

Primljen / Received: 7.1.2016.
Ispravljen / Corrected: 2.10.2016.
Prihvaćen / Accepted: 1.3.2017.

Dostupno online / Available online: 10.7.2017.

Nelinearna analiza ab ploča opterećenih udarnim opterećenjem

Autori:



Doc.dr.sc. **R. Tuğrul Erdem**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Celal Bayar, Turska
Fakultet tehničkih znanosti
Odjel za građevinarstvo
tugrul.erdem@cbu.edu.tr



Doc.dr.sc. **Engin Gucuyen**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Celal Bayar, Turska
Fakultet tehničkih znanosti
Odjel za građevinarstvo
engin.gucuyen@cbu.edu.tr

Stručni rad

R. Tuğrul Erdem, Engin Gücüyen

Nelinearna analiza ab ploča opterećenih udarnim opterećenjem

Većina postojećih konstrukcija projektirana je tako da se odupre samo statičkim opterećenjima. Brojni istraživači ukazuju da u projektnoj fazi treba razmotriti i iznenadna opterećenja. Površine mnogih građevina izvedene su ab pločama koje su pod utjecajem iznenadnih opterećenja poput iznenadnih padova različitih elemenata, odrona kamenja ili vojnih djelovanja. Nelinearna analiza ab ploča u radu je provedena primjenom računalnog programa ABAQUS. Određeni su i detaljno analizirani parametri udara kao što su ubrzanja, brzine, pomaci, udarne sile i energetski kapaciteti za svaku ploču.

Ključne riječi:

parametri udara, nelinearna analiza, iznenadna opterećenja, uvjeti oslanjanja

Professional paper

R. Tuğrul Erdem, Engin Gücüyen

Non-linear analysis of reinforced concrete slabs under impact effect

Most of the existing structures are designed to resist static loads only. Various researchers indicate that sudden loads affecting structural members should also be considered in the design phase. Surfaces of many structures are covered with concrete slab members that are under the effect of sudden loads such as accidental drops, rock falls, or military attacks. A non-linear analysis of RC slabs is performed in this study using the Abaqus software. Impact parameters such as accelerations, velocities, displacements, impact forces, and energy capacities, are determined for each slab.

Key words:

impact parameters, non-linear analysis, sudden loads, support conditionss

Fachbericht

R. Tuğrul Erdem, Engin Gücüyen

Nicht lineare Analyse von Stahlbetonplatten belastet durch Stoßbelastung

Die meisten bestehenden Konstruktionen sind projektiert, um statischen Belastungen standzuhalten. Zahlreiche Forscher weisen darauf hin, dass in der Projektierungsphase auch plötzliche Belastungen berücksichtigt werden müssen. Die Oberflächen vieler Gebäude sind aus Stahlbetonplatten ausgeführt, die unter dem Einfluss überraschender Belastungen wie plötzliches Herunterfallen unterschiedlicher Elemente, Steinschlag oder Militäraktionen stehen. Die nicht lineare Analyse von Stahlbetonplatten in Benutzung wurde durch die Anwendung des Computerprogramms ABAQUS durchgeführt. Für jede Platte wurden die Parameter des Aufpralls wie Beschleunigung, Geschwindigkeit, Verschiebungen, die Stoßkräfte und die Energiekapazität bestimmt und detailliert analysiert.

Schlüsselwörter:

Stoßparameter, nicht lineare Analyse, plötzliche Belastung, Bedingungen der Anlehnung

1. Uvod

Armiranobetonske konstrukcije čine većinu postojećih konstrukcija. Projektiranje ovih konstrukcija provodi se na temelju utjecaja nekoliko statičkih i dinamičkih uvjeta opterećenja. Elementi konstrukcija mogu se urušiti kada su tijekom uporabe izloženi iznenadnim opterećenjima kao što su udarna i eksplozivna opterećenja. Budući da je mnogo složenije analizirati konstrukcije za iznenadna opterećenja, do sada nije objavljeno mnogo studija o ovoj temi. Dakle, sve je važnije razumjeti ponašanje elemenata konstrukcija pod tim opterećenjima, jer se sustavi armiranobetonskih ravnih ploča široko koriste u građevinskim projektima zahvaljujući ekonomskim i funkcionalnim prednostima. Armiranobetonske ploče se naširoko koriste u konstrukcijama za odvajanje katova jednog od drugog. To su obično horizontalni elementi koji prenose opterećenja na grede, stupove i posmične zidove. Budući da su ti elementi vitki, podložni su rušenju pod iznenadnim opterećenjima. Stoga je važno odlučiti o debljini i konfiguraciji armature ab ploča u fazi projektiranja.

Elementi konstrukcija, a posebno ploče, izravno su podložni iznenadnim opterećenjima, što može biti posljedica nekoliko razloga. Udarne opterećenje je značajno iznenadno dinamičko opterećenje i njegov intenzitet može biti znatno veći u usporedbi s drugim opterećenjima. Odroni, iznenadna djelovanja - pogotovo u tvornicama, sudari vozila, eksplozije, udari uzrokovani projektilima, raketama ili letjelicama, teroristički napadi i utjecaji leda, mogu se smatrati tipičnim primjerima iznenadnih opterećenja. Ti učinci mogu u potpunosti uništiti konstrukcije u vrlo kratkom razdoblju.

Pojava udara mijenja mehanička svojstva elemenata konstrukcija zbog dinamičkih učinaka, a vrijednosti naprezanja se zbog tih učinaka u trenutku udara mijenjaju. Šteta se tijekom takvih događaja širi izvan točke udara i zbog toga se mogu pojaviti velika oštećenja i gubici. Mnoga eksperimentalna [1-9] i numerička ispitivanja [10-21] nedavno je provelo više znanstvenika kako bi se omogućilo bolje razumijevanje tih složenih situacija povezanih s udarom.

Otpornost konstrukcijskih elemenata na udarna opterećenja utvrđena je u literaturi nizom eksperimentalnih ispitivanja utemeljenih na određenom rasporedu eksperimenta i osnovnih ispitnih uređaja [22, 23]. Međutim, eksperimentalna istraživanja mogu biti nepraktična i zahtijevati skupe uređaje za promatranje rasporeda pukotina i otkazivanja nosivosti ispitnih elemenata. S druge strane, slični rezultati mogu se dobiti nelinearnom analizom pomoću konačnih elemenata kada se definiraju točni numerički modeli i koraci analize [24-29].

Iako postoje neke poteškoće u pojedinim fazama analize, rezultati nelinearnih dinamičkih rješenja pokazali su se sve točnijim i pouzdanijim zahvaljujući napredovanju suvremene računalne tehnologije. Rezultati nelinearnih analiza provedenih u različitim istraživanjima ovise o razvoju odgovarajućih modela u opsegu njihovih rješenja. Iz tog razloga, složena trodimenzionalna analiza konačnih elemenata u posljednje

se vrijeme pojavila kao opcija koja se oslanja na tehnološka dostignuća.

U ovom radu, armiranobetonske ploče su modelirane za tri različite debljine i dva uvjeta oslanjanja pomoću računalnog programa za analizu konačnih elemenata Abaqus [30]. Navedeni računalni program služi za eksplicitno istraživanje dinamičkog ponašanja uslijed udarnog opterećenja. Analize su provedene za svaki model. Na taj se način ponašanje debelih ploča - koje je inače teško testirati u laboratorijskim uvjetima zbog teškog opterećenja - može istražiti analizom konačnih elemenata.

Budući da mnogi istraživači izbjegavaju numeričke analize udarnog opterećenja jer je prilično teško modelirati potrebne segmenate, definirati kontaktne površine i svojstva svakog materijala, istraživati odgovarajuće veličine mreže i obavljati dugotrajne proračune, ovaj bi rad mogao ispuniti manjak eksplicitnih dinamičkih analiza usredotočujući se na učinak iznenadnih opterećenja.

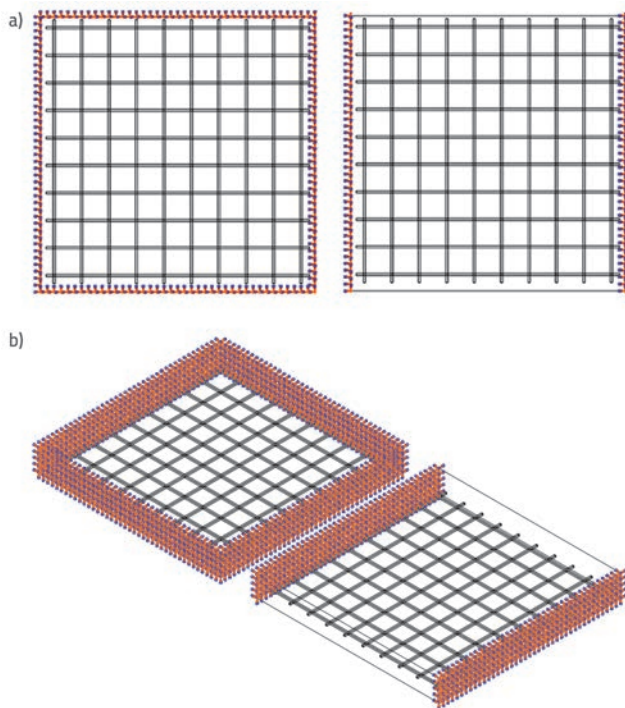
Ovo istraživanje također razmatra i pouzdanost dinamičkih rješenja, tj. njihovu sposobnost da se prikažu točni rezultati. Nakon što se provedu potrebni koraci analize, dobivaju se parametri udara kao što su ubrzanje, brzina, pomaci, udarna sila i vrijednosti energije. Raspodjela naprezanja također se promatra u skladu s uvjetima oslanjanja. Konačno, rezultati se uspoređuju i donose odgovarajući prijedlozi.

2. Svojstva ploča

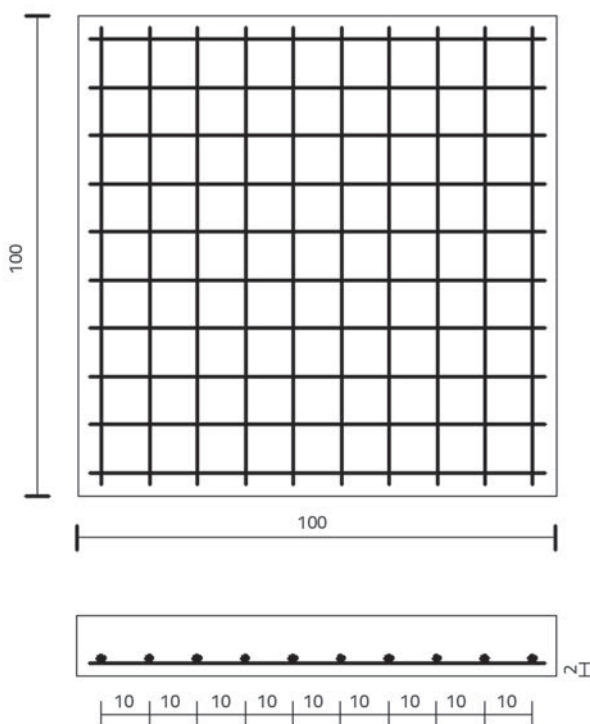
Dimenzije armiranobetonskih ploča su 100 x 100 x 8 cm, 100 x 100 x 12 cm i 100 x 100 x 15 cm. Promjeri, broj i razmaci armaturnih šipki uzimaju se kao konstanta za svaki element. S druge strane, u analizama se razmatraju dva različita uvjeta oslanjanja. Geometrijska svojstva armiranobetonskih ploča s tipovima oslanjanja navedena su u tablici 1. Uvjeti oslanjanja također se uzimaju u obzir u ovom radu. U nelinearnim analizama koriste se upeti uvjeti oslanjanja. Na slici 1.a i 1.b prikazani su dvodimenzionalni i trodimenzionalni oblici upetog oslanjanja na četiri i dvije suprotne strane.

Tablica 1. Svojstva armiranobetonskih ploča

Oznaka ploče	Širina [cm]	Dužina [cm]	Debljina [cm]	Tip oslanjanja
RS1	100	100	8	Sve strane
RS2	100	100	12	Sve strane
RS3	100	100	15	Sve strane
RS4	100	100	8	Suprotne strane
RS5	100	100	12	Suprotne strane
RS6	100	100	15	Suprotne strane



Slika 1. Uvjeti upetog oslanjanja: a) Prikaz uvjeta oslanjanja odozgo; b) Prostorni prikaz uvjeta oslanjanja



Slika 2. Prikaz ploča u tlocrtu i presjeku, dimenzije u cm

Pretpostavlja se da su svojstva materijala 30 MPa za tlačnu čvrstoću betona i 420 N/mm² za granicu popuštanja armature. Armaturne šipke su promjera 8 mm i nalaze se na razmaku od

10 cm. Deset armaturnih šipki smješteno je u svakom smjeru ab ploča. Zaštitni sloj betona pretpostavlja se da je 2 cm u analizama. Raspored armature prikazan je na slici 2., u tlocrtu i presjeku.

3. Analiza metodom konačnih elemenata

Analize se izvode pomoću Abaqus/Explicit računalnog programa za istraživanje ponašanja ab ploča nakon izlaganja iznenadnom opterećenju. Eksplicitni modul, prikladan za različite tipove materijalnih modela, odgovoran je za uspješno završavanje dinamičkih analiza. Jednom kada se izrade modeli, dobivaju se vrste elemenata, svojstva materijala pojedinih segmenata, odgovarajući koraci analize i veličine mreže, veza između površina elemenata, ispravni rubni i početni uvjeti.

Vremenski koraci imaju značajan utjecaj na rezultate analize udarnog opterećenja. U tu svrhu dosljedno se provjeravaju i korak i ukupni vremenski rasponi. Vremenski koraci određuju se od početka do kraja kretanja čeličnog utega. Dok su inkrementi vremena definirani kao 0,060 sekundi prije točke kontakta, postavljeni su na 2×10^{-8} sekundi kada započne kontakt između utega i ploče. Budući da je riječ o inkrementalnom dinamičkom problemu, modeli konačnih elemenata analiziraju se za vrlo male vremenske korake sve dok se ne dobiju ispravni rezultati u smislu raspodjele naprezanja, ubrzanja, udarne sile i vrijednosti pomaka.

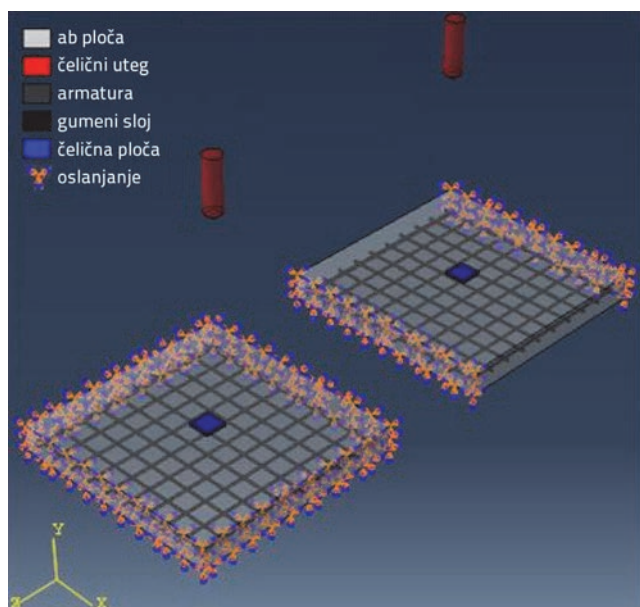
Prvi korak analize znači podijeliti cijelu geometriju kako bi se definirao pravi model fizičkog problema. Modeli konačnih elemenata trebaju biti odvojeni u male dijelove - poznato kao *meshiranje*, tako da se analize mogu izvesti ispravno. Na taj se način mogu istražiti složene geometrije i rezultati su pouzdaniji. U ovom istraživanju modeli su geometrijski podijeljeni kako bi se dobila odgovarajuća rješenja. Elementi C3D10M korišteni su u analizama. Trodimenzionalni 10-čvorni modificirani elementi u obliku tetraedara široko se koriste za simulaciju udarnog opterećenja konstrukcijskih elemenata.

Pri udaru ne dolazi do izravne interakcije ploče i utega. Čelična ploča i sloj gume su povezani i postavljeni na ploču. Prema rezultatima dobivenim eksperimentalnim istraživanjima [3, 4], uteg uzrokuje točkasto opterećenje ploče. Međutim, unutarnja reakcija ploče je distribuirana. U tu svrhu, u analizama se koristi čelična ploča s gumenim slojem kako bi se smanjili unutarnji učinci u trenutku udara i rasporedilo udarno opterećenje na ploče.

Pomicanje čeličnog utega u horizontalnom smjeru je spriječeno, odnosno može se pomicati samo u vertikalnom smjeru. Budući da je problem povezan sa slobodnim padom, na sustav se primjenjuje samo gravitacijska sila. Gumeni sloj i čelična ploča nalaze se na sredini ploča. Veza između pojedinih elemenata modela ima značajan utjecaj na rezultate. Interakcija između ovih elemenata i utega mora biti ispravno modelirana kako bi se omogućilo pouzdano određivanje ponašanja pri udarnom opterećenju. Dakle, dok je površina utega odabrana kao *master*, površina ploče je određena kao *slave*. Kontakt između

njih je tangencijalan. Budući da u praksi postoji trenje, koeficijent trenja je 0,2 za sve kontaktne površine. Prije svega, trodimenzionalne geometrije pojedinih ploča modelirane su pomoću C3D10M (10-čvorni modificirani tetraedri) elemenata. Element ploče se kombinira s blokovima armature, sloja gume i čelične ploče. Čelični uteg je drugačije geometrije. Modeliran je kao cilindar koji nanosi udarno opterećenje u središnjoj točki ploče padajući s visine od 125 cm.

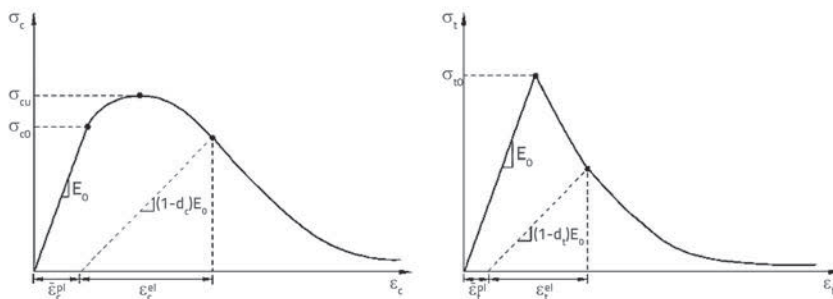
Drugo, cjelokupni eksperimentalni raspored uspostavljen je kombiniranjem ovih elemenata kako bi se dobila složena geometrija. Upeti način oslanjanja zadan je na sve četiri ili na dvije nasuprotne stranice ploče. Trodimenzionalni modeli za simulaciju ploča RS2 i RS5 prikazani su na slici 3.



Slika 3. Simulacija za svaki uvjet oslanjanja

Odskočni pomaci čeličnog utega su spriječeni. Dakle, analize se provode za svaki pojedini udar utega. Visina pada je 125 cm, a masa utega je 10 kg. Analiza traje sve dok ab ploče ne dođu do oštećenja koje uzrokuje gubitak nosivosti i tada se analiziraju maksimalni pomaci i naprezanja. Analize se ponavljaju pod utjecajem ekvivalentne mase utega u odnosu na položaj od prvog pada.

Nakon toga, svojstva materijala dodjeljuju se srodnim geometrijskim blokovima. Modeli linearnog elastičnog materijala koriste se za čelični uteg, čeličnu ploču, gumeni sloj i armaturu. Za definiranje svojstava betona korišten je *concrete damaged plasticity* model dostupan u računalnom programu. Veza naprezanja i relativne deformacije za betonski materijal u tlaku i vlaku prikazana je na slici 4. Beton je modeliran s tlačnom čvrstoćom od 30 MPa, gustoćom od 2400 kg/m³, modulom

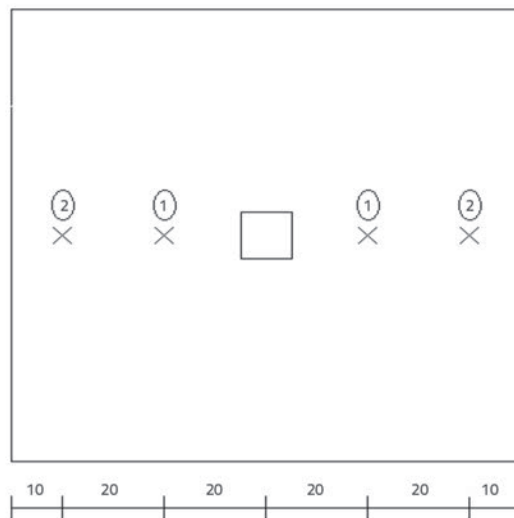


Slika 4. Odnos naprezanja i relativne deformacije

elastičnosti od 32000 kg/m³ i Poissonovim koeficijentom od 0,20. Osim toga, materijalna svojstva čeličnog utega, čelične ploče, gumenog sloja i armature navedene su u tablici 2. Ta svojstva materijala dodjeljuju se pripadnim blokovima prije provođenja dinamičkih analiza.

Tablica 2. Svojstva materijala (čelični uteg, gumeni sloj, armatura)

Svojstvo	Materijal		
	Čelični uteg i ploča	Gumeni sloj	Armatura
Masa po jedinici volumena [kg/m ³]	7850	1230	7850
Modul elastičnosti [MPa]	200000	22	200000
Poissonov koeficijent	0,30	0,45	0,30
Modul posmika [MPa]	76923,08	7,59	76923,08
Modul kompresije [MPa]	166670	73,33	166670
Granica popuštanja [MPa]	-	-	420
Vlačna čvrstoća snaga [MPa]	-	-	500



Slika 5. Detalji presjeka, dimenzije u cm

Vrijednosti ubrzanja dobivene su iz četiri točke na armiranobetonskim pločama. Vrijednosti udarne sile koje se javljaju nakon iznenadnog opterećenja određene su u rubnoj točki utega nakon svakog pada. Gumeni sloj i čelična ploča smješteni su na sredini elemenata ploča. Geometrijske pozicije mjernih točaka prikazane su na slici 5. Dok su mjerne točke udaljene 20 cm od udarne točke numerirane kao točka 1, mjerne točke udaljene 40 cm od udarne točke numerirane su kao točka 2.

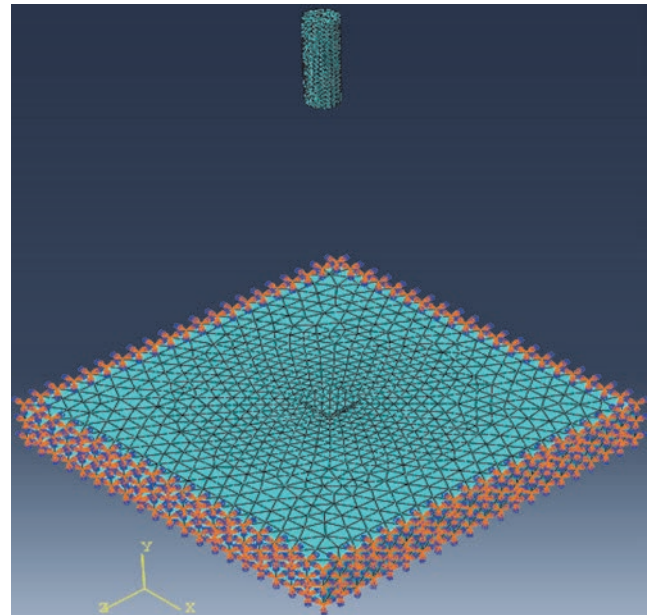
Veličine konačnih elemenata su važne s obzirom na analizu i vrijeme rješavanja. Modeli konačnih elemenata odvajaju se u male dijelove u analizi. Iako se smanjenjem veličine konačnih elemenata dobiva veća osjetljivost rezultata, vrijeme izračuna rezultata postaje dulje.

Za odlučivanje o veličinama mreže u analizama korišteno je računalo velikih performansi. Operacija veličine mreže obavlja se za ploču RS1 kako je prikazano u tablici 3. Analize se ponavljaju za različite veličine mreže na udaljenosti od 20 cm od udarne točke za prvi pad. Vidljivo je da broj čvorova i elemenata jako ovisi o veličini mreže.

Tablica 3. Analiza mreže za ploču RS1

Izlazi	Veličine mreže [cm]			
	4	3	2	1,5
Broj čvorova	47043	89685	233551	442942
Broj elemenata	33006	63336	166244	316145
Maksimalno ubrzanje [m/s^2]	2075	3808	4485	4659
Maksimalna brzina [m/s]	-0,32	-0,53	-0,69	-0,70
Maksimalni pomak [m]	-0,29	-0,48	-0,62	-0,64
Maksimalna sila udara [N]	48589	79213	92574	98143

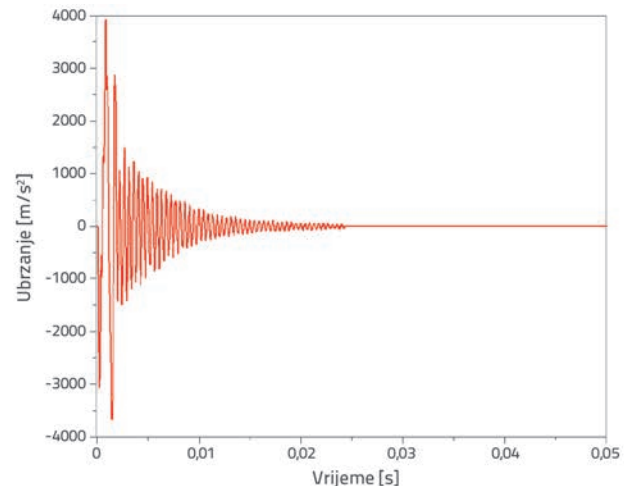
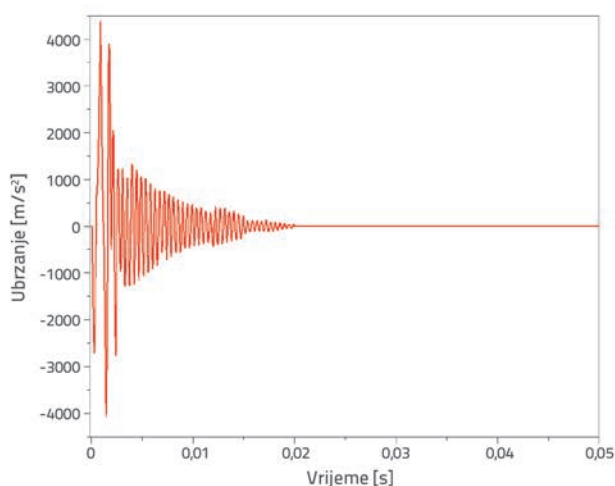
Kako se veličine mreže smanjuju od 4 cm do 1 cm, broj čvorova i elemenata se značajno povećava. Međutim, rezultati analize su manje pogođeni (osjetljivi) u posljednja dva ispitivanja. Kako je poznato da analiza postaje sve teža zbog povećanja broja čvorova i elemenata, odlučeno je da vrijednost veličine mreže bude 2 cm nakon završetka analize konvergencije. Model konačnih elemenata problema nakon izvedbe mreže prikazan je na slici 6. za ploču RS2.



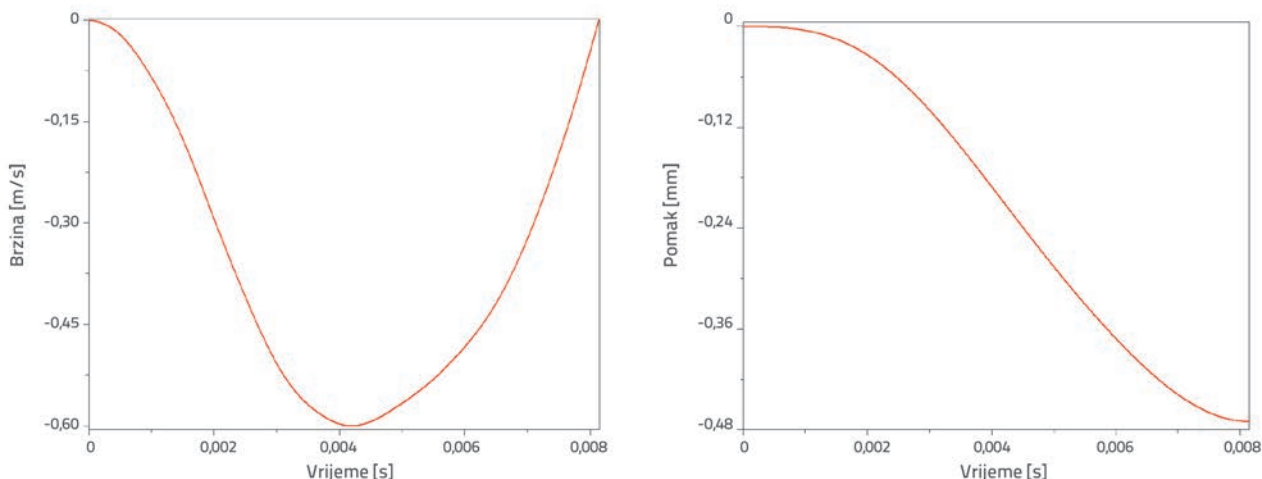
Slika 6. Konačni elementi modela sustava, ploča RS2

4. Rezultati

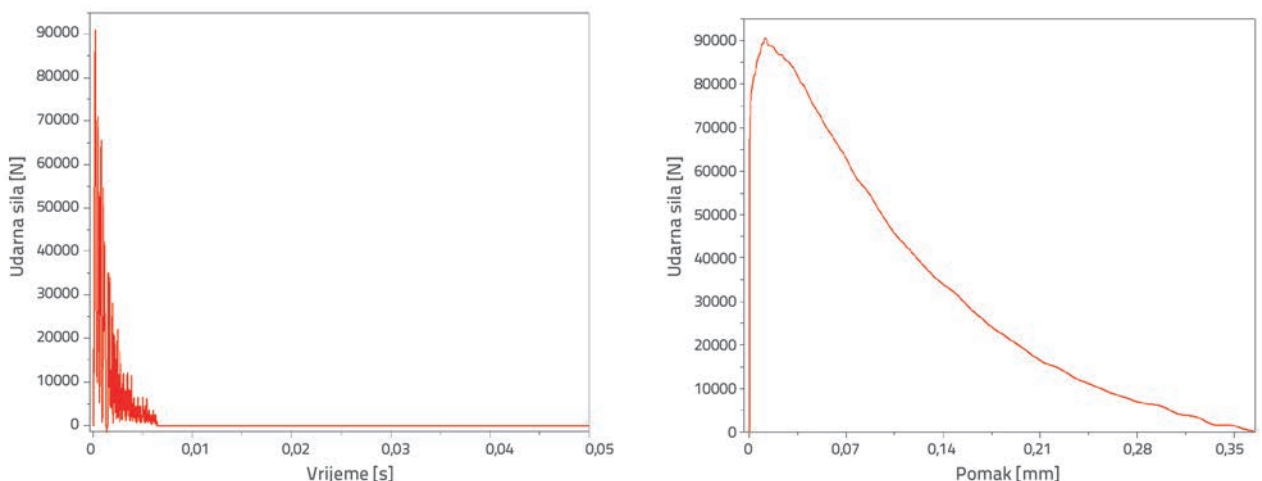
Nakon što se izrade modeli konačnih elemenata, dodjeljuju se materijalna svojstva i zadaju uvjeti oslanjanja. Tada se analize izvode za svaku situaciju. Za visinu pada 125 cm, masa čeličnog utega se uzima kao 10 kg u simulacijama. Analize se nastavljaju sve dok armiranobetonske ploče ne dođu do stanja oštećenja, što se događa nakon pada utega koji uzokuje gubitak nosivosti. Nemoguće



Slika 7. Dijagrami ubrzanje-vrijeme za ploču RS2 u točkama udaljenim 20 cm i 40 cm od točke udara (prvi pad)



Slika 8. Dijagrami brzina-vrijeme i pomak-vrijeme za ploču RS2 (prvi pad)



Slika 9. Dijagrami udarna sila-vrijeme i udarna sila-pomak za ploču RS2 (prvi pad)

je dobiti novo ubrzanje, udarnu silu i vrijednosti pomaka nakon što ploča bude oštećena. Vrijednosti brzine, ubrzanja, pomaka i udarne sile dobivene su za prvu i zadnju kretnju pada utega.

Prvo, vrijednosti ubrzanja, brzine i pomaka dobivene su iz četiri simetrične točke armiranobetonske ploče, kao što je prikazano na slici 5. Nakon toga, brzine i pomaci se također izračunavaju nakon integracijskih operacija za dobivanje rezultata. Vrijednosti udarne sile također se određuju nakon pada čeličnog utega. Dijagrami su prikazani na slikama 7. i 9. za prvi pad utega na armiranobetonske ploče dimenzije 100 x 100 x 12 cm, čije su četiri stranice pridržane.

Nelinearne dinamičke analize obavljaju se za sve armiranobetonske ploče prema dva uvjeta oslanjanja. Parametri udara kao što su vrijednosti ubrzanja, brzine, pomaka i udarne sile dobivene su iz računalnog programa. Vrijednosti brzine i pomaka izračunavaju se nakon integracijskih operacija za povezane točke gdje se dobivaju ubrzanja. Vrijednosti udarne sile određene su na rubnoj točki čeličnog utega. Konačno, sposobnost preuzimanje energije (eng. *energy absorption capacity*) je rad koji uteg obavlja pri padu i predstavlja površinu ispod krivulje sila-pomak. Rezultati su usporedno prikazani

u tablicam 4. do 7. za prve padove i padove koji su uzrokovali gubitak nosivosti (zadnji pad).

Tablica 4. Vrijednosti ubrzanja

Ploča		Vrijednosti na 20 cm		Vrijednosti na 40 cm	
		Prvi pad [m/s ²]	Zadnji pad [m/s ²]	Prvi pad [m/s ²]	Zadnji pad [m/s ²]
RS1	Min	-4328	-3403	-3557	-3084
	Maks	4303	3633	3804	3106
RS2	Min	-4351	-3466	-3726	-3225
	Maks	4485	3713	3984	3186
RS3	Min	-4795	-3622	-4218	-3207
	Maks	4962	3983	4472	3365
RS4	Min	-4176	-3308	-3731	-2965
	Maks	4285	3377	3473	2780
RS5	Min	-4317	-3426	-3853	-3006
	Maks	4368	3581	3598	3122
RS6	Min	-4723	-3615	-4263	-3184
	Maks	4608	3747	4054	3316

Tablica 5. Vrijednosti brzine

Ploča	Vrijednosti na 20 cm		Vrijednosti na 40 cm	
	Prvi pad [m/s]	Zadnji pad [m/s]	Prvi pad [m/s]	Zadnji pad [m/s]
RS1	-0,69	-0,92	-0,58	-0,79
RS2	-0,60	-0,81	-0,51	-0,70
RS3	-0,47	-0,61	-0,39	-0,52
RS4	-0,75	-0,99	-0,63	-0,83
RS5	-0,64	-0,87	-0,54	-0,75
RS6	-0,50	-0,65	-0,42	-0,54

Tablica 6. Vrijednosti pomaka

Ploča	Vrijednosti na 20 cm		Vrijednosti na 40 cm	
	Prvi pad [mm]	Zadnji pad [mm]	Prvi pad [mm]	Zadnji pad [mm]
RS1	-0,62	-1,23	-0,49	-1,02
RS2	-0,47	-1,04	-0,37	-0,86
RS3	-0,36	-0,88	-0,28	-0,74
RS4	-0,66	-1,36	-0,54	-1,13
RS5	-0,51	-1,12	-0,43	-0,94
RS6	-0,40	-0,95	-0,33	-0,82

Vrijednosti naprezanja za armiranobetonske ploče dobivene su u obliku jedinice Pa (N/m^2) nakon provedbe nelinearnih analiza. Iako se pojavljuju maksimalna naprezanja oko točke udara, vrijednosti se mijenjaju ovisno o uvjetima oslanjanja, posebno na stranicama ploča. Raspodjela naprezanja prema dvije vrste oslanjanja prikazana

je na slici 10. za armiranobetonske ploče veličine $100 \times 100 \times 12$ cm. Rezultati su prikazani za prvi pad utega nakon potpune primjene udarnog opterećenja na armiranobetonsku ploču. Može se vidjeti da na raspodjelu naprezanja uvelike utječu uvjeti oslanjanja.

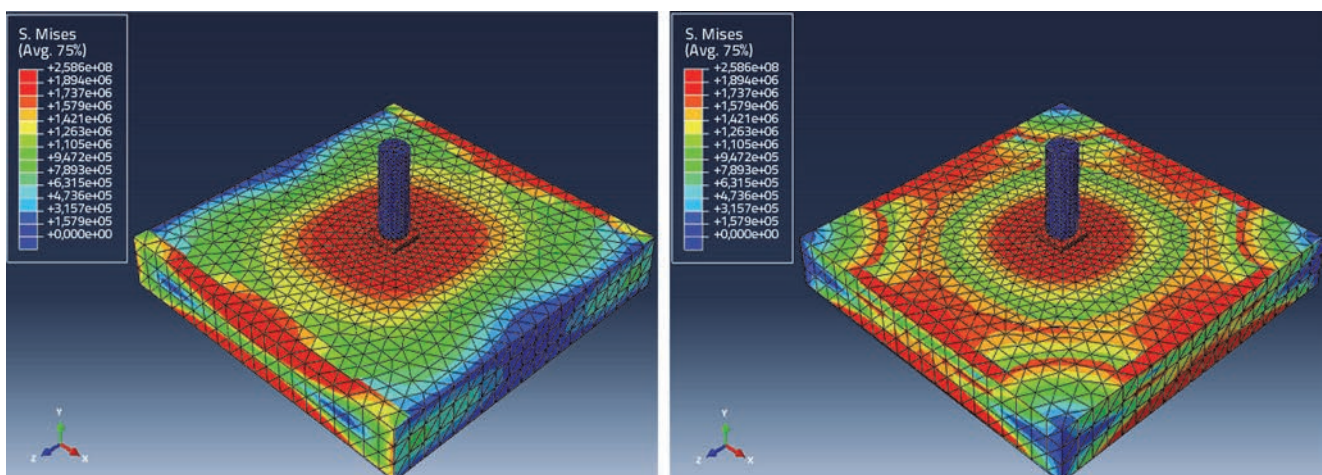
Tablica 7. Sila udara i sposobnost preuzimanje (apsorpcije) energije

Ploča	Utjecaj sile prvog pada [N]	Utjecaj sile zadnjeg pada [N]	Sposobnost preuzimanje energije [J]
RS1	81065	58753	26,78
RS2	92574	73062	31,24
RS3	108234	81391	33,05
RS4	79867	54247	25,71
RS5	90321	70476	30,81
RS6	104649	77359	31,86

5. Zaključci i prijedlozi

Armiranobetonske ploče se naširoko koriste u konstrukcijama kao njihovi sastavni elementi. Tijekom uporabe ti su elementi podložni iznenadnom opterećenju koje može proizaći iz raznih uzroka. U ovom radu provedene su nelinearne dinamičke analize za određivanje ponašanja ab ploča pod udarnim opterećenjem. U tu svrhu, armiranobetonske ploče veličine 100×100 cm, s tri različite vrijednosti debljine i dva uvjeta oslanjanja modelirane su u Abaqusu. Visina pada i masa utega prihvaćaju se kao konstantne vrijednosti u simulacijama. Nakon analize dobivaju se parametri udarnog opterećenja, kao što su ubrzanje, brzina, pomak, udarna sila i sposobnosti preuzimanja energije.

Dvije simetrične točke, smještene na udaljenosti od 20 cm i 40 cm od točke udara gdje pada čelični uteg, definirane su na armiranobetonskim pločama kako bi se odredile vrijednosti ubrzanja. Nakon toga se izračunavaju brzina i pomak za iste točke nakon integriranja relevantnih vrijednosti ubrzanja.



Slika 10. Raspodjela naprezanja za ploče RS2 i RS5

Udarne sile dobivaju se za svaki pad čeličnog utega. Vrijednosti energetskog kapaciteta također se izračunavaju prema grafikovima udarna sila-pomak. Čelična ploča i gumeni sloj se postavljaju na središnju točku armiranobetonskih ploča kako bi se ravnomjerno rasporedilo opterećenje udara na elemente ploča i smanjili unutarnji učinci pri nanošenju naglog opterećenja.

Simulacije metodom konačnih elemenata izvode se za tri debljine ploča i dvije različite vrste oslanjanja. Zbog krutosti, deblje armiranobetonske ploče, oslonjene na četiri stranice, manje su osjetljive na iznenadna opterećenja u usporedbi s ostalim pločama. Najkruća armiranobetonska ploča je RS3 debljine 15 cm, oslonjena na sve četiri stranice. Stoga, u usporedbi s ostalim pločama, RS3 je bila zadnja kod koje je došlo do oštećenja. S druge strane, ploča RS4 debljine 8 cm, oslonjena na dvije nasuprotne stranice, bila je prva kod koje je došlo do oštećenja.

Rezultati udarnog opterećenja u velikoj su mjeri pod utjecajem vrijednosti krutosti i debljine ploča. Vrijednosti ubrzanja povećavaju se s povećanjem veličine presjeka, a dobivaju se veće vrijednosti ubrzanja za deblje armiranobetonske ploče oslonjene na svim stranicama. Dok se vrijednosti ubrzanja smanjuju, vrijednosti brzine i pomaka povećavaju se zbog pada utega. Glavni razlozi za takve situacije su pukotine i oštećenja armiranobetonskih ploča. Kako se armiranobetonske ploče približavaju situaciji oštećenja, ubrzanja se smanjuju s porastom brzine i vrijednosti pomaka. Osim toga, sve vrijednosti koje se

odrede 20 cm od točke udara su veće u usporedbi s vrijednostima registriranim na 40 cm.

Vrijednosti udarne sile dobivene su u rubnoj točki čeličnog utega nakon svakog pada. Te vrijednosti pokazuju isto ponašanje kao i ubrzanja zbog krutosti članova. Sile udara također se smanjuju jer se armiranobetonske ploče približavaju situaciji oštećenja. Sposobnost preuzimanja energije armiranobetonskih ploča izračunava se prema području (površini) ispod krivulje na dijagramu udarna sila-pomak. Najveća energijska vrijednost dobiva se za ploču RS3 koja ima maksimalnu vrijednost udarnog opterećenja. Maksimalne vrijednosti naprezanja pojavljuju se na središnjem mjestu ploča gdje se primjenjuje udarno opterećenje. Najveće vrijednosti opažene su za ploču RS4, debljine 8 cm. Zbog povećanja krutosti uzrokovanim upetim osloncima, pukotine i oštećenja oko središta ploča proširuju se na nosače (slučajevi kod ploča RS1, RS2 i RS3) čije su četiri stranice upete. Osim toga, šteta je uglavnom locirana oko točke udara kod ploča čije su suprotne stranice upete. Iz tog razloga, ove ploče ranije doživljavaju stanje oštećenosti.

Budući da je gotovo nemoguće osigurati savršene uvjete ispitivanja i oslanjanja u eksperimentalnim istraživanjima, analize modelima konačnih elemenata s točnim modelima materijala predstavljaju odličnu alternativu. Te analize smanjuju radna opterećenja i daju informacije o ponašanju elemenata konstrukcija izloženih udarnim opterećenjima. Slijedom toga, istraživači će dodatno poboljšati ispitivanja različitih konstrukcijskih elemenata opterećenih udarnim opterećenjima koristeći računala velikih performansi.

LITERATURA

- [1] Arslan, A.: Mixed-mode Fracture Performance of Fibre Reinforced Concrete under Impact Loading, *Materials and Structures*, 28 (1995), pp. 473-478, <https://doi.org/10.1007/BF02473167>
- [2] Chakradhara Rao, M., Bhattacharyya, S.K., Barai, S.V.: Behaviour of Recycled Aggregate Concrete under Drop Weight Impact Load, *Construction and Building Materials*, 25 (2011), pp. 69-80, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.055>
- [3] Erdem, R.T.: Prediction of Acceleration and Impact Force Values of a Reinforced Concrete Slab, *Computers and Concrete*, 14 (2014) 5, pp. 563-575, <https://doi.org/10.12989/cac.2014.14.5.563>
- [4] Erdem, R.T., Gücüyen, E., Kantar, E., Bağcı, M.: Impact Effect on Different Sized Reinforced Concrete Specimens. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 22 (2015), pp. 597-603.
- [5] Izzat, C., May, I.M., Lyle, J., Chen, Y., Algaard, W.: Perforation owing to Impacts on Reinforced Concrete Slabs, *Proceedings of the ICE-Structures and Buildings*, 162 (2009) 1, pp. 37-44, <https://doi.org/10.1680/stbu.2009.162.1.37>
- [6] Kishi, N., Konno, H., Ikeda, K., Matsuoka, K.G.: Prototype Impact Tests on Ultimate Impact Resistance of Pc Rock Sheds, *International Journal of Impact Engineering*, 27 (2002) 9, pp. 969-985, [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(02\)00019-2](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(02)00019-2)
- [7] Mougín, J.P., Perrotin, P., Mommessin, M., Tonnelo, J., Agbossou, A.: Rock Fall Impact on Reinforced Concrete Slab: An Experimental Approach, *International Journal of Impact Engineering*, 31 (2005) 2, pp. 169-183, <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2003.11.005>
- [8] Nili, M., Afroughsabet, V.: Combined Effect of Silica Fume and Steel Fibers on the Impact Resistance and Mechanical Properties of Concrete, *International Journal of Impact Engineering*, 37 (2010) 8, pp. 879-886, <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2010.03.004>
- [9] Rao, H.S., Ghorpade, V.G., Ramana, N.V., Gnaneswar, K.: Response of SIFCON Two-Way Slabs under Impact Loading, *International Journal of Impact Engineering*, 37 (2010) 4, pp. 452-458, <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2009.06.003>
- [10] Arros, J., Doumbalski, N.: Analysis of Aircraft Impact to Concrete Structures, *Nuclear Engineering and Design*, 237 (2007), pp. 1241-1249, <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2006.09.044>
- [11] Delhomme, F., Mommessin, M., Mougín, J.P., Perrotin, P.: Simulation of a Block Impacting a Reinforced Concrete Slab with a Finite Element Model and a Mass-Spring System, *Engineering Structures*, 29 (2007) 11, pp. 2844-2852, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.01.017>
- [12] Korotkov, V., Poprygin, D., Ilin, K., Ryzhov, S.: Determination of Dynamic Reaction in Concrete Floors of Civil Structures of Nuclear Power Plant in Accidental Drops of Heavy Objects, *Abaqus Users' Conference*, Boston, May, 2004.
- [13] Kosteski, L.E., Riera, J.D., Iturrioz, I., Singh, R.L., Kant, T.: Analysis of Reinforced Concrete Plates Subjected to Impact Employing the Truss-Like Discrete Element Method, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 38 (2015) 3, pp. 276-289, <https://doi.org/10.1111/ffe.12227>

- [14] Micallef, K., Sagaseta, J. Ruiz, M.F., Muttoni, A.: Assessing Punching Shear Failure in Reinforced Concrete Flat Slabs Subjected to Localised Impact Loading, *International Journal of Impact Engineering*, 71 (2014), pp. 17-33, <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2014.04.003>
- [15] Mokhatari, S.N., Abdullah, R.: Computational Analysis of Reinforced Concrete Slabs Subjected to Impact Loads, *International Journal of Integrated Engineering*, 4 (2012) 2, pp. 70-76.
- [16] Rambaud, P.B., Timsah, Y., Daudeville, L., Mazars, J.: Finite Element Modelling of Concrete Protection Structures Submitted to Rock Impacts, 16th ASCE Engineering Mechanics Conference, Seattle, July, 2003.
- [17] Riedel, W., Kawai, N., Kondo, K.: Numerical Assessment for Impact Strength Measurements in Concrete Materials, *International Journal of Impact Engineering*, 36 (2009) 2, pp. 283-293, <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2007.12.012>
- [18] Sawamoto, Y., Tsubota, H., Kasai, Y., Koshika, N., Morikawa, H.: Analytical Studies on Local Damage to Reinforced Concrete Structures under Impact Loading by Discrete Element Method, *Nuclear Engineering and Design*, 179 (1998), pp. 157-177, [https://doi.org/10.1016/S0029-5493\(97\)00268-9](https://doi.org/10.1016/S0029-5493(97)00268-9)
- [19] Tai, Y.S., Tang, C.C.: Numerical simulation: The Dynamic Behaviour of Reinforced Concrete Plates under Normal Impact, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 45 (2006), pp. 117-127, <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2006.02.007>
- [20] Triverdi, N., Singh, R.K.: Prediction of Impact Induced Failure Modes in Reinforced Concrete Slabs through Nonlinear Transient Dynamic Finite Element Simulation, *Annals of Nuclear Energy*, 56 (2013), pp. 109-121, <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2013.01.020>
- [21] Zineddin, M., Krauthammer, T.: Dynamic Response and Behaviour of Reinforced Concrete Slabs under Impact Loading, *International Journal of Impact Engineering*, 34 (2007), pp. 1517-1534, <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2006.10.012>
- [22] Barr, B., Baghli, A.: A repeated Drop-Weight Impact Testing Apparatus for Concrete, *Magazine of Concrete Research*, 40 (1988) 144, pp. 167-176, <https://doi.org/10.1680/mac.1988.40.144.167>
- [23] Barr, B., Bouamrata, A.: Development of A Repeated Drop-Weight Impact Testing Apparatus for Studying Fibre Reinforced Concrete Materials, *Composites*, 19 (1988), pp. 453-466, [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(88\)90703-3](https://doi.org/10.1016/0010-4361(88)90703-3)
- [24] Abbas, H., Gupta, N.K., Alam, M.: Nonlinear Response of Concrete Beams and Plates under Impact Loading, *International Journal of Impact Engineering*, 30 (2004) 8-9, pp. 1039-1053, <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2004.06.011>
- [25] Sadiq, M., Yun, Z.X., Rong, P.: Simulation Analysis of Impact Tests of Steel Plate Reinforced Concrete and Reinforced Concrete Slabs Against Aircraft Impact and Its Validation with Experimental Results, *Nuclear Engineering and Design*, 273 (2014), pp. 653-667, <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2014.03.031>
- [26] Wang, W., Zhang, D., Lu, F., Wang, S-c, Tang, F.: Experimental Study and Numerical Simulation of the Damage Mode of a Square Reinforced Concrete Slab under Close-In Explosion, *Engineering Failure Analysis*, 27 (2013), pp. 41-51, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2012.07.010>
- [27] 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, <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2013.03.006>
- [28] Ahmed, A.: Modeling of a Reinforced Concrete Beam Subjected to Impact Vibration Using ABAQUS, *International Journal of Civil & Structural Engineering*, 4 (2014) 3, pp. 227-236.
- [29] Mokhatari, S.N., Abdullah, R., Kueh, A.B.H.: Computational Impact Responses of Reinforced Concrete Slabs, *Computers and Concrete*, 12 (2013) 1, pp. 37-51, <https://doi.org/10.12989/cac.2013.12.1.037>
- [30] Abaqus/CAE User's Manual, 2014.