

Dr. Nebojša Đuranović, dipl. ing. građ.

PRIMJENA ENERGETSKE METODE ZA DIMENZIONISANJE AB ELEMENATA IZLOŽENIH UDARNOM TALASU EKSPLOZIJE

ENERGY METHOD FOR THE BLAST DESIGN OF RC ELEMENTS



Dr Nebojša Đuranović, dipl.inž.građ., rođen 1963. godine. Diplomirao 1988. godine na Građevinskom fakultetu Univerziteta Crne Gore. Doktorirao 1994. godine na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Šefildu - Engleska. Radi na Građevinskom fakultetu Univerziteta Crne Gore u Podgorici, kao docent na grupi predmeta iz Betonskih konstrukcija.

Dr Nebojša Đuranović, graduated civil engineer, born in 1963. Graduated in 1988 from the Civil Engineering Faculty, University of Montenegro. He obtained a PhD from the Civil and Structural Engineering Department, University of Sheffield, England, in 1994. He now works as a Lecturer of Concrete Structures at the Civil Engineering Faculty, University of Montenegro, Podgorica.

REZIME

U ovom radu se obrađuju principi dimenzionisanja AB elemenata primjenom energetske metode. Izložena su osnovna načela projektovanja za slučaj udarnog talase eksplozije. Dat je način podjele dinamičkih opterećenja udarom, a prema vibracionim osobinama izložene AB konstrukcije, i to na impulsna i kvazistatička opterećenja. Takođe su izloženi relevantni kvantifikacioni parametri udarnog talasa eksplozije, a zatim analizirani različiti propisi za definisanje projektnog opterećenja i faktora sigurnosti.

Ključne riječi: eksplozija, dinamika, beton, dimenzionisanje.

SUMMARY

This paper describes the main principles of blast design of RC elements by using the energy approach. According to its dynamic characteristics and the relative vibrational characteristics of the structure, blast loads have been described as either impulsive or quasi - static. The main blast parameters have been described. The paper also analyses a number of different codes of practice from this area, with the emphasis on the load definition and the safety factors.

Keywords: blast, dynamics, concrete, design.

UVOD

Pri analizi konstrukcija izloženih dejstvima udarnog talasa eksplozije treba polaziti od nekoliko faktora koji definišu odgovor konstrukcije pri takvim opterećenjima, i prave ga u velikoj mjeri drugačijim od odgovora konstrukcije izložene "statičkom" opterećenju, a u dobroj mjeri različitim i od odgovora konstrukcije izložene vjetru ili, na primjer, uticajima zamljotresa. U ovom radu te razlike neće biti detaljnije razmatrane, ali treba podsjetiti da su, recimo, i uticaji vjetra i zemljotresa dinamičke prirode, ali oni veoma rijetko ili gotovo nikada ne djeluju na izolovani, pojedinačni element konstrukcije, već uglavnom na konstrukciju kao cjelinu. Za razliku od toga, kod udarnog opterećenja eksplozijom je veoma uobičajeno da najveći dio opterećenja bude inicijalno predat jednom elementu ili manjem dijelu konstrukcije, a zatim, zavisno od njegovog odgovora, opterećenje bude preneseno dalje u konstrukciju ili potpuno prigušeno. Ne smije se međutim zanemariti činjenica da u pojedinim ekstremnim slučajevima i cijeli objekat može da odgovara na udarni talas eksplozije.

Dalje, razlika postoji i između ponašanja samih materijala od kojih je napravljena konstrukcija. Ta razlika je uslovljena velikim brzinama pri nanošenju opterećenja, a samim tim i brzinama deformisanja sastavnih materijala. Poznato je, na primjer, da je brzina dostizanja najvećih dilatacija elemenata kod statičkog opterećenja reda veličine 10^{-6} sec^{-1} , da je kod opterećenja usljed motornog saobraćaja ona do 100 puta, a kod zemljotresa i do 1000 puta viša od toga. Međutim kod opterećenja udarnim talasom eksplozije ova brzina dilatacija ide i do 10^6 sec^{-1} . Poznato je, a i teoriski i analitički obrađeno, da se, pri tim ogromnim brzinama nanošenja

opterećenja, značajno mijenjaju fizičko - mehaničke karakteristike materijala /1/. Tako, na primjer, dostižu se čvrstoće materijala i do 2 - 3 puta veće nego kod "statičkog" opterećenja. To je kod ostalih dinamičkih dejstava kao što su vjetar, zemljotresi, udari morskih talasa itd. mnogo manje izraženo.

Dalje, kod opterećenja zemljotresom, a posebno vjetrom, osnovne vibracione karakteristike objekta, kao što su sopstveni period i frekvencija prirodnih oscilacija, prvi i ostali tonovi oscilovanja, kao i nivo prigušenja prisutan u konstrukciji, veoma utiču na nivo odgovora posmatranog objekta. Kod dinamičkog opterećenja usljed udarnog talasa eksplozije, taj vibracioni i rezonantni aspekt odgovora mnogo je manje prisutan, prvenstveno zbog veoma kratkotrajnog vremena trajanja opterećivanja i praktično minimalnog uticaja prigušenja na odgovor direktno izloženog AB elementa.

Pored izloženog treba istaći i suštinsku razliku u načinu odgovora konstrukcije izložene udarnom talasu koji dolazi sa malog i velikog udaljenja. Ova dva slučaja opterećenja razmatraju se na fundamentalno različitim principima /4/ i /5/. Tako se kod opterećenja od talasa koji dolazi sa neposredne blizine prvenstveno razmatra lokalni odgovor konstrukcije, dok kod ovih drugih to nije slučaj.

Ovaj članak će se prvenstveno baviti odgovorom konstrukcije koja se nalazi na rastojanju od 10 ili više prečnika eksplozivnog punjenja koje izaziva udarni talas.

Prekretnicu u istraživanjima (za potrebe civilne struke) iz oblasti konstrukcija opterećenih udarnim talasom, prvenstveno u definisanju odgovora konstrukcija usljed iznenadnih udarnih opterećenja, predstavljalo je katastrofalno rušenje jedne cijele vertikale 22-o spratne stambene zgrade u Londonu

iz 1968 godine, slika 1. Ono je bilo prouzrokovano eksplozijom plinske boce normalne veličine u stanu na 18-om spratu solitera, pri čemu je došlo do

progresivnog loma konstrukcije i na svim nižim spratovima.



Slika 1 - Progresivni kolaps dijela solitera Ronan Point u Londonu /2/

Kao direktna posljedica ove katasastrofe, u Britanskom pravilniku BS 5628 za zidane konstrukcije /3/, data je vrijednost od 34 KN/m^2 prema kojoj treba dimenzionisati sve elemente za koje postoji mogućnost da budu izloženi dejstvu eksplozije plinske boce, a prvenstveno u cilju predupređivanja progresivnog loma cijele konstrukcije. Uopšte govoreći, od tog događaja opterećenja udarom i udarnim talasom eksplozije izlaze iz ekskluzivne nadležnosti stručnjaka iz oblasti vojnog inženjerstva i postaju potpuno ravnopravan aspekt proračuna i dimenzionisanja uobičajenih AB konstrukcija.

1. OSNOVNA NAČELA PROJEKTOVANJA AB KONSTRUKCIJA ZA OPTEREĆENJA OD UDARNOG TALASA EKSPLOZIJE

Sem u sračunatim i predhodno planiranim terorističkim ili vojnim akcijama, opterećenja udarnim talasom eksplozije su moguća i usljed cijelog niza drugih aktivnosti i radnji. Na primjer u toku skladištenja, transportovanja i proizvodnje eksplozivnih i jako zapaljivih substanci, u hemiskoj i petro-hemiskoj industriji, usljed popuštanja kontejnera pod pritiskom, usljed eksplozije plinskih boca, usljed eksplozija gasa koji se može nagomilati

usljed dotrajalosti i oštećenja na gasovodima, kao i u mnogim drugim sličnim situacijama.

Pri dimenzionisanju za slučajeve opterećenja od eksplozija treba polaziti od sljedećih principa /6/:

- građevinski objekat je otporan na eksploziju ako može da izdrži spoljnu ili unutrašnju eksploziju predhodno definisanog nivoa i pri tome zaštititi osoblje, opremu i instrumente od njenih štetnih uticaja.
- oštećenja konstrukcije se mogu tolerisati ako nijesu takva da onemogućavaju bezbjedan boravak i rad ljudi i opreme, kako u toku, tako i nakon eksplozije.
- u slučaju da eksplozija prevaziđe nivo projektom predviđene, konstrukcija će pretrpljeti određen stepen plastičnih oštećenja, ali bez značajnijeg gubitka ukupne nosivosti, tj. izbjegava se progresivni lom konstrukcije.
- najadekvatniji pristup je da se građevinski objekti (sem vojnih i objekata specijalne namjene) dimenzionišu da pretrpe značajniju eksploziju samo jednom u toku svog postojanja.

2. DEFINISANJE PROJEKTOG OPTEREĆENJA I PROPISI

Karakteristike udarnog talasa eksplozije kao eventualnog opterećenja građevinske konstrukcije veoma je teško pretpostaviti. U našoj građevinskoj praksi one se, na primjer, pominju u Pravilniku o tehničkim normativima za skloništa iz 1983 godine /7/. Po ovom Pravilniku skloništa se, između ostalog, dimenzionišu i prema

veličini nadpritiska udarnog talasa eksplozije (50 kPa, 100 kPa, 300 kPa, pa i više - zavisno od nivoa zaštite) i prema veličini kalibra avio - bombe ili drugog projektila koji može direktno da pogodi sklonište. Istim Pravilnikom je definisan i postupak proračuna za slučaj udarnog dejstva eksplozivnog talasa. Njime se dinamičko opterećenje nadpritiska eksplozije (koje je objašnjeno dalje u tekstu) pretvara u ekvivalentno, jednako raspodijeljeno statičko opterećenje, koje djeluje upravno na površine elemenata konstrukcije objekta. Pri tome se vrijednost ekvivalentnog statičkog opterećenja p određuje kao:

$$p = K \times p_a,$$

gdje su:

- K - koeficijent čija vrijednost zavisi od elementa konstrukcije i uticaja koji se proračunavaju (tavanica, spoljni zidovi, momenti itd) i kreće se od 0,5 za određivanje momenata savijanja, do 3,5 za dimenzionisanje spoljašnjih zidova.
- p_a - vrijednost najvećeg, propisima datog, nadpritiska udarnog talasa eksplozije, koja će dalje u tekstu biti detaljno objašnjena.

Po ovim propisima postoji i dodatno horizontalno opterećenje konstrukcije q_p , nastalo od potresa izazvanog eksplozijom i ono se definiše na način sličan onom kod definisanja opterećenja od udarnog talasa. Znači i ono se prevodi na ekvivalentno statičko opterećenje, po izrazu:

$$q_p = \pm q \times K_1$$

gdje su:

- K_1 - koeficijent koji zavisi od obima zaštite tj. nivoa projektovanog udarnog talasa eksplozije. Vrijednost mu se kreće od 0 - za obim zaštite od 50 kPa, do 6 - za obim zaštite od 300 kPa.

- q - osnovno opterećenje elementa tj. stalno i pokretno opterećenje, sračunato na klasičan način.

Potres može izazvati i koncentrisano opterećenje koje se definiše na sličan način.

Zanimljivo je primjetiti da su u članu 153 ovog Pravilnika, u cilju definisanja elemenata za direktnu zaštitu od udarnog talasa, data trajanja pozitivne faze nadpritiska udarnog talasa eksplozije. Inače dužina pozitivne faze udarnog talasa je jedan od najbitnijih, a po mnogima, uz veličinu nadpritiska, i jedina bitna karakteristika udarnog opterećenja. Tako, po ovim propisima, trajanje projektnog nadpritiska od 100 kPa iznosi 3 sec, projektnog nadpritiska od 200 kPa - 2,5 sekunde, a trajanje projektnog nadpritiska od 300 kPa - 2 sekunde. Raspodjela projektnog nadpritiska po vremenu je linearna.

U većini propisa koji se koriste pri projektovanju AB konstrukcija, opterećenja udarnim talasom pripadaju kategoriji takozvanih slučajnih opterećenja, što se obično manifestuje kroz odgovarajuće parcijalne koeficijente sigurnosti u odnosu na opterećenja. Kako po PBAB-u 87 /8/, član 79, ne postoji kategorija slučajnih, već samo kategorije stalnih, promenljivih i ostalih opterećenja, eventualna dejstva udarnog talasa bi se moglo naći u grupi uticaja od ostalih opterećenja. Pri tome vrijednost koeficijenta sigurnosti sa kojim se, pri sračunavanju graničnih uticaja, množe ovi uticaji, iznosi $\gamma_{\Delta} = 1,3$ kod loma AB elementa pri kome je dilatacija u armaturi $\varepsilon_a \geq 3 \text{ ‰}$, to jest $\gamma_{\Delta} = 1,5$ kod loma AB elementa pri kome je dilatacija u armaturi $\varepsilon_a \leq 0 \text{ ‰}$.

Međutim, ovdje treba naglasiti da je koeficijent sigurnosti protiv loma za objekte dimenzionisane po Pravilniku o tehničkim normativima za skloništa dat u članu 61 i on iznosi $\gamma_u = 1,1$. Tu je znači

faktor sigurnosti dat kao jedinstveni, globalni faktor sigurnosti, pa bi pri sračunavanju graničnih uticaja sa njime trebalo množiti i stalno i pokretno i ostala opterećenja, u ovom slučaju, opterećenje udarnim talasom. Pri tumačenju ovih faktora sigurnosti treba biti veoma oprezan. Jasno je da se propisi iz propisa za izgradnju skloništa ne mogu direktno primjenjivati na objektima kojima to nije prvenstvena svrha. Sa druge strane odredbe iz tih propisa mogu biti veoma relevantne za određene objekte, koji su pobrojani dalje u tekstu, a kod kojih je veoma moguće da dođe do opterećenja udarnim talasom eksplozije. U takvim slučajevima treba ići parcijalnim pristupom, pri čemu se pojedini elementi konstrukcije, i to oni koji će najvjerojatnije i biti izloženi udarnim opterećenjima, trebaju dimenzionisati po odredbama iz propisa o skloništima, a preostali dio konstrukcije po PBAB 87. Možda nije potrebno naglašavati da kod objekata sa značajnim stalnim i promenljivim opterećenjem, kombinacija opterećenja u kojoj je uključeno i opterećenje od udarnog talasa možda i nije mjerodavna. To je posebno slučaj ako se uzme u obzir da kombinaciju opterećenja bez uticaja od opterećenja udarnim talasom treba sračunavati sa koeficijentima sigurnosti iz PBAB-a 87, koji su uvijek, sem u slučajevima povoljnog dejstva opterećenja, veći od $\gamma_u = 1,1$.

Evropski propisi EUROCODE 1 "Osnove dimenzionisanje i opterećenja konstrukcija" ("*Basis of Design and Actions on Structures*") će u svom dijelu 2 - xyz "Opterećenja konstrukcija - Incidentna opterećenja" ("*Actions on Structures - Accidental actions*"), dati mnogo striktnije određenje opterećenja za koje se pojedini objekti moraju dimenzionisati. Ovaj dokumenat je u pripremljivoj fazi i njegovo objavljivanje se očekuje veoma brzo.

Uz ove, treba pomenuti i u svijetu najsveobuhvatnija i svakako najčešće citirana uputstva za dimenzionisanje armiranobetonskih konstrukcija za dejstva udarnih opterećenja. To su uputstva američkog Ministarstva odbrane TM-5-1300 iz novembra 1990 godine - "Projektovanje konstrukcija za uticaje slučajne eksplozije" - ("*Structures to resist the Effects of Accidental Explosions*") [9]. Ovaj obimni pravilnik, koji nije klasifikovan kao vojni dokumenat - kao ni njegova predhodna izdanja, predstavlja osnovu pri izradi propisa iz ove oblasti u ogromnom broju zemalja, a koriste ga i mnogobrojni projektantski biroi širom svijeta pri dimenzionisanju objekata koji se izloženi eventualnom dejstvu udarnog talasa eksplozije. Kao takve u prvom redu se misli na objekte ambasada, visokih državnih ustanova, ekonomskih i poslovnih objekata velike važnosti i t.sl..

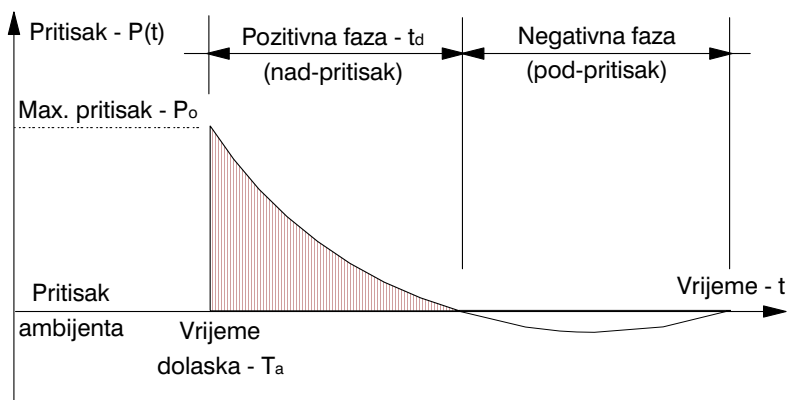
Nakon definisanja projektnog opterećenja treba utvrditi parametre tog

opterećenja koji se obično koriste pri dimenzionisanju AB elemenata.

3. MODELIRANJE UDARNOG TALASA EKSPLOZIJE U CILJU DEFINISANJA OPTEREĆENJA AB KONSTRUKCIJE

Da bi se primijenila energetska metoda dimenzionisanja potrebno je predhodno definisati glavne parametre eksplozivnog opterećenja.

Eksplozivni talas, kao izvor dinamičkog opterećenja na konstrukciji, se kvantifikuje uz pomoć nekoliko osnovnih parametara. To su maksimalni nivo nad-pritisaka P_o udarnog talasa eksplozije, vrijeme dolaska eksplozivnog talasa T_a , vremensko trajanje faze nad-pritisaka t_d i vremensko trajanje faze pod-pritisaka. Svi oni su grafički predstavljeni na slici 2.



Slika 2 - Parametri eksplozivnog talasa

Vrijednosti maksimalnih nad-pritisaka za datu vrstu eksploziva, njegovu

količinu kao i udaljenost od objekta, mogu se sračunati po izrazu:

$$P_o = \frac{808 \left[1 + \left(\frac{Z}{4.5} \right)^2 \right]}{\sqrt{\left[1 + \left(\frac{Z}{0.048} \right)^2 \right] \cdot \left[1 + \left(\frac{Z}{0.32} \right)^2 \right] \cdot \left[1 + \left(\frac{Z}{1.35} \right)^2 \right]}}, \text{ izraženo u bar-ima}$$

gdje je:

- **Z** - tzv. "modelirano udaljenje" (engleski: *scaled distance*), izraženo u m/kg³, i izračunava se po izrazu:

$$Z = \frac{d}{W^{1/3}},$$

gdje su:

$$t_d = \frac{980 \left[1 + \left(\frac{Z}{0.54} \right)^2 \right] \cdot W^{1/3}}{\sqrt{\left[1 + \left(\frac{Z}{0.02} \right)^3 \right] \cdot \left[1 + \left(\frac{Z}{0.74} \right)^6 \right] \cdot \left[1 + \left(\frac{Z}{6.9} \right)^2 \right]}},$$

Pored ovih osnovnih parametara, značajno je pomenuti i impuls **I** udarnog talasa:

$$I^+ = \int_{T_a}^{t_d} P \cdot t$$

On predstavlja površinu pod krivom nadpritisk - vrijeme, pri čemu se u obzir uzimaju samo pozitivne vrijednosti nadpritiska, to jest šrafirana površina na slici 2.

Izrazi koji su predstavljeni gore, svoju punu primjenu nalaze u situacijama gdje je rastojanje između objekta i eksplozivnog punjenja najmanje 10 puta veće nego prečnik samog punjenja. U literaturi ova situacija je opisana terminom "udaljene eksplozije" (engleski: *far range explosion*). Kada je taj odnos manji od 10 onda se radi o takozvanim "bliskim eksplozijama" (engleski: *close range explosion*).

Inače, najprihvatljiviji i najprecizniji način definisanja najvećih nadpritiska i potrebnih vremenskih komponenti u slučaju bliske eksplozije, temelji se na njihovom određivanju na osnovu poznatih (teoriskih) pritiska u toku same detonacije (engleski: *detonation pressure*) koji su poznati za sve važnije vrste

- **d** udaljenost eksplozivnog punjenja (m),
- **W** težina eksplozivnog punjenja, data kao ekvivalentna težina izražena u kilogramima TNT eksploziva, Vrijeme trajanja eksplozije **t_d** se može sračunati po izrazu:

eksplozija. Na osnovu poznate udaljenosti objekta od izvora eksplozije i pretpostavljene promjene pritiska kroz vrijeme i prostor, moguće je, dosta pouzdano, odrediti gore pomenute parametre udarnog talasa i bliske eksplozije /10/.

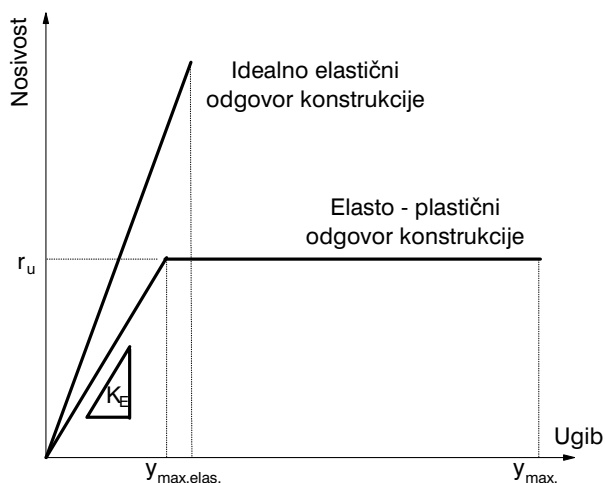
4. ODREĐIVANJE DINAMIČKOG KARAKTERA UDARNOG TALASA I OSNOVE ENERGETSKE METODE

Interakcija eksplozivnog talasa i konstrukcije, njegovo odbijanje i prelamanje od objekte koji se nalaze na pravcu prodiranja eksplozije, vremenska i prostorna raspodjela nadpritiska, prostorna degradacija jačine eksplozivnog talasa do nivoa zvuka, i mnogi drugi faktori čine predviđanje odgovora elemenata konstrukcije na udarna dejstva veoma teškim i kompleksnim.

Pri energetskejoj metodi polazi se od dinamičkih karakteristika opterećenja i vibracionih karakteristika posmatranog AB elementa. Samim tim se na samom početku nameće potreba definisanja veze između dužine trajanja opterećenja i prirodnih vibracija samog elementa.

Najpogodnija je podjela koja udarna opterećenja dijeli po dužini trajanja na tri režima to jest: "kratkotrajno" ili impulsno, "dugotrajno" ili kvazi-statičko i na kraju dinamička opterećenja, kod kojih se postiže dinamički režim odgovora. Oznake "kratkotrajno" i "dugotrajno" su uslovne i pod znacima navoda, jer su ova opterećenja takva samo u poređenju jedno sa drugim, inače se oba odvijaju veoma brzo i traju kratko, od nekoliko djelića sekunde pa najviše do par sekundi.

Značajno pitanje na koje treba odgovoriti je kako definisati što je to "kratkotrajno" ili impulsno, što je "dugotrajno" ili kvazi-statičko opterećenje, a što je treći, tz. dinamički region odgovora konstrukcije. Da bi se odgovorilo na ovo pitanje posmatrajmo sistem sa jednim stepenom slobode, koji je izložen idealizovanom eksplozivnom udaru. Za odgovor sistema pretpostavimo da se nalazi u elastičnom domenu, slika 3.

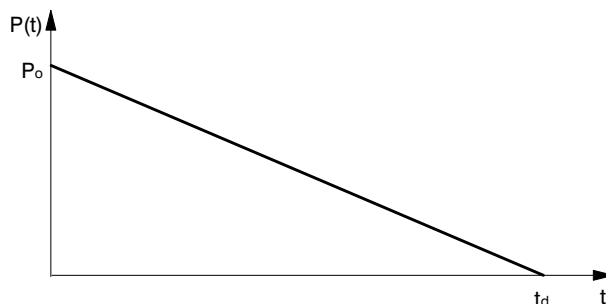


Slika 3 - Idealno elastični i elasto - plastični odgovor konstrukcije

K_E je ekvivalentna elastična krutost posmatranog AB elementa,

Za funkciju opterećenja razmatraćemo uticaje samo od početnog, pozitivnog dijela udarnog talasa, pri čemu se promjena nad pritiska može smatrati

linearnom (slika 4), a u skladu sa članom 153 Pravilnika o tehničkim normativima za skloništa.



Slika 4 - Idealizovana funkcija opterećenja udarnim talasom

Funkcija opterećenja $P(t)$ u obliku datom na gornjoj slici se može napisati kao:

$$P(t) = P_0 \cdot \left(1 - \frac{t}{t_d}\right).$$

Zanemarujući uticaje prigušenja dinamičkog sistema, jednačina kretanja sistema se može napisati kao:

$$M \cdot \ddot{x} + K \cdot x = P_0 \cdot \left(1 - \frac{t}{t_d}\right),$$

gdje su:

- M - masa sistema,
- K - mjeru krutost sistema.

Prigušenje, koje se obično uzima da je proporcionalno sa brzinom pomjeranja sistema, se obično ne uzima u razmatranje, zato što je prva oscilacija sistema ta koja je odlučujuća za cijeli odgovor konstrukcije izložene uticaju udarnog talasa eksplozije. U prvoj oscilaciji nakon udara veoma je malo rasipanje energije usljed prigušenja sistema, pa se ono obično može i zanemariti.

Ako se prirodna frekvencija sistema ω sračuna kao:

$$w = \sqrt{\frac{K}{M}},$$

gdje je:

- K krutost,
- M masa sistema.

Tada će se rešenja jednačine kretanja u vremenima manjim od dužine trajanja opterećenja nalaziti u obliku:

$$x(t) = \frac{P_0}{K} \cdot [1 - \cos(wt)] + \frac{P_0}{K \cdot t_d} \cdot [w^{-1} \cdot \sin(wt) - t]$$

Maksimalni ugib x_{max} će se dobiti u trenutku kada je brzina sistema $\dot{x} = 0$.

Iz izloženog je jasno da će i vrijeme trenutka maksimalnog odgovora t_m i sam maksimalni dinamički ugib x_{max} biti funkcije vremena trajanja opterećenja t_d i prirodnog perioda oscilovanja konstrukcije T . To znači da je:

$$w \cdot t_m = f\left(\frac{t_d}{T}\right) = f'(w \cdot t_d).$$

Na isti način se mogu izraziti i maksimalni ugibi:

$$\frac{x_{max}}{P_0 / K} = \varphi(\omega \cdot t_d) = \varphi'\left(\frac{t_d}{T}\right).$$

Za situaciju kada je $w \cdot t_d < 0.4$, tj. kada je vrijeme trajanja nanošenja opterećenja t_d kratko u odnosu na period oscilovanja posmatranog sistema T , kaže se da je opterećenje impulsivno. Ako je $w \cdot t_d > 40$ tada je opterećenje kvazi-statičko i period T je kraći od vremena nanošenja opterećenja. Ovaj slučaj se obično događa kada opterećenje potiče od eksplozije gasa - npr. plinske boce. Ako je $40 > w \cdot t_d > 0.4$ tada su period i trajanje opterećenja približno jednaki i za odgovor konstrukcije se kaže da pada u dinamički region. U ovom slučaju rešenje

je teže sračunati i za njega je potrebno riješiti jednačine pomjeranja sistema.

U daljem tekstu će biti predstavljena jedna jednostavna i konzervativna metoda za određivanje potrebnih dimenzija presjeka koji je izložen eksploziji poznatih parametara.

Metoda uravnoteženja energija (engleski: *energy-balance method*) za dimenzionisanje objekata izloženih dejstvu eksplozije je danas daleko najpopularnija metoda koja se koristi pri projektovanju ovako opterećenih elemenata AB konstrukcija. Kako će biti i objašnjeno u daljem tekstu, ova metoda se zasniva na principu poređenja energije predate AB elementu i učinjenog rada AB elementa, a uz njihovo kombinovanje sa osnovnom dinamičkom jednačinom kretanja za neprigušeni sistem sa jednim stepenom slobode.

Upotreba metode uravnoteženja energija korišćena je znatno prije nego što je našla primjenu u dimenzionisanju za slučaj opterećenja od udarnog talasa eksplozije. Na primjer, koristio ju je Timošenko za računanje napona i deformacija pri statičkom opterećivanju ploča i ljuski u zoni elastičnog odgovora konstrukcije kao i za razvoj teorije vibracija elastičnih tijela. Biggs [11] je primjenjivao na elastično-plastične sisteme sa jednim stepenom slobode i njegov rad se smatra osnovom za njihovo korišćenje u oblasti dinamike udara.

5. PRIMJENA ENERGETSKE METODE ZA ODREĐIVANJE ASIMPTOTA ODGOVORA AB ELEMENTA

Asimptote odgovora konstrukcije za impulsna i kvazi - statička opterećenja će definisati moguće nivoe udarnog talasa koji može da podnese određeni elemenat uz postizanje predhodno definisanog nivoa oštećenja konstrukcija, pri čemu su

poznate karakteristike tog elementa, a samo udarno opterećenje može biti promjenljivo.

Potražimo primjenjivo rešenje za čisto impulsno opterećenje. Kinetička energija eksplozije **KE** inicijalno predata AB elementu će tokom odgovora konstrukcije biti prihvaćena energetskim potencijalom AB elementa na deformaciju, to jest mogućom deformacionom energijom sistema **SE** (engl. *strain energy*). To znači da će odnos među njima biti:

$$KE = SE$$

Ovaj izraz definiše takozvanu asimptotu impulsa odgovora AB konstrukcije.

Pri idealno elastičnom odgovoru AB elementa, otpornost presjeka raste proporcionalna sa ugibom, slika 3.

U tom slučaju potencijalna energija deformacije AB elementa predstavlja površinu ispod dijagrama napadne sile i ugiba, a sve do nivoa maksimalnih ugiba.

Ona se znači može izraziti kao:

$$SE = \frac{1}{2} \cdot k \cdot y_{\max} \cdot y_{\max} = \frac{k \cdot y_{\max}^2}{2},$$

gdje su:

- **k** - krutost posmatranog elementa a
- **y_{max}** - njegov maksimalni (elastični) ugib usljed dinamičkog opterećenja.

Kombinovanjem poznatih teorema o impulsu i kinetičkoj energiji dobija se:

$$KE = \frac{M \cdot V_0^2}{2} = \frac{M}{2} \cdot \left(\frac{I}{M} \right)^2 = \frac{I^2}{2M}$$

gdje su:

- **I** - impuls od eksplozivnog opterećenja,
- **M** - koncentrisana masa konstrukcije ili elementa.

Izjednačavanjem deformacione energije AB elementa **SE** i kinetičke energije udarnog talasa **KE** dobija se:

$$y_{\max} = \frac{I}{\sqrt{k \cdot M}}.$$

Ovaj izraz će za posmatrani sistem, a uz predhodno poznavanje krutosti i mase AB elementa, dati niz vrijednosti maksimalnih pomjeranja, u odnosu na različite vrijednosti impulsa udarnog talasa, to jest različite eksplozije, pa se zato i naziva asimptota impulsa.

Nivo eventualnih oštećenja se kontroliše nivoom vrijednosti maksimalnog ugiba **y_{max}**.

Treba naglasiti da se maksimalni dinamički ugib može definisati preko nivoa rotacije u osloncu posmatranog elementa. Te rotacije se, zavisno od nivoa dozvoljenog oštećenja, mogu kretati od 2° do 12°, a prema već pomenutom uputstvu TM-5-1300. U istom uputstvu dati su načini određivanja pripadajuće mase elementa **M**, koji zavise od statičkog sistema i šeme opterećenja posmatranog elementa i kreću se od 78% ukupne mase elementa za ravnomjerno podijeljeno opterećenje na prostoje gredi, do 24% ukupne mase kod konzole opterećene koncentrisanim impulsnim opterećenjem. Treba napomenuti da su procenti, kojima se množi ukupna masa, dobijeni primjenom dinamičkog sistema masa - opruga sa jednim stepenom slobode, pri čemu je prigušenje sistema zanemareno.

U slučaju opterećenja čija dužina trajanja nema impulsni karakter, već traje relativno dugo, pa ima takozvani kvazi - statički karakter, primijenije se izraz:

$$WK = SE.$$

Ovaj izraz definiše takozvanu kvazi - statičku asimptotu odgovora konstrukcije. U njoj **WK** predstavlja rad

koji sistem obavi prilikom deformacije. Na isti način kao i u predhodnom slučaju se dobija:

$$P_o \cdot y_{\max} = \frac{1}{2} \cdot k \cdot y_{\max}^2,$$

$$y_{\max} = \frac{2P_o}{k}.$$

Ista procedura konstruisanja asimptota se može primijeniti i na slučajeve konstrukcija čiji odgovor je kruto-plastičan ili elasto-plastičan.

Da bi se ove relacije primijenile u praksi obično se pretpostavi funkcija promjene ugiba y posmatranog elementa, pri čemu su zadovoljeni uslovi oslanjanja. Za manje složene AB elemente, kao što su grede i ploče, funkcije promjene ugiba se mogu, na primjer, napisati u obliku:

$$y = y_{\max} \cdot \left(1 - \frac{4x^2}{l^2}\right),$$

(za slobodno oslonjenu gredu) i

$$y = y_{\max} \cdot \cos \frac{\pi \cdot x}{l_x} \cdot \cos \frac{\pi \cdot z}{l_z},$$

(za uklještenu ploču).

gdje su:

- $y_{\max}$ - maksimalni ugib dok su
- x i z - ravanske koordinate koje se mjere od sredine nosača.

Zatim se sračunaju vrednosti **SE**, **WK** i **KE**, koje su, preko veza izvoda linije ugiba sa krutošću i nanesenim opterećenjem (momentom M_z , $\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{M_z}{EI}$), sve u stvari funkcije linije ugiba. Isti princip se može primijeniti i na mnogo komplikovanije sisteme.

6. PRIMJENA ENERGETSKE METODE ZA DIREKTN

DIMENZIONISANJE AB ELEMENTA

Pri korišćenju energetske metode u procesu direktnog dimenzionisanja AB elemenata izloženog udarnom dejstvu eksplozije, polazi se od istih pretpostavki koje su korišćene i u slučaju definisanja asimptota odgovora koje su date u predhodnom poglavlju. Za slučaj elasto - plastičnog odgovora konstrukcije, slika 3, osnovna jednačina veze između potencijalne energije deformacije AB elementa **SE** i kinetičke energije **KE** predate AB elementu može se napisati u obliku:

$$\frac{I^2}{2M} = r_u \cdot \left(y_{\max} - \frac{y_{\max,elas}}{2} \right),$$

gdje su:

- r_u - tzv. "jedinična granična nosivosti presjeka" ("*ultimate unit resistance*").
- $y_{\max,elas}$ i $y_{\max}$ su najveće vrijednosti ugiba na nivou granica elastičnosti i loma, respektivno.

Značenja za r_u , $y_{\max,elas}$ i $y_{\max}$, se mogu uočiti i na slici 3.

Predhodno je objašnjeno kako se može procijeniti vrijednost pripadajuće mase elementa **M**. Impuls udarnog talasa **I** se takođe može jednostavno sračunati /12/, a na osnovu predhodno definisanog projektnog udarnog talasa. Kroz preostale faktore treba unijeti detalje AB elementa koji treba dimenzionisati, da bi se zatim, rešavanjem datog izraza, odredile karakteristike betonskog presjeka i količina i kvalitet potrebne armature. Funkcija r_u daje tu potrebnu vezu nanesenog opterećenja i nosivosti presjeka.

Predhodno pomenuto američko uputstvo TM5 - 1300 daje izraze za sračunavanje funkcije r_u . Tako na primjer, za obostrano uklještenu AB gredu

opterećenu ravnomjerno raspoređenim udarnim talasom proizilazi da je:

$$r_u = \frac{4(M_n + M_p)}{l^2}.$$

U gornjem izrazu M_n predstavlja granični negativni, a M_p granični pozitivni moment nosivosti AB presjeka. Ako se radi o simetrično armiranim presjecima jasno je da su ova dva momenta jednaka.

Gore pomenuti momenti za određeni presjek se lako mogu izraziti u funkciji gabarita presjeka, količine armature i mehaničkih karakteristika sastavnih materijala. U zavisnosti od izbora veličine ovih momenata može se izabrati prihvatljivi nivo oštećenja za AB element koji dimenzionišemo. Ako se pretpostavi da se u pravougaonom presjeku dimenzija b x d dostigne nivo tečenja armature A_s , koja ima dinamičku čvrstoću f_{ds} , pri određenom nivou udarnog talasa definisanog kroz impuls I , koristi se izraz:

$$M = \frac{A_s \cdot f_{ds}}{b} \cdot (d - 0,45x),$$

pri čemu je položaj neutralne ose x AB presjeka, dinamičke čvrstoće betona f_{dc} , može približno izračunati po izrazu:

$$x = \frac{A_s \cdot f_{ds}}{0,6 \cdot b \cdot f_{dc}}.$$

Ova dva izraza su dobijena korišćenjem raspodjele napona i dilatacija u presjeku kako je to dato u BS 8110 - /13,14/.

Ako se želi u presjeku postići još veće oštećenje i lom armature onda se za vrijednost momenta nosivosti presjeka može koristiti izraz:

$$M = A_s \frac{f_{ds}}{b} d_c.$$

Da bi smo u početnoj energetske jednačini ostali samo sa nepoznatim karakteristikama presjeka, a nakon što smo funkciju r_u izrazili preko tih karakteristika, trebamo se osloboditi nepoznate $y_{max,elas}$.

Sa slike 3 se vidi da se funkcija ugib na granici elastičnosti $y_{max,elas}$ može sračunati po izrazu:

$$y_{max,elas} = \frac{r_u}{K_E}.$$

Definisanjem ekvivalentne elastične krutosti K_E problem će biti riješen, jer u početnoj energetske jednačini, kao nepoznate, ostaju samo karakteristike AB presjeka.

Ekvivalentna elastična krutost K_E je krutost koja se dobija izjednačavanjem maksimalnih elastičnih ugiba posmatranog AB elementa i odgovarajućeg dinamičkog sistema klatno - opruga (sistem sa jednim stepenom slobode). Znači ona se dobija na isti način na koji su sračunati i procenti kojima se množi ukupna masa, a u cilju određivanja pripadajuće masa oscilatornog sistema (poglavlje 5). Ova ekvivalentna krutost je već sračunata i data u obliku tabela za mnoge kombinacije opterećenja i oslonaca koji se mogu pojaviti u praksi. Na primjer, za uklještenu, simetrično armiranu gredu opterećenu ravnomjerno podijeljenim opterećenjem od udarnog talasa eksplozije, ona je data kao:

$$K_E = \frac{307EI}{l^4}$$

gdje su:

- E - modul elastičnosti, a
- I - moment inercije posmatranog presjeka.

Znači i ekvivalentna elastična krutost je definisana preko karakteristika presjeka koji se želi dimenzionisati, pa se sada mogu svi ovi izrazi unijeti u početnu energetska jednačinu i jednostavnim probanjem doći do najpogodnijih dimenzija u betonskom presjeku.

Ne smije se zaboraviti da je kod prikazanog postupka primijenjena metoda dimenzionisanja za slučaj "kratkotrajnog", to jest, impulsnog dejstva udarnog talasa. Ta polazna pretpostavka o impulsnoj prirodi opterećenja, mora se na kraju provjeriti upoređenjem prirodnog perioda oscilovanja sračunatog AB elementa i dužine trajanja pozitivne faze udarnog talasa. Ako nisu ispunjeni ti vibracioni uslovi analize, dati u poglavlju 4, onda se dimenzionisanje mora obaviti postupkom za kvazi-statičko djelovanje udarnog talasa, koje je dosta slično gore izloženom, što se u ovom radu detaljnije ne razmatra.

7. OSNOVNI PRINCIPI KONSTRUISANJA AB ELEMENATA IZLOŽENIH UDARNOM TALASU EKSPLOZIJE

Dva osnovna parametra određuju kvalitet ponašanja konstrukcije pri eksploziji. To su duktilitet presjeka (dat kroz odnos maksimalne dostignute dilatacije i dilatacije na nivou tečenja armature) i nivo mogućih rotacija na mjestima formiranja plastičnih zglobova - kod liniskih, tj. linija plastičnog tečenja - kod ravnih nosača. Kao što se vidi, to su isti oni parametri koji se tradicionalno koriste i kod armiranja za dejstva zemljotresa. Na oba parametra značajno se može uticati pravilnim detaljisanjem konstruktivnih elemenata.

Osnovne pretpostavke za pravilno armiranje elemenata izloženih dejstvu eksplozije su:

- Grede i nosači moraju biti simetrično armirani za slučaj dejstva opterećenja iz oba pravca, kao i da bi se izbjegle situacije "obrnutog" ugiba, to jest ugiba u pravcu suprotnom od pravca prodiranja eksplozije, koje su tipične za elemente izložene opterećenju od eksplozije;
- Podužna armatura i aktivni dio betonskog presjeka moraju biti obuhvaćeni uzengijama, spiralnom armaturom ili utegnuti na neki drugi pogodan način.

U novije vrijeme vlaknaste FRP armature /15/ sve češće zamjenjuju čelik kao glavno sredstvo armiranja. Testovi pokazuju da betonski zidovi izloženi eksploziji, a ojačani sa tankim trakama ovog materijala, pokazuju znatno bolje karakteristike nego zidovi armirani običnim čeličnim armaturama /16/.

Izbor statičkog sistema objekta takođe je značajan. I betonski i čelični ramovi sa visokim stepenom statičke neodređenosti, za razliku od statički određenih, omogućavaju horizontalnim elementima da dobro podnesu promjenu pravaca glavnih napona, što je tipično za opterećivanje eksplozijom. Glavni razlog je što statička neodređenost u realnosti pretpostavlja značajnu armiranost čvora i u gornjoj i u donjoj zoni elementa, kao i povezanost te armature sa glavnom armaturom nosača, a u cilju ostvarivanja krute veze u čvoru. Ta se armatura dalje prevodi u nosač, a gotovo uvijek i po cijeloj dužini nosača, čak i u gornjoj zoni. Usljed toga, kada opterećenja dolaze iz pravca suprotnog onom predviđenom u statičkom proračunu (tj. iz pravca suprotnog silama zemljine težje), ova armatura praktično preuzima ulogu glavne armature za zatezanja /17/.

Sledeći značajan razlog za dobro ponašanje ovakvih ramova je

redistribucija momenata prilikom pojave plastičnih zglobova u statički neodređenim konstrukcijama. Na taj način progresivno rušenje objekta će u većini slučajeva biti preduprijeđeno, a kao što je već rečeno nivo eventualnog oštećenja konstrukcije prvenstveno će zavisiti od njegove osjetljivosti na ovu pojavu.

8. KATEGORIZACIJA OŠTEĆENJA OBJEKATA

Informacije radi, u ovom radu su dati, u svijetu uglavnom prihvaćeni, principi kategorizacije objekata oštećenih udarnim talasom eksplozije. Dakle, oštećenja na objektima se svrstavaju u pet glavnih kategorija /18/. To su:

- Kategorija A - Objekat razoren, preko 75% od spoljašnjih zidova porušeno.
- Kategorija B - Oštećenja ogromna, objekat ne može biti saniran, 50-75% spoljašnjih zidova porušeno. Objekat će pripadati ovoj kategoriji i ako su oštećenja po spoljnim zidovima manja po obimu, a unutrašnji zidovi takođe znatno oštećeni i jako ispucali.
- Kategorija C_a - Objekti koji moraju biti evakuisani i čija opravka traži znatna sredstva i vrijeme. Primjeri su djelimičan ili totalni kolaps krovne konstrukcije, razorenost spoljašnjih zidova objekta do nivoa od oko 25% od ukupne površine zidova kao i oštećenja na ostalim nosećim elementima koja se ne mogu sanirati.
- Kategorija C_b - Objekti koji moraju biti evakuisani, ali čija opravka je relativno laka i efikasna. Oštećenja

konstruktivnih elemenata su na manjem nivou dok su pregrade i nenoseći elementi eventualno pomjereni iz svojih oslonaca.

- Kategorija D - Objekti koje ne treba evakuisati, ali oštećenja mogu biti značajna na nekonstruktivnim elementima. Tipična oštećenja su ispucalost plafona, oštećenja na krovnom pokrivaču, manja oštećenja zidova i lom stakla na više od 10% površine prozora.

Ako su oštećenja manja od gore pomenutih za objekat se smatra da nije pretrpio oštećenja.

9. ZAKLJUČAK

U radu su obrađena osnovna načela projektovanja za slučaj opterećenja udarnim talasom eksplozije.

Objašnjen je mogući način primjene različitih koeficijenata sigurnosti iz relevantnih domaćih propisa.

Primjena energetske metode ne zahtijeva komplikovan analitički postupak i veoma je efikasno sredstvo za proračun. Pri njenoj primjeni treba obratiti pažnju na karakter dinamičkog dejstva udarnog talasa. Postupci proračuna pri impulsnom i kvazi-statičkom režimu opterećivanja konstrukcije uzimaju u obzir vibracione karakteristike objekta, i u zavisnosti od toga daju podatke neophodne za dimenzionisanje presjeka

Energetska metoda može se koristiti i pri određivanju asimptota odgovora konstrukcije

Pri određivanju asimptota odgovora konstrukcije na udarna dejstva prvo se sračuna energija koju sistem može prihvatiti u toku deformisanja (deformaciona energija), rad spoljnjih sila na zadatim pomjeranjima i kinetička energija nanešena na konstrukciju u toku

opterećenja. Zatim, izjednačavajući deformacionu energiju i rad spoljnjih sila, dobija se eksplicitna veza maksimalnih ugiba i nanijetog opterećenja za slučaj bilo "kratkotrajnog", impulsnog, bilo "dugotrajnog", kvazi-statičkog, opterećenja eksplozijom. Te veze se nazivaju asimptotama odgovora i one definišu krajnje moguće granice odgovora određene konstrukcije

Principi konstruisanja detalja AB elemenata opterećenih udarnim talasom slični su onima koji se koriste kod detaljisanja elemenata za opterećenja od zemljotresa.

LITERATURA

- /1/ ĐURANOVIĆ, N.: "Impulsno opterećenje na AB pločama", (na engleskom), Doktorska disertacija, Univerzitet u Šefildu, april 1994.
- /2/ MORTON, J.: "Accidental damage robustness & stability", na osnovu seminara za Brick Development Association, Berkshire, maj 1985.
- /3/ BRITISH STANDARDS INSTITUTION: BS 5628: "The Structural Use of Masonry", London, 1978.
- /4/ ĐURANOVIĆ, N. WATSON, A.J.: "Impulsno opterećenje na AB pločama - Vremenska funkcija opterećenja", (na engleskom), u Zborniku radova sa "Third International Conference on Structures Under Shock and Impact - SUSI", str. 63-70, Madrid, Španija, jun 1994.
- /5/ ĐURANOVIĆ, N., WATSON, A.J.: "Impulsno opterećenje na AB pločama - vremenska funkcija lokalnog loma", (na engleskom), u Zborniku radova sa "7th International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structures", str. 125 - 132, april 1995, Manhajm, Njemačka.
- /6/ HOROSCHUN, G.: "Design of Blast Resistant Structures", "Explosives Engineering", str. 10 - 15, London, mart 1992.
- /7/ Pravilnik o tehničkim normativima za skloništa, Službeni list SFRJ broj 55/83, Beograd, 1983.
- /8/ Pravilnik o tehničkim normativima za beton i armirani beton, Službeni list SFRJ broj 11/87, Beograd, 1987.
- /9/ DEPARTMENT OF THE ARMY - Američko ministarstvo odbrane: "Structures to resist the Effects of Accidental Explosions" - "Projektovanje konstrukcija za uticaje slučajne eksplozije" TM-5-1300, novembra 1990 godine, USA.
- /10/ ĐURANOVIĆ, N.: "Interakcija udarnog talasa eksplozije i AB ploče", objavljeno u monografiji "Istraživanja", str. 133 - 152, Građevinski fakultet Podgorica, Podgorica, 1995.
- /11/ BIGGS, J.: "Introduction to Structural Dynamics", McGraw-Hill Book Company, New York, 1964.
- /12/ KINNEY, G. F. and GRAHAM, K. J., "Explosions in air", izdavač Springer-Verlag, Njujork, 1985.
- /13/ BRITISH STANDARDS INSTITUTION: BS 8110 - "Structural Use of Concrete", London, 1985.
- /14/ ĐURANOVIĆ N.: "Testiranje greda armiranih plastičnim (FRP) armaturama", časopis IZGRADNJA - Udruženje građevinskih inženjera i arhitekata Srbije, sveska 12/96, str. 657 - 665, Beograd, decembar 1996,.
- /15/ ĐURANOVIĆ N.: "Armiranje AB greda plastičnom (FRP) armaturom", časopis IZGRADNJA - Udruženje građevinskih inženjera i arhitekata Srbije, sveska 8/96, str. 469 - 476, Beograd septembar 1996.
- /16/ PRENDERGAST, J.: "Oklahoma city aftermath", *Civil Engineering*, str. 42 - 45, New York, oktobar 1995.
- /17/ MCMANAMY, R.: "Oklahoma blast forces unsettling design questions", *ENR News*, str. 10 - 16, izdavač McGraw-Hill Companies, 1 maj 1995, New York.
- /18/ SCILLY, N.F. i HIGH, W.G.: "The Blast Effects of Explosions", objavljeno na: "5th International Symposium on Loss prevention and Safety promotion in the Process Industries", Vol. 1, paper 39, str. 39-1 do 39-15, Cannes, France, septembar 1986.