

Primljen / Received: 22.11.2016.

Ispravljen / Corrected: 21.3.2017.

Prihvaćen / Accepted: 24.3.2017.

Dostupno online / Available online: 10.7.2017.

Numerička simulacija djelovanja eksplozije na nadvožnjake

Autori:



Doc.dr.sc. **Hrvoje Draganić**, dipl.ing.građ.
Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku
Građevinski fakultet
draganic@gfos.hr



Izv.prof.dr.sc. **Damir Varevac**, dipl.ing.građ.
Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku
Građevinski fakultet
dvarevac@gfos.hr

Izvorni znanstveni rad

Hrvoje Draganić, Damir Varevac

Numerička simulacija djelovanja eksplozije na nadvožnjake

Nadvožnjak nije moguće učiniti, projektiranjem i/ili izvedbom, apsolutno sigurnim na djelovanje eksplozije jer se ni sama količina eksploziva koja bi se detonirala ispod mosta u nekakvom napadu ne može odrediti s prihvatljivom vjerojatnošću. U radu je analizirano djelovanje tri količine eksploziva detonirane ispod rasponske konstrukcije nadvožnjaka. Promatrano je djelujuće opterećenje, ponašanje i oštećenje rasponskog sklopa nadvožnjaka. Zaključeno je kako sve tri količine eksploziva znatno oštećuju uobičajeni nadvožnjak te uzrokuju rušenje. Nelinearna numerička analiza nadvožnjaka provedena je koristeći hidrokod softver Ansys Autodyn.

Ključne riječi:

val eksplozije, ploha tlakova, prostorni numerički model, oštećenje rasponskog sklopa, tlak-impuls dijagrami

Original scientific paper

Hrvoje Draganić, Damir Varevac

Numerical simulation of effect of explosive action on overpasses

Overpasses can not be made absolutely safe to explosive action, regardless of interventions made during their design and/or realisation. This is due to the fact that the very quantity of explosive to be activated under the bridge during an attack can not be defined with an acceptable level of probability. Three quantities of explosives activated under the overpass structure are analysed. The load, behaviour, and damage to overpass superstructure are considered. It is stated in conclusion that all three quantities of explosive afflict considerable damage to usual overpasses, and cause their collapse. The nonlinear numerical analysis of the overpass was conducted using the Ansys Autodyn hydrocode software.

Key words:

explosion wave, pressure area, spatial numerical model, superstructure damage, pressure-impulse diagrams

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Hrvoje Draganić, Damir Varevac

Numerische Simulation der Einwirkung einer Explosion auf Überführungen

In Übereinstimmung damit wurde die Wirkung von drei Sprengstoffmengen analysiert, die unter der Konstruktion der Überführung detonierten. Beobachtet wurden die einwirkende Belastung, das Verhalten und die Beschädigung am Überbau der Überführung. Es wurde festgestellt, dass alle drei Sprengstoffmengen eine normale Überführung erheblich beschädigen sowie den Einsturz verursachen. Die nicht lineare numerische Analyse der Überführung wurde durch Anwendung der hidrokod Software Ansys Autodyn durchgeführt.

Schlüsselwörter:

Explosionswelle, Druckflächen, räumliches numerisches Modell, Beschädigung des Überbaus, Druck-Impuls-Diagramme

1. Uvod

Mostovi su, s obzirom na opasnosti od terorističkog napada, vrlo osjetljive konstrukcije zbog lakog pristupa svim njegovim dijelovima. U slučaju neposredne ugroženosti, nadzirati se mogu veliki mostovi, ali teško je očekivati da se na svaki nadvožnjak ili podvožnjak može postaviti fizička zaštita.

Ugroženost mostova s obzirom na eksploziju može se podijeliti na tri osnovne grupe: eksplozija na prometnici koju prevodi most, izravno eksplozivno djelovanje na konstrukciju mosta (miniranje) te eksplozija ispod mosta, a ovo istraživanje obuhvaća treću grupu ugroženosti. Pretpostavljeni scenarij je da se eksploziv doveze motornim vozilom ispod nenadziranog mosta i detonira na određenoj udaljenosti od donjeg ruba rasponskog sklopa. Količinu eksploziva teško je predvidjeti, ali grubu procjenu možemo dobiti iz nosivosti i volumena prtljažnog prostora određenih tipova najčešćih vozila na prometnicama [1, 2] (tablica 1.). Prve tri količine navedene u tablici su najvjerojatnije te ostavljaju mogućnost da se nadvožnjak neće srušiti; detonacija većih količina uzrokuje sigurno rušenje.

Tablica 1. Procijenjene količine eksploziva ovisno o tipu vozila [1, 2]

Tip vozila	Količina eksploziva [kg]
Prtljažnik automobila	115
Prtljažnik većeg automobila (karavan)	230
Zatvoreni kombi	680
Zatvoreni kamion	2270
Kamion s prikolicom	13610
Kamion s dvije prikolice	27220

Istraživanju utjecaja eksplozija na konstrukciju mosta može se pristupiti eksperimentalno i računalnim modeliranjem. Do sada provedena istraživanja najčešće povezuju otpornost mostova na eksplozije s potresnom otpornošću, gdje veći razred duktilnosti osigurava i veću otpornost mosta na eksploziju. Ovo se pokazalo u ispitivanjima otpornosti stupova mosta projektiranih prema američkim seizmičkim zahtjevima izloženih različitim intenzitetima eksplozije [3-5]. Većina ispitivanja se provodi na skaliranim modelima [6-9] budući da su ispitivanja na modelima stvarne veličine [10, 11] skupa i opasna. Fujikura i Bruneau (2011) [7] provode ispitivanje duktilnih običnih i neduktilnih čelikom ojačanih armiranobetonskih stupova na djelovanje eksplozije, ali niti jedna vrsta stupa nije pokazala duktilno ponašanje pri opterećenju već se slom dogodio zbog posmika u dnu stupa, što je bilo u suprotnosti s pretpostavljenim slomom popuštanjem pri savijanju. Na temelju eksperimentalnih rezultata zaključeno je da takav tip stupova ne zadovoljava potrebnu otpornost na djelovanje eksplozije već su potrebne određene izmjene. Foglar i Kovar (2013) [6] na vojnom poligonu ispituju djelovanje eksplozije na armiranobetonske ploče visoke čvrstoće te dodatno pojačane mikrovlaknima, u stvarnoj veličini. Ploče opterećuju djelovanjem eksplozije 25 kg TNT postavljenim

na određenoj udaljenosti. Rezultati eksperimenata pokazuju znatno poboljšanje otpornosti ploča s dodatkom vlakana i povećanom čvrstoćom u pogledu smanjenja krhotina i oštećenja te povećanja duktilnosti. Bez obzira na te i ostale eksperimente koji se navode u popisu literature, utjecaj eksplozije još uvijek je neistraženo područje, pri čemu se istraživanja prije svega provode na numeričkim modelima i simulacijama. Računalni programi koji se koriste za numeričke simulacije djelovanja eksplozije jesu takozvani hidrokod programi, specijalizirani za simuliranje dinamike fluida. Takvi programi imaju mogućnost simuliranja procesa detonacije, širenja eksplozivnog vala te interakcije vala s promatranom konstrukcijom (Ansys Autodyn, LS-Dyna, Abaqus, STADPro) [12-15]. Black [16] izvodi procjenu hidrokod računalnog programa Autodyn za korištenje pri modeliranju elemenata opterećenih djelovanjem eksplozije gdje daje opći opis programa, tehnika modeliranja te načina proračuna i simuliranje djelovanja eksplozije. Simulira djelovanje kockastog naboja, mase 45 kg na kvadratnu betonsku ploču (244 cm x 20 cm) kojom je aproksimirana rasponska konstrukcija mosta. Anwarul i Yazdani [17] analiziraju najčešći tip mosta na međudržavnim autocestama SAD-a na djelovanje eksplozije (dvorasponski, tip III AASHTO gredni most s dva prometna traka). Opterećenje greda, stupova i naglavnih greda određeno je na temelju vjerojatnog djelovanja eksplozije. Numerički model mosta načinjen u STAAD Pro računalnom programu pokazao je slom pri djelovanju eksplozije oko i ispod mosta. Autori zaključuju kako tipični AASHTO most nije u stanju podnijeti pretpostavljeno djelovanje eksplozije. Deng i Jin [18] koristeći Autodyn provode numeričku simulaciju u kojoj proučavaju utjecaj veličine mreže konačnih elemenata na raspodjelu tlakova te oštećenja elemenata čeličnog rešetkastog mosta podvrgnutog djelovanju eksplozije 800 kg TNT postavljenog povrh kolničke konstrukcije mosta. Numerički rezultati pokazuju oštećene dijelove mosta i pružaju globalno razumijevanje ponašanja mosta pri djelovanju eksplozije. Tang [19] analizira nelinearni odgovor ovješnog mosta podvrgnutog djelovanju eksplozije 1000 kg TNT-a koristeći prostorni numerički model u LS-DYNA-i. Analiza je provedena u dva koraka kako bi se smanjilo potrebno vrijeme proračuna. Prvi korak detaljno analizira pojedine dijelove mosta ne bi li se odredio način sloma, a u drugom koraku je na temelju uvjeta opterećenja propisanih u DoD-u (eng. *US Department of Defence*) analizirana mogućnost rušenja mosta za prethodno određena oštećenja. Zaključeno je kako slom vertikalnih konstrukcijskih elemenata (stupovi i piloni) vodi katastrofalnom rušenju mosta. Tang i Hao [20] predstavljaju numeričku simulaciju dinamičkog odgovora ovješnog mosta pri djelovanju eksplozije (LS-DYNA). Rad opisuje most, procjenu opterećenja eksplozijom, numerički i materijalni model te detaljnu numeričku simulaciju ponašanja mosta pri djelovanju 1000 kg TNT ekvivalenta na udaljenosti od 0,5 m od stupa i pilona te 1,0 m od rasponske konstrukcije. Proučeni su opseg i mehanizmi oštećenja stupova, pilona i rasponske konstrukcije. U pratećem radu [21] procjenjuju oštećenje mosta te mogućnost ojačanja CFRP (eng. *Carbon Fiber Reinforced Polymer*) vlaknima.

Još jedna numerička metoda pomoću koje je moguće simulirati rušenje konstrukcije [22-24] pri djelovanju eksplozije jest metoda primijenjenih elemenata (eng. *Applied Element Method* - AEM). Ta metoda se razlikuje od klasičnih metoda konačnih elemenata u tome što su ovdje elementi koji čine konstrukcijski element ili konstrukciju zapravo kruta tijela koja su međusobno povezana oprugama kojima se opisuju unutarnje deformacije i polja naprezanja. Svaka ploha AEM elementa je povezana cijelom površinom s drugim elementom preko niza opruga, a svaka opruga se zapravo sastoji od 3 (ili 6) opruge u pojedinim smjerovima slobode. Razlika FEM-a i AEM-a je u tome što se sve deformacije u FEM-u odvijaju unutar elementa, dok se sve deformacije u AEM-u odvijaju izvan elementa tj. u oprugama. Kao i u FEM-u, AEM zahtijeva manje konačne elemente radi veće točnosti, ali je ovdje lakše međusobno povezivanje elemenata jer se povezuju vanjskim oprugama, a ne preko čvorova kao kod FEM-a [25]. AEM je jedina numerička metoda koja može točno analizirati i vizualizirati ponašanje konstrukcije u sve tri faze opterećenja; male i velike deformacije te udar, odnosno slom (rušenja uključujući progresivni slom). Jedini računalni program koji primjenjuje ovu metodu proračuna jest Extreme Loading for Structures (ELS) [26].

Uz kvalitetno modeliranje parametara eksplozije i konstrukcije, numeričke simulacije daju rezultate bliske eksperimentu, no uvijek su prisutna odstupanja, ali ne samo u numeričkim modelima već i pri eksperimentalnom istraživanju na koje također utječe velik broj vanjskih, ali i unutarnjih parametara [27-32].

2. Numeričko modeliranje

Numerički modeli razvijeni za ovo istraživanje konstruirani su koristeći Ansys Autodyn hidrokod računalni program koji je namijenjen dinamičkoj analizi fluida [12]. Program se temelji na eksplicitnoj teoriji konačnih diferencija s mogućnošću modeliranja prostornih problema, a proračun se može obavljati koristeći nekoliko različitih numeričkih formulacija: Eulerovu, Lagrangeovu, proizvoljnu Lagrange-Eulerovu formulaciju, hidrodinamiku glatkih čestica (eng. Eulerian, Lagrange, Arbitrary Lagrange Eulerian - ALE, Smooth Particle Hydrodynamics - SPH) kako bi se optimizirala analiza nelinearnih dinamičkih problema. Analiza mora omogućavati simuliranje, kako ponašanja fluida (zraka), tako i ponašanja konstrukcije te njihove interakcije [9].

Lagrangeova formulacija koristi se za modeliranje čvrstog kontinuuma i konstrukcija te djeluje na strukturiranoj (I-J-K) numeričkoj mreži četverostranih (2D) ili kvadratnih (3D) elemenata [33]. Mreža konačnih elemenata se kreće i deformira kako se kreće materijal, a između konačnih elemenata nema transporta materijala. Prednost ove formulacije je mogućnost točnog praćenja kretanja materijala te je točno definirana granica kontakta različitih materijala, ali i granica različitih površina. Glavni nedostatak je da pri velikim deformacijama materijala dolazi do velikih izobličenja mreže elemenata što

uzrokuje smanjenje točnosti i učinkovitosti proračuna, a u nekim slučajevima može doći do divergencije i prekida proračuna [34]. Eulerova formulacija koristi se za modeliranje fluida, plinova i s njima povezanih velikih deformacija, gdje se primjenjuje metoda kontrolnog volumena za rješavanje jednadžbi očuvanja mase, količine gibanja i energije. Za razliku od drugih tehnika, mreža konačnih elemenata je nepomična u prostoru, a materijal se kreće kroz nju. Prednost ove formulacije je u lakom proračunu velikih deformacija i kretanja mase, ali nema mogućnosti proračuna granica između pojedinih materijala i granica različitih površina.

Proizvoljna Lagrange-Eulerova (ALE) formulacija proračuna je hibridna metoda gdje se mreža konačnih elemenata kreće i deformira prema specifikacijama korisnika. Ugrađen je dodatni korak koji pomiče mrežu elemenata te obavlja prijepis rješenja na novu mrežu. ALE je proširenje Lagrangeove formulacije koje kombinira najbolje značajke obje metode, Lagrangeove i Eulerove.

Modeliranje Ansysom koristeći eksplicitnu vremensku integraciju ograničeno je Courant-Friedrichs-Levyjevom uvjetom [35]. Vremenski korak ograničen je tako da se poremećaj (tj. naprezanje) u definiranom vremenskom koraku ne može proširiti više od najmanje izmjere jednog karakterističnog elementa definiranog mrežom konačnih elemenata. Slijedi da je kriterij vremenskog koraka za stabilnost rješenja prema (1):

$$dt_{\text{cou}} < \min\left(\frac{dx}{c}, \frac{dy}{c}\right) \quad (1)$$

gdje je:

dt - vremenski korak

dx i dy - karakteristične izmjere konačnog elementa

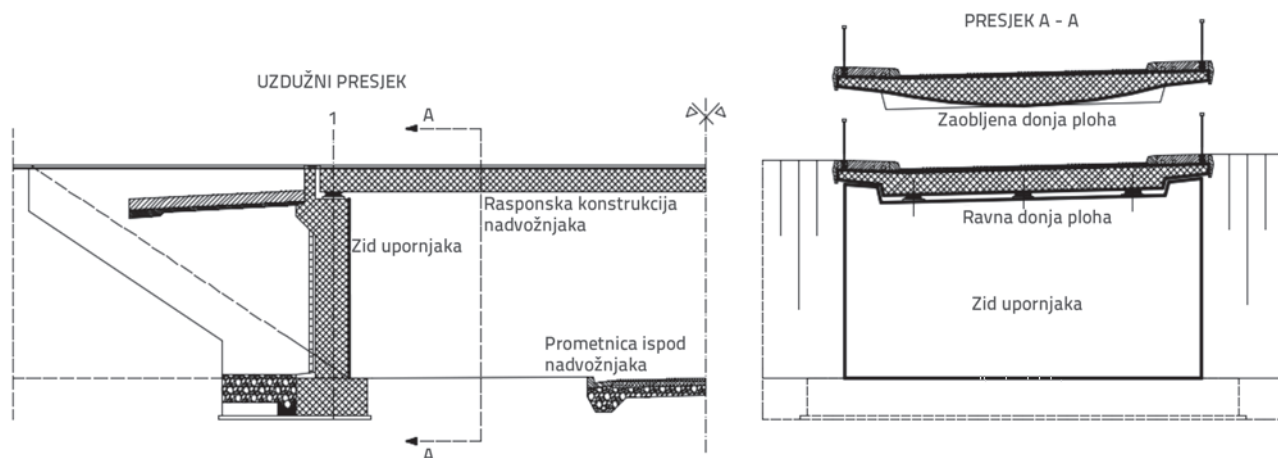
c - brzina zvuka u materijalu promatranog elementa.

Na temelju ovog uvjeta može se zaključiti kako sitnija mreža konačnih elemenata vodi manjem vremenskom koraku te posljedično dužem trajanju proračuna pa je optimizacija mreže konačnih elemenata jedan od ključnih problema numeričkih simulacija.

2.1. Geometrija i model nadvožnjaka

Odabrani tip pločastog grednog nadvožnjaka raspona je 15 m i statičkog sustava proste grede (slika 1.a). Ukupna širina iznosi 7,8 m, a sastoji se od dva prometna traka širine 3,0 m i dva pješaka hodnika širine 0,9 m. Debljina rasponskog sklopa u polovici presjeka iznosi 0,8 m. Krajeve presjeka čine konzolni istaci debljine 0,25 m. Svijetla visina rasponskog sklopa u odnosu na prometnicu koja prolazi ispod nadvožnjaka iznosi 5 m. U ovom istraživanju razmatrana su dva tipa poprečnog presjeka (slika 1.b).

Netipični zaobljeni presjek odabran je jer se pretpostavlja kako zaobljena donja ploha poprečnog presjeka povoljno utječe na

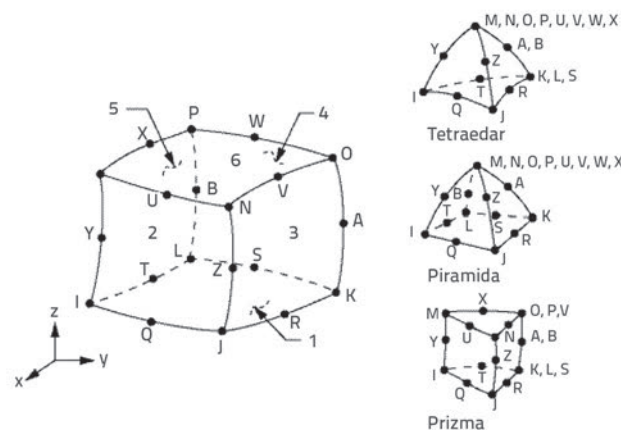


Slika 1. Geometrija nadvožnjaka (uzdužni i poprečni presjek)

otpornost smanjujući direktno opterećenu plohu nadvožnjaka. Odbijanje vala eksplozije odvija se pod određenim kutom što znači kako ne dolazi do dodatnog pojačanja vala uslijed refleksije kao u slučaju ravne donje plohe.

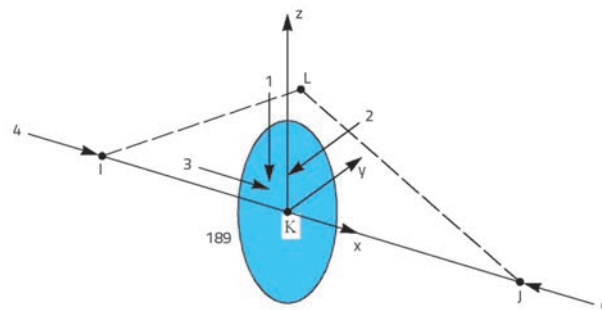
Rasponska konstrukcija je modelirana kao AB ploča. Betonski elementi modelirani su volumenskim, a armatura štapnim konačnim elementima. Štapni elementi su smješteni unutar volumenskih elemenata te su međusobno povezani kontaktnim algoritmom (eng. *body interaction*) kojim je osigurano zajedničko ponašanje pod opterećenjem. Pretpostavljena je idealna veza između betona i armature (eng. *bonded contact*). Volumenski element je tipa SOLID 186, 20-čvorni volumenski konačni element (slika 2.).

deformacije uključeni u proračun. Element je definiran s dvije točke sa šest stupnjeva slobode, translacija u smjeru x, y i z te rotacija oko osi x, y, i z. Prikladan je za linearne i nelinearne proračune, a poprečni presjek se jednoliko skalira kao funkcija uzdužne deformacije pri nelinearnoj analizi kako bi se očuvao volumen elementa. Omogućava velike deformacije [12, 36].



Slika 2. Volumenski element SOLID 186 [36]

To je element višega reda kojim se mogu modelirati nepravilni oblici bez gubitka na točnosti rezultata (kompatibilni deformabilni oblik prikladan za modeliranje zakrivljenih rubova). Element je definiran s 20 točaka s tri stupnja slobode, translacije u smjeru x, y i z. Može imati bilo kakvu prostornu orijentaciju te mu se može zadati plastičnost, puzanje, očvršćivanje, itd. Štapni element je tipa BEAM 189, 2-čvorni štapni element (slika 3.). Temelji se na Timoshenkovoj teoriji pa su učinci poprečne

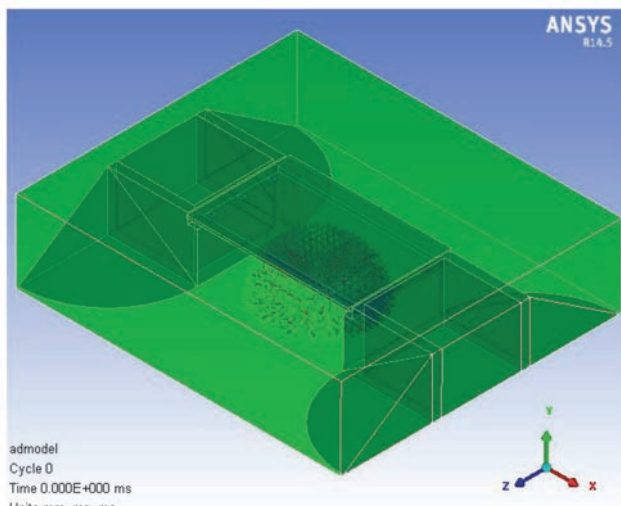


Slika 3. Štapni element BEAM 189 [36]

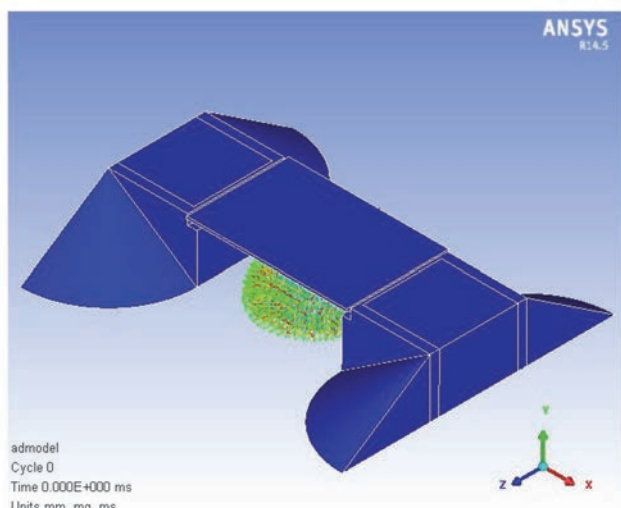
Numerički model nadvožnjaka sastoji se od dijela koji je modeliran kao Eulerov idealni plin (1 503 684 volumnih elemenata) te strukturiranog dijela koje predstavlja konstrukciju nadvožnjaka (AB ploča 1 620 240 volumnih elemenata, armatura 23 836 štapnih elemenata te elastomerni ležaj 384 volumna elementa). Navedeni broj elemenata odnosi se na četvrtinu modela. Tlo je modelirano rubnim uvjetom koji ne dopušta širenje čestica zraka u valu eksplozije niti čestica erodiranog materijala nadvožnjaka (betona i čelika). Interakcija vala eksplozije i konstrukcije računa se koristeći Euler-Lagrangeovu interakciju i eroziju. Erozijom, tj. uklanjanjem oštećenog materijala nadvožnjaka, simulirano je oštećenje rasponske konstrukcije. Rubni uvjeti postavljeni na preostale zračne plohe omogućavaju slobodno širenje tlaka vala eksplozije i erodiranih elemenata izvan modeliranog volumena zraka.

Slika 4. prikazuje prostorni numerički model nadvožnjaka u okolini. Modelirana je rasponska konstrukcija (ravnog te posebno, zaobljenog poprečnog presjeka), masivni upornjak, nasip, detonacija eksploziva ispod rasponskog sklopa te je cijeli

model smješten u okolinu kojoj su zadane karakteristike zraka (tablica 5.). Ovaj dio modela bitan je jer je to medij kojim se prenosi tlak vala eksplozije s detoniranog TNT-a na rasponsku konstrukciju. Na slici 5. prikazan je položaj eksplozije ispod nadvožnjaka. Ovdje se vidi već djelomično proširen val eksplozije neposredno prije kontakta s rasponskom konstrukcijom.



Slika 4. Nadvožnjak s masivnim upornjakom u okolini



Slika 5. Položaj eksplozije ispod nadvožnjaka

2.2. Materijali

Pri odabiru svojstava materijala mora se voditi računa da se trajanje djelovanja u ovim slučajevima mjeri u milisekundama pa se ona razlikuju od svojstava za spore/statičke pojave. Za beton je odabran RHT (Riedel-Hiermaier-Thoma) model, eksperimentalno određen na uzorcima podvrgnutim impulsnim opterećenjem (udarom), što je dovoljno točan materijalni model ponašanja pri eksploziji. Parametri modela (tablica 2.) prilagođeni su razredu čvrstoće betona C35/45 pomoću faktora predloženih u [37, 38], gdje se može pronaći i detaljniji opis modela.

Tablica 2. Parametri RHT modela za beton klase C35/45

Parametar	Opis parametra	NSC, 35 [MPa] [37, 38]
G_{el}	Elastični modul posmika	16,7 GPa
f_c	Statička tlačna čvrstoća betona	35,0 MPa
f_t/f_c	Omjer statičke vlačne i tlačne čvrstoće betona	0,10
f_s/f_c	Omjer posmične i statičke tlačne čvrstoće betona	0,18
A_{fail}	Parametar nezavisan o tlaku za plohu sloma	0,00
B_{fail}	Linearni parametar za plohu sloma	1,60
N_{fail}	EkspONENT plohe sloma	0,61
$Q_{2,0}$	Omjer vlačnog i tlačnog meridijana, referentna vrijednost	0,6805
BQ	Parametar prijelaza i krtog u duktilno ponašanje	0,0105
$G_{el}/(G_{el}-G_{pl})$	Omjer elast. modula posmika i razlike elast. i plast. modula posmika	2,0
$f_{t,el}/f_t$	Omjer elastične i statičke vlačne čvrstoće betona	0,70
$f_{c,el}/f_c$	Omjer elastične i statičke tlačne čvrstoće betona	0,53
Cap option	Opcija vršne vrijednosti	Active
B_{fric}	Linearni parametar za plohu preostale čvrstoće	1,60
N_{fric}	EkspONENT plohe preostale čvrstoće	0,61
α	EkspONENT prirasta tlačne čvrstoće	0,032
δ	EkspONENT prirasta vlačne čvrstoće	0,036
D_{RHT1}	D_1 parametar oštećenja materijala	0,04
D_{RHT2}	D_2 parametar oštećenja materijala	1,00
$\epsilon_{min}^{failure}$	Minimalna deformacija pri slomu	0,01
ShratD	Dio preostalog posmičnog modula	0,13

Tablica 3. Parametri sloma betona

Parametar	Vrijednost	Mjerna jedinica
Slom	RHT beton	/
D1	0,04	/
D2	1,00	/
Minimalna deformacija sloma	0,01	/
Preostali dio posmičnog modula elastičnosti	0,13	/
Vlačni slom	glavno naprezanje	/
Glavno vlačno naprezanje sloma	3290	kPa
Raspucavanje	Da	/
Energija loma	100	J/m ²
Stohastički slom	Ne	/

Tablica 4. Statički i dinamički parametri odabrane armature B500B

B500B	E [N/mm ²]	f_y [N/mm ²]	ε_y [%]	f_u [N/mm ²]
Statički	210000	500	0,238	540
Dinamički	210000	755	0,238	615,6

Osim osnovnih parametara čvrstoće betona, u model je uključena i simulacija sloma materijala pri doseganju vlačne čvrstoće. Parametri sloma betona prikazani su u tablici 3. Na model betona nije dodatno primijenjen dinamički faktor uvećanja [39] (eng. *Dynamic Increase Factor* - DIF) jer je model posebno razvijen za dinamička djelovanja.

Za armaturu je odabran bilinearni kinematički elasto-plastični model. Odabrana je kvaliteta armature B500B. Na statičke veličine primijenjen je DIF kako bi se simuliralo dinamičko ponašanje armature. S obzirom na procijenjenu brzinu deformacije armature pri eksploziji od 1000 s⁻¹ primijenjen je DIF [40] u iznosu od 1,51 za granicu popuštanja te 1,14 za vlačnu čvrstoću, a izračunane dinamičke karakteristike armature prikazane su u tablici 4.

Zrak je modeliran s jednadžbom stanja za idealni plin u kojoj je tlak p povezan s energijom preko empirijskog izraza (2):

$$p = (\gamma - 1)\rho e \quad (2)$$

gdje je:

ρ - gustoća zraka

e - specifična unutarnja energija

γ - konstanta.

Jednadžba predstavlja jednu od najjednostavnijih jednadžbi stanja. Zrak je plinoviti materijal pa nema mogućnost prijenosa naprezanja te kao takvom nije pridružena nikakva zakonitost promjene čvrstoće ili sloma već on služi samo kao medij koji prenosi udarne valove eksplozije nastale detonacijom. Glavni parametri zraka korišteni u numeričkom modelu prikazani su u tablici 5.

Tablica 5. Materijalne karakteristike zraka

Zrak		
Jednadžba stanja	Idealan plin	
Referentna gustoća	$1,225 \cdot 10^{-3}$	[g/cm ³]
Γ	1,40	
Referentna temperatura	288,20	[K]
Specifična toplina	717,60	[J/kgK]
Početa energija	$2,068 \cdot 10^5$	[mJ/mg]

Detonacija je proces u kojemu se materijal eksplozivno pretvara u plin te je najčešće taj proces završen na samome početku simulacije. Slično kao i zrak, eksplozivni materijal nema nikakvu čvrstoću niti je podložan slomu. Eksploziv je modeliran Jones-Wilkins-Leeovom (JWL) [41] jednadžbom stanja (3):

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 \chi}\right) e^{-R_1 \chi} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 \chi}\right) e^{-R_2 \chi} + \frac{\omega}{\chi} \quad (3)$$

gdje je:

p - hidrostatički tlak

χ - specifični volumen ($1/\rho$)

e - specifična unutarnja energija

A, R_1, B, R_2, ω - eksperimentalno određene konstante [42].

Parametri TNT-a korišteni u numeričkom modelu prikazani su u tablici 6.

Tablica 6. Materijalne karakteristike TNT-a

TNT		
Jednadžba stanja	JWL	
Referentna gustoća	1,63	[g/cm ³]
Parametar A	$3,738 \cdot 10^8$	[kPa]
Parametar B	$3,747 \cdot 10^6$	[kPa]
Parametar R_1	4,15	
Parametar R_2	0,90	
Parametar ω	0,35	
C-/brzina detonacije	$6,930 \cdot 10^3$	[m/s]
C-/energija po jedinici volumena	$6,000 \cdot 10^6$	[kJ/m ³]
C-/tlak	$2,100 \cdot 10^7$	[kPa]
Početa energija	$3,681 \cdot 10^6$	[mJ/mg]

2.3. Mreža konačnih elemenata

Zbog izrazito kratkog trajanja djelovanja vala eksplozije i brzog protoka energije između elemenata, numerički rezultati širenja vala i interakcije s konstrukcijom vrlo su osjetljivi na veličinu mreže konačnih elemenata. Osim toga, nejednolika raspodjela tlakova koju uzrokuje eksplozija pri različitim veličinama mreže stvara gradijente tlaka koji mogu biti bitno različiti [43].

Istraživanja [4, 10, 39, 43-48] pokazuju kako mreža konačnih elemenata prihvatljiva za jedan slučaj djelovanja eksplozije ne mora biti mjerodavna za nekakav drugi slučaj iako je riječ o sličnim problemima. Iz ovoga proizlazi da jednostavna provjera konvergencije veličine mreže ne mora biti dovoljna kako bi zajamčila točne numeričke rezultate. Mreža elemenata koja je dovoljne točnosti za predviđanje nadtlaka eksplozije za velike udaljenosti može biti pregruba za predviđanje slučajeva gdje su udaljenosti male. Štoviše, zbog ograničenja računala i softvera nekada je nemoguće koristiti malu mrežu elemenata

u simulacijama. U tim slučajevima potrebno je koristiti grublje mreže, ali to neizbježno vodi greškama.

Usljed nelinearnosti procesa oštećenja mosta izloženog djelovanju eksplozije potrebno je provesti kalibraciju parametara numeričkog modela, tj. vremenskog koraka i veličine konačnih elemenata s eksperimentalnim podacima. Za razliku od elastičnih problema gdje finija mreža elemenata i manji vremenski korak daju točnije rezultate, u slučaju nelinearnih problema to ne mora biti tako. Naime, smanjenje elemenata mreže i vremenskog koraka ne vodi nužno točnijim rezultatima, već oni ovise i o materijalnim karakteristikama. Također, presitna mreža može prouzročiti numeričku nestabilnost.

Kako su eksperimentalni podatci o djelovanju eksplozije na mostove slabo dostupni, moguće je provesti kalibraciju mreže elemenata modela koristeći eksperimentalne podatke na drugim komponentama izvedenih od sličnih materijala, pa iako i taj proces ne osigurava potpunu točnost kalibriranog modela, dobiveni rezultati ipak će biti točniji od onih dobivenih koristeći samo parametarsku analizu modela.

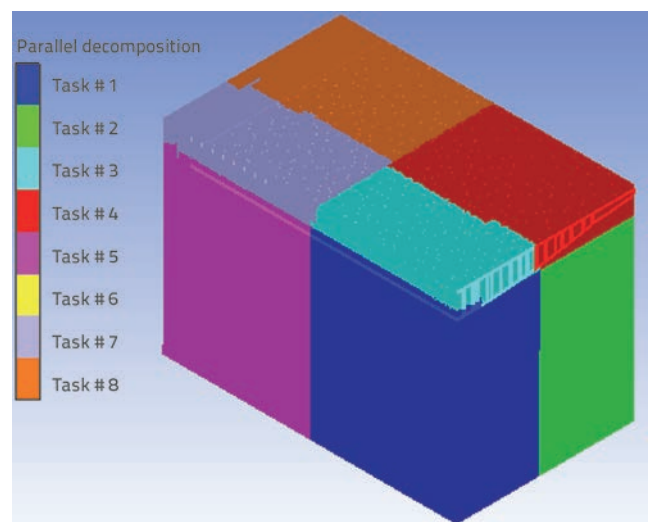
Slijedom navedenog izvršena je kalibracija modela, tj. određivanje optimalne mreže konačnih elemenata usporedbom rezultata simulacije s eksperimentalnim rezultatima djelovanja eksplozije na AB ploču koju su proveli Zhao i dr. [49]. Usporedbom rezultata zaključeno je podudaranje širenja oštećenja eksperimentalnog i numeričkog modela za veličinu mreže elemenata od 25 mm. Razina oštećenja u numeričkim modelima nešto je veća od eksperimentalnog ispitivanja zbog stvarnih i numeričkih rubnih uvjeta i razlika u stvarnom i modeliranom ponašanju materijala. Naime, rubni uvjet koji se zadaje numerički ima apsolutnu krutost (upetost), dok se u eksperimentalnim uvjetima može ostvariti samo nominalna upetost, a stvarno ponašanje materijala je znatno složenije u odnosu na pojednostavljeno modelirano. Navedena veličina mreže primijenjena je na sve elemente numeričkog modela; rasponsku konstrukciju i zrak.

2.4. Paralelni proračun

Autodyn je specijalno razvijen za analizu nelinearnih, dinamičkih problema kao što su udari te opterećenja eksplozijom na konstrukcije ili njezine elemente. Kako raste pouzdanost u računalne simulacije tako raste i složenost problema koje treba riješiti. Međutim, praktičnost rješenja velikih simulacija ograničena je smanjenim mogućnostima postojećih kapaciteta računala. Nije neuobičajeno da proračun modela koji se sastoji od nekoliko milijuna elemenata traje tjednima. Jedan mogući pristup kojim se može riješiti ovaj problem je uporaba paralelnog proračuna. Paralelni algoritmi uvedeni su u Autodyn kako bi se iskoristile mogućnosti paralelnog proračuna koji omogućava istovremeno korištenje više računalnih procesora bilo na mreži različitih računala ili unutar jednog računala. Dekompozicija domene (modela) koristi se za oblikovanje paralelnog proračuna strukturiranih (Lagrange), ali i nestrukturiranih (Euler) dijelova. Koristeći ovu metodu svaki dio je podijeljen kako bi se stvorili manji dijelovi, poddomene. Poddomene se dalje distribuiraju

između središnjih procesorskih jedinica za obradu (eng. *Central Processing Unit* - CPU). Svaka poddomena se analizira u paralelnom proračunu kao da je standardni dio serijskog proračuna. Algoritam također omogućava dekompoziciju složenih Euler/Lagrangeovih modela [50].

Zbog složenosti problema, dekompozicija je učinjena automatskim putem, tj. ostavljeno je Autodynu da sam izvrši dekompoziciju modela na temelju unutarnjeg algoritma koji nastoji smanjiti na minimum međusobnu komunikaciju procesora te ujednačiti njihovo opterećenje. Zadan je samo broj zadataka (eng. *tasks*), tj. broj procesora koji se koristi za proračun što je određeno na temelju dostupne HPC licencije koja dopušta istovremeno korištenje 8 procesora. Slika 6. prikazuje dekompoziciju modela nadvožnjaka.



Slika 6. Dekompozicija nadvožnjaka

3. Rezultati i rasprava

Analizirana je pojava širenja vala eksplozije te interakcije s rasponskim sklopom. Konstruirana je ploha tlakova vala na rasponsku konstrukciju i vizualno prikazano nastalo oštećenje. Prikazano je naprezanje u ugrađenoj armaturi, oblik nastalih pukotina uslijed djelovanja tlaka vala te erozija konstitutivnog materijala rasponskog sklopa, betona. Prikazani rezultati odnose se na trenutak maksimalnog djelovanja tlaka eksplozije (1,5 ms).

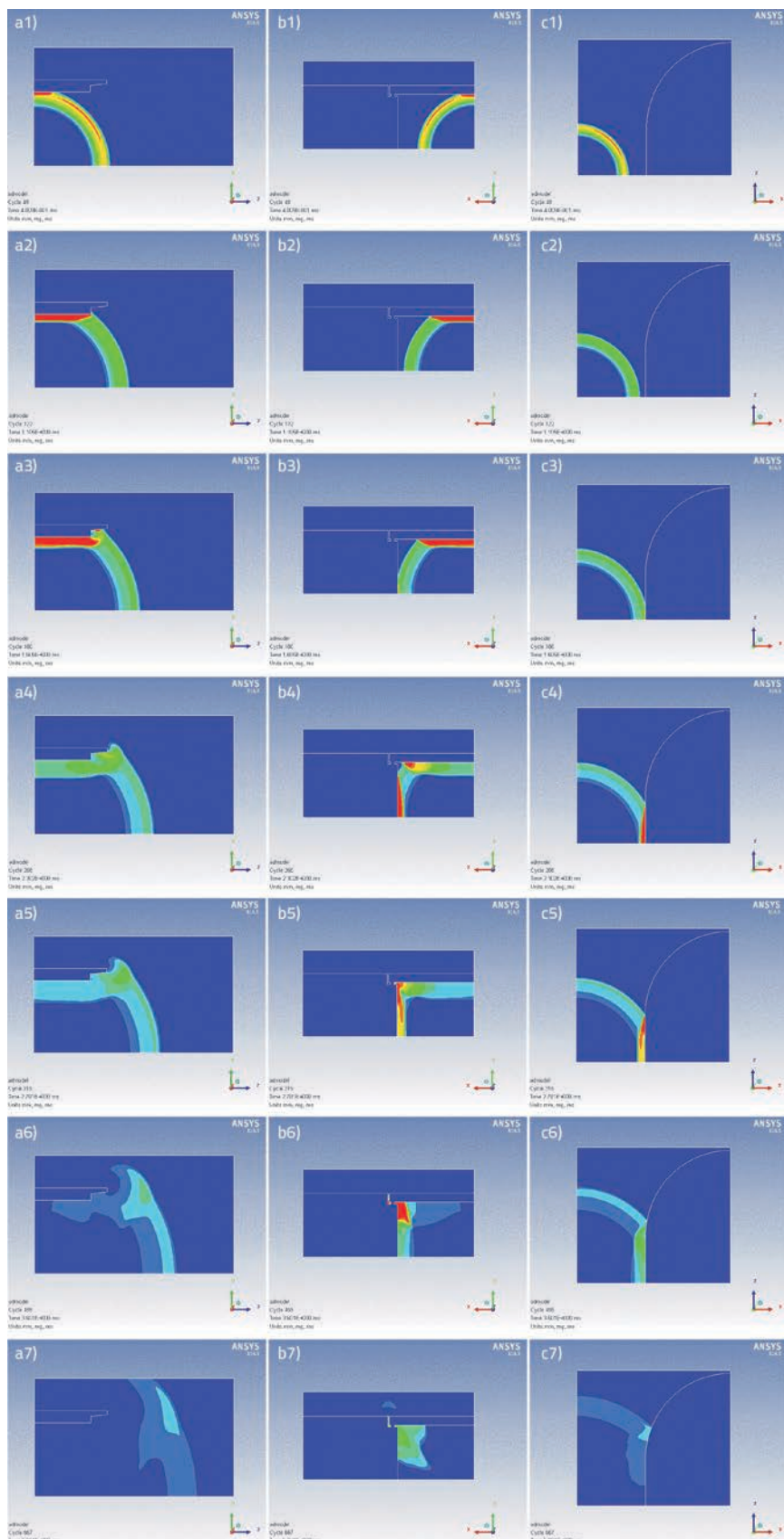
Model nadvožnjaka u prvoj fazi analize pretpostavljen je (i modeliran) kao apsolutno kruta konstrukcija za koju se promatralo samo širenje vala eksplozije te vrijednosti djelujućih tlakova. Konstrukcija je promatrana apsolutno kruta kako bi se ubrzao proračun i eliminirali svi ostali učinci tlaka, oštećenje rasponskog sklopa, te su se promatralo samo vrijednosti tlakova, tj. opterećenje na rasponski sklop izazvano detonacijom pretpostavljene količine eksploziva ispod nadvožnjaka. Ovdje je korištena manja količina eksploziva, 100 kg TNT-a sferičnog oblika naboja u odnosu na simulacije oštećenja gdje je korištena veća količina koja je odgovarala realnim kapacitetima mogućih

vozila koja prometuju ispod nadvožnjaka. Bez obzira na promatranu količinu eksploziva, način širenja vala i raspodjela tlakova na rasponsku konstrukciju za jednak oblik naboja i položaj točke detonacije ostaje jednak, variranjem količine eksploziva variraju se samo iznosi djelujućih tlakova.

U drugoj fazi rasponska konstrukcija nadvožnjaka modelirana je kao deformabilna konstrukcija te su joj pridružene materijalne karakteristike betona i čelika kako bi se simuliralo oštećenje. U toj fazi modelirana je samo četvrtina konstrukcije s primjenom simetrije oko uzdužne i poprečne osi. Na ovaj način se dodatno smanjilo vrijeme proračuna bez smanjenja točnosti rezultata. Nadvožnjak je analiziran na djelovanje prve tri (115 kg, 230 kg i 680 kg) količine eksploziva navedene u tablici 1. za koje se pretpostavlja da su najvjerojatnije. Rezultati oštećenja prikazani su samo za najveću količinu eksploziva, 680 kg TNT-a.

3.1. Širenje vala eksplozije i opterećenje na rasponski sklop nadvožnjaka

Širenje vala eksplozije poprima pretpostavljeni oblik. Valovi se šire u obliku koncentričnih krugova od središta (izvora) detonacije prema van, nastaje početni tlak. Val se širi do kontakta s rasponskim sklopom (konstrukcijom) nakon čega se čestice vala odbijaju od plohe konstrukcije. Nakon odbijanja, čestice vala se sudaraju s ostalim nadolazećim česticama pri čemu dolazi do stlačivanja što uzrokuje povećanja tlaka vala na promatranu plohu, nastaje odbijeni tlak. Udar vala, stlačivanje i povećanje tlaka vala može se vidjeti na slici 7., prikazano tamno crvenom bojom u konturama vala (a1, b1, a2, b2, a3, b3, b4, c4). Val se i dalje širi te dolazi do prelijevanja vala preko rubova rasponskog sklopa pri čemu nastaju tlakovi i na gornjoj plohi rasponskog sklopa (slika 7., a4, a5, a6). Val također dolazi do upornjaka te vrši pritisak na njegov zid, ali ovdje je tlak manjeg iznosa budući da je zid upornjaka udaljeniji od točke detonacije u odnosu na rasponski sklop. Nakon sudara vala

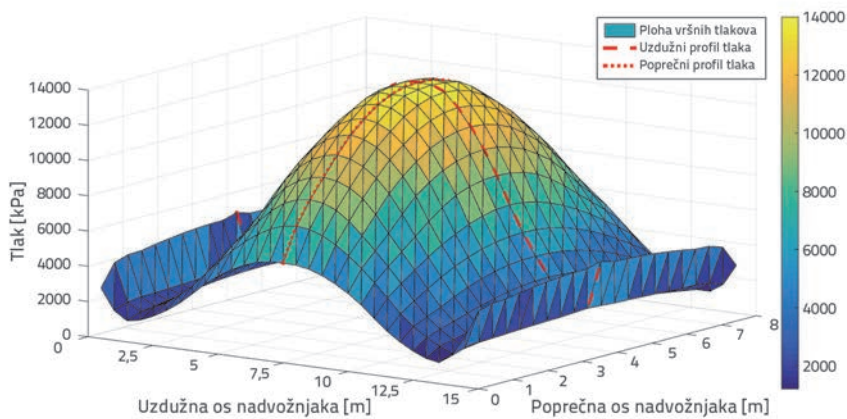


Slika 7. Rasprostiranje valne fronte oko nadvožnjaka kroz nekoliko vremenskih trenutaka (stupac a: oko poprečnog presjeka rasponskog sklopa; stupac b: pri osloncu; stupac c: točno oko zida upornjaka)

s rasponskim sklopom i upornjakom, nastali odbijeni val putuje duž ploha prema ležajnoj gredi (slika 7., b4, b5, b6, b7). Ako je detonirana dovoljna količina eksploziva, to može uzrokovati povećane tlakove na krajeve rasponskog sklopa, a to posljedično može dovesti do odizanja i skliznuća s ležajeva. Budući da postoji slobodan prostor između rasponskog sklopa i upornjaka, zbog postavljenih ležajeva, omogućeno je "ventiliranje", tj. djelomično slobodan prolaz vala eksplozije što smanjuje konačni iznos tlaka na kraj nadvožnjaka (slika 7., b.6, b.7).

Detonacija je najčešće praćena s nastankom "vatrene kugle" (eng. *fireball*) koja nastaje jer je mješavina eksplozivnog sredstva (plin, kemikalija, eksploziv) toliko koncentrirana da cjelokupna količina materijala ne može trenutno detonirati, već izgara tijekom vremena. Obuhvaćanje konstrukcije "vatrenom kuglom" može uzrokovati veća oštećenja od običnog djelovanja eksplozije, no promjer i trajanje "kugle" je vrlo teško odrediti jer ne postoji nagli prestanak djelovanja već dolazi do polaganog hlađenja. Također, "vatrena kugla" je najčešće optički gusta te nije moguće valjano odrediti koji se procesi odvijaju unutar "kugle", a postoji vrlo malo mjerenja budući da su katastrofalne eksplozije najčešće nenajavljene i nema priprema za njihovo mjerenje. Uspoređujući rizik od učinaka eksplozije s rizikom učinaka "vatrene kugle" utvrđeno je kako djelovanje "vatrene kugle" ima veći učinak na osobe na većim udaljenostima od djelovanja eksplozije, a za konstrukcije veći učinak ima djelovanje eksplozija na većim udaljenostima od djelovanja "vatrene kugle" [51]. Iz navedenih razloga učinci "vatrene kugle" nisu uzeti u obzir prilikom analize djelovanja eksplozije na nadvožnjak.

Ovojnica tlakova dobivena je na način da su na donju plohu u pravilnim razmacima postavljene mjerne točke kojima su mjereni odbijeni tlakovi na rasponsku konstrukciju u vremenu. Mjerne točke su, počevši iz središta rasponskog sklopa, postavljene na razmaku od 0,5 m u uzdužnom smjeru te 0,39 m u poprečnom smjeru, pa je tako dobivena pravilna mreža od

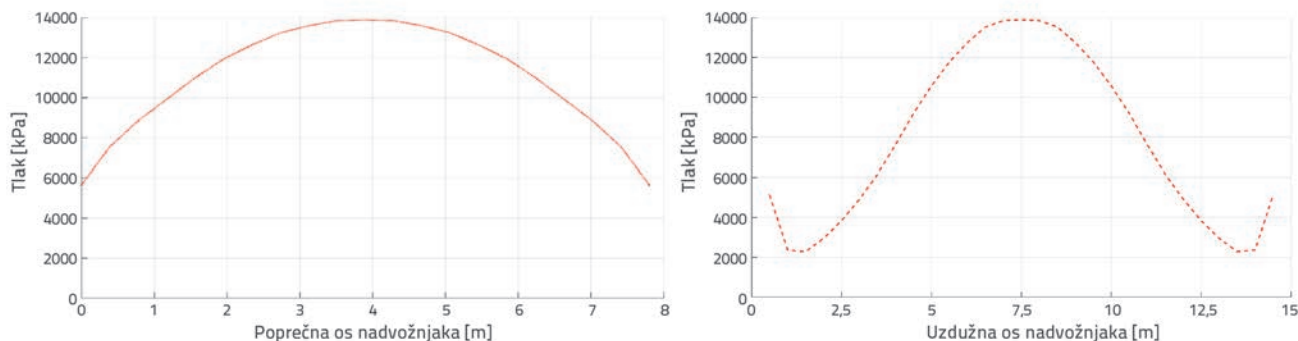


Slika 8. Ovojnica maksimalnih tlakova na rasponski sklop nadvožnjaka

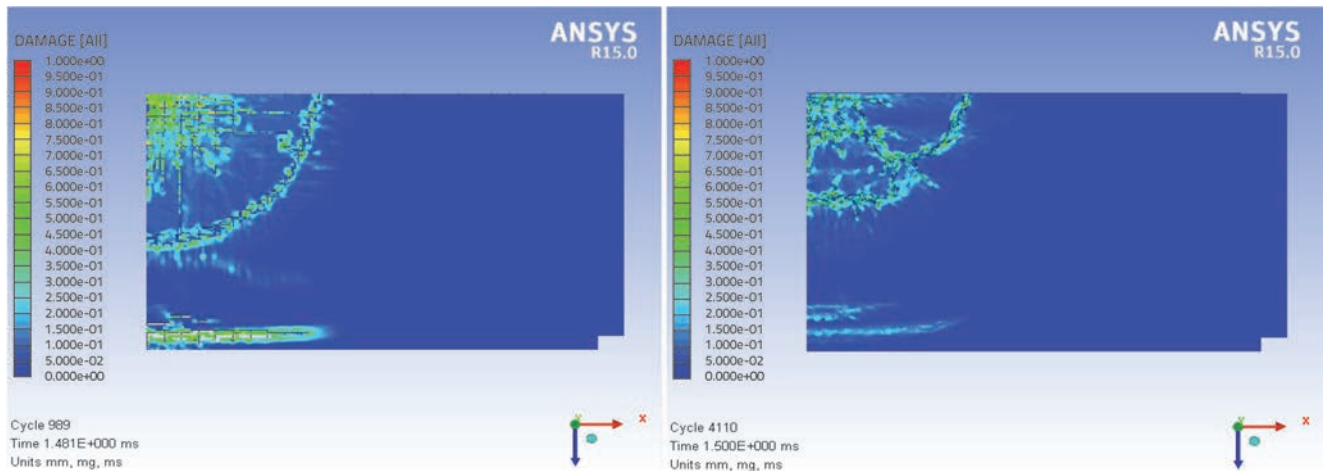
609 mjerne točke. Na temelju prikupljenih vremenskih zapisa tlakova u pojedinoj točki konstruirana je ploha djelujućih tlakova na donju stranu rasponskog sklopa. Rezultantna ovojnica maksimalnih tlakova prikazana je na slici 8. Slika 9. prikazuje raspodjelu maksimalnih tlakova po širini i duljini nadvožnjaka u središnjoj osi. Maksimalno djelovanje vala u sredini je raspona jer je ta točka nadvožnjaka najbliža točki detonacije. Vidljivo je kako se udaljujemo od središta detonacije veličine tlakova se smanjuju. Promatrajući promjenu tlaka u uzdužnom smjeru vidimo da se tlakovi smanjuju idući prema kraju nadvožnjaka, ali na krajevima je ponovno povećanje tlaka, što je uzrokovano dodatnim sudarom valova odbijenih od rasponske konstrukcije i zida upornjaka (slika 7., b5, b6). Načelno, obje vrste poprečnog presjeka, ravni i zaobljeni, imaju jednak oblik ovojnice maksimalnih tlakova.

3.2. Oštećenje rasponskog sklopa

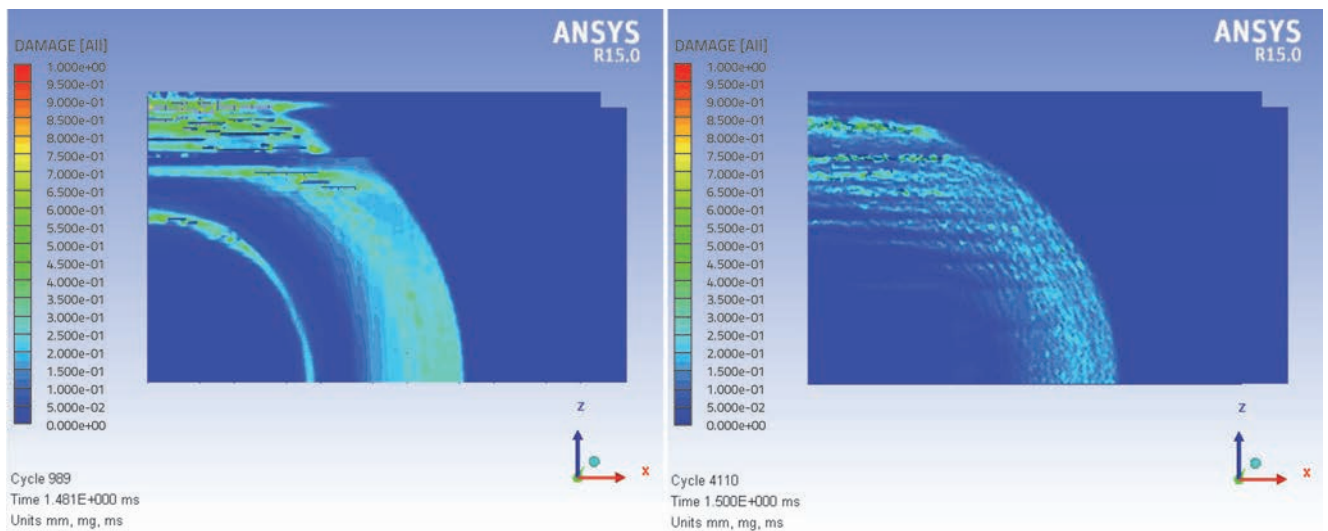
Analiza dobivenih rezultata te vizualizacija oštećenja rasponskog sklopa upućuju na to da je gornja ploha pretrpjela znatno veća oštećenja nego donja ploha. Slika 10. prikazuje raspodjelu nastalih pukotina na gornjoj plohi rasponskog sklopa u trenutku djelovanja maksimalnog tlaka za obje vrste poprečnog presjeka, ravni (lijevo) i zaobljeni (desno), a slika 11. prikazuje raspodjelu pukotina na donjoj plohi.



Slika 9. Raspodjela tlaka eksplozije po širini i duljini nadvožnjaka



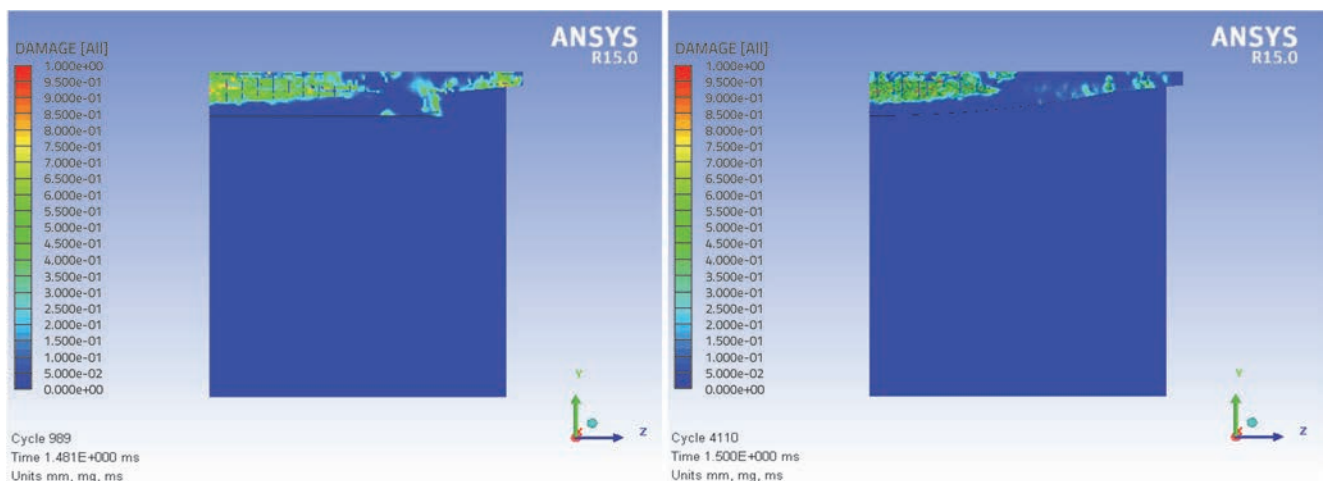
Slika 10. Oštećenje rasponske konstrukcije u t=1,5 ms - gornja ploha



Slika 11. Oštećenje rasponske konstrukcije u t=1,5 ms - donja ploha

Početak oštećenja je unutar poprečnog presjeka, u jezgri presjeka, te se širi prema gornjoj plohi, dok donja ploha na mjestu djelovanja vala eksplozije ostaje gotovo neoštećena.

To se jasno može vidjeti na poprečnom (slika 12.) i uzdužnom presjeku rasponskog sklopa (slika 13.). Osim oštećenja ploče, dolazi i do oštećenja konzolne istake, opet je veće oštećenje kod



Slika 12. Oštećenje rasponske konstrukcije u t=1,5 ms - poprečni presjek

rasponskog sklopa s ravnom donjom plohom. Manje oštećenje konzolne istake zaobljenog presjeka rezultat je postupnog povećanja tlaka kako val klizi po zaobljenoj plohi ploče, ali i konzole, dok kod ravnog presjeka dolazi do iznenadnog odbijanja i tlačnja čestica tlaka nakon sudara s ravnom plohom (slike 11. i 12.).

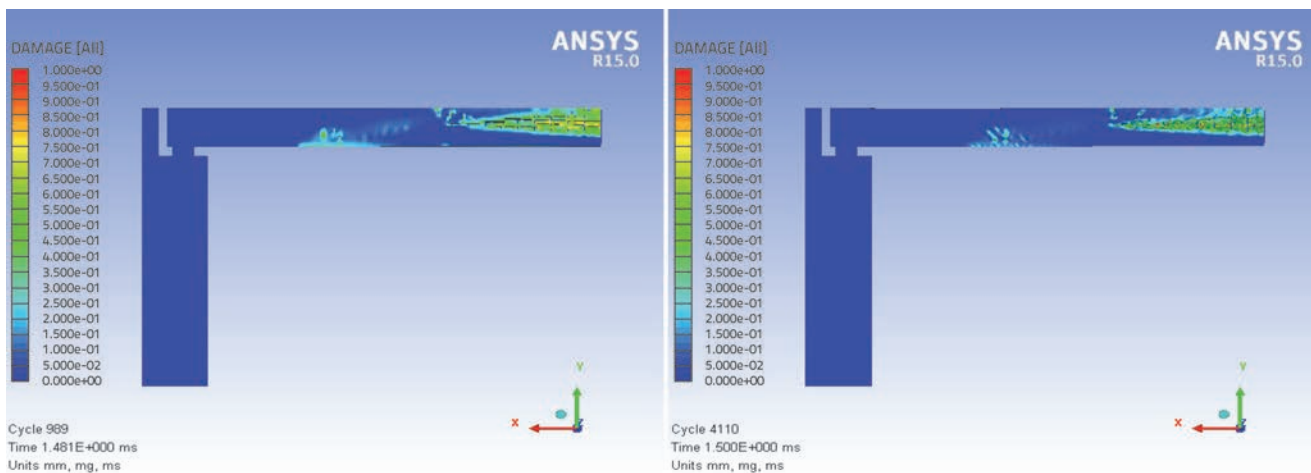
Naprezanja unutar armature rasponskog sklopa pokazuju kako pri prijenosu opterećenja uzrokovanog djelovanjem eksplozije sudjeluje većinom ugrađena konstrukcijska armatura gornje zone rasponskog sklopa. Ugrađena glavna armatura, dobivena dimenzioniranjem sklopa na standardno stalno i promjenjivo djelovanje, ima mali utjecaj na otpornost presjeka, već je glavina otpornosti ostvarena konstrukcijskom armaturom. Na temelju ovoga može se zaključiti kako dvostruko armiranje rasponskog sklopa može znatno pridonijeti otpornosti na djelovanje eksplozije. Prilikom armiranja rasponskog sklopa može se primijeniti princip armiranja seizmički otpornih stupova u kojemu se armatura dobivena dimenzioniranjem postavlja u obje zone stupa, tlačnu i vlačnu.

Slika 15. prikazuje stanje materijala rasponskog sklopa, pri

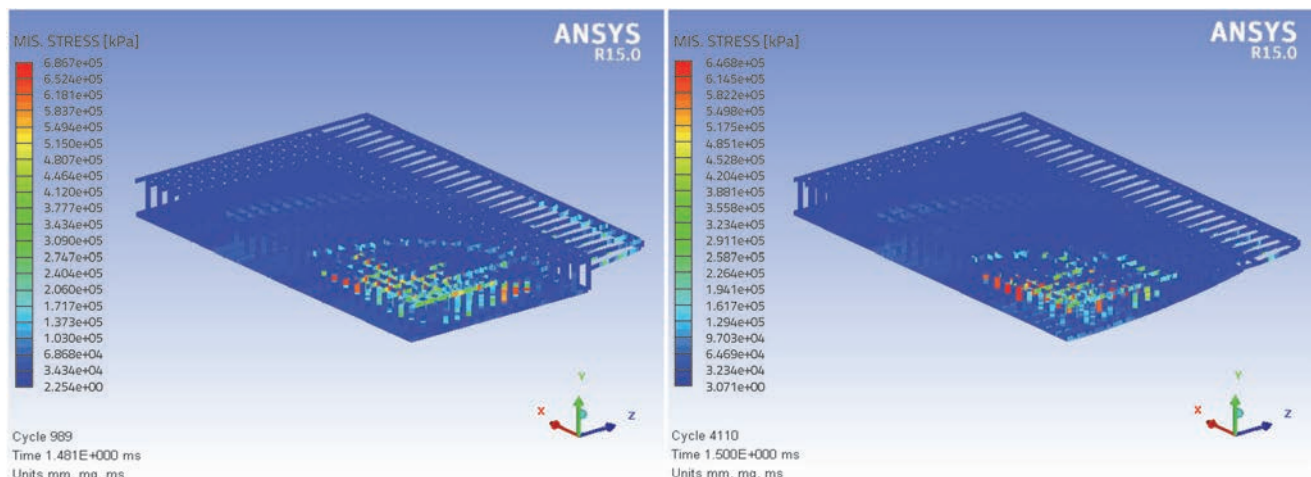
čemu se može vidjeti prethodno opisano oštećenje gornje plohe i jezgre presjeka gdje je došlo do otkazivanja nosivosti. Tlačna deformacija betona na donjem rubu presjeka prešla je granicu od 3,5 ‰, a na gornjem rubu prekoračena je vlačna čvrstoća od 3,2 N/mm². Preostali dijelovi rasponskog sklopa još uvijek se ponašaju elastično te je posebno zanimljivo primijetiti kako se donja ploha rasponskog sklopa, koja je direktno opterećena djelovanjem vala eksplozije, također ponaša elastično, odnosno nije došlo do plastične deformacije. Ako oštećene elemente, tj. elemente kod kojih je deformacija znatno veća od definirane granice, uklonimo s modela, a na slici 16. jasno možemo vidjeti koliki su razmjeri oštećenja rasponskog sklopa.

3.3. Procjena stanja nadvožnjaka koristeći tlak-impuls dijagrame

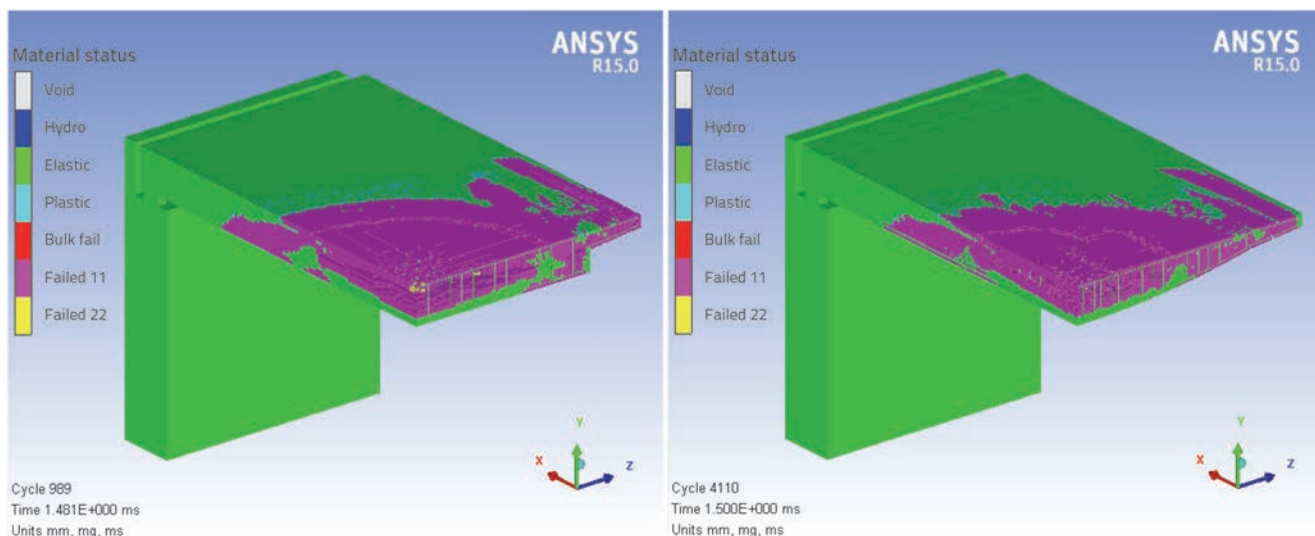
Trajanje opterećenja pri eksploziji vrlo je kratko (ovisi o količini eksploziva i udaljenosti naboja, npr. za 100 kg TNT na udaljenosti od 1 m trajanje pozitivne faze je oko 1,2 ms, no za udaljenost od 10 m trajanje pozitivne faze je oko 11 ms) pa



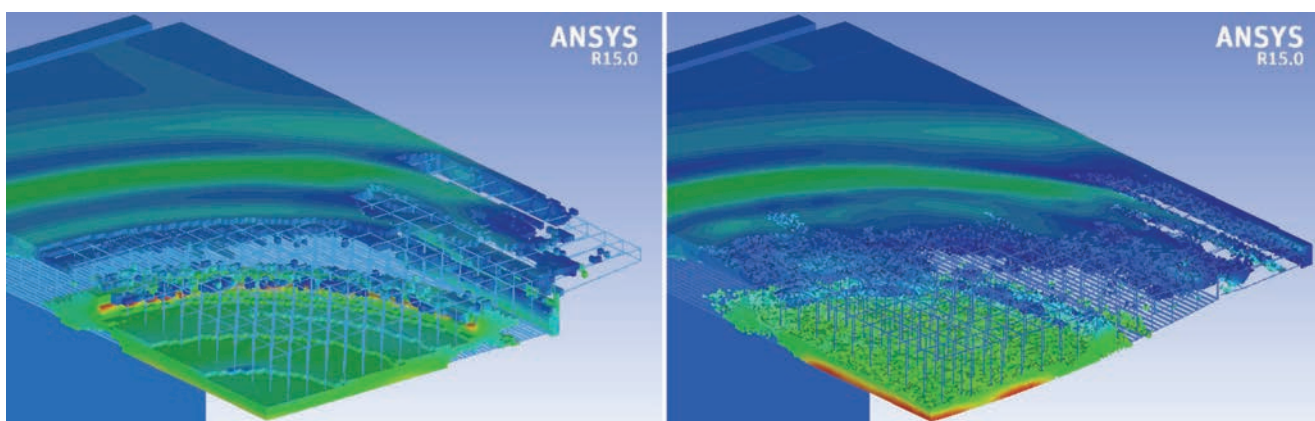
Slika 13. Oštećenje rasponske konstrukcije u t=1,5 ms - uzdužni presjek



Slika 14. Mises naprezanje armature rasponskog sklopa u t=1,5 ms



Slika 15. Stanje materijala u t=1,5 ms



Slika 16. Oštećenje rasponske konstrukcije

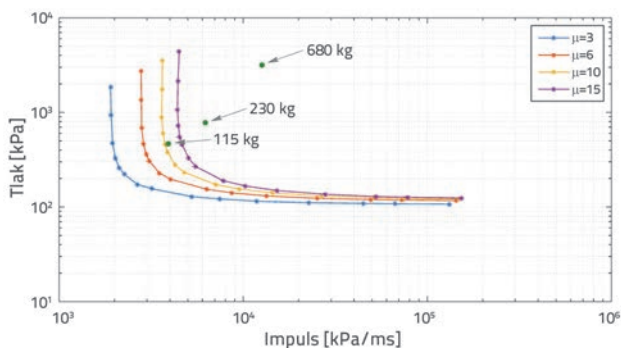
do trenutka kada se masa pokrene opterećenje je prošlo čime se smanjuje odgovor konstrukcije. Parametri eksplozije, tlak i impuls, mogu poslužiti za prikazivanje bilo kojeg opterećenja eksplozijom. Za konstrukcije izložene djelovanju eksplozije, tlak-impuls dijagrami su izobarne krivulje koje predstavljaju razine oštećenja konstrukcije za pojedinu kombinaciju tlaka i impulsa [52, 53]. Tlak-impuls (TI) dijagram je alat koji omogućuje pojednostavljenu procjenu ponašanja konstrukcijskog elementa izloženog djelovanju određenog opterećenja, u našem slučaju opterećenja eksplozijom. Kada projektant definira maksimalnu vrijednost određenog parametra odziva, dijagram predstavlja kombinaciju tlaka i impulsa koji će uzrokovati jednaku razinu oštećenja promatranog elementa [54]. Svaki tlak-impuls dijagram sastoji se od dvije asimptote: impulsne i tlačne. Impulsna asimptota povezana je uz opterećenja koja su izrazito kratkog trajanja u odnosu na prirodnu frekvenciju konstrukcije te predstavlja minimalnu vrijednost impulsa potrebnog da se postigne određena razina oštećenja. S druge strane, tlačna asimptota je povezana uz opterećenja koja su dužeg trajanja u odnosu na prirodnu

frekvenciju konstrukcije te u ovom području konstrukcija postaje neosjetljiva na impulsno djelovanje već na tlačno i u tom slučaju asimptota predstavlja minimalnu vrijednost tlaka potrebnog da se postigne određena razina oštećenja [55]. TI dijagrami su najčešće izvedeni iz analize sustava s jednim stupnjem slobode pretpostavljajući savijanje kao dominantan oblik odziva bez uzimanja u obzir oštećenja uslijed posmika. Najčešće su izvedene pretpostavljajući idealizirane elastoplastične materijale. Kombinacija tlaka i impulsa s lijeve strane i ispod TI krivulje neće uzrokovati slom, dok kombinacija s desne strane i iznad krivulje uzrokuje oštećenje koje prelazi dopuštenu granicu, tj. odabranu granicu oštećenja [56]. Za konstrukciju TI krivulja nadvožnjaka odabrane su četiri razine duktilnosti poprečnog presjeka prema preporukama danim u FEMA 426 [57]. Za pojedinu razinu oštećenja odabrana je gornja granica duktilnosti prema kojoj su konstruirane TI krivulje. Razine duktilnosti navedene su u tablici 7. gdje su dana i kratka objašnjenja navedenih razina. Za dane duktilnosti izračunane su TI krivulje koristeći SBEDS program [58] koji pretpostavlja konstrukciju kao sustav s jednim stupnjem slobode.

Tablica 7. Veza razine oštećenja i odgovora konstrukcije

Razina oštećenja	Omjer deformacije (duktilnost)	Rotacija plastičnog zgloba	Razina oštećenja	Posljedica na konstrukciju	Kontrolni pomak, X_m [mm]
1	1 do 3	0° do 1°	Manje oštećenje	Konstrukcija zadržava svoju ulogu. Konstrukcija je upotrebljiva nakon eksplozije. Potrebni su samo manji popravci. Mala je ugroza za osobe uslijed oštećenja konstrukcije.	9,04
2	3 do 6	1° do 2°	Umjereno oštećenje	Konstrukcija zadržava svoju ulogu. Konstrukcija nije upotrebljiva nakon eksplozije. Potrebni su samo veći popravci čiji se troškovi približavaju ili su veći od troškova zamjene. Postoji mogućnost ozljeda osoba uslijed oštećenja konstrukcije.	18,08
3	6 do 10	2° do 4°	Veliko oštećenje (početak rušenja)	Zaštita zgrade na djelovanje eksplozije je umanjena. Velika opasnost zbog ozljeda osoba uslijed oštećenja konstrukcije.	30,13
4	> 10	> 4°	Totalno uništenje i rušenje	Konstrukcija je uništena. Velika opasnost za život.	45,20

Na slici 17. uz TI krivulje prikazane su kombinacije vrijednosti tlaka i impulsa dobivene za nadvožnjak izložen djelovanju tri pretpostavljene količine TNT-a (115 kg, 230 kg i 680 kg). Usporedbom numeričkih rezultata s vrijednostima TI krivulja vidi se kako su vrijednosti dobivene za 230 kg i 680 kg eksploziva iznad krajnje krivulje za duktilnost 15, što znači da se postiže razina oštećenja 4 i dolazi do rušenja nadvožnjaka prilikom djelovanja navedenih količina eksploziva. Par vrijednosti tlaka i impulsa za 115 kg eksploziva nalazi se između krivulja za razinu oštećenja 3 i 4, iz čega možemo zaključiti da je oštećenje nadvožnjaka znatno manje nego za preostale dvije količine, ali i dalje dolazi do sloma nadvožnjaka.



Slika 17. TI krivulje za predviđanje oštećenja nadvožnjaka

4. Zaključak

Provedena je numerička analiza djelovanja eksplozije na armiranobetonski nadvožnjak pločastog poprečnog presjeka. Promatrano je ponašanje dva tipa pločastog presjeka, s ravnom donjom plohom te zaobljenom donjom plohom jer se pretpostavila drugačija razina oštećenja po tipu presjeka. Na temelju numeričke analize doneseni su sljedeći zaključci:

- Širenje vala eksplozije oko nadvožnjaka pretpostavljenog je oblika, tj. nakon detonacije val se koncentrično širi od izvora prema nadvožnjaku, udara u rasponsku konstrukciju pri čemu nastaje odbijeni val (tlak) koji se dalje širi po konstrukciji te se "prelijeva" preko konzolnih istaka i djelomično opterećuje gornju plohu rasponskog sklopa (na rubovima nastaje "kovitlac") te se dalje širi u prostor.
- Ovojnica tlakova također poprma pretpostavljeni oblik, gdje je maksimalni tlak u sredini rasponskog sklopa te se njegova vrijednost eksponencijalno smanjuje prema krajevima gdje se javlja dodatni skok zbog sudara s upornjakom; ploha je jednakog oblika za sve promatrane količine eksploziva, samo se mijenja vršna vrijednost tlaka ovisno o količini.
- Veličina mreže konačnih elemenata znatno utječe na veličinu tlakova, ali i na vrijeme proračuna. Stoga se mora provesti kalibracija modela kojom se određuje optimalna veličina mreže. Za ovaj problem optimalna veličina mreže konačnih elemenata je 25 mm.

- Zbog veličine numeričkog modela, kako bi se skratilo ukupno vrijeme proračuna, primijenjeni su simetrija i paralelni proračun čime je znatno uštedeno na vremenu proračuna modela (karakteristike računala: Intel(R) Xeon(R) CPU 2.4 GHz, 2 procesora sa 6 fizičkih i 12 logičkih jezgri te 48 Gb RAMa). Radi usporedbe, proračun volumenskog prostornog modela nadvožnjaka bez korištenja paralelnog proračuna trajao je 14 dana (336 sati) za trajanje djelovanja eksplozije 0,01 ms, dok je cjelokupan model (trajanje djelovanja eksplozije 2,0 ms) izračunan koristeći paralelni izračun za 3 dana (72 sata).
- Jednake količine eksploziva uzrokuju veće oštećenje presjeka s ravnom donjom plohom, što je posljedica direktnog odbijanja i tlačenja nadolazećih čestica vala zraka pri čemu nastaju odbijeni tlakovi koji su znatno veći o početnih tlakova eksplozije.
- Konzolni istaci presjeka s ravnom donjom plohom također se znatno više oštećuju u odnosu na konzolne istake zaobljenog presjeka.
- Na oba tipa poprečnog presjeka oštećenja i slom imaju sličan obrazac. Donja ploha, koja je direktno izložena djelovanju eksplozije, ostaje cjelovita, a najveća se oštećenja javljaju na gornjoj plohi rasponskog sklopa. Može se primijetiti da su ta oštećenja gornje plohe vrlo slična uzorku pukotina pri pojavi proboja armiranobetonskih ploča.
- Za povećanje otpornosti armiranobetonskih sklopova na djelovanje eksplozije ispod rasponske konstrukcije potrebno je dodatno armirati gornju zonu glavnom uzdužnom i razdjelnom armaturom te sponama. Ploča rasponskog sklopa u sustavu proste grede, kao u navedenom primjeru, armira se glavnom armaturom u donjoj zoni, dimenzionirano prema mjerodavnim računskim opterećenjima. Međutim, gornja zona ploče armira se samo konstrukcijskom armaturom koja služi za sprječavanje raspucavanja uslijed skupljanja betona te za preuzimanje rezidualnih poprečnih momenata savijanja pa se ona ugrađuje u puno manjoj količini. U slučaju djelovanja velikog izvanrednog opterećenja odozdo (eksplozije), nastaje stanje naprezanja suprotno od onoga u uporabnom stanju: vlačna zona nalazi se na gornjem rubu, a tlačna na donjem.
- Usporedbom parova vrijednosti tlak-impuls dobivenih numeričkim proračunom i TI krivulja može se procijeniti razina oštećenja nadvožnjaka te je potvrđena početna pretpostavka o rušenju mosta na djelovanje pretpostavljenih količina eksploziva.

LITERATURA

- [1] Hameed, A.H.: Dynamic Behaviour Of Reinforced Concrete Structures Subjected To External Explosion, A Thesis, Jumada Elawal, 1428 (2007).
- [2] Norman, T.L.: Building Security Design Considerations: The Effects of Bomb Blasts, AIA Best Practices, 2007.
- [3] Suthar, K.: The effect of dead, live and blast loads on a suspension bridge, University of Maryland, College Park, 2007.
- [4] Agrawal, A. K., Yi, Z.: High Precision Analysis of Blast Events on Highway Bridges (Blast Load Effects on Highway Bridges). New York: The City Collage on New York, pp. 204, 2008.
- [5] Williamson, E.B., Bayrak, O., Williams, G.D., Davis, C.E., Marchand, K.A., McKay, A.E.: Blast-Resistant Highway Bridges: Design and Detailing Guidelines. Washington, D.C.: Transportational Research Board, pp. 142, 2010.
- [6] Foglar, M., Kovar, M.: Conclusions from experimental testing of blast resistance of FRC and RC bridge decks, International Journal of Impact Engineering, 59 (2013) 9, pp. 18-28, <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2013.03.008>
- [7] Fujikura, S., Bruneau, M.: Experimental investigation of seismically resistant bridge piers under blast loading, Journal of Bridge Engineering, 16 (2010) 1, pp. 63-71.
- [8] Fujikura, S., Bruneau, M.: Dynamic analysis of multihazard-resistant bridge piers having concrete-filled steel tube under blast loading, Journal of Bridge Engineering, 17 (2011) 2, pp. 249-258.
- [9] Fujikura, S., Bruneau, M., Lopez-Garcia, D.: Experimental investigation of multihazard resistant bridge piers having concrete-filled steel tube under blast loading, Journal of Bridge Engineering, 13 (2008) 6, pp. 586-594.
- [10] Wei, J., Quintero, R., Galati, N., Nanni, A.: Failure Modeling of Bridge Components Subjected to Blast Loading Part I: Strain Rate-Dependent Damage Model for Concrete, International Journal of Concrete Structures and Materials, 1 (2007) 1, pp. 19-28.
- [11] Quintero, R., Wei, J., Galati, N., Nanni, A.: Failure Modeling of Bridge Components Subjected to Blast Loading Part II: Estimation of the Capacity and Critical Charge, International Journal of Concrete Structures and Materials, 1 (2007) 1, pp. 29-36, <https://doi.org/10.4334/IJCSM.2007.1.1.029>
- [12] ANSYS AUTODYN User manual. ANSYS Release 14.0. Canonsburg, PA, USA, pp. 1-464, 2010.
- [13] Hallquist, J.O.: LS-DYNA theory manual, Livermore software Technology corporation, 3 (2006) pp. 25-31
- [14] ABAQUS: Theory Manual, Hibbit, Karlsson, Sorensen, 1997.
- [15] STAAD.Pro V8i (SELECTseries 4), Technical Reference Manual. In: Infrastructure BS, USA: Bentley Systems, Incorporated, pp. 775.2012.
- [16] Black, G.: Computer Modeling of Blast Loading Effects on Bridges. University of Delaware, 2006.
- [17] Anwarul Islam, A.K.M., Yazdani, N.: Performance of AASHTO girder bridges under blast loading, Engineering Structures, 30 (2008) 7, pp. 1922-1937.
- [18] Deng, R.B., Jin, X.L.: Numerical Simulation of Bridge Damage under Blast Loads, WSES Transactions on Computers, 8 (2009) 9, pp. 10.
- [19] Tang, E.K.C.: Numerical Simulation of a Long Span Bridge Response to Blast Loading, The University of Western Australia, 2009.

- [20] Tang, E.K.C., Hao, H.: Numerical simulation of a cable-stayed bridge response to blast loads, Part I: Model development and response calculations, *Engineering Structures*, 32 (2010) 10, pp. 3180-3192.
- [21] Hao, H., Tang, E.K.C.: Numerical simulation of a cable-stayed bridge response to blast loads, Part II: Damage prediction and FRP strengthening, *Engineering Structures*, 32 (2010) 10, pp. 3193-3205.
- [22] Ibarhim, A., Salim, H., Rahman, N.A.: Progressive collapse of post-tensioned box girder bridges under blast loads using applied element method. *Structures Congress 2012*, pp. 2291-2300, 2012, <https://doi.org/10.1061/9780784412367.201>
- [23] Lau, D.T., Wibowo, H.: Seismic progressive collapse analysis of reinforced concrete bridges by applied element method *Earth and Space 2010: Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments*, pp. 3019-3026, 2010.
- [24] Salem, H., Mohssen, S., Nishikiori, Y., Hosoda, A.: Numerical Collapse Analysis of Tsuyagawa Bridge Damaged by Tohoku Tsunami, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 30 (2016) 6, pp. 401-6065.
- [25] Meguro, K., Tagel-Din, H.: Applied element method for structural analysis: theory and application for linear analysis, *Doboku Gakkai Ronbunshu*, 2000 (2000) 647, pp. 31-45.
- [26] ELS. Extreme Loading for Structures (ELS). Developed by Applied Science International (ASI), LLC, 3221, Wellington Court, Raleigh, NC 27615. .2006.
- [27] Walter, P.L.: Introduction to Air Blast Measurements - Part I, PCB Piezotronics Inc, pp. 1-3, 2004.
- [28] Walter, P.L.: Introduction to Air Blast Measurements - Part II: Interfacing the Transducer, PCB Piezotronics Inc, pp. 1-3, 2004.
- [29] Walter, P.L.: Introduction to Air Blast Measurements - Part III: Guaranteeing that Validated Pressure Measurements are Acquired, PCB Piezotronics Inc, pp. 1-3, 2004.
- [30] Walter, P.L.: Introduction to Air Blast Measurements - Part IV: Getting the Signal Down the Cable, PCB Piezotronics Inc, pp. 1-4, 2004.
- [31] Walter, P.L.: Introduction to Air Blast Measurements - Part V: Alternate Technologies?, PCB Piezotronics Inc, pp. 1-4, 2004.
- [32] Walter, P.L.: Validating the data before the structural model, *Experimental Techniques*, 34 (2006) 6, pp. 56-59.
- [33] Kwaśniewski, L.: Application of grid convergence index in FE computation, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 61 (2013) 1, pp. 123-128.
- [34] Bimbaum, N.K., Tancreto, J., Hager, K.: Calculation of blast loading in the high performance magazine with AUTODYN-3D. DTIC Document.1994.
- [35] Courant, R., Fridrichs, K., Lewy, H.: On the Partial Difference Equations of Mathematical Physics, *Mathematische Annalen*, 100 (1928) pp. 32-74, <https://doi.org/10.1007/BF01448839>
- [36] Kohnke, P.: ANSYS theory manual, Release 12.0, ANSYS Inc, pp. 1126, 2009.
- [37] Riedel, W., Thoma, K., Hiermaier, S., Schmolinske, E.: Penetration of Reinforced Concrete by BETA-B-500, *Numerical Analysis using a New Macroscopic Concrete Model for Hydrocodes*, 9 Internationales Symposium, Interaction of the Munitions with Structures, Berlin, pp. 1-8, 1999
- [38] Riedel, W., Kawai, N., Kondo, K.I.: Numerical assessment for impact strength measurements in concrete materials, *International Journal of Impact Engineering*, 36 (2009) 2, pp. 283-293.
- [39] Malvar, L.J., Crawford, J.E.: Dynamic increase factors for concrete, Twenty-Eighth DDESB Seminar, Orlando, Florida, USA, 1-17, 1998.
- [40] Malvar, L.J., Crawford, J.E.: Dynamic increase factors for steel reinforcing bars, Twenty-Eighth DDESB Seminar, Orlando, Florida, USA, pp. 1-17, 1998.
- [41] Baudin, G., Serradeill, R.: Review of Jones-Wilkins-Lee equation of state, *EPJ Web of Conferences*, 10 (2010), pp. 00021.
- [42] Lee, E., Hornig, H., Kury, J.: Adiabatic expansion of high explosive detonation products. California Univ., Livermore. Lawrence Radiation Lab.1968, <https://doi.org/10.2172/4783904>
- [43] Nam, J., Kim, J.H., Kim, S., Yi, N., Byun, K.: A study on mesh size dependency of finite element blast structural analysis induced by non-uniform pressure distribution from high explosive blast wave, *KSCSE Journal of Civil Engineering*, 12 (2008) 4, pp. 259-265.
- [44] Luccioni, B., Ambrosini, D., Danesi, R.: Blast load assessment using hydrocodes, *Engineering Structures*, 28 (2006) 12, pp. 1736-1744.
- [45] Shi, Y., Li, Z., Hao, H.: Mesh size effect in numerical simulation of blast wave propagation and interaction with structures, *Transactions of Tianjin University*, 14 (2008) 6, pp. 396-402.
- [46] Bazant, Z.P., Belytschko, T.B.: Wave propagation in a strain-softening bar: exact solution, *Journal of Engineering Mechanics*, 111 (1985) 3, pp. 381-389.
- [47] Chapman, T.C., Rose, T.A., Smith, P.D.: Blast wave simulation using AUTODYN2D: A parametric study, *International Journal of Impact Engineering*, 16 (1995) 5-6, pp. 777-787.
- [48] Krauthammer, T., Otani, R. K.: Mesh, gravity and load effects on finite element simulations of blast loaded reinforced concrete structures, *Computers, Structures*, 63 (1997) 6, pp. 1113-1120.
- [49] Zhao, C.F., Chen, J.Y.: Damage mechanism and mode of square reinforced concrete slab subjected to blast loading, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 63-64 (2013), pp. 54-62.
- [50] ANSYS. Autodyn Parallel Processing Tutorial. ANSYS Release 150. Canonsburg, PA, USA p. 1-46.2013.
- [51] Baker, W.E., Cox, P., Kulesz, J., Strehlow, R., Westine, P.: *Explosion hazards and evaluation*, Elsevier, 2012.
- [52] Zadeh, R.: Pressure-impulse diagrams using finite element analysis for reinforced concrete columns subjected to blast loading, *University of Missouri--Kansas City*, 2011.
- [53] Nalagotla, J.K.R.: Pressure-impulse diagrams using finite element analysis for reinforced concrete slabs subjected to blast loading, *University of Missouri-Kansas City*, 2013.
- [54] Krauthammer, T., Astarlioglu, S., Blasko, J., Soh, T.B., Ng, P.H.: Pressure-impulse diagrams for the behavior assessment of structural components, *International Journal of Impact Engineering*, 35 (2008) 8, pp. 771-783.
- [55] Shi, Y., Hao, H., Li, Z.X.: Numerical derivation of pressure-impulse diagrams for prediction of RC column damage to blast loads, *International Journal of Impact Engineering*, 35 (2008) 11, pp. 1213-1227.
- [56] Mays, G., Smith, P.D.: *Blast Effects on Buildings: Design of Buildings to Optimize Resistance to Blast Loading*, T. Telford, 1995.
- [57] FEMA. Reference Manual to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings (FEMA 426). Risk Management Series: FEMA, pp. 420, 2003.
- [58] Center, U.P.D. User's guide for the single-degree-of-freedom blast effects design spreadsheets (SBEDS). PDC-TR-06-02. Omaha, NE.2006.