdaljo med virom eksplozije in objektom: Primarna naloga načrtovanja, je preprečitev možnosti približanja vira eksplozije objektu. To je najlažji in najcenejši način obvarovanja objekta pred učinki eksplozije.
- Preprečitev porušanja objekta: Za preprečevanje smrtnih žrtev je zelo pomembno, da ne pride do progresivnega rušenja objektov. Pri objektu ne sme priti do progresivnega rušenja, ne glede na to kakšna je razdalja med virom eksplozije in objektom ali kako se objekt odzove na obtežbo.
- Izbira primernih materialov: V primerih, kadar ob eksploziji ne pride do porušitve celotnega objekta, so lahko razbitine stekla oziroma delov konstrukcije tiste, ki povzročijo veliko smrtnih žrtev. Za zmanjševanje takšne nevarnosti je potrebno v objekt vgrajevati pravilne materiale.

- Izbira lokacije objekta: Primerna lokacija objekta lahko močno zmanjša možnost bombnega napada.
- Omogočena nadgradnja objektov: V primeru povečanja nevarnosti bombnega napada na področju kjer se nahaja objekt, mora le ta omogočati tako nadgradnjo, da bo objekt varen v primeru bombnega napada.

Natančna določila so opredeljena v standardih. V teh standardih je zajeto vse od načrtovanja stavb, načrtovanja njihove okolice in načrtovanja vse pripadajoče infrastrukture, ki je pomembna za funkcioniranje stavbe. V nadaljevanju so opisani standardi, ki zajemajo kemično eksplozijo v bližnji okolici objekta.

Najpomembnejši standard je standard, ki določa minimalno razdaljo med virom eksplozije in objektom. To je stroškovno najbolj učinkovita rešitev. To razdaljo zagotovimo tako, da onemogočimo, da so eksplozivna sredstva aktivirana v bližini objektov. Z različnimi rešitvami poskušamo zadržati aktiviranje eksplozivnih sredstev izven parametra varnostne razdalje med virom eksplozije in objektom. Standard v nadaljevanju določa varnostno razdaljo za objekte, ki so bili grajeni brez posebnih načrtovanj za objekte obremenjene z eksplozijo. Varnostne razdalje, ki jih določa standard so navedene v preglednici 3.1. V preglednici se pojavljata dve kategoriji eksplozije. Eksplozivna sredstva kategorije I so eksplozivi takšne teže, da so nameščeni v vozilih, kategorijo II pa predstavljajo eksplozivi, ki so takšne teže, da se jih v bližino objektov lahko prinese v rokah. Kontrolirano območje, ki je navedeno v preglednici je nadzorovano območje. To območje je razdalja od stavbe, pa vse do koder poteka nadzor. Kontrolirano območje temelji na predpostavki, da bodo odkrita vsa eksplozivna sredstva v kolikor jih bodo želeli transportirati v to območje. V kolikor okrog stavbe ni kontroliranega območja je ena od rešitev, da se cest in parkirišč ne gradi bližje, kot je za posamezno stavbo določeno z varnostno razdaljo. Pri novejših objektih je dovolj, da se upošteva minimalna razdalja med potencialnim virom eksploziva in objektom. V kolikor pa gre za starejše objekte in se ne more zagotoviti razdalje za običajno konstruirane objekte, ki so navedene v preglednici, se lahko uporabi minimalno razdaljo v kolikor se z analizo dokaže, da objekt lahko zdrži eksplozijo. Razdalja za običajno grajene objekte se uporablja pri stavbah

brez posebne analize. Analizo je treba narediti v kolikor ima objekt tri ali več etaž. Z to analizo mora biti ugotovljena razdalja pri kateri se ne bo zgodilo progresivno rušenje objekta.

Preglednica 3.1: Varnostna razdalja za nove in obstoječe objekte. (UFC 4-010-01, 2003, str. 40)

Lokacija eksplozije	Vrsta objekta	Merodajna stopnja zaščite	Varnostna razdalja		Merodajna eksplozivna polnitev
			Razdalja pri običajno konstruiranih objektih (m)	Minimalna razdalja (m)	
Kontrolirano območje ali parkirna mesa in ceste brez kontrole	Vojaški objekti	Nizka	45	25	I
	Stavbe v katerih se ljudje zbirajo	Nizka	45	25	I
	Stanovanjske stavbe	Zelo nizka	25	10	I
Kontrolirano območje parkirnih mest in cest	Vojaški objekti	Nizka	25	10	II
	Stavbe v katerih se ljudje zbirajo	Nizka	25	10	II
	Stanovanjske stavbe	Zelo nizka	10	10	II
Kontejnerji za odpadke	Vojaški objekti	Nizka	25	10	II
	Stavbe v katerih se ljudje zbirajo	Nizka	25	10	II
	Stanovanjske stavbe	Zelo nizka	10	10	II

Standardi narekujejo tudi kako mora biti urejena okolica objekta. Le ta mora biti pregledna, kajti oseba, ki bo eksploziv namestila v bližino objekta, ne bo namestila eksploziva tako, da bo postavljeno na vidnem mestu in ga bodo lahko ljudje odkrili že pred aktivacijo. Okrog stavb mora zato biti v razdalji 10 metrov prostor, ki je pregleden. Znotraj tega prostora ne sme biti kontejnerjev za odpadke, saj so le ti odlično skrivališče za postavljanje improviziranih

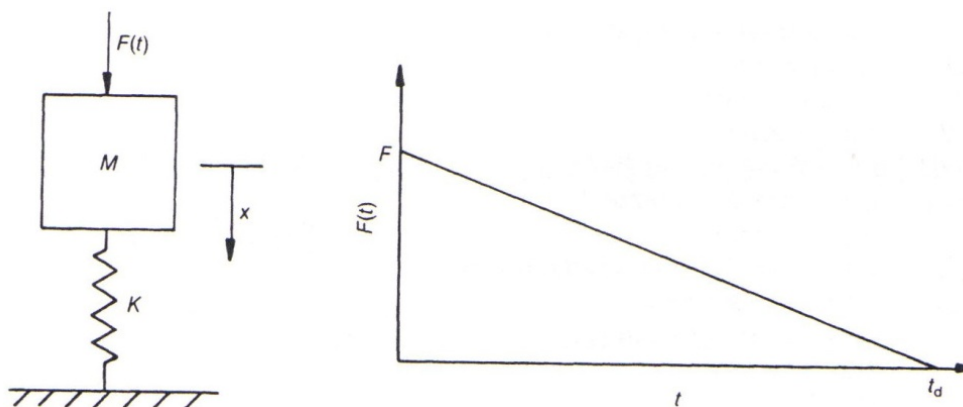
eksplozivnih sredstev. Znotraj tega prostora tako ne sme biti ničesar kar bi omogočilo prekrivanje eksplozivnih sredstev.

Standardi posegajo tudi v dimenzioniranje objektov. Vsi elementi objektov kateri so lahko v prihodnosti podvrženi določenim nevarnostim bombnih terorističnih napadov morajo biti dimenzionirani po navodilih za dimenzioniranje takšnih objektov. Postopek dimenzioniranja elementov takšnih objektov sem opisal v nadaljevanju pod točko dimenzioniranje armiranobetonskih elementov obremenjenih z eksplozivno obtežbo.

Standard posebej obravnava stavbe, ki imajo tri ali več etaž. Glavno nevarnost za tovrstne stavbe predstavlja progresivno rušenje. Take stavbe morajo biti zato načrtovane tako, da zaradi lokalnih poškodb, ki jih lahko povzroči eksplozija ne pride do progresivnega porušenja celotne stavbe.

### 3.2 ODZIV OBJEKTA OBREMENJENEGA Z OBTEŽBO EKSPLOZIJE

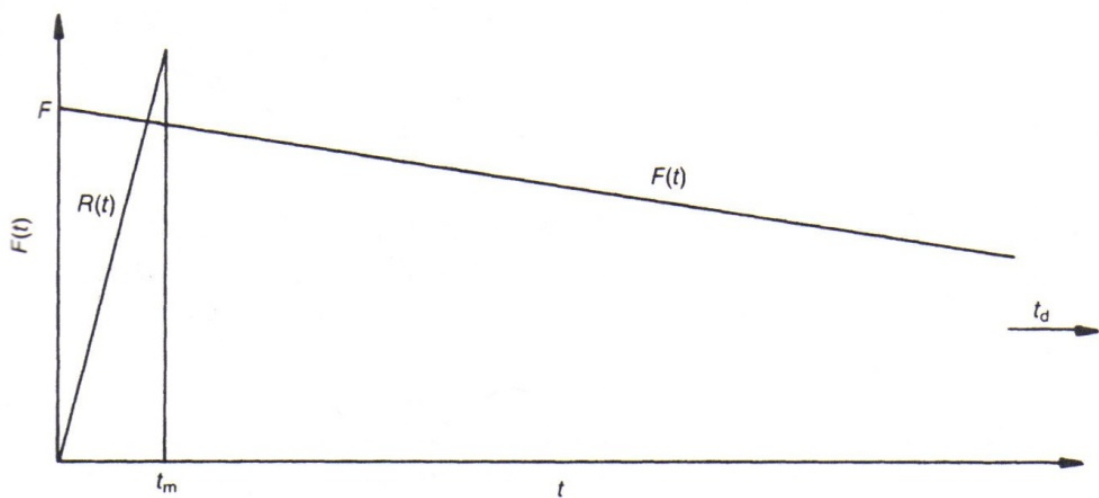
V odvisnosti razmerja med trajanjem obtežbe udarnega vala eksplozije in lastnega nihajnega časa konstrukcije določimo na kakšen način bo eksplozivna obtežba delovala na konstrukcijo (statično, dinamično, impulzivno). Eksplozivno obtežbo približno modeliramo kot trikotno obtežbo, kjer je na začetku največja in nato sčasoma pada ( $t_d$ ). Odziv sistema z eno prostostno stopnjo, ki je obremenjen z eksplozivno obtežbo razdelimo na fazo, ki se ujema s trajanjem obtežbe in na fazo lastnega nihanja.



Slika 3.1: Sistem z eno prostostno stopnjo elastičnega objekta izpostavljenega obtežbi eksplozije. (Mays G., Smith P., 1995, str. 48)

- Dolgo trajanje pozitivne faze v primerjavi s trajanjem lastnega nihanja konstrukcije.

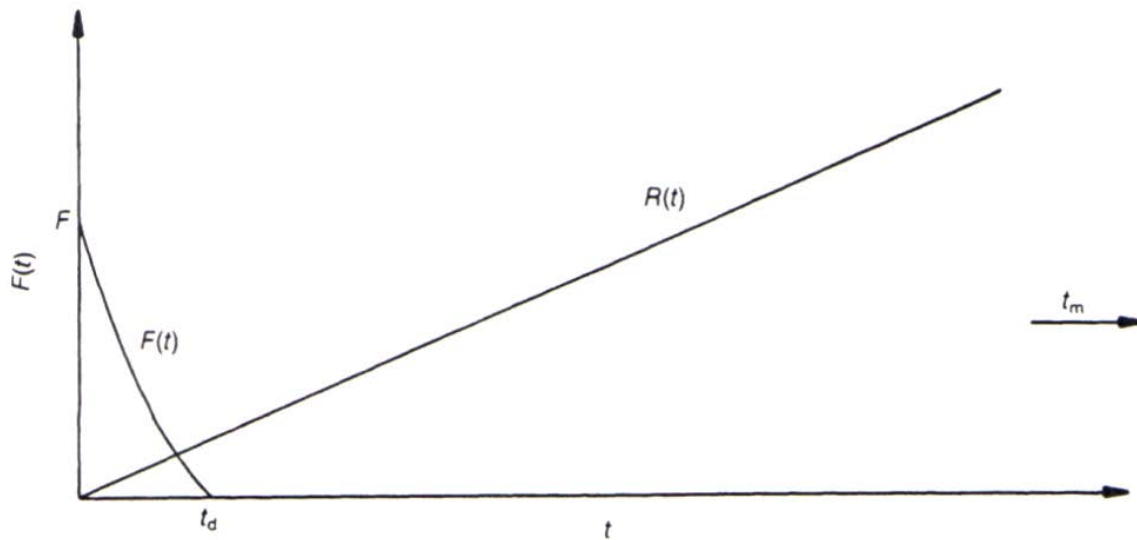
Obravnavamo situacijo, kjer je čas trajanja pozitivne faze eksplozije  $t_d$  veliko daljši od časa lastnega nihanja konstrukcije  $T$ . V primeru, ko imamo objekt obremenjen z eksplozijo, so maksimalni premiki  $x_{\max}$  funkcija obtežbe eksplozije  $F$  in togost konstrukcije  $K$ . Na sledečem grafu je prikazana časovna sprememba eksplozivne obtežbe in odpornost objekta  $R(t)$ . Evidentno je da je maksimalen premik dosežen še preden se je obtežba eksplozije bistveno zmanjšala. V takšnem primeru obtežbo imenujemo *kvazi – statična obtežba*.



Slika 3.2: Kvazi – statična obtežba (Mays G., Smith P., 1995, str. 49)

- Kratko trajanje pozitivne faze eksplozije v primerjavi z trajanjem lastnega nihanja konstrukcije.

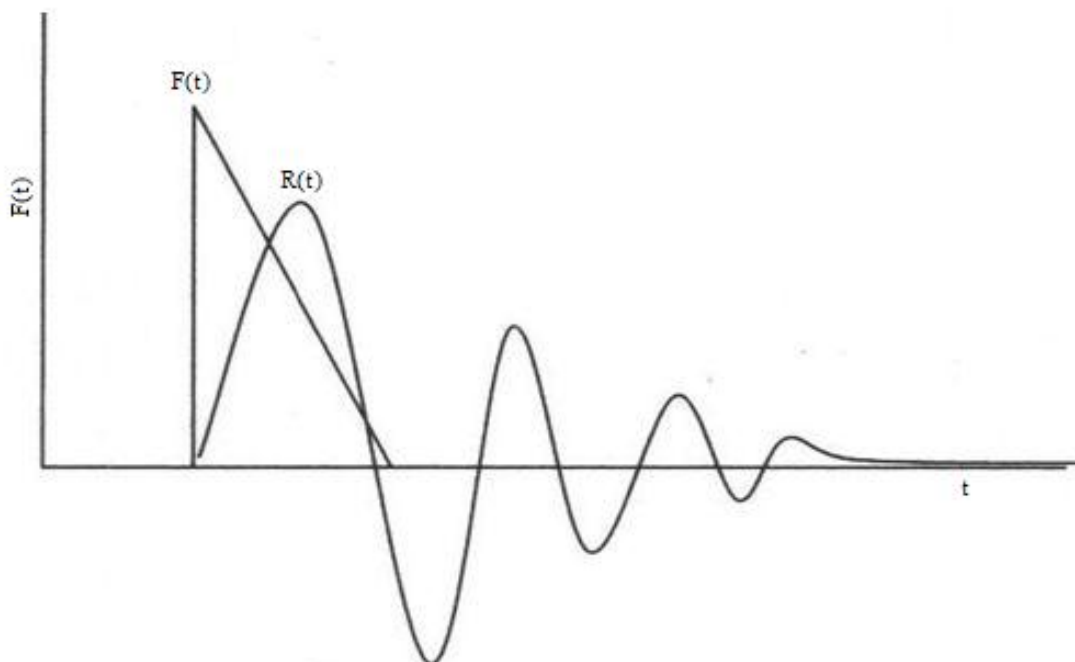
V tem primeru je obravnavana situacija, kjer je čas trajanja pozitivne faze eksplozije  $t_d$  veliko krajši od časa lastnega nihanja konstrukcije  $T$ . Obtežba je prenehala delovati preden je objekt imel čas, da se odzove na obtežbo. Večina deformacij se zgodi v času večjem od trajanja pozitivne faze eksplozije  $t_d$ . Graf na sliki 3.3 nam kaže, da je impulz eksplozivne obtežbe padel na nič, preden se je zgodil premik objekta. Udarni val eksplozije bo minil še preden se bo objekt odzval. Tako situacijo imenujemo *impulzna obtežba*.



Slika 3.3: Impulzna obtežba (Mays G., Smith P., 1995, str. 50)

- Enako trajanje pozitivne faze obtežbe in lastnega nihajnega časa konstrukcije.

V tem primeru je trajanje pozitivne faze eksplozije  $t_d$  in čas lastnega nihanja konstrukcije  $T$  približno enak. Obtežbo ob takšnem režimu imenujemo *dinamična obtežba*.



Slika 3.4: Dinamična obtežba (Cormie et al, 2009, str. 84)

Za razvrstitev v posamezen režim obtežbe se opredelimo glede na produkt krožne frekvence nihanja objekta in časa trajanja pozitivne faze obtežbe  $\omega t_d$ , kateri je proporcionalen razmerju med  $t_d$  in  $T$ . Omejitve za posamezne režime obtežbe so navedene v knjigi Blast effects on buildings second edition (Cormie et al, 2009) in so sledeče:

$$0,4 > \omega t_d \quad \left[ \infty \frac{t_d(\text{kratko})}{T(\text{dolgo})} \right] \quad \text{Impulz}$$

$$40 < \omega t_d \quad \left[ \infty \frac{t_d(\text{dolgo})}{T(\text{kratko})} \right] \quad \text{Kvazi – statično}$$

$$0,4 < \omega t_d < 40 \quad \left[ \frac{t_d}{T} \approx 1 \right] \quad \text{Dinamično}$$

### 3.3 DIMENZIONIRANJE ARMIRANOBETONSKIH ELEMENTOV OBREMENJENIH Z OBTEŽBO ZARADI EKSPLOZIJE

#### 3.3.1 Namen dimenzioniranja

Glavni namen dimenzioniranja elementov obremenjenih z obtežbo eksplozije je zagotovitev zadostne duktilnosti, tako, da se element na tako obtežbo odzove v mejah dopustnih poškodb. Dimenzioniranje temelji na upogibnih plastičnih deformacijah.

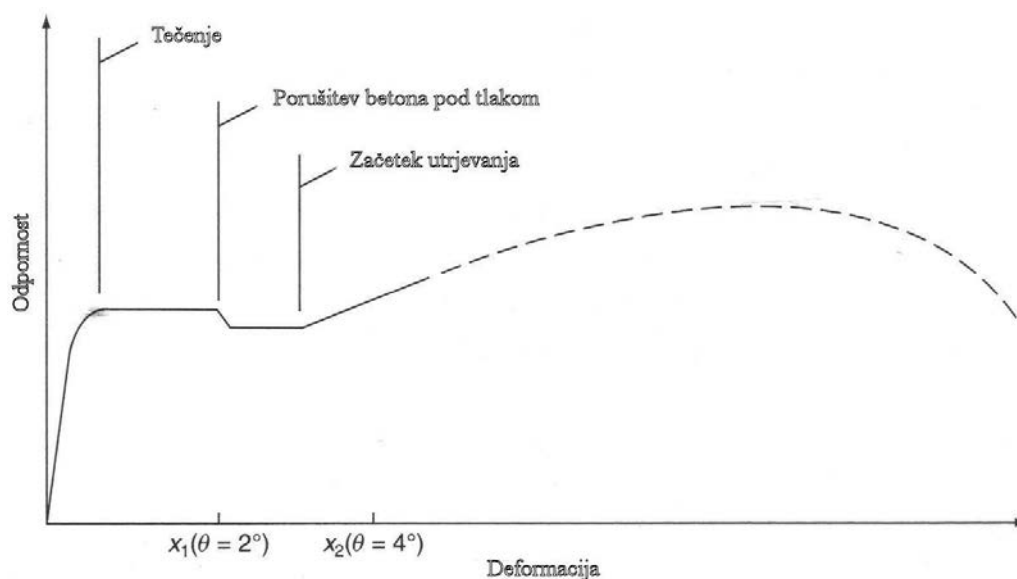
#### 3.3.2 Določitev obtežbe

Obtežba eksplozije za katero se zagotavlja odpornost armiranobetonskih elementov predstavlja ekstremen dogodek in je zato verjetnost takega dogodka zelo majhna. Ob prisotnosti drugih obtežb v času delovanja obtežbe eksplozije, se upošteva njihovo delovanje na celotnem območju, kjer deluje obtežba eksplozije. V večini primerov bo učinek drugih obtežb le še zmanjšal odpornost elementa, medtem, ko nekatere obtežbe lahko koristno vplivajo na element, ki je izpostavljen eksploziji.

### 3.3.3 Obnašanje armiranega betona obremenjenega z obtežbo eksplozije (Cormie et al., 2009)

Pri dinamično obremenjenem elementu iz armiranega betona, se element deformira tako dolgo dokler deformacijska energija ne pride v ravnovesje z energijo eksplozije, oziroma pride do porušenja elementa. Iz sledeče odpornostno – deformacijske krivulje je razviden odziv armiranobetonskega elementa obremenjenega z upogibom (Slika 3.5).

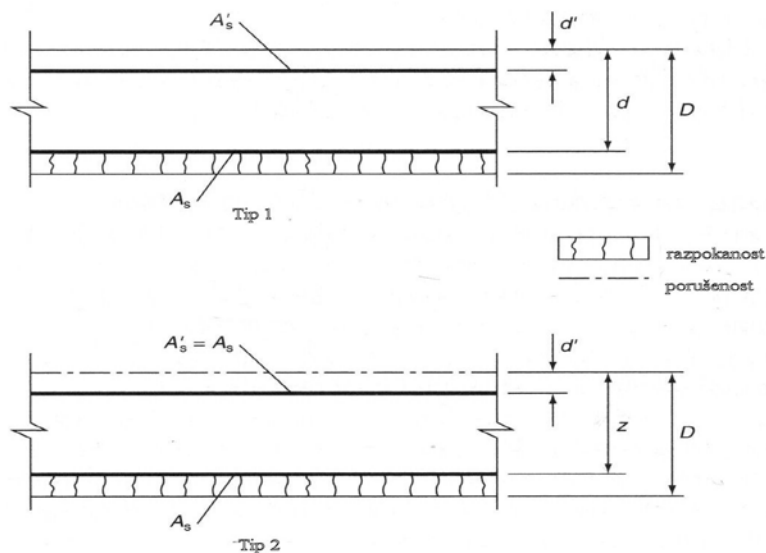
Pri elementu, kateri je prvič obremenjen, odpornost narašča linearno z deformacijo dokler ne pride do plastificiranja armature. Potem odpornost armiranobetonskega elementa ostane enaka kljub naraščajoči deformaciji elementa, dokler se beton v tlaku ne zdrobi pri deformaciji  $x_1$ , katera ustreza rotaciji elementa  $\theta = 2^\circ$ . Med rotacijo  $\theta = 0^\circ$  in  $\theta = 2^\circ$ , beton efektivno prispeva k odpornostnemu momentu in zaščitni sloj betona ostane nepoškodovan. Tak element imenujemo tip 1. Element tipa 1 je lahko enostransko ali obojestransko armiran. Pri rotacijah  $\theta > 2^\circ$  se tlačne sile transformirajo iz betona na armaturo, kar rezultira kakor majhna izguba odpornosti, kar se vidi na sliki 3.5. V kolikor ni v tlačni coni nobene armature, bi ob porušenju betona v tlačni coni prišlo do porušanja celotnega elementa. Elemente pri katerih pride do porušitve zaščitnega sloja na tlačni strani in pri tem zaščitni sloj na natezni strani razpoka in ne odpade imenujemo tip 2. Do nastanka takega prereza elementa pride med rotacijo  $\theta = 2^\circ$  in  $\theta = 5^\circ$ .



Slika 3.5: Odpornostno – deformacijska krivulja upogibno obremenjenega AB elementa. (Cormie et al., 2009, str. 127)



Kadar zaščitni sloj razpoka ali se poruši vendar še ne odstopi, takrat še vedno prispeva k masi elementa in posledično k odpornosti elementa vse dokler zaščitni sloj ne odstopi.



Slika 3.6: Prerez armiranobetonskega elementa, na zgornji sliki je prerez tipa 2, na spodnji sliki pa prerez tipa 2. (Cormie et al., 2009, str. 128)

Odpornostni moment za prerez tipa 2, se določi po enačbi:

$$M_{Rd} = \sigma_{s,d} A_s z$$

kjer so

$A_s$ ..... prerez armature na vsaki strani prereza

$z$ .....ročica med sredino armature, ki je v napetosti in tlačno cono

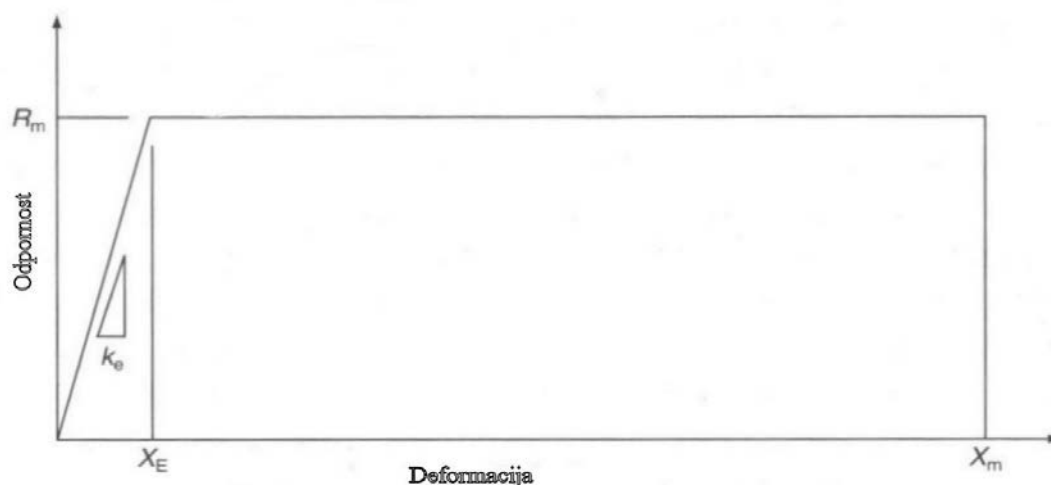
$b$ ..... širina elementa

$f_{y,d,dyn}$ ...računska natezna trdnost armature

V nadaljevanju se element še naprej upogiba, kar privede do utrjevanja armature in odpornost nekoliko naraste. Pri deformaciji  $x_2$ , katera ustreza rotaciji okrog  $4^\circ$  pa se element poruši. Obstaja pa zelo malo podatkov, kateri kažejo da se je element obremenjen z obtežbo eksplozije porušil zaradi strižne obremenitve.

### 3.3.4 Odziv AB objekta obremenjenega z obtežbo eksplozije

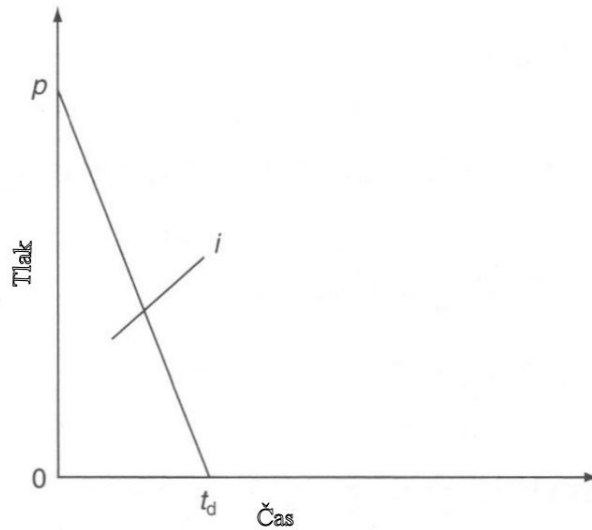
Odziv armiranobetonskega elementa na obtežbo eksplozije najlažje opišemo z grafom nosilnost – deformacija (Slika 3.7), kjer je  $R_m$  mejna nosilnost,  $x_e$  je deformacija na meji elastičnosti,  $x_m$  je največja dovoljena deformacija.



Slika 3.7: Graf odpornost – deformacija (Mays G., Smith P., 1995, str. 79)

### 3.3.5 Dimenzioniranje armiranobetonskega elementa – impulzen odziv

Obtežba eksplozije je funkcija tlaka in časa, kakor je prikazano na sliki 3.8. Kot že v enem izmed prejšnjih poglavij omenjenem impulznem režimu je trajanje obtežbe  $t_d$  kratko v primerjavi s trajanjem odziva elementa  $t_m$ . Tako da je  $t_m/t_d \geq 3$ . Za obtežbo se predpostavlja da je enakomerno porazdeljena in jo izrazimo kot impulzno obtežbo. Obnašanje elementa obremenjenega z določeno impulzno obtežbo je opisan z osnovno impulzno enačbo 3.2. Uporaba te enačbe pri dimenzioniranju je razložena v nadaljevanju, ko je naveden postopek dimenzioniranja.



Slika 3.8: Graf obtežbe eksplozije (Mays G., Smith P., 1995, str. 79)

Osnovna impulzna enačba:

$$\frac{p \cdot A}{K_{LM} \cdot M} \leq R_m \cdot x_m \cdot x_E$$

kjer so

$i$ ..... impulz

$A$ ..... površina na katero obtežba deluje

$K_{LM}$ ... koeficient obtežbe in mase

$M$ ..... masa elementa

$R_m$ ..... mejna nosilnost

$x_m$ ..... največji dovoljen pomik

$x_E$ ..... pomik na meji elastičnosti

Dimenzioniranje armiranobetonskega elementa na impulzno obtežbo eksplozije, poteka tako, da se najprej izračunajo vse funkcije nosilnosti in deformacije. Količino in vrsto armature v natezni coni določimo že v naprej. Pri računu mejnega momenta iz enačbe 3.1, izrazimo ročico  $z$ , ki je prikazana na sliki 3.6. Mejna nosilnost in pomik na meji elastičnosti sta funkciji mejnega momenta in sta tako izražena z ročico  $z$ .

• Mejna nosilnost (3.3)

• Največji dovoljen pomik (3.4)

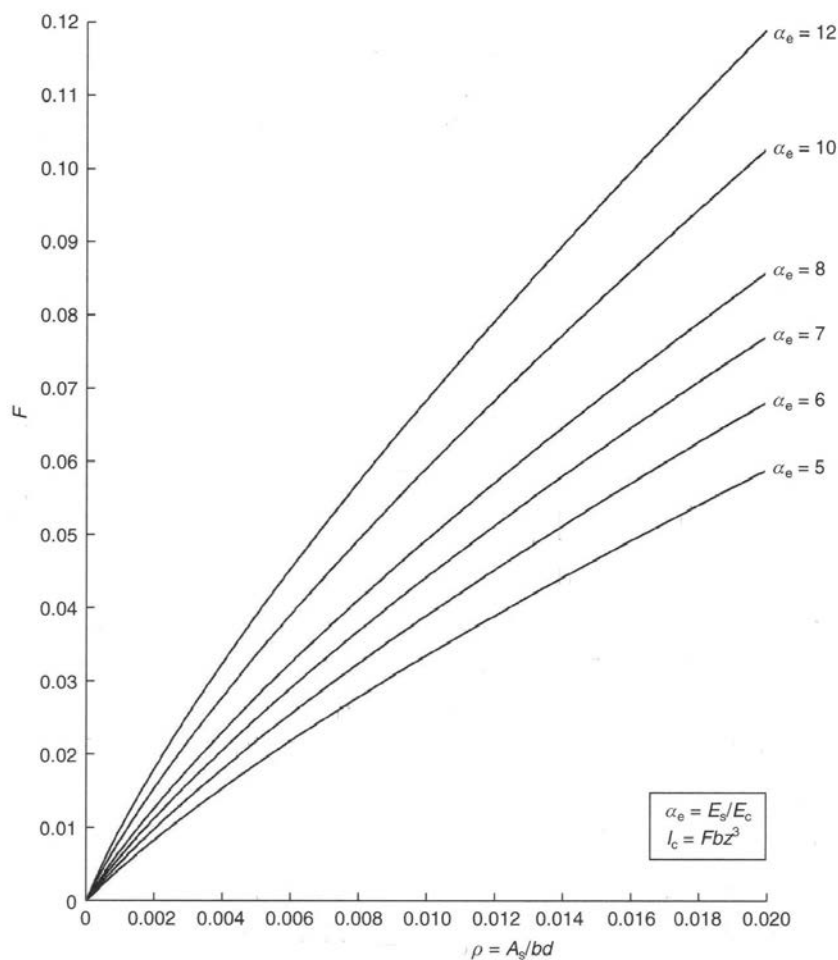
• Togost v elastičnem območju (3.5)

• Pomik na meji elastičnosti (3.6)

Vztrajnostni moment se izračuna po enačbi 3.7.

(3.7)

Koeficient F se odčita iz grafa na sliki 3.9.



Slika 3.9: Graf za odčitavanje koeficienta F, za prerez za katerega se predvideva, da je zaščitni sloj porušen na obeh straneh. (Cormie et al., 2009, str. 132)

Sedaj, ko imamo izračunane vse funkcije nosilnosti in deformacije, moramo iz preglednice 3.2 določiti koeficient obtežbe in mase  $K_{LM}$ . S tem faktorjem reduciramo maso elementa in obtežbo. Sedaj lahko začnemo z razreševanjem že prej navedene osnovne impulzne enačbe, iz te enačbe izrazimo ročico  $z$ . Ročici  $z$  prištejemo še zaščitno plast betona in tako smo dobili potrebno debelino armiranobetonskega elementa.

### 3.3.6 Dimenzioniranje armiranobetonskega elementa pri dinamičnem ali kvazi – statičnem odzivu elementa

Obtežba eksplozije je funkcija tlaka in časa, kakor je prikazano na sliki 3.8. Pri dinamičnem režimu je trajanje obtežbe  $t_d$  v primerjavi z trajanjem odziva elementa  $t_m$ , približno enako. Pri kvazi – statičnem režimu pa je trajanje obtežbe  $t_d$  dolgo v primerjavi z trajanjem odziva elementa  $t_m$ . Tako da je v teh dveh režimih  $t_m/t_d < 3$ . Za obtežbo se predpostavlja da je enakomerno porazdeljena in jo izrazimo kot tlak eksplozije  $p$ .

Dimenzioniranje armiranobetonskega elementa na dinamično ali kvazi - statično obtežbo eksplozije, poteka tako, da se najprej izračuna vse funkcije nosilnosti in deformacije. Količino in vrsto armature v natezni coni določimo že v naprej. Določimo tudi debelino elementa.

• Mejni moment \_\_\_\_\_ (3.8)

• Nevtralna os  $x$  \_\_\_\_\_ (3.9)

• Mejna nosilnost (3.10)

• Največji dovoljen pomik (3.11)

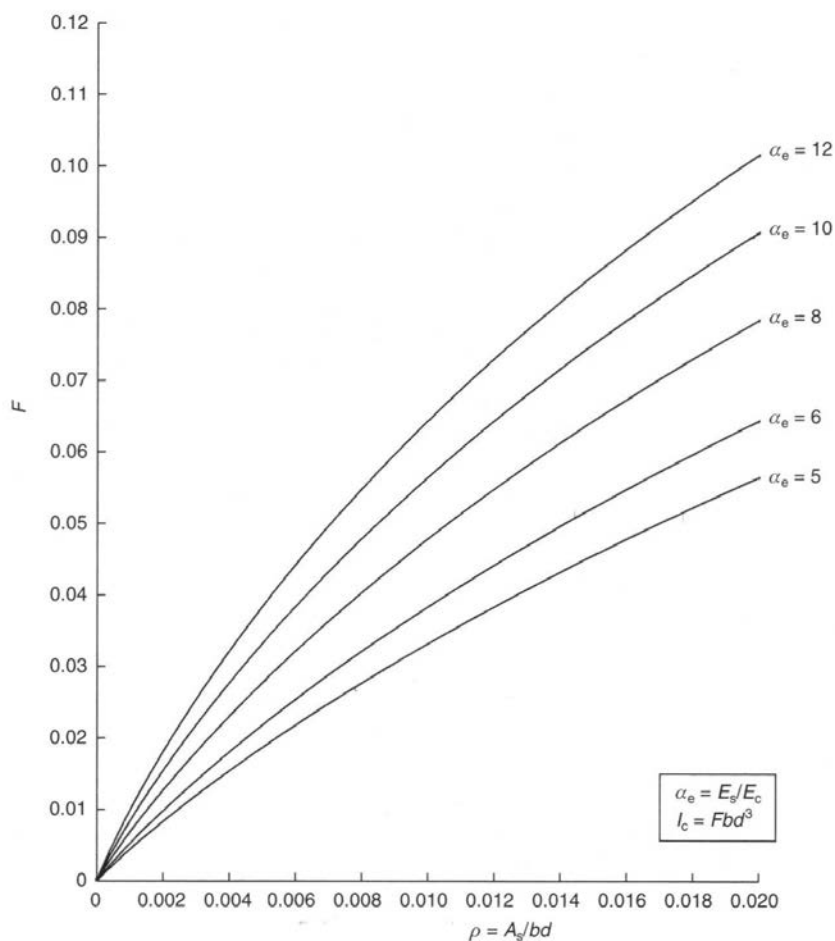
• Togost v elastičnem območju (3.12)

• Pomik na meji elastičnosti (3.13)

Vztrajnostni moment se izračuna po enačbi 3.9.

(3.14)

Koeficient  $F$  se odčita iz grafa na sliki 3.10.



Slika 3.10: Graf za odčitavanje koeficienta  $F$ , za prerez za katerega se predvideva, da je zaščitni sloj porušen na natezni coni. (Cormie et al., 2009, str. 135)

Izračunamo še čas odziva elementa  $T$ .

\_\_\_\_\_

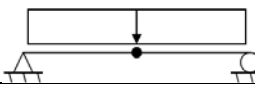
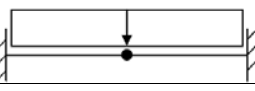
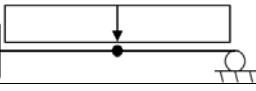
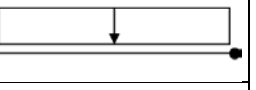
\_\_\_\_\_

Preverimo razmerje časa trajanja obtežbe z trajanjem odziva elementa.

- dinamična obtežba
- kvazi – statična obtežba

V kolikor razmerje ni ustrezno dinamični ali kvazi – statični obtežbi, moramo dimenzionirati element kakor element obremenjen z impulzno obtežbo.

Preglednica 3.2: Določanje koeficientov: koeficient obtežbe -  $K_L$ , koeficient mase -  $K_M$  ter koeficient obtežbe in mase -  $K_{LM}$ , za sistem z eno prostostno stopnjo (Cormie et al., 2009).

Enakomerno razporejena obtežba				
				
Elastične deformacije				
$K_M$	0,50	0,41	0,45	0,26
$K_L$	0,64	0,53	0,58	0,40
$K_{LM}$	0,78	0,77	0,78	0,65
Plastične deformacije				
$K_M$	0,33	0,33	0,33	0,33
$K_L$	0,50	0,50	0,50	0,50
$K_{LM}$	0,66	0,66	0,66	0,66

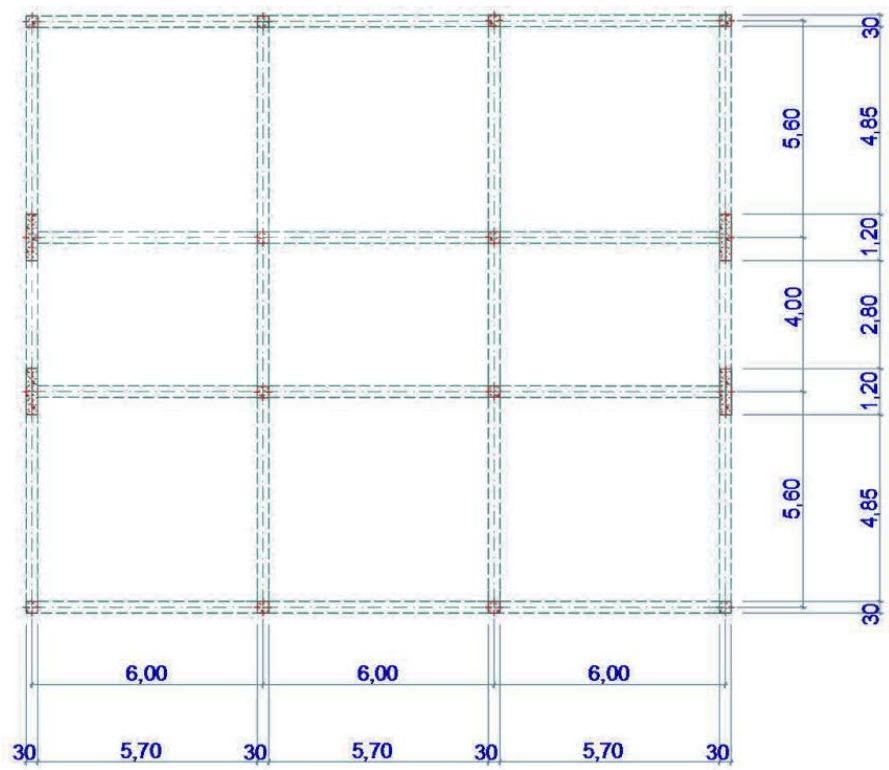
### 3.4 PRIKAZ DELOVANJA EKSPLOZIJE NA STAVBO

#### 3.4.1 Opis obravnavane stavbe

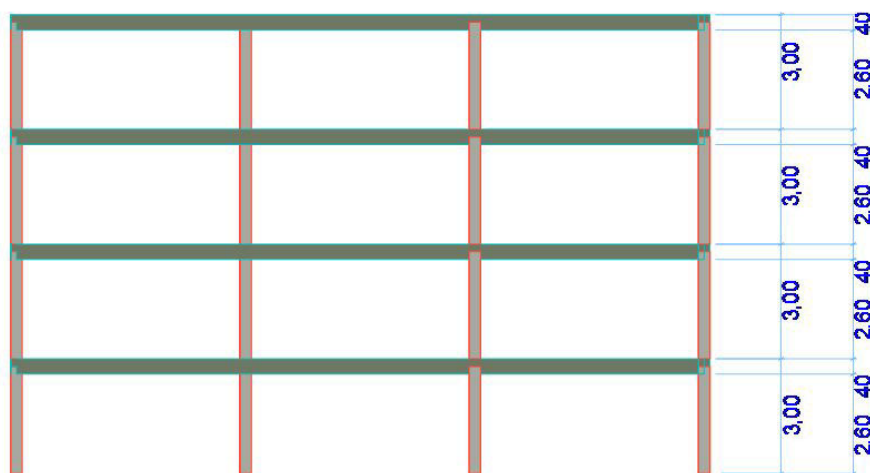
Za prikaz vpliva eksplozije na objekt sem obravnaval poslovno stanovanjsko zgradbo, ki vsebuje poleg pritličja še tri etaže. Arhitektura stavbe je prikazana na slikah 3.11 in 3.12. Prostori pritličja so večnamenski, prostori vseh treh nadstropij pa so namenjeni poslovni dejavnosti. Nosilna konstrukcija objekta sestoji iz nosilnih armiranobetonskih okvirjev. Medetažne stropne konstrukcije so lite armiranobetonske plošče.

Uporabljeni materiali:

- beton C25/30:  $f_{ck}=25 \text{ KN/cm}^2$ ,  $E_{cm}=3100 \text{ KN/cm}^2$ ,  $f_{ctm}=0,26 \text{ KN/cm}^2$
- armatura: S 500  $f_{yk}=50 \text{ KN/cm}^2$  (rebraste arm. palice, mrežna armatura)



Slika 3.11: Tloris tipične etaže.

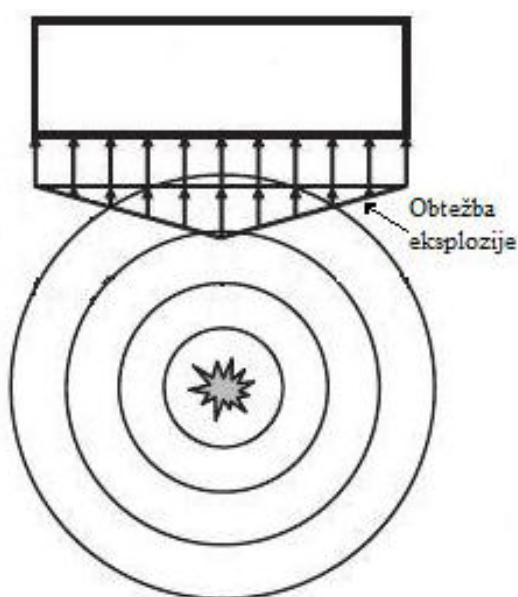


Slika 3.12: Prečni prerez.



### 3.4.2 Modeliranje obtežbe

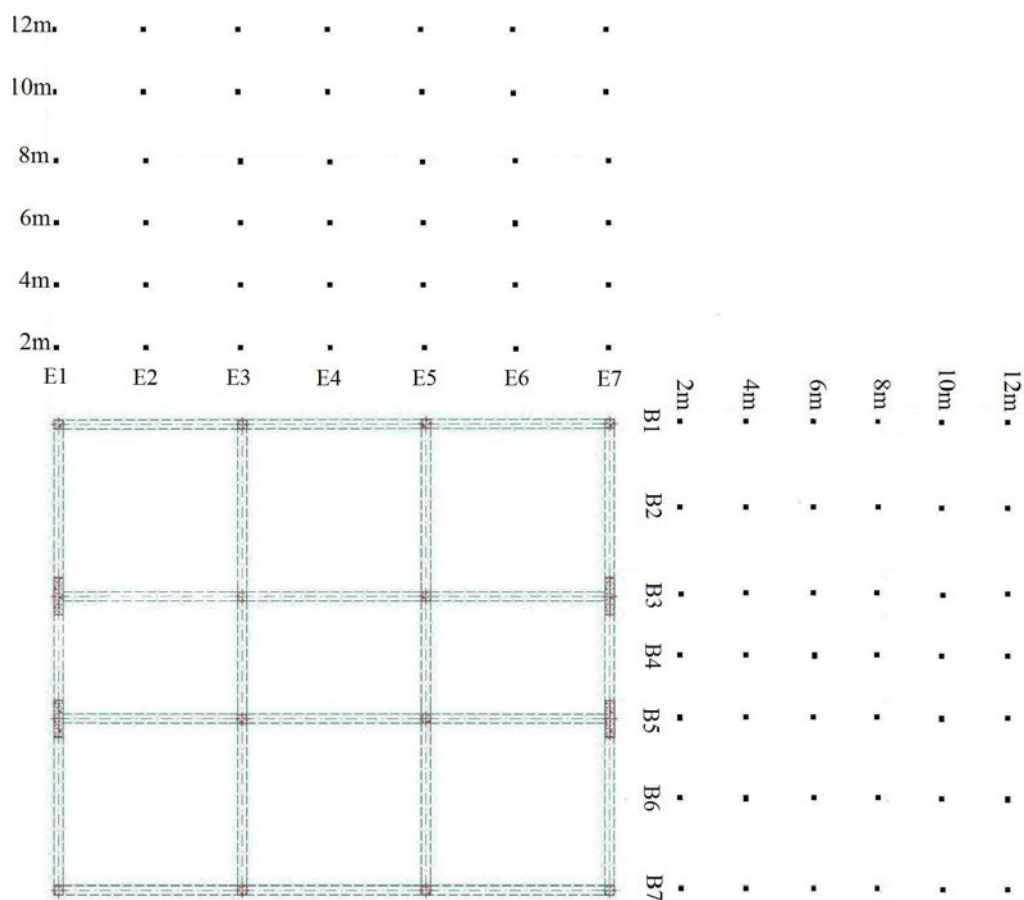
Obtežba eksplozije na objekt je odvisna od količine eksploziva, vrste eksploziva, višine in oddaljenosti eksplozije od objekta in kota pod katerim deluje eksplozija na objekt. Okolica objekta ima velik vpliv na obtežbo eksplozije, ker se lahko obtežba eksplozije z različnimi odboji poveča. Za obtežbo eksplozije ima velik pomen tudi vpliv oblike objekta na katerega deluje obtežba eksplozije. Za izračun obtežbe eksplozije se vse vrste eksplozivov računsko pretvorijo v eksploziv TNT. Vsak eksploziv ima določen koeficient mase eksploziva v primerjavi z eksplozivom TNT. V kolikor ploskev na katero deluje eksplozija razdelimo na neskončno točk, bo v vsaki točki obtežba nekoliko drugačna, kar je vidno na sliki 3.13. V našem računskem primeru je bilo predpostavljeno, da v neposredni okolici objekta ni nobenih ovir, zaradi katerih bi prišlo do povečanja ali zmanjšanja eksplozivne obtežbe. Predpostavljeno je, da je na fasadi objekta lamelirano steklo katero zdrži obremenitev eksplozije brez porušitve, tako, da se vsa obtežba prenese na stebre in prečke. Za primer je bila izračunana obtežba eksploziva TNT v treh različnih masah polnitve. Za primer eksploziva, katerega bi bilo mogoče skriti v kovček in postaviti v bližino objekta je predpostavljeno 25 kg eksploziva TNT. Količina eksploziva TNT skritega v osebem vozilu znaša 250 kg, v manjšem tovornjaku pa 1250 kg. Vir eksplozije je bil postavljen na različnih lokacijah. Za vsako lokacijo posebej je bila določena obtežba na objektu.



Slika 3.13: Delovanje obtežbe eksplozije na ploskev. (Wassef et al., 2010, str. 12)

### 3.4.3 Izbira lokacije vira eksplozije

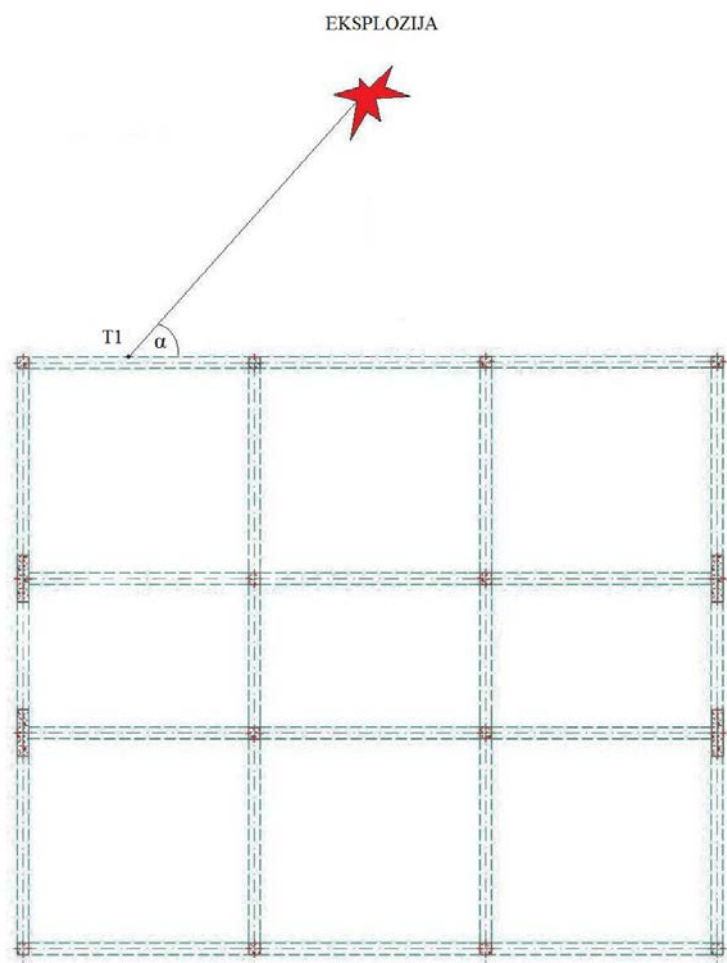
Vir eksplozije sem postavljajal okrog objekta na različnih oddaljenostih, za vsako lokacijo sem izračunal obtežbo eksplozije na objekt. Ob kasnejših izračunih lahko vidimo kako bo na kateri lokaciji obtežba delovala na objekt. Eksplozija na vsaki lokaciji drugače deluje na objekt. Za primer količine eksploziva 25 kg TNT sem vir eksplozije postavljajal na vsaka dva metra od objekta v liniji vsakega stebra in v liniji med stebri. Za vsako lokacijo eksploziva sem izračunal obtežbo eksplozije na objekt. Za primer polnitve eksplozije 250 kg TNT, sem vir eksplozije postavljajal v enakih linijah kot za primer 25 kg, na vsaka dva metra. Enako sem naredil še za maso polnitve eksploziva 1250 kg eksploziva TNT. Točke na katere sem postavljajal vir eksplozije 25 kg TNT so prikazane na sliki 3.14. Za eksplozijo 25 kg TNT-ja so te točke le do razdalje 12 m. Pri eksploziji 250 kg TNT-ja, pa so točke do razdalje 26 m. Za eksplozijo 1250 kg, pa sem moral toče postavljajati še do večje razdalje in sicer do 36 m.



Slika 3.14: Lokacije postavitve vira eksplozije za vir eksplozije 25 kg TNT.

### 3.4.4 Uporaba računalniškega programa A.T. Blast (ARA Computer Technologies), za izračun obtežbe eksplozije

A.T. Blast je računalniški program, s katerim določamo obtežbo eksplozije. Program omogoča uporabniku, da določi maksimalno in minimalno razdaljo eksplozije do ploskve na katero deluje. Uporabnik določi tudi težo eksploziva in kot delovanja eksplozije na izpostavljeno ploskev objekta. Na sliki 3.15 je za primer delovanja eksplozije na točko T1, prikazana razdalja med eksplozijo in točko T1, ter kot  $\alpha$  med eksplozijo in izpostavljeno ploskvijo. Na osnovi podanih parametrov nam program izračuna hitrost udarnega vala, čas od detonacije eksplozije do pričetka delovanja obtežbe eksplozije na ploskev, tlak P, impulz I in čas trajanja delovanja obtežbe  $t_d$ . Rezultati so prikazani v tabeli, katero je mogoče tudi natisniti. Delovanje tlaka in impulza pa je prikazano tudi grafično.

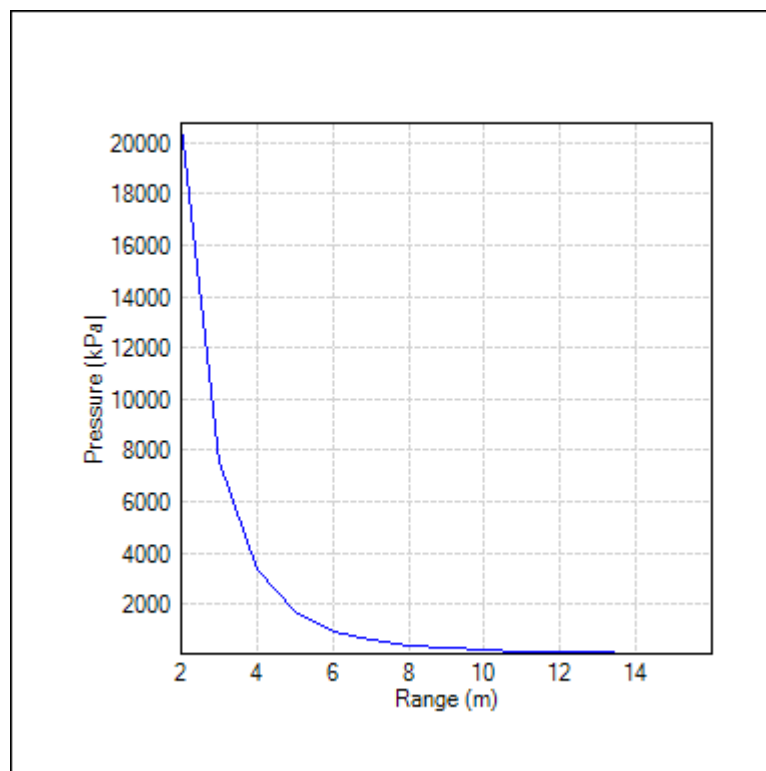


Slika 3.15: Primer delovanja eksplozije na točko T1, prikazan je kot  $\alpha$  med eksplozijo in izpostavljeno ploskvijo.

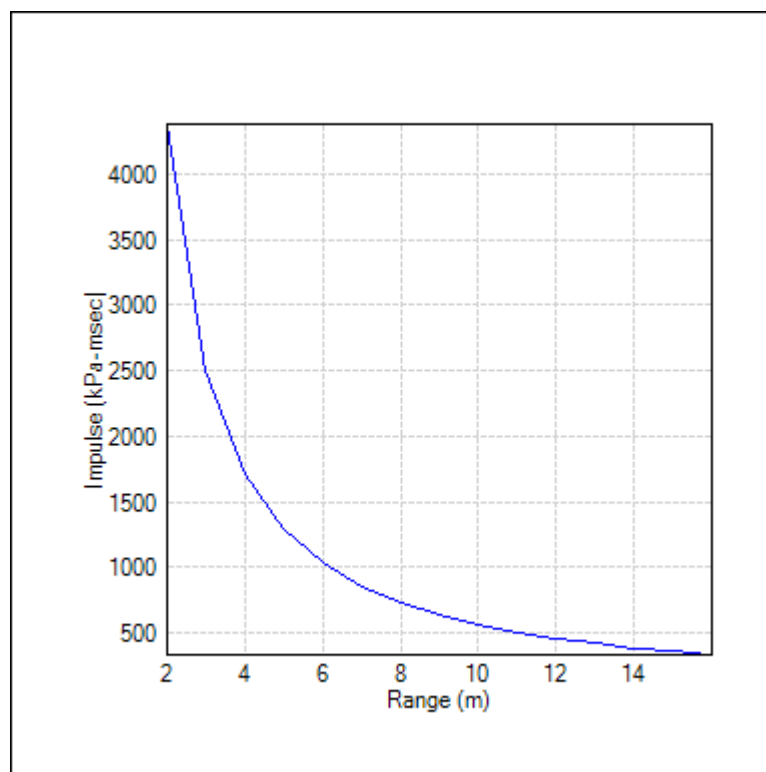
Spodaj so prikazani rezultati izračuna obtežbe s programom A.T. Blast, za eksplozijo mase polnitve 25 kg. Programu je bilo določeno naj poda rezultate na vsak meter od dveh metrov do šestnajst metrov, pri čemer je bil kot delovanja eksplozije na ploskev enak  $0^\circ$ . Rezultati so podani tabelarično in grafično.

Preglednica 3.3: Prikaz rezultatov A.T. Blast v tabeli.

Razdalja (m)	Hitrost (m/ $\mu$ s)	Čas pričetka obtežbe ( $\mu$ s)	Tlak (kPa)	Impulz (kPa- $\mu$ s)	Trajanje obtežbe ( $\mu$ s)
2	1,7	0,7	20747,29	4380,58	0,42
3	1,17	1,43	7598,09	2499,42	0,66
4	0,88	2,44	3334,17	1712,86	1,03
5	0,71	3,7	1699,07	1291,04	1,52
6	0,61	5,2	978,02	1031,04	2,11
7	0,55	6,91	620,25	855,98	2,76
8	0,5	8,8	424,72	730,57	3,44
9	0,47	10,84	309,02	636,52	4,12
10	0,45	13,01	235,87	563,58	4,78
11	0,43	15,28	187,05	505,39	5,4
12	0,42	17,63	153,06	457,95	5,98
13	0,41	20,06	128,38	418,51	6,52
14	0,4	22,54	109,9	385,28	7,01
15	0,4	25,07	95,7	356,87	7,46
16	0,39	27,64	84,53	332,33	7,87



Slika 3.16: Grafični prikaz spremembe tlakov eksplozije 25 kg TNT v odvisnosti od razdalje.

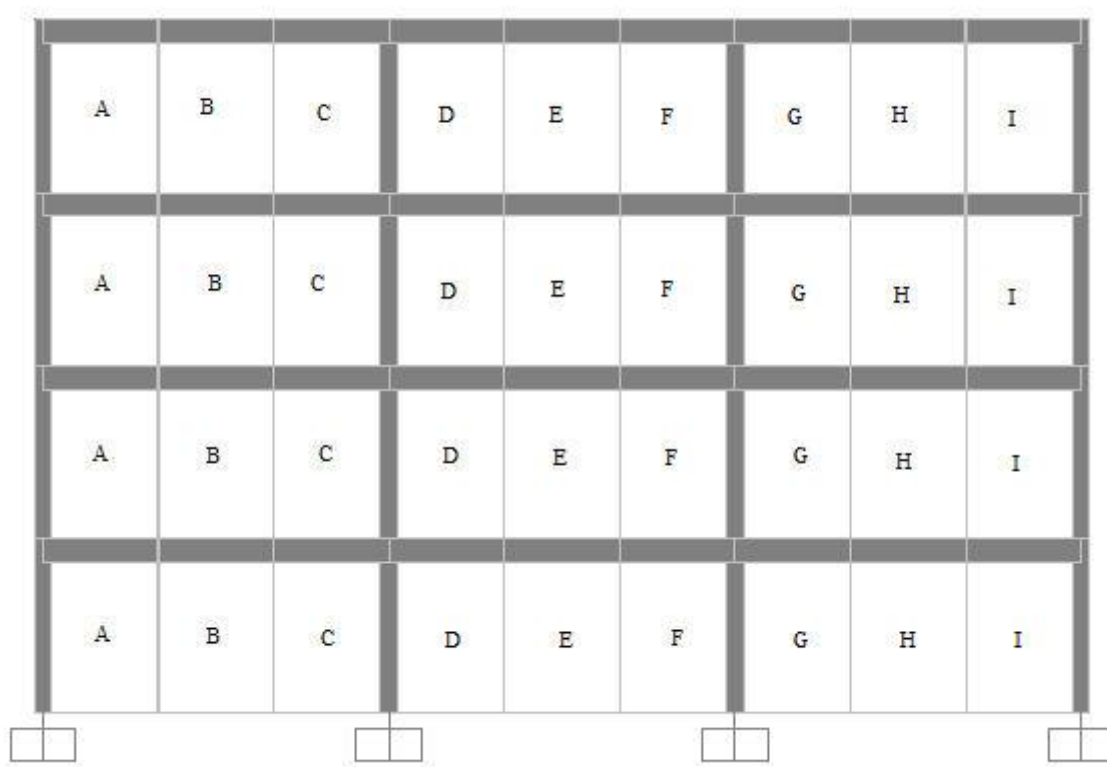


Slika 3.17: Grafični prikaz spremembe impulza eksplozije 25 kg TNT v odvisnosti od razdalje.

### 3.4.5 Določanje obtežbe eksplozije na model objekta

Računalniški program A.T. Blast nam poda obtežbo, na neko točko. Objekt na katerega deluje eksplozija pa je večjih dimenzij, kar pomeni, da je potrebno fasado objekta razdeliti na več manjših ploskev in za vsako ploskev posebej s programom A.T. Blast določiti obtežbo. Na več manjših ploskev bomo fasado objekta razdelili, bolj natančno bo obtežba določena. Spodaj je prikazan potek določitve obtežbe na objekt, za primer delovanja eksplozije 25 kg TNT-ja, ki se zgodi na razdalji 12 m od objekta v liniji E4, ki je prikazana na sliki 3.14.

Najprej sem fasado stavbe razdelil na več ploskev, tako kot je prikazano na sliki 3.18. Vse ploskve so enakih dimenzij.



Slika 3.18: Fasada razdeljena na označene ploskve.

Za vsako ploskev posebej sem izračunal razdaljo od vira eksplozije in sredine ploskve. Izračunal sem tudi kot  $\alpha$  med ploskvijo in virom eksplozije. Izračunano razdaljo ( $r$ ) in kot  $\alpha$  sem vnesel v program A.T. Blast. Nato sem pognal program A.T. Blast, ki mi je izračunal še impulz ( $i$ ), tlak ( $p$ ) in trajanje obtežbe eksplozije ( $t_d$ ). To sem ponovil za vsako ploskev posebej. Spodaj so tabelarično prikazani rezultati za vse ploskve na fasadi na katero deluje eksplozija.

Preglednica 3.4: Rezultati obtežbe za vse ploskve v prvi etaži.

ploskev	$\alpha$ (°)	$r$ (m)	$I$ (kPa- $\mu$ s)	$p$ (kPa)	$t_d$ ( $\mu$ s)
A	33,69	14,42	336,6	101,08	6,66
B	26,57	13,41	378,11	117,56	6,43
C	18,43	12,65	417,55	133,76	6,24
D	9,46	12,17	446,71	145,96	6,12
E	0,00	12	457,95	153,06	5,98
F	9,46	12,17	446,71	145,96	6,12
G	18,43	12,65	417,55	133,76	6,24
H	26,57	13,41	378,11	117,56	6,43
I	33,69	14,42	336,6	101,08	6,66

Preglednica 3.5: Rezultati obtežbe za vse ploskve v drugi etaži.

ploskev	$\alpha$ (°)	r (m)	I (kPa- $\mu$ s)	p (kPa)	$t_d$ ( $\mu$ s)
A	33,69	15,11	320,33	91,98	6,97
B	26,57	14,15	357,08	105,08	6,79
C	18,43	13,43	391,21	117,56	6,66
D	9,46	12,97	416,03	126,59	6,57
E	0,00	12,82	425,48	132,52	6,42
F	9,46	12,97	416,03	126,59	6,57
G	18,43	13,43	391,21	117,56	6,66
H	26,57	14,15	357,08	105,08	6,79
I	33,69	15,11	320,33	91,98	6,97

Preglednica 3.6: Rezultati obtežbe za vse ploskve v tretji etaži.

ploskev	$\alpha$ (°)	r (m)	I (kPa- $\mu$ s)	p (kPa)	$t_d$ ( $\mu$ s)
A	33,69	16,26	296,47	79,70	7,44
B	26,57	15,37	326,67	88,87	7,35
C	18,43	14,71	354,05	97,22	7,28
D	9,46	14,29	373,56	103,01	7,25
E	0,00	14,15	380,73	107,56	7,08
F	9,46	14,29	373,56	103,01	7,25
G	18,43	14,71	354,05	97,22	7,28
H	26,57	15,37	326,67	88,87	7,35
I	33,69	16,26	296,47	79,70	7,44

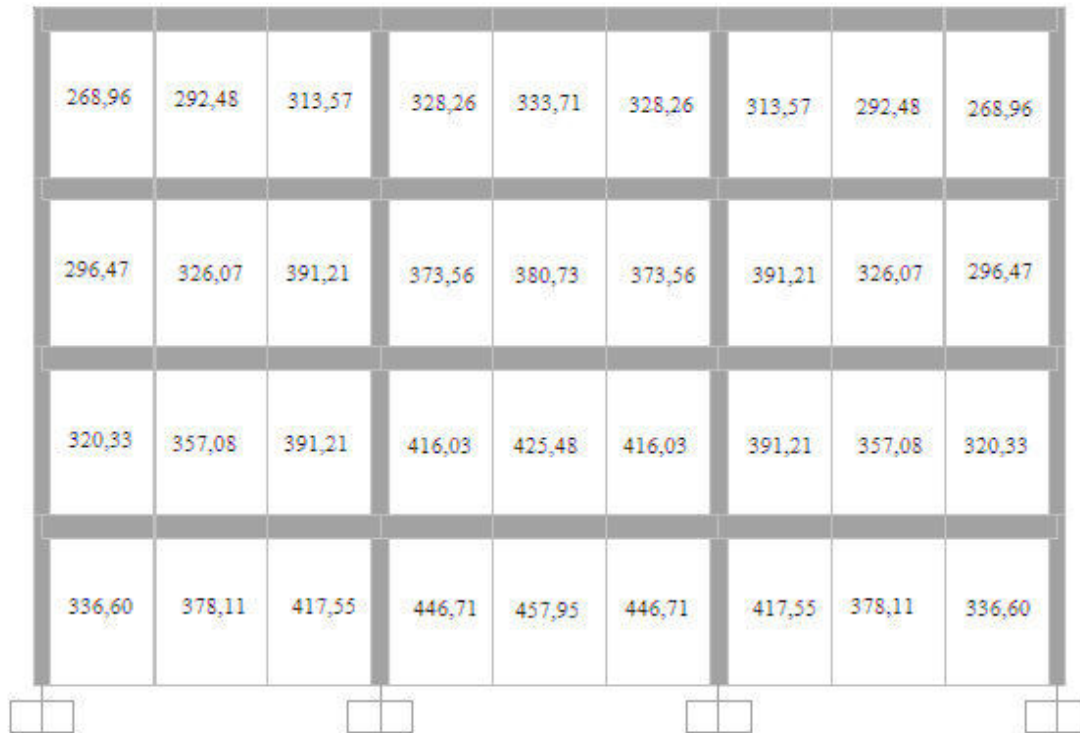


Preglednica 3.7: Rezultati obtežbe za vse ploskve v četrti etaži.

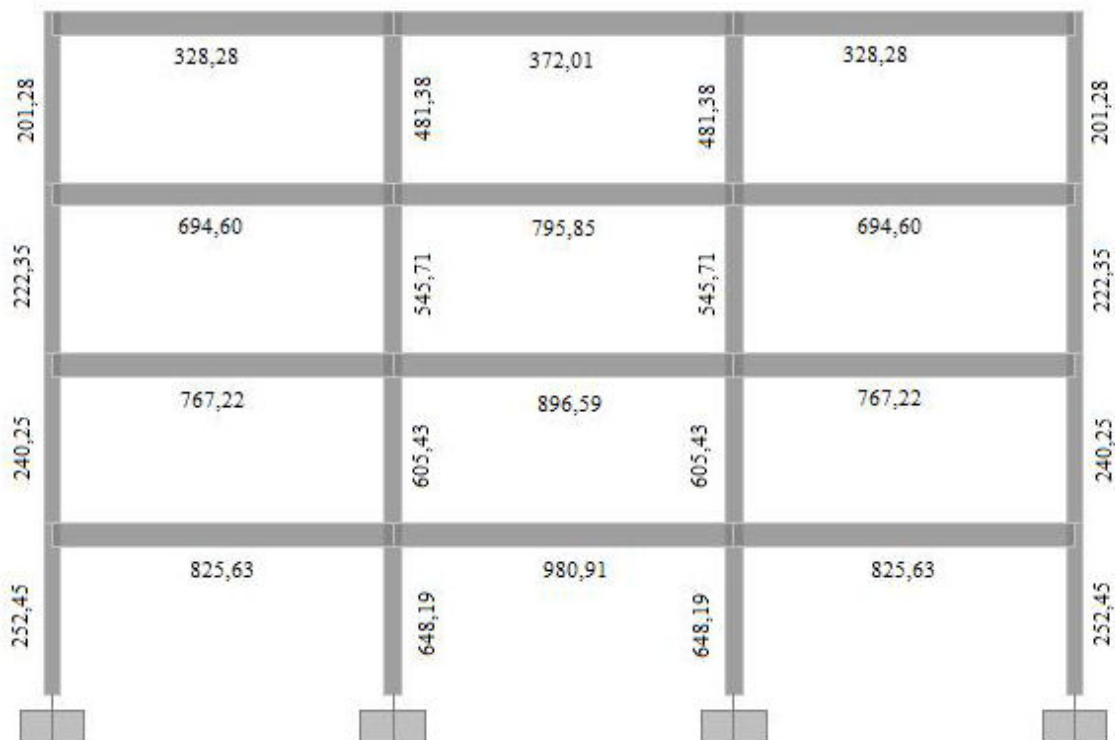
ploskev	$\alpha$ (°)	r (m)	I (kPa- $\mu$ s)	p (kPa)	$t_d$ ( $\mu$ s)
A	33,69	17,84	268,96	67,43	7,98
B	26,57	17,04	292,48	73,08	8,01
C	18,43	16,44	313,57	78,05	8,04
D	9,46	16,07	328,26	81,50	8,06
E	0,00	15,95	333,71	85,08	7,84
F	9,46	16,07	328,26	81,50	8,06
G	18,43	16,44	313,57	78,05	8,04
H	26,57	17,04	292,48	73,08	8,01
I	33,69	17,84	268,96	67,43	7,98

Na sliki 3.19 je prikazana obtežba impulza na objekt, za primer delovanja eksplozije, ki je zgoraj prikazan tabelarično. Lepo je razvidna razlika v obtežbi na sredinski ploskvi v prvi etaži, kjer je razdalja med eksplozijo in ploskvijo najmanjša in deluje pod kotom 0°, ter ploskvijo na skrajnem robu v zgornji etaži, kjer je razdalja do eksplozije večja in deluje pod večjim kotom.

Obtežbo eksplozije sem nato iz ploskev po vplivnicah porazdelil na stebre in prečke. Obtežba na stebrih in prečkah je prikazana na sliki 3.20.



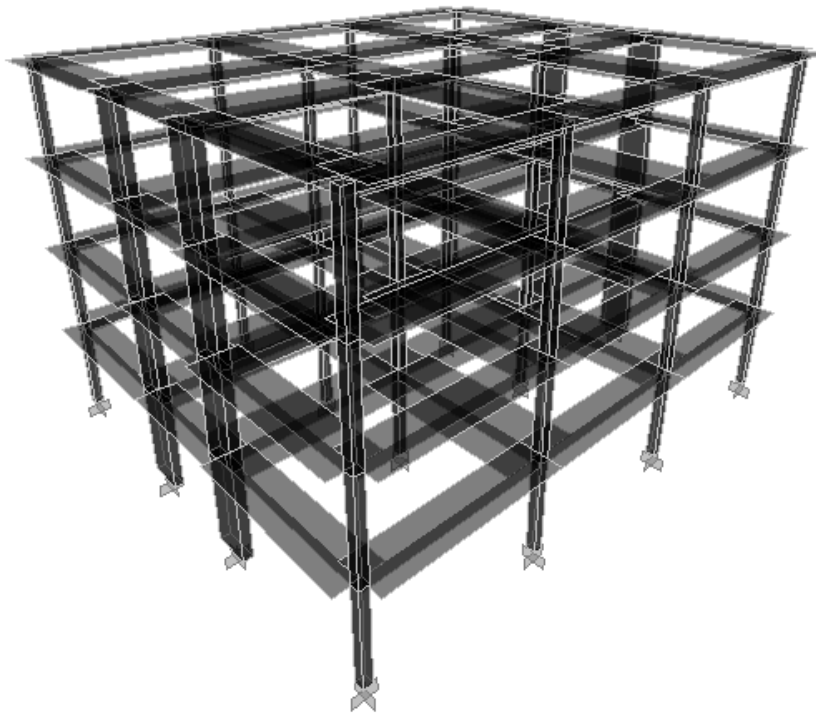
Slika 3.19: Obtežba na fasado objekta (enote kPa- $\mu$ s).



Slika 3.20: Obtežba na stebre in prečke (enote kN- $\mu$ s/m)

### 3.4.6 Modeliranje konstrukcije

Stavbo lahko modeliramo na več načinov, izmed vseh možnih pa je najbolje izbrati tistega, ki se dovolj natančno približa dejanskemu stanju, hkrati pa je dovolj enostaven za vnos podatkov in kontrolo rezultatov. Model konstrukcije, ki ga obravnavamo je poleg elastične analize primeren tudi za nelinearno analizo. Računski čas analize takšnega modela je zelo kratek, rezultati so pregledni, je pa potrebno nekoliko več dela za pripravo podatkov. Prostorski model je modeliran z linijskimi elementi tako, da je za vsak stebel in gredo upoštevan en končni element. Predpostavljeno je, da so plošče v svoji ravnini neskončno toge. Modelirane so bile z vezmi med vozlišči, ki se jih enostavno definira v programu SAP2000. Za dolžine stebrov je upoštevano, da potekajo od težišča grede v obravnavani etaži do težišča grede nad obravnavano etažo. Podobno je upoštevano, da elementi za grede potekajo od osi enega stebra, do osi drugega stebra. Razpokan prerez je upoštevan tako, da za vse grede in stebre izračunamo vztrajnostne momente po enačbi:  $I_{eff} = I_{gross} \cdot F$ , koeficient  $F$  odčitamo z grafa na sliki 3.9.



Slika 3.21: Slika konstrukcije v programu SAP2000.

Pri modeliranju prečk sem upošteval sodelujočo širino plošče, ki se izračuna s pomočjo enačb:

(3.16)

(3.17)

(3.18)

kjer so

$b_{eff}$ ..... sodelujoča širina pasnice

$b_w$ ..... širina grede

$b_i$ .....polovica svetlega razpona plošče levo in desno od obravnavane grede

$l_0$ .....razdalja med točkami ničelnih momentov grede,  $l_0$  je enak polovici dolžine grede

Ta način modeliranja prispevka plošče k togosti gred je primeren za nelinearne modele, za elastično analizo pa je praviloma na varni strani, saj sorazmerno velika širina pasnice poveča togost konstrukcije, kar pomeni posledično večjo obremenitev gred.

### 3.4.7 Modeliranje lastne, stalne teže in spremenljive obtežbe

Za lastno težo nosilne konstrukcije upoštevamo specifično težo  $\gamma=25\text{kN/m}^3$ . Na ta način je zajeta teža stebrov, gred in plošče. Poleg lastne teže konstrukcije je bila konstrukcija obtežena še s stalno in spremenljivo obtežbo. Stalna obtežba je bila v vseh etažah upoštevana, kot enakomerno porazdeljena obtežba  $2,7\text{ kN/m}^2$ . Karakteristične vrednosti spremenljive obtežbe so določene na osnovi standarda EN 1991-1-1, glede na namembnost posameznih površin. Obravnavan objekt spada v kategorijo A, zato znaša koristna obtežba  $2,0\text{ kN/m}^2$ . Pri določitvi mase se upošteva, da se masa izračuna iz lastne in stalne obtežbe G ter iz dela spremenljive obtežbe (EN 1998-1, člen 3.2.4):

(3.19)

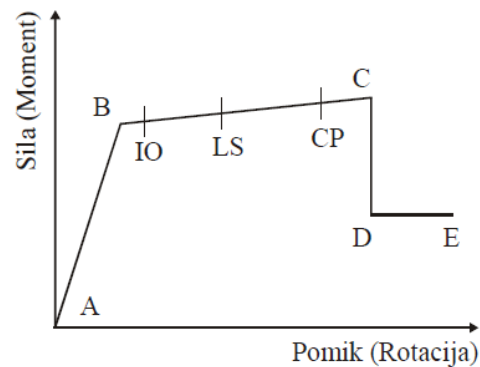
Kjer kombinacijski koeficient  $\Psi_{2i}$  znaša 0,3 (EN 1990, preglednica A.1.1), saj obravnavano konstrukcijo uvrstimo v kategorijo A. Ob predpostavki, da so etaže obremenjene med seboj neodvisno (EN 1998-1, preglednica 4.2), sledi, da je faktor  $\phi$  v prvih, drugi in tretji etaži enak  $\phi_{1,2,3}=0,5$ , v četrti pa  $\phi_4=1$ . V prvih treh etažah tako pri računu mase upoštevamo 15% spremenljive obtežbe, v četrti (zgornji) pa 30%.

#### 3.4.8 Modeliranje plastičnih členkov

Vsak linijski element ima lahko več plastičnih členkov, ki so razporejeni poljubno glede na os linijskega elementa. Plastični členek predstavlja koncentrirano plastičnost (materialno nelinearnost). Plastične členke lahko definiramo za različne količine: osna sila – pomik, prečna sila – pomik, moment – zasuk ter za interakcijo med dvo-osnim upogibom in osno silo. Pri slednji vrsti plastičnega členka je tečenje definirano s površino interakcijskega diagrama, ki je določen na osnovi dvoosnega upogiba in osne sile.

Deformacijska energija členka je lahko definirana z obliko krivulje, ki je prikazana na sliki 3.22. Oblika je določena s petimi točkami: A – vedno predstavlja izhodišče; B – predstavlja točko tečenja (prvo plastičnost členka). Deformacija se v plastičnem členku ne pojavi pred točko B, čeprav je deformacija za točko B lahko podana. V tem primeru, ko je podan pomik (rotacija) za točko B, se le ta odšteje od podanih deformacij v točki C, D, E tako, da se v plastičnih členkih upoštevajo le plastične deformacije; C – predstavlja mejno nosilnost, D – predstavlja preostalo nosilnost, po delni porušitvi; E – predstavlja popolno porušitev. Opisana je le privzeta oblika deformacijske krivulje členka, ki je definirana v FEMA-273 (FEMA 1997). Obliko ovojnice se lahko poljubno spreminja, v točkah B, C, D in E.

Vmesna stanja IO (*angl. Immediate Occupancy*), LS (*Life Safety*) in CP (*Collapse Prevention*) so informativna stanja poškodovanosti (slika), ki jih lahko podamo za plastični členek, vendar na analizo ne vplivajo.



Slika 3.22: Oblika deformacijske krivulje plastičnega členka. (Dolšek M., 2004, str. 4)

Plastične členke za obravnavan objekt sem izračunal tako, da sem v stebrih najprej izračunal vrednosti osnih sil, v gredah so osne sile enake ničli. Vsakemu prerezu sem za vrednost osne sile z interakcijskim diagramom določil pripadajoči moment. Plastični del mejnih rotacij se izračuna po enačbi:

kjer so:

$\gamma_{el}$  koeficient, ki je v mojem primeru 1,8  
 $v$  normirana osna sila v elementu (3.21)

$\omega$  mehanski delež armiranja v natezni coni

$\omega'$  mehanski delež armiranja v tlačni coni

$f_c$  trdnost betona

$L_v$  razdalja do nične točke momenta (3.22)

$h$  širina elementa v smeri obtežbe

$f_{yw}$  natezna trdnost stremenske armature

$f_y$  natezna trdnost vzdolžne armature

$\rho_d$  delež diagonalne armature

$S_h$  razmik stremen

$b_0$       dimenzija od stremena do sredine zanke  
 $h_0$       dimenzija od stremena do sredine zanke  
 $b_w$       višina stojine  
 $\alpha$       faktor objetja betonskega prereza      —      —      —      (3.23)

$\rho_{sx}$       delež stremenske armature      (3.24)

Za vsak element v obravnavanem objektu tako določimo plastične členke po zgoraj opisanem postopku. Potrebno je določiti še ovojnico za plastični členek. Predpostavi se elastično – plastično obnašanje plastičnih členkov. Za elasto – plastično ovojnico je zadosten podatek, če vnesemo moment na meji elastičnosti. Plastične členke je potrebno v programu SAP2000 še prirediti pripadajočim elementom.

#### 3.4.9 Modalna analiza obravnavanega objekta

Modeliran objekt v programu SAP2000, analiziramo z modalno analizo, iz katere dobimo odzivni čas objekta  $T$ . Ta čas potrebujemo zato, da v odvisnosti razmerja med trajanjem obtežbe udarnega vala eksplozije in časa lastnega nihanja konstrukcije določimo na kakšen način bo eksplozivna obtežba delovala na konstrukcijo (statično, dinamično, impulzivno). Lahko pa se ga izračuna po enačbi 3.26.



kjer so

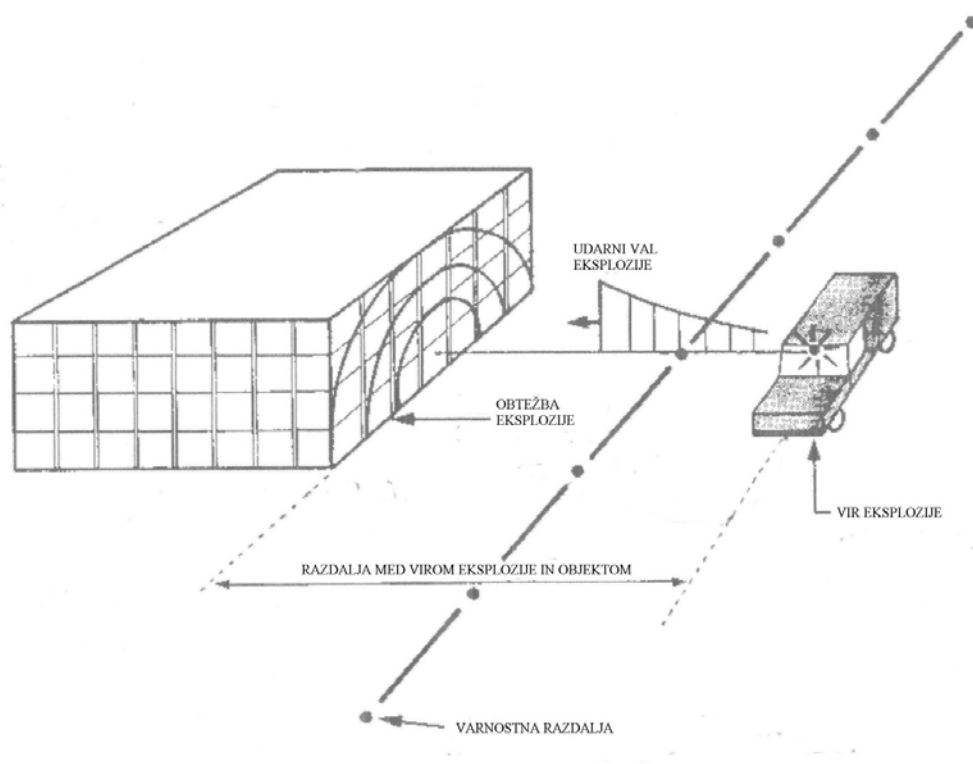
$M$ .....masa elementa

$K_{LM}$ ... koeficient obtežbe in mase (odčita se ga iz tabele 3.2)

$k_e$ ..... togost v elastičnem območju

### 3.4.10 Določitev varnostne razdalje med virom eksplozije in obravnavanim objektom.

Eksplozija lahko povzroči take lokalne poškodbe, da lahko pride do progresivnega rušenja stavbe. Cilj te analize je, da ugotovim kako daleč stran od stavbe se mora zgoditi eksplozija (25 kg, 250 kg in 1250 kg eksploziva TNT), da ne pride do progresivnega rušenja stavbe. To razdaljo imenujemo varnostna razdalja.



Slika 3.23: Varnostna razdalja med virom eksplozije in objektom na katerega eksplozija deluje.

Najprej je potrebno ugotoviti, porušitve katerih stebrov privedejo do progresivnega rušenja stavbe. Za vse prečke objekta sem s pomočjo računalniškega programa Gala (AEC Constructions) izračunal mejne vrednosti momentov. To sem naredil tako, da sem v program Gala vnesel dimenzije prereza elementa, prerez armature in vse karakteristike materiala. Program mi je s interakcijskim diagramom podal mejne vrednosti momentov. Pri prečkah sem upošteval sodelujočo širino plošče.

V nadaljevanju, sem določil na kateri lokaciji eksplozija povzroča največjo obtežbo. Nato sem v programu SAP2000 modeliral steber in ga obremenil z obtežbo, ki jo povzroča eksplozija na



tej lokaciji. V programu SAP2000 sem steber modeliral, tako da sem upošteval njegov prerez in material. Tako kot pri dimenzioniranju elementov obremenjenih z obtežbo eksplozije je treba tudi tukaj upoštevati, da je zaščitni sloj porušen na obeh straneh. To se upošteva tako, da se vztrajnostni moment izračuna z enačbo 3.7. Upoštevati je potrebno tudi koeficient  $K_{LM}$  za obtežbo in maso. Izračunan vztrajnostni moment  $I$ , ter koeficient  $K_{LM}$ , se vnese tudi med podatke za element v programu SAP2000. Steber sem nato v programu SAP2000 analiziral z modalno analizo. V kolikor je moment, ki ga povzroči obtežba eksplozije večji od mejnega momenta, ki se ga določi z enačbo 3.26, pomeni, da je steber porušen.

kjer so

$A_s$ ..... prerez natezne armature

$z$ .....ročica med sredino armature, ki je v napetosti in tlačno cono

$b$ ..... širina elementa

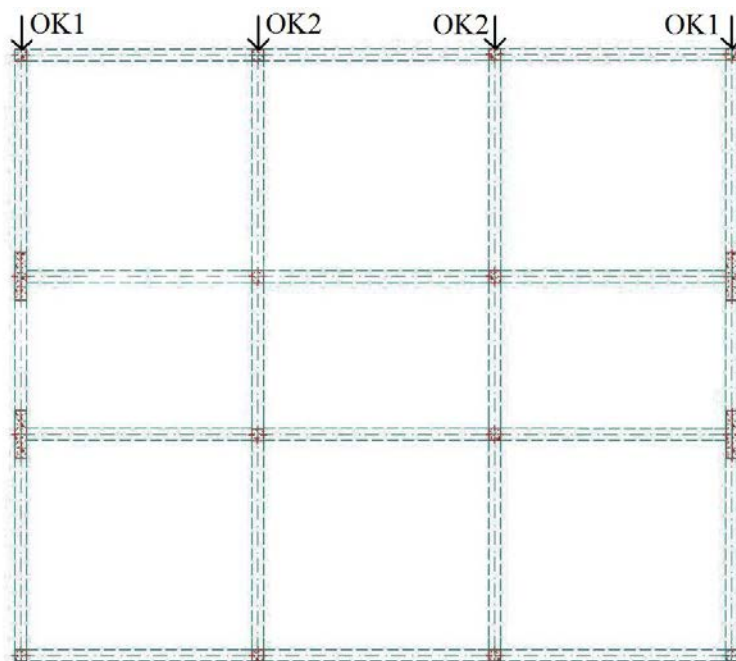
$f_y$ .....računska natezna trdnost armature

Nato sem že modeliranemu objektu v programu SAP2000 smiselno odstranjeval stebre in določil različne kombinacije odstranjenih stebrov. Za vsako kombinacijo odstranjenih stebrov sem naredil statično analizo stavbe. Po končani statični analizi sem preveril vse notranje sile, ki jih povzročajo lastna, stalna in spremenljiva obtežba. Preveril sem ali so presežene mejne vrednosti notranjih sil v posameznih elementih. Za elemente, kjer so presežene mejne vrednosti notranjih sil se predvideva, da so porušeni in sem jih odstrani. Ponovno sem naredi statično analizo, v kolikor so bile mejne vrednosti v ostalih elementih presežene, pomeni, da je zaradi lokalne porušitve določenih stebrov prišlo do progresivnega rušenja objekta. S to analizo sem tako dobil vse kombinacije porušanih stebrov, ki privedejo do progresivnega rušenja stavbe.

V kolikor je bila obtežba na tej lokaciji postavitve vira eksplozije tolikšna, da poruši takšno kombinacijo stebrov, da pride do progresivnega rušenja stavbe, pomeni, da moram izbrati novo lokacijo postavitve vira eksplozije. To lokacijo izberemo na večji razdalji in še enkrat narediti celotno analizo.

### 3.4.11 Nelinearna statična analiza

Za opazovanje globalnega odziva obravnavanega objekta je potrebno narediti nelinearno statično analizo. Nelinearna statična analiza je sestavljena iz poljubnega števila zaporednih obtežnih primerov. Za objekt, ki ga obravnavam je potrebno narediti nelinearno analizo zaradi horizontalnih sil, ki jih povzročata obtežba eksplozije. Pri tej analizi sem krmilil pomike. V splošnem lahko uporabljamo različne vrste nelinearnosti, kot je materialna nelinearnost v diskretnih točkah linijskih elementov (plastični členki) ali geometrijska nelinearnost v vseh vrstah elementov, ki so vgrajeni v program (P-delta, teorija drugega reda). Za obravnavan objekt sem naredil analizo materialne nelinearnosti v diskretnih točkah linijskih elementov (plastični členki). S to analizo sem prikazal doseženo stanje v plastičnih členkih. Analizo sem krmilil s pomikom. Stanje plastičnih členkov bo prikazano na okvirjih, ki so prikazani na sliki 3.24.



Slika 3.24: Prikaz okvirjev na katerih bo po končani analizi prikazano stanje plastičnih členkov.

## 3.5 REZULTATI

### 3.5.1 Rezultati modalne analize

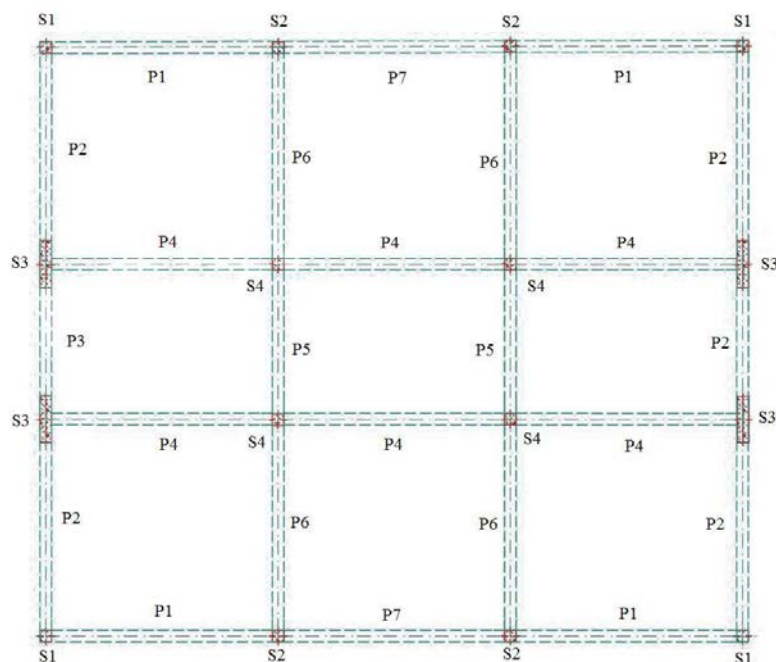
Z modalno analizo obravnavanega objekta v programu SAP2000 je bil izračunan čas lastnega nihanja objekta  $T$  in krožna frekvenca  $\omega$ . Nihajni čas v smeri  $x$  znaša 0,120 s, v smeri  $y$  pa znaša 0,123 s. Krožna frekvenca v smeri  $x$  znaša 51,83 rad/s, medtem, ko v smeri  $y$  znaša 51,96 rad/s. Naredil sem tudi izračun kako dolgo mora trajati obtežba na obravnavan objekt, da lahko govorimo o impulznem, dinamičnem ali kvazi – statičnem odzivu objekta. V kolikor obtežba eksplozije na obravnavan objekt traja manj kot 12,1  $\mu$ s, gre za impulzno obtežbo. Kadar pa obtežba traja več kot 12,1  $\mu$ s in manj kot 1210  $\mu$ s, gre za dinamično obtežbo. Kvazi–statična obtežba je v primeru, ko je trajanje obtežbe daljše kot 1210  $\mu$ s.

### 3.5.2 Varnostna razdalja med virom eksplozije in obravnavanim objektom

#### 3.5.2.1 Kombinacije porušenih stebrov, katere vodijo v progresivno rušenje stebrov

Določiti je potrebno, porušitev katerih kombinacij stebrov privede do progresivnega rušenja stavbe. Najprej sem izračunal mejne momente prečk. Izračunal sem jih s pomočjo računalniškega programa Gala. Pri prečkah sem upošteval sodelujočo širino plošče. Na sliki 3.25 so označene vse prečke in stebri. Rezultati sodelujoče širine plošče so prikazani v tabeli 3.8. V tabeli 3.9 pa so podani rezultati mejnih momentov za vsako prečko.

V nadaljevanju so prikazane vse kombinacije porušitve stebrov, ki vodijo v progresivno rušenje stavbe. Tloris obravnavane stavbe je simetričen, zato so rezultati prikazani le za dve strani stavbe, za drugi dve strani veljajo enaki rezultati. V programu SAP2000, so za vsako kombinacijo porušenih stebrov prikazani statični izračuni stavbe brez porušenih stebrov. V kolikor statična analiza stavbe brez določenih stebrov pokaže večje vrednosti momentov od mejnih vrednosti momentov, pomeni, da je ta element porušen.



Slika 3.25: Tloris obravnavanega objekta, na katerem so označene prečke in stebri, prečke so označene z črko P, stebri pa z črko S.

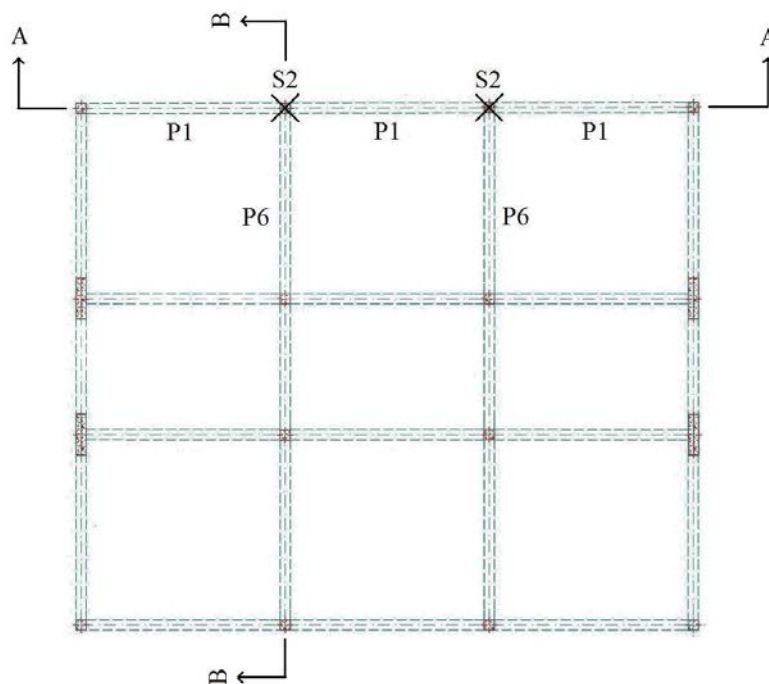
Preglednica 3.8: Sodelujoča širina plošče pri določenih prečkah, ki so označene na sliki 3.25.

Greda	Sodelujoča širina (cm)
P1, P2	143
P3	127
P4	240
P5	218
P6	256
P7	143

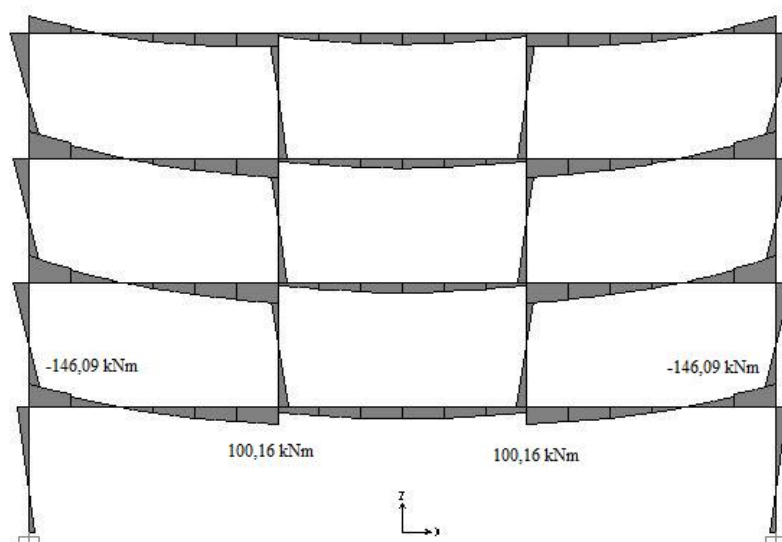
Preglednica 3.9: Mejni momenti (enote kNm) v prečkah, prečke so označene na sliki 3.25.

Prečka	Mejni moment (+)	Mejni moment (-)
P1	41	147
P2	71	166
P3	41	106
P4	89	238
P6	71	287
P7	80	195

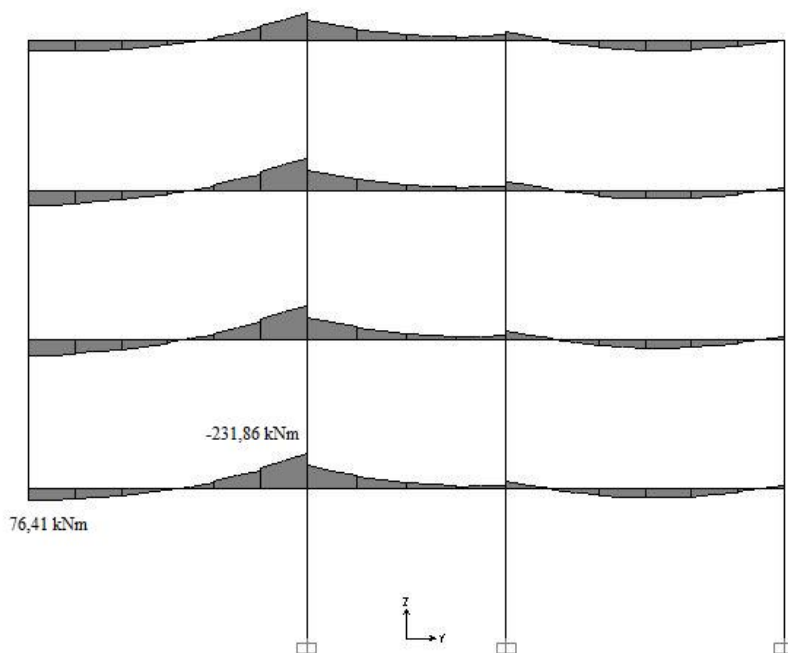
Porušitev dveh sosednjih stebrov S2, kot je prikazano na sliki 3.26. S statično analizo obravnavane stavbe brez teh dveh stebrov, sem preveril, ali so mejni momenti v elementu preseženi.



Slika 3.26: Tloris stavbe, označena sta porušena oba stebra S2.



Slika 3.27: Prerez A - A, prikaz momentov, statične analize brez dveh stebrov S2.



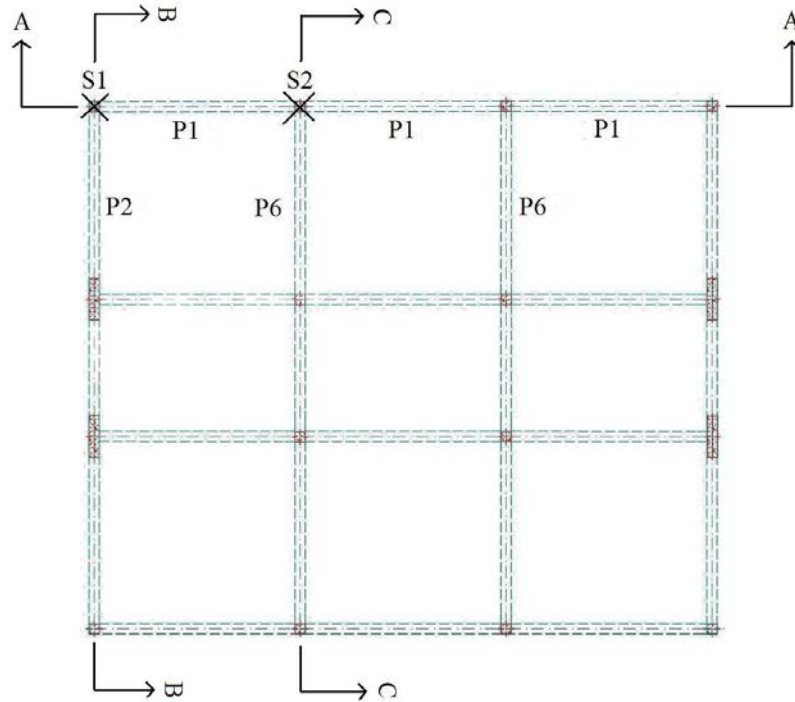
Slika 3.28: Prerez B - B, prikaz momentov, statične analize brez dveh stebrov S2.

Prečke, kjer je presežen mejni moment:

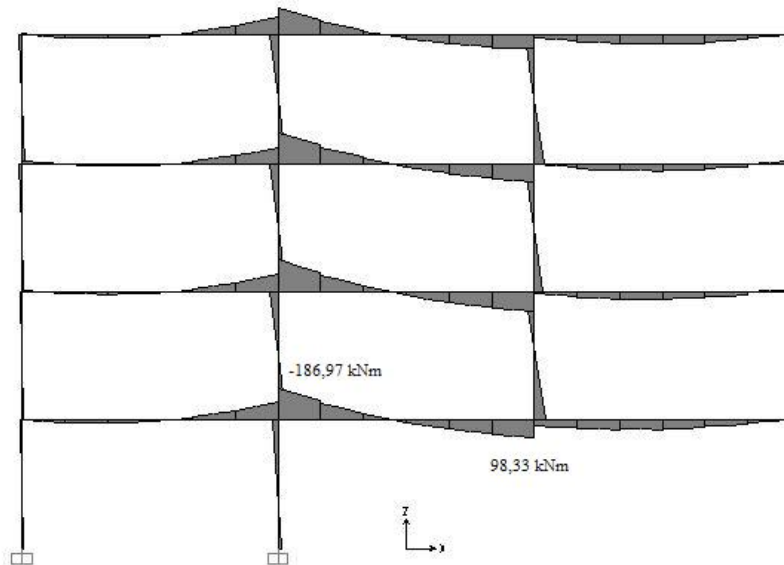
Prečka P1:  $M_{\text{mejni}} = 41,0 \text{ kNm} < M_{\text{dejansi}} = 100,16 \text{ kNm}$

Prečka P6:  $M_{\text{mejni}} = 71,0 \text{ kNm} < M_{\text{dejansi}} = 76,41 \text{ kNm}$

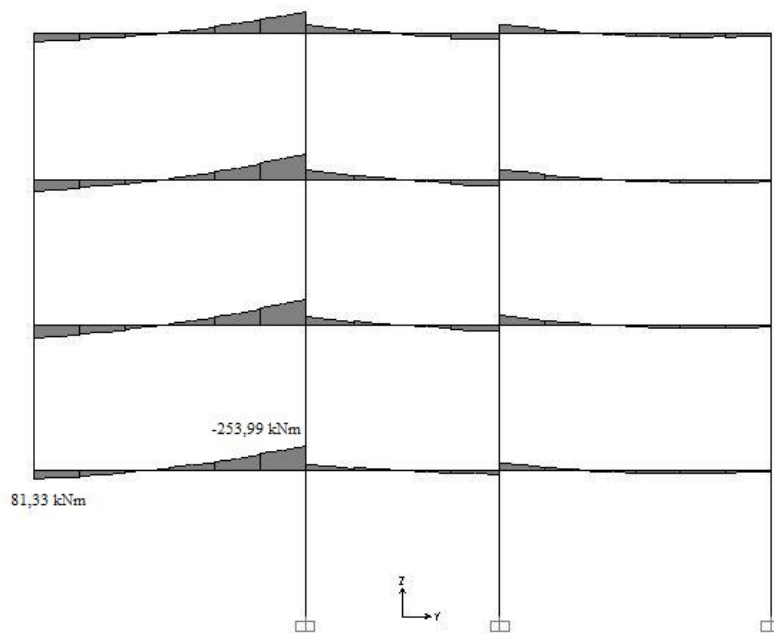
Porušitev dveh sosednjih stebrov S2 in S1 kot je prikazano na sliki 3.29. S statično analizo obravnavane stavbe brez teh dveh stebrov, sem preveril, ali so mejni momenti v elementu preseženi.



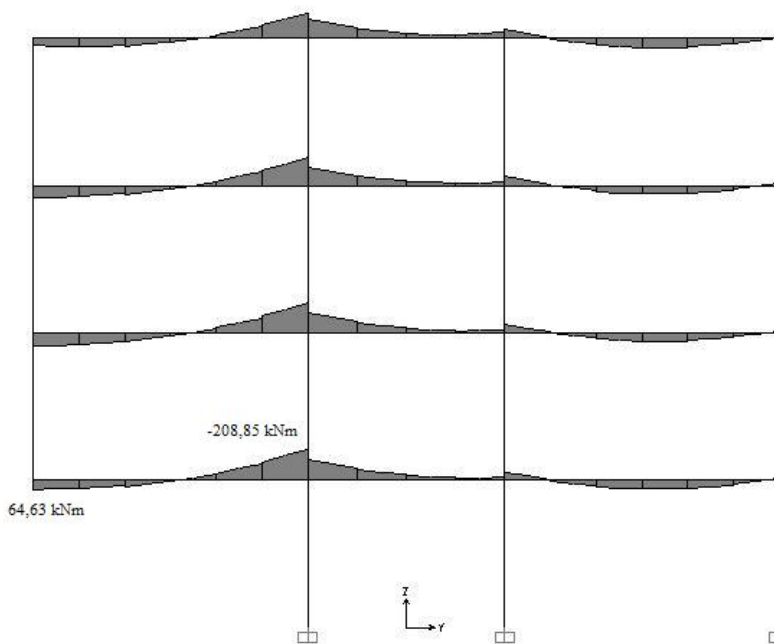
Slika 3.29: Tloris stavbe, označena sta porušena stebra S1 in S2.



Slika 3.30: Prerez A - A, prikaz momentov, statične analize brez dveh stebrov S2 in S1.



Slika 3.31: Prerez B-B, prikaz momentov, statične analize brez dveh stebrov S2 in S1.



Slika 3.32: Prerez C - C, prikaz momentov, statične analize brez dveh stebrov S2 in S1.



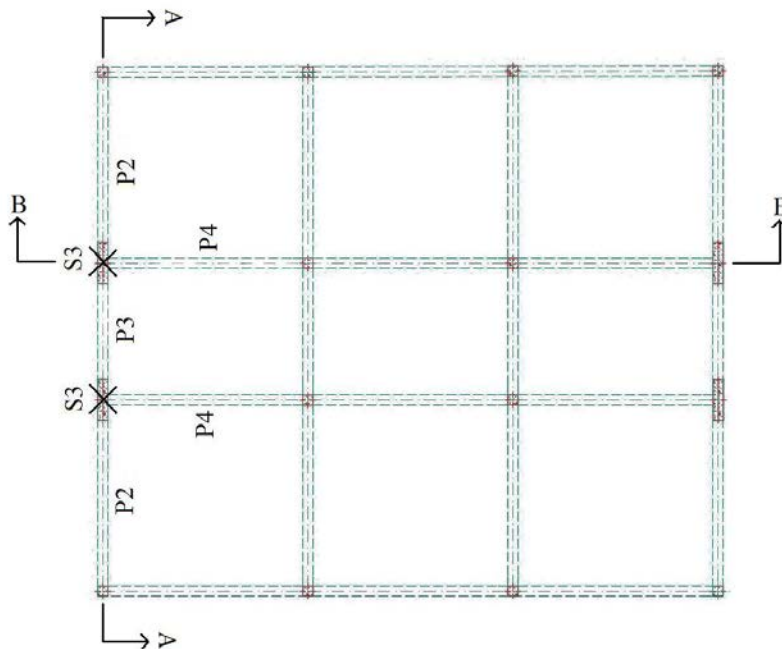
Prečke, kjer je presežen mejni moment:

Prečka P7:  $M_{\text{mejni}} = 80,0 \text{ kNm} < M_{\text{dejansi}} = 98,33 \text{ kNm}$

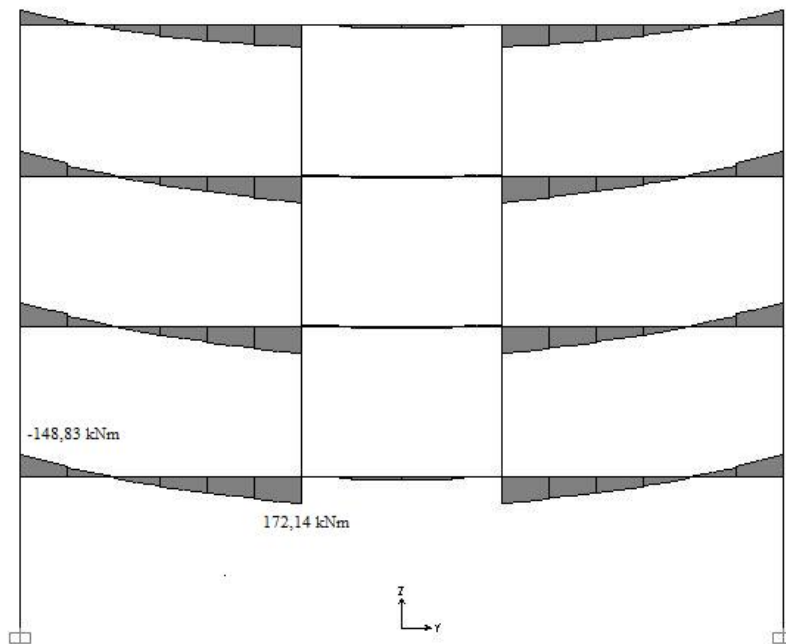
Prečka P2:  $M_{\text{mejni}} = -253,0 \text{ kNm} < M_{\text{dejansi}} = -253,99 \text{ kNm}$

Prečka P2:  $M_{\text{mejni}} = 55,0 \text{ kNm} < M_{\text{dejansi}} = 81,33 \text{ kNm}$

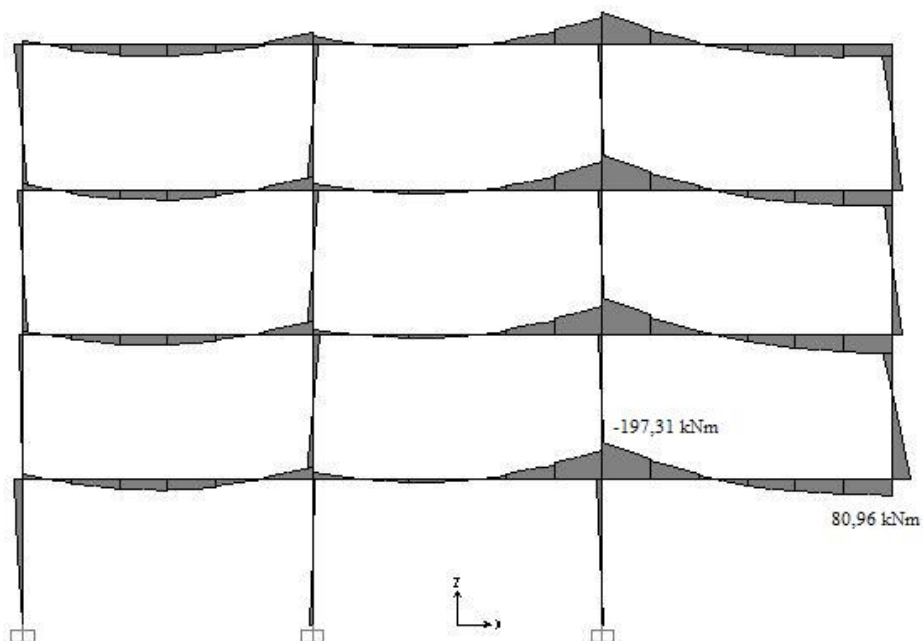
Porušitev dveh sosednjih stebrov S3, kot je prikazano na sliki 3.33. S statično analizo obravnavane stavbe brez teh dveh stebrov, sem preveril, ali so mejni momenti v elementu preseženi.



Slika 3.33: Tloris stavbe, označena sta porušena stebra S3.



Slika 3.34: Prerez A - A, prikaz momentov, statične analize brez dveh stebrov S3.



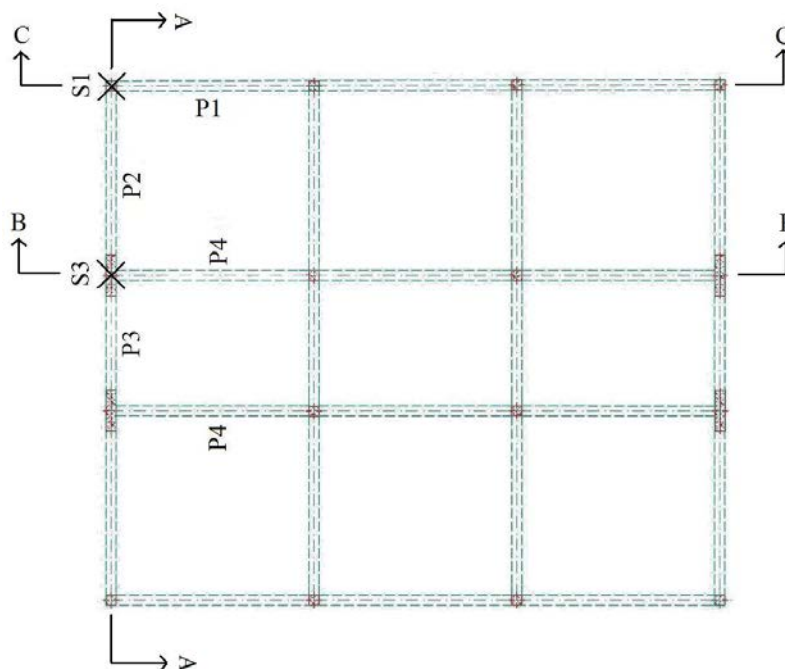
Slika 3.35: Prerez B - B, prikaz momentov, statične analize brez dveh stebrov S3.

Prečke, kjer je presežen mejni moment:

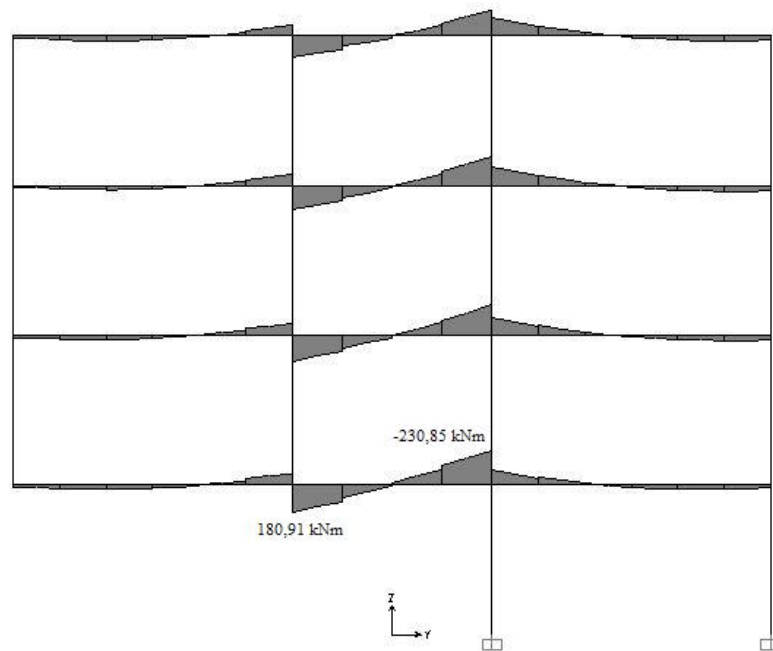
Prečka P4:  $M_{\text{mejni}} = 41,0 \text{ kNm} < M_{\text{dejansi}} = 80,96 \text{ kNm}$

Prečka P2:  $M_{\text{mejni}} = 71,0 \text{ kNm} < M_{\text{dejansi}} = 172,14 \text{ kNm}$

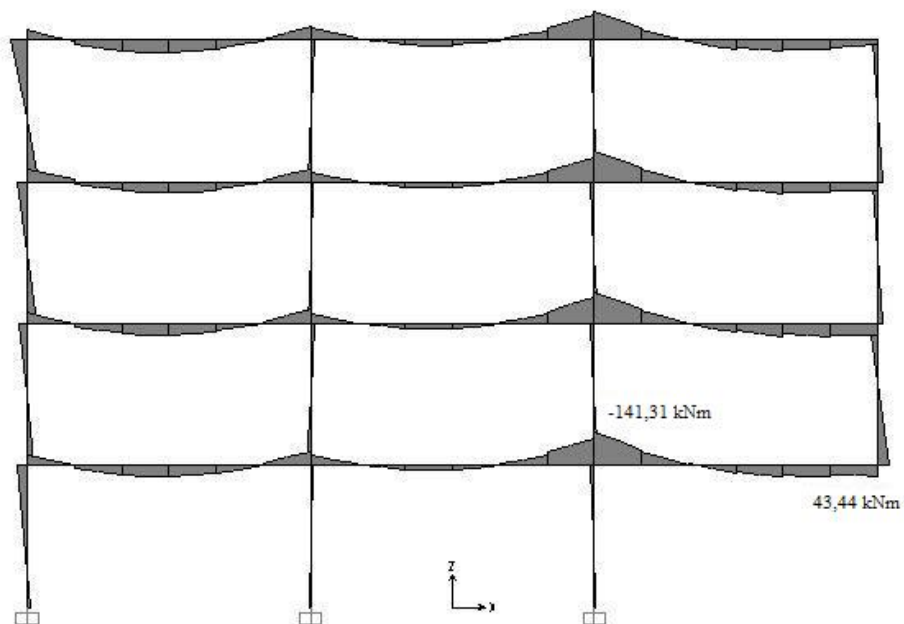
Porušitev dveh sosednjih stebrov S3 in S1, kot je prikazano na sliki 3.36. S statično analizo obravnavane stavbe brez teh dveh stebrov, sem preveril, ali so mejni momenti v elementu preseženi.



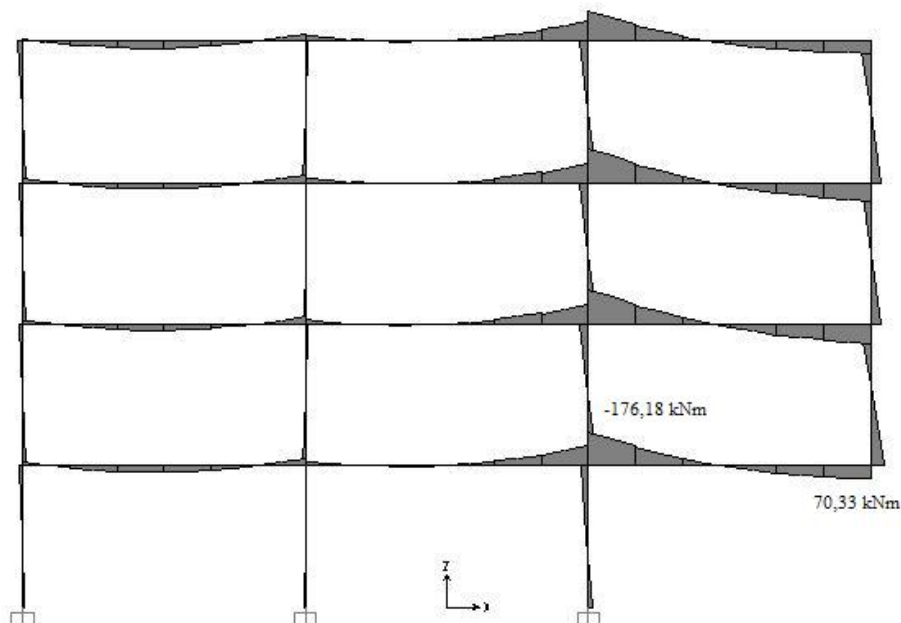
Slika 3.36: Tloris stavbe, označena sta porušena stebra S3 in S1.



Slika 3.37: Prerez A - A, prikaz momentov, statične analize brez dveh stebrov S3 in S1.



Slika 3.38: Prerez B - B, prikaz momentov, statične analize brez dveh stebrov S3 in S1.



Slika 3.39: Prerez C - C, prikaz momentov, statične analize brez dveh stebrov S3 in S1.

Prečke, kjer je presežen mejni moment:

Prečka P1:  $M_{\text{mejni}} = 41,0 \text{ kNm} < M_{\text{dejansi}} = 70,33 \text{ kNm}$

Prečka P3:  $M_{\text{mejni}} = -106,0 \text{ kNm} < M_{\text{dejansi}} = -230,85 \text{ kNm}$

### 3.5.2.2 Mejni momenti stebrov v prvi etaži ( $M_{\text{rd}}$ ).

Zgoraj sem določil, porušitev katerih kombinacij stebrov privedejo, do rušenja stavbe. Sedaj je potrebno določiti še mejne momente stebrov, da bom v nadaljevanju lahko videl ali določena eksplozija poruši steber. Stebri so označeni na sliki 3.25.

Steber S1:  $M_{\text{rd}} = 628,40 \text{ kNm}$

Steber S2:  $M_{\text{rd}} = 628,40 \text{ kNm}$

Steber S3:  $M_{\text{rd}} = 282,40 \text{ kNm}$

### 3.5.2.3 Določitev varnostne razdalje za eksploziv mase polnitve 25 kg TNT

Vir eksplozije sem postavljajal po točkah okoli objekta, ki so prikazane na sliki 3.14. Največjo obtežbo eksplozije na severni ali južni strani objekta predstavlja eksplozija, ki se zgodi v liniji E4 (glej sliko 3.14). V tem primeru sta najbolj obremenjena sosednja stebra S2. Na oba stebra deluje enaka obtežba. Začel sem z obtežbo eksplozije na razdalji enega metra. Obtežbo sem nanesel na model stebra v programu SAP2000, po končani analizi sem preveril momente. Rezultati so prikazani v tabeli 3.10. Iz rezultatov je vidno, da takšna eksplozija na steber S2 ne povzroči zadostne obtežbe, da bi porušila ta steber, kajti mejni moment stebra ni presežen.

Preglednica 3.10: Rezultati analize za eksplozijo na severni ali južni strani objekta.

razdalja (m)	1
obtežba na steber S2 (kN/m)	1568,08
trajanje obtežbe na steber S2 ( $\mu$ s)	0,42
M (kNm)	213,15

Največjo obtežbo eksplozije na vzhodni ali zahodni strani objekta predstavlja eksplozija, ki se zgodi v liniji B4 (glej sliko 3.14). V tem primeru sta najbolj obremenjena sosednja stebra S3. Na oba stebra deluje enaka obtežba. Ponovil sem enak postopek analize kot za obtežbo na severni ali južni strani objekta. Rezultati so prikazani v tabeli 3.11. Iz rezultatov je vidno, da takšna eksplozija na steber S3 ne povzroči zadostne obtežbe, da bi porušila ta steber, kajti mejni moment stebra ni presežen.

Preglednica 3.11: Rezultati analize za eksplozijo na vzhodni ali zahodni strani objekta.

razdalja (m)	1
obtežba na steber S3(kN/m)	5447,75
trajanje obtežbe na steber S3 ( $\mu$ s)	0,35
M (kNm)	167,88

Preveril sem še delovanje eksplozij, ki se zgodijo v liniji s stebri, te linije so E1, E3, E5, E7, B1, B3, B5, B7 (glej sliko 3.14). Takšna eksplozija na razdalji enega metra sicer poruši najbolj izpostavljen steber, vendar je vpliv na sosedni steber že tako majhen, da sosednjega stebra ne poruši. Na razdalji dveh metrov pa eksplozija, ki se zgodi v navedenih linija ne poruši nobenega stebra.

Iz rezultatov je razvidno, da eksplozija mase ekvivalenta 25 kg TNT, na obravnavanem objektu, ne more povzročiti takih lokalnih poškodb, da bi prišlo do porušitve objekta. Eksplozija lahko poruši katerikoli steber na obravnavanem objektu, kolikor je vir eksplozije postavljen direktno v liniji stebra in je oddaljena manj kot 2 m. Porušitev enega stebra pa ne zadošča, da bi se objekt porušil.

#### 3.5.2.4 Določitev varnostne razdalje za eksploziv mase polnitve 250 kg TNT

Vir eksplozije sem postavljajal povsem enako, kot sem to storil pri eksploziji 25 kilogramov TNT. V primeru eksplozije 250 kilogramov TNT, na severni ali južni strani je mesto postavitve vira eksplozije, ki povzroči največjo obtežbo na objekt enako kot pri eksploziji 25 kilogramov. V tem primeru gre za veliko večjo obtežbo zato sem začel z obtežbo eksplozije na razdalji desetih metrov. Vse do razdalje 24 m, do koder je trajala obtežba toliko časa, da je bil odziv konstrukcije impulzen, je tovrstna obtežba porušila vsaj dva stebra, tako, da je prišlo do rušenja stavbe. Na razdalji 25 m pa je odziv objekta dinamičen in ta obtežba ni delovala destruktivno na stebre. Rezultati za eksplozijo na razdalji 25 metrov so prikazani v tabeli 3.12. Iz rezultatov je vidno, da takšna eksplozija na steber S2 ne povzroči zadostne obtežbe, da bi porušila ta steber, kajti mejni moment stebra ni presežen.

Preglednica 3.12: Rezultati analize za eksplozijo na severni ali južni strani objekta.

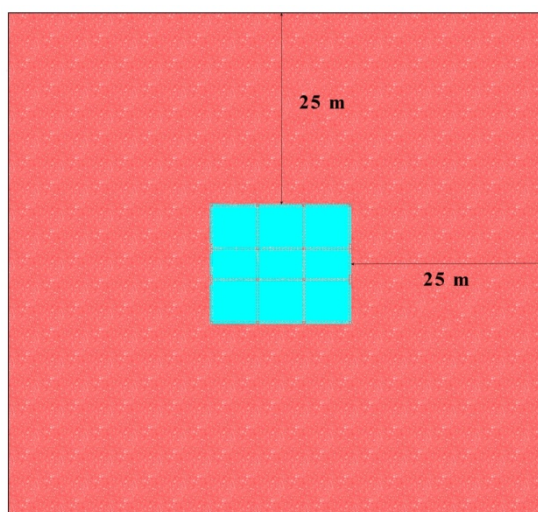
razdalja (m)	22 (impulzen odziv)	25 (dinamičen odziv)
obtežba na steber S2 (kN/m)	1745,59	240,09
trajanje obtežbe na steber S2 ( $\mu$ s)	10,65	12,54
M (kNm)	1098,79	159,7

Za eksplozijo, ki se zgodi na vzhodni ali zahodni strani objekta, je mesto postavitve vira eksplozije, ki povzroči največjo obtežbo na objekt enako kot pri eksploziji 25 kg. Ponovil sem postopek, ki sem ga naredil že za severno ali južno stran objekta, le da sta na vzhodni ali zahodni strani najbolj izpostavljena stebra S3. Vse do razdalje 24 m, do koder je trajala obtežba toliko časa, da je bil odziv konstrukcije impulzen, je tovrstna obtežba porušila oba stebra S3, tako, da je prišlo do rušenja stavbe. Na razdalji 25 m pa je odziv objekta tudi na tej strani dinamičen in dinamična obtežba ni delovala destruktivno na stebra S3. Rezultati za eksplozijo na razdalji 25 m so prikazani v tabeli 3.13. Iz rezultatov je vidno, da takšna eksplozija na steber S3 ne povzroči zadostne obtežbe, da bi porušila ta steber, kajti mejni moment stebra ni presežen.

Preglednica 3.13: Rezultati analize za eksplozijo na vzhodni ali zahodni strani objekta.

razdalja (m)	22 (impulzen odziv)	25 (dinamičen odziv)
obtežba na steber S2 (kN/m)	1761,85	218,99
trajanje obtežbe na steber S2 ( $\mu$ s)	10,71	12,58
M (kNm)	987,05	143,62

Iz rezultatov je vidno, da eksplozija mase polnitve 250 kg TNT, ne more povzročiti takšnih lokalnih poškodb zaradi katerih bi prišlo do porušitve obravnavanega objekta na razdalji 25 metrov in več.



Slika 3.40: Varnostno območje, za eksplozijo avto bombe ekvivalenta 250 kg TNT.



### 3.5.2.5 Določitev varnostne razdalje za eksploziv mase polnitve 1250 kg TNT

Vir eksplozije sem na severni in južni strani postavljaj povsem enako, kot sem to storil pri eksploziji 25 kg oziroma 250 kg TNT. V primeru eksplozije 1250 kg TNT, sem izvedel popolnoma enak računski postopek kot za eksplozijo 250 kg TNT. V tem primeru gre za še večjo obtežbo zato sem začel z obtežbo eksplozije računati na razdalji petindvajset metrov. Vse do razdalje 29 m, do koder je trajala obtežba toliko časa, da je bil odziv konstrukcije impulzen, je tovrstna obtežba porušila vsaj dva stebra, tako, da je prišlo do rušenja stavbe. Na razdalji 29 m pa je odziv objekta dinamičen in ta obtežba ni delovala destruktivno na stebre. Rezultati za eksplozijo na razdalji 29 m so prikazani v tabeli 3.14. Iz rezultatov je vidno, da takšna eksplozija na steber S2 ne povzroči zadostne obtežbe, da bi porušila ta steber, kajti mejni moment stebra ni presežen.

Preglednica 3.14: Rezultati analize za eksplozijo na severni ali južni strani objekta.

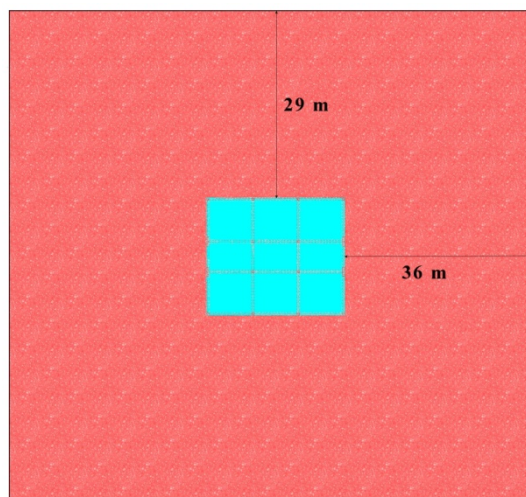
razdalja (m)	25 (impulzen odziv)	29 (dinamičen odziv)
obtežba na steber S2 (kN/m)	4835,06	653,10
trajanje obtežbe na steber S2 ( $\mu$ s)	9,95	12,44
M (kNm)	2963,97	105,94

Za eksplozijo, ki se zgodi na vzhodni ali zahodni strani objekta, je mesto postavitve vira eksplozije, ki povzroči največjo obtežbo na objekt enako kot pri eksploziji 25 kg oziroma 250 kg TNT. Vir eksplozije sem začel postavljati pri razdalji 25 m, na tej razdalji je obtežba na stebre delovala destruktivno. Dinamičen odziv objekta se je začel na razdalji 29 m, tako da sem od te razdalje dalje obtežbo eksplozije upošteval kot dinamično. Najbolj obremenjena stebra v tem primeru sta stebra S3, ki imata manjši mejni moment, kot ostali stebri, tako, da se ta dva stebra ne porušita, kadar eksplozija deluje na razdalji 36 m in več.

Preglednica 3.15: Rezultati analize za eksplozijo na vzhodni ali zahodni strani objekta.

razdalja (m)	29 (dinam. odziv)	36 (dinam. odziv)
obtežba na steber S2 (kN/m)	659,57	369,17
trajanje obtežbe na steber S2 ( $\mu$ s)	12,48	17,27
M (kNm)	422,44	266,94

Iz rezultatov je vidno, da eksplozija mase polnitve 1250 kg TNT, na severni in južni strani objekta, na razdalji večji od 29 m ne povzroči takšnih lokalnih poškodb, da bi prišlo do porušitve. Na vzhodni in zahodni strani obravnavanega objekta pa je ta meja na 36 m.



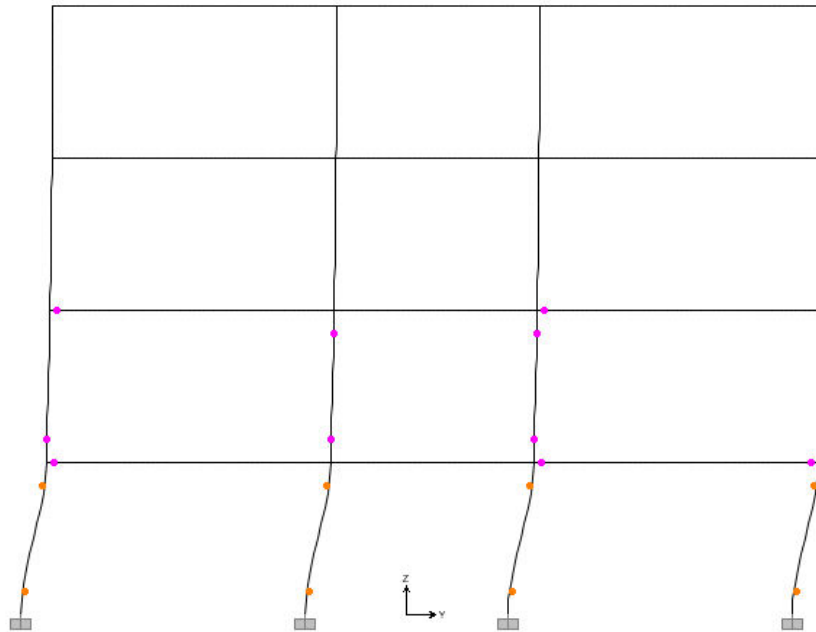
Slika 3.41: Varnostno območje, za eksploziv v tovornem vozilu 1250 kg TNT.

### 3.5.3 Rezultati analize globalnega odziva obravnavanega objekta na obtežbo eksplozije

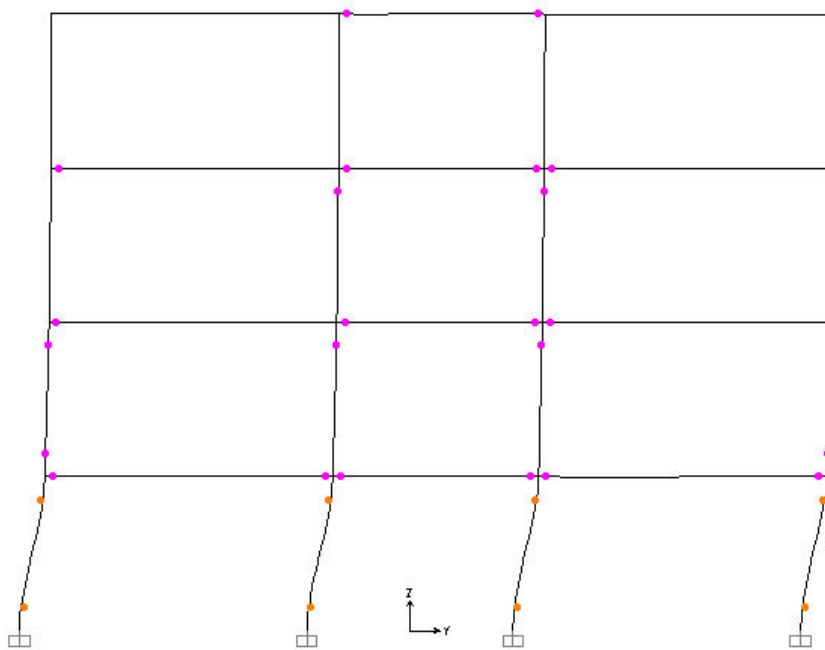
Eksplozija običajno na objekt deluje destruktivno zaradi lokalnih poškodb, za moj primer me je zanimalo kako pa eksplozija deluje globalno na stavbo. Naredil sem analizo za dve vrsti eksplozije. Analiziral sem eksplozijo 25 kg TNT na razdalji 12 m v liniji E4 (glej sliko 3.14). Na tej razdalji tovrstna eksplozija ne povzroči lokalne porušitve konstrukcijskega sistema. Odziv objekta na takšno eksplozijo je impulzen. Zanimal pa me je še rezultat takšne eksplozije, ki povzroča dinamično obtežbo. Zato sem za globalno analizo izbral še eksplozijo 250 kg TNT na razdalji 30 m, vir eksplozije je postavljen v isti liniji kot kot vir eksplozije 25 kg TNT. Tudi tovrstna eksplozija ne povzroči lokalne porušitve konstrukcijskega sistema.

#### 3.5.3.1 Globalen odziv obravnavanega objekta – impulzna obtežba

V nadaljevanju je najprej obravnavan objekt, ki je obremenjen z eksplozijo mase polnitve 25 kg TNT, pri čemer je vir eksplozije postavljen na severni strani obravnavanega objekta. Ta eksplozija povzroča impulzno obtežbo na obravnavan objekt. V tem primeru eksplozije so najbolj obremenjeni okvirji OK1 in OK2 (glej sliko 3.24). Pomik na vrhu stebra S2 v četrti etaži je bil izračunan in znaša 0,158 m, glede na ta pomik je krmiljena nelinearna statična analiza. Na slikah 3.42 in 3.43 sta prikazana najbolj obremenjena okvirja. Razvidno je, da je prišlo do porušitve stebrov pritličja. Prišlo je do tako imenovanega efekta mehke etaže.



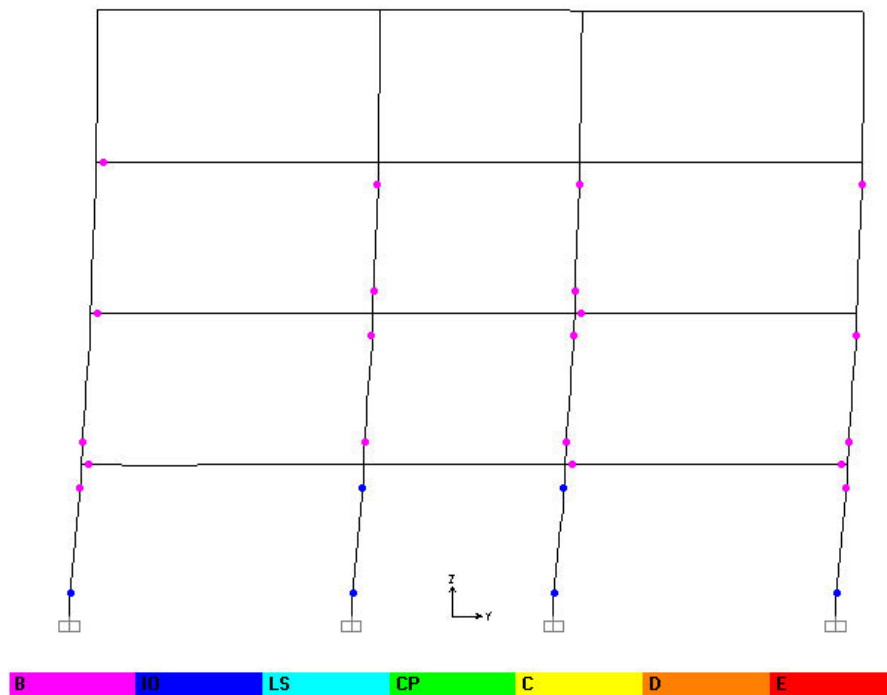
Slika 3.42: Dosežena stanja poškodovanosti v plastičnih členkih, OK 2.



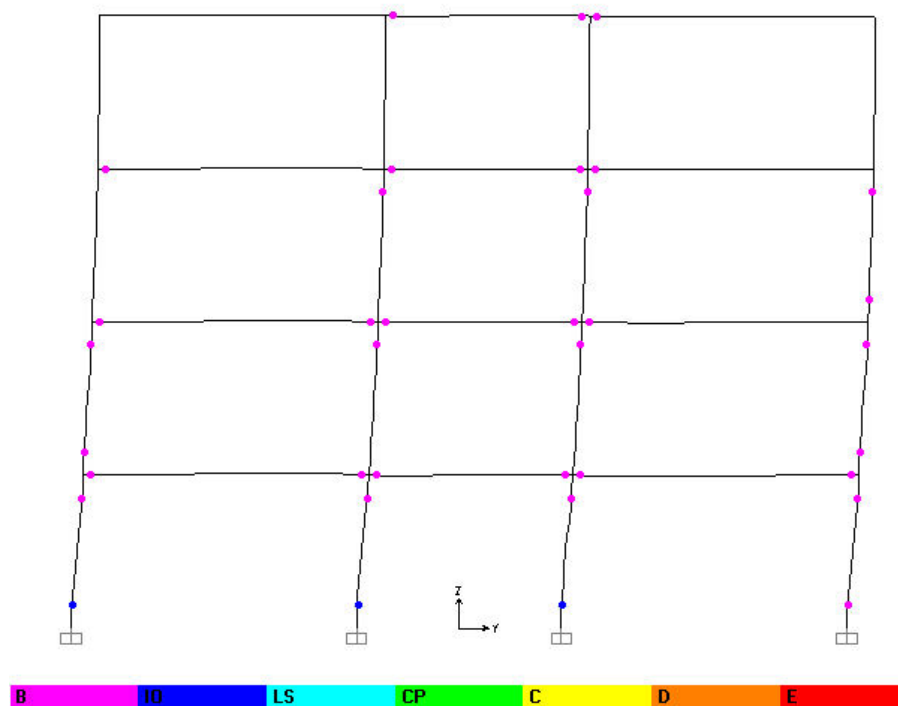
Slika 3.43: Dosežena stanja poškodovanosti v plastičnih členkih, OK 1.

### 3.5.3.2 Globalen odziv obravnavanega objekta – dinamična obtežba

Obravnavan objekt, je obremenjen z eksplozijo mase polnitve 250 kilogramov TNT, pri čemer je vir eksplozije postavljen na severni strani obravnavanega objekta. Ta eksplozija povzroča dinamično obtežbo na obravnavan objekt. V tem primeru eksplozije so najbolj obremenjeni okvirji OK1 in OK2 (glej sliko 3.24). Pomik na vrhu stebra S2 v četrti etaži je bil izračunan in znaša 0,071 m, glede na ta pomik je krmiljena nelinearna statična analiza. Na slikah 3.44 in 3.45 sta prikazana najbolj obremenjena okvirja. Prikazano je doseženo stanje v plastičnih členkih, pri tem pomiku. Stanje ni blizu porušitve saj niso bile nikjer presežene mejne rotacije.



Slika 3.44: Dosežena stanja poškodovanosti v plastičnih členkih, OK 2.



Slika 3.45: Dosežena stanja poškodovanosti v plastičnih členkih, OK 1.

### 3.5.3.3 Primerjava rezultatov analize globalnega odziva za obtežbo eksplozije 25 kg TNT na razdalji 12 m in obtežbe eksplozije 250 kg TNT na razdalji 30 m.

Eksplozija 25 kg TNT je veliko manjše moči od eksplozije 250 kg TNT. Ključna razlika med obema primeroma pa je, da sem vir eksplozije 250 kg TNT postavil na tolikšno razdaljo da je odziv na tovrstno obtežbo dinamičen. Vir eksplozije 25 kg TNT pa na tolikšno razdaljo, da je obtežba impulzna. V primeru impulzne obtežbe sem za obtežbo upošteval impulz, v primeru dinamične obtežbe pa tlak. Iz analize je razvidno, da je šibkejša eksplozija, ki pa povzroča impulzno obtežbo za objekt veliko neugodnejša, kakor močnejša eksplozija na toliko večji razdalji, da je odziv objekta dinamičen.

## 4 ZAKLJUČEK

Živimo v času, ko skoraj ne mine dan, da ne bi mediji poročali, da se je nekje v svetu zgodil bombni teroristični napad. Zato sem si v diplomskem delu zadal namen in cilj predstaviti vpliv eksplozije na gradbeno konstrukcijo. Predstavil sem dogodke pri kemični eksploziji in obtežbo, ki jo eksplozija povzroča. Z grafi in slikami sem nazorno prikazal na kakšen način eksplozija deluje na objekt in za kakšno obtežbo gre pri eksploziji. V jedru naloge sem obravnaval običajno dimenzioniran okvirni armirano-betonski objekt, za katerega sem naredil analizo obnašanja ob dogodkih različnih eksplozij. Z izračuni sem preveril, na kakšni razdalji določena eksplozija povzroči lokalne poškodbe, ki lahko povzročijo progresivno porušenje objekta. Iz teh rezultatov sem dobil varnostno območje okrog stavbe, znotraj katerega ne sme priti do aktivacije eksploziva. Preveril pa sem tudi globalen vpliv eksplozije na obravnavan objekt. Rezultati, kažejo, da je za objekt najbolj neugodna takšna eksplozija, ki na objekt deluje kot impulzna obtežba.

Najprej sem za izbrani statični sistem in karakteristike prereza (beton in armatura) določal ob kateri lokalni porušitvi posameznega elementa bo prišlo do progresivne porušitve celotnega objekta. Nato sem skozi parametrično analizo za različne količine eksploziva na različnih lokacijah določal, kdaj bo prišlo do porušitve kritičnih elementov. Vplive zaradi eksplozije kot obtežbe sem določal s programom A.T.Blast, s katerim sem za različne scenarije eksplozije (eksplozivna sredstva ekvivalenta 25, 250 in 1250kg) določal rezultirajoče impulze in tlake.

Eksplozija mase ekvivalenta 25 kg TNT (kovček), na obravnavanem objektu ne more povzročiti takih lokalnih poškodb, da bi prišlo do porušitve celotnega objekta. Eksplozija lahko poruši katerikoli steber na obravnavanem objektu, kolikor je vir eksplozije postavljen direktno v liniji stebra in je oddaljen manj kot 2 m. Porušitev enega stebra pa ne zadošča, da bi se objekt v celoti porušil.

Za eksplozijo mase ekvivalenta 250 kg TNT (avto), varnostna razdalja mora znašati 25 m in več. Za maso 1250 kg TNT (pick-up), na severni in južni strani objekta varnostna razdalja

mora znašati vsaj 29 m. Na vzhodni in zahodni strani obravnavanega objekta pa ta meja znaša 36 m.

Nelinearno analizo objekta sem naredil za dve vrsti eksplozij. Analiziral sem eksplozijo 25 kg TNT na razdalji 12 m v liniji E4 (glej sliko 3.14). Na tej razdalji tovrstna eksplozija ne povzroči lokalne porušitve konstrukcijskega sistema. Odziv objekta na takšno eksplozijo je impulzen. Zanimal pa me je še rezultat takšne eksplozije, ki povzroča dinamično obtežbo. Zato sem za globalno analizo izbral še eksplozijo 250 kg TNT na razdalji 30 m, vir eksplozije je postavljen v isti liniji kot kot vir eksplozije 25 kg TNT. Tudi tovrstna eksplozija ne povzroči lokalne porušitve konstrukcijskega sistema. V primeru impulzne obtežbe sem dobil porušitve stebrov pritličja. Prišlo je do tako imenovanega efekta mehke etaže. V primeru dinamične obtežbe pa nikjer niso bile presežene mejne rotacije.

Uporabljena metodologija določanja vpliva eksplozije na objekte vsebuje določene pomanjkljivosti: ni upoštevana komponenta srka obtežbe, lege sosednjih objektov, predpostavljena je idealna sferična eksplozija, predpostavka le enega dogodka - eksplozije, plošče konstrukcije so bile obravnavane kot idealno toge itd. Vendar je s stališča inženirskega pristopa dovolj natančna za definiranje varnostne razdalje za obravnavani objekt.

V kolikor bi v Slovenji želeli povečati varnost stavbam, ki so potencialno ogrožene s strani bombnega terorističnega napada, bi morali vsako stavbo analizirati tako, kakor sem sam analiziral obravnavano stavbo. Iz rezultatov analize bi dobili določeno varnostno območje okrog stavbe, katerega bi morali kontrolirati fizično ali z različnimi tehničnimi ukrepi.



## VIRI

Alaoui, S., Oswald, C. 2007. Blast-resistant design considerations for precast, prestressed concrete structures. PCI Journal November–December 2007: str. 53–65  
[http://prestressed.org/view\\_file.cfm?file=JL-07-NOVEMBER-DECEMBER-9.pdf](http://prestressed.org/view_file.cfm?file=JL-07-NOVEMBER-DECEMBER-9.pdf)  
(3.12.2010).

Asprone, D., Jalayer, F., Prota, A., Manfredi, G. 2008. Proposal of a probabilistic model for multi-hazard risk assessment of structures in seismic zones subjected to blast for the limit state of collapse: 10 str.  
[http://wpage.unina.it/fatemeh.jalayer/Publications\\_file/SSBlast.pdf](http://wpage.unina.it/fatemeh.jalayer/Publications_file/SSBlast.pdf) (27.10.2010).

Augustsson, R., Härenstam, M. 2010. Design of reinforced concrete slab with regard to explosions. Göteborg, Department of Civil and Environmental Engineering, Division of Structural Engineering: 117 str.  
<http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/132132.pdf> (12.02.2011).

Beg, D., Pogačnik, A. 2009. Priročnik za projektiranje gradbenih konstrukcij po evrokod standardih. Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije: 1077 str.

Bosiljkov, V., Gostič, S., Kržan, M., Antolinc, D., Žarnić, R. Izdelava in demonstracija modela za načrtovanje ohranjanja umetnostnozgodovinske dediščine v vojnih spopadih : končno poročilo za CRP MIR M4-0207. Ljubljana: UL FGG: ZRMK Institut, 2009.

Carino, N., Lew H. 2001. Summary of NIST/GSA Workshop on Application of Seismic Rehabilitation Technologies to Mitigate BlastInduced Progressive Collaps. 17 str.  
<http://www.fire.nist.gov/bfrlpubs/build01/PDF/b01055.pdf> (24.01.2011).

Cormie, D., »et al.«. 2009. Blast effects on buildings Second edition. London, Thomas Telford Limitd, 40 Marsh Wall, London E14 9TP: 255 str.

Dolšek, M. 2004. Opis in primer nelinearne statične analize s programom SAP ali ETABS. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za konstrukcije in potresno inženirstvo: 20 str.

Fajfar, P. 1984. Dinamika gradbenih konstrukcij. Ljubljana, Univerzitetna tiskarna, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo: 550 str.

Glasstone, S., Dolan, P. 1977. Effects of nuclear weapons.  
<http://glasstone.blogspot.com/2009/11/groupthink-and-proliferation-why.html> (27.12.2010)

Hinman, E. 2009. Blast Safety of the Building Envelope.  
[http://www.wbdg.org/resources/env\\_blast.php](http://www.wbdg.org/resources/env_blast.php) (15.10.2010).

Kulačanin, B., Pejčinović, J., Šakota, L. 1971. Rušenje zgrada. Beograd, Uprava inženjerije GŠ JNA: 182 str.

Maksimović, P. 1985. Eksplozivne materije. Beograd, Vojnoizdavački zavod Beograd: 347 str.

Mays, G., Smith, P. 1995. Blast effects on buildings. London, Thomas Telford Publications, Thomas Telford Services Ltd, 1 Heron Quay, London E14 4JD: 119 str.

Planinc U. 2009. Miniranje v gradbeništvu. Diplomaska naloga. Celje, Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo, Prometno - hidrotehnična smer: 109 f.

SIST EN 1991-1-7: 2006 – Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 1-7 del: Splošni vplivi – Nezagodni vplivi.

SIST EN 1998- 1: 2005, Evrokod 8: Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij - del 1: Splošna pravila, potresni vplivi in vplivi na stavbe.

Wassef, W., »et al.«. 2010. Blast-Resistant Highway Bridges, Design and Detailing Guidelines. Washington, Transportation research board: 143 str.  
[http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp\\_rpt\\_645.pdf](http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_645.pdf) (11.12.2010).

UFC 4-010-01. 2003. DoD Minimum Antiterrorism Atandards for Buildings: 71 str.  
[http://www.wbdg.org/ccb/DOD/UFC/ufc\\_4\\_010\\_01.pdf](http://www.wbdg.org/ccb/DOD/UFC/ufc_4_010_01.pdf) (27.01.2011).

Zakon o eksplozivih. UL RS št. 001-22-121/02: 10495