

Primljen / Received: 14.8.2013.

Ispravljen / Corrected: 2.11.2013.

Prihvaćen / Accepted: 15.11.2013.

Dostupno online / Available online: 10.1.2014.

Park-Angov indeks oštećenja sudara susjednih čeličnih okvirnih konstrukcija

Autori:



Izv.prof.dr.sc. **Javad Vaseghi Amiri**, dipl.ing.građ.
Tehničko Sveučilište Noshirvani
Građevinski fakultet
Babol, Iran
vaseghi@nit.ac.ir



Sayyed Ghasem Jalali, dipl.ing.građ.
Tehničko Sveučilište Noshirvani
Građevinski fakultet
Babol, Iran
sg.jalali@stu.nit.ac.ir

Prethodno priopćenje

[Javad Vaseghi Amiri, Sayyed Ghasem Jalali](#)

Park-Angov indeks oštećenja sudara susjednih čeličnih okvirnih konstrukcija

U radu se analizira sudar dviju susjednih petokatnih okvirnih konstrukcija od kojih jedna ima tri a druga pet polja. Konstrukcije su analizirane za osam raznih pomaka tla u dva smjera (od lijeve strane prema desnoj i obratno) za 17 razmaka između građevina. Analiziraju se indeksi oštećenja Park-Ang za susjedne okvire. Rezultati pokazuju da se primjena udarnih elemenata može uglavnom smatrati konzervativnom. Smjer pomaka tla utječe na stupanj oštećenja konstrukcija u sudaru. Razmakom od 1% od visine kata eliminira se ili bitno umanjuje sila sudara.

Ključne riječi:

sudar konstrukcija, Park-Angov indeks oštećenja, apsorbirana energija, sudarni elementi, nelinearna dinamička analiza

Preliminary note

[Javad Vaseghi Amiri, Sayyed Ghasem Jalali](#)

Park-Ang damage index for adjacent steel frames under pounding

The pounding of two adjacent 3-bay and 5-bay 5-storey frames is studied in this paper. These frames are analysed under eight different ground motions in two left-to-right and right-to-left directions for 17 separations between them. Park-Ang damage indices of adjacent frames are studied. The results show that the use of elastic impact elements is generally conservative. The direction of ground motion influences the level of damage of colliding structures. The separation equalling to 1% of storey height can eliminate or strongly decrease pounding force.

Key words:

Structural pounding, Park-Ang damage index, absorbed energy, impact elements, nonlinear dynamic analysis

Vorherige Mitteilung

[Javad Vaseghi Amiri, Sayyed Ghasem Jalali](#)

Park-Ang Schadensindex für miteinander anstoßende Stahlrahmenkonstruktionen

In dieser Arbeit wird das Anstoßen zwei anliegender fünfstöckiger Rahmenkonstruktionen mit drei und fünf Spannweiten untersucht. Die Rahmen sind unter acht Erdbebenaufzeichnungen in zwei Richtungen, links-rechts und rechts-links, für 17 Trennungsabstände. Park-Ang Schadensindexe sind ermittelt worden. Die Resultate zeigen, dass die Anwendung von Prallelementen allgemein konservativ ist. Die Richtung der Bodenbewegung beeinflusst das Schadensausmaß der anstoßenden Konstruktionen. Trennungsabstände, die 1% der Stockwerkshöhe betragen, können Aufprallkräfte eliminieren oder stark mindern.

Schlüsselwörter:

Anstoßen von Konstruktionen, Park-Ang Schadensindex, absorbierte Energie, Aufprallelemente, nichtlineare dynamische Analysen

1. Uvod

U jakim potresima koji su zabilježeni proteklih desetljeća, sudari su doveli do znatnih oštećenja pa čak i rušenja susjednih nedovoljno razmaknutih konstrukcija različitih svojstava kod kojih postoji mogućnost osciliranja s razlikom u fazi. Tijekom potresa koji je 1985. godine zadesio grad Mexico City sudari su zabilježeni na 40 % od ukupno 330 srušenih ili jako oštećenih konstrukcija, a kod 15 % srušenih konstrukcija sudar je bio glavni uzrok rušenja [1]. Kasai i Maison navode da je kod potresa Loma Prieta zabilježeno 200 sudara u kojima je sudjelovalo više od 500 građevina i to na lokacijama koje su od epicentra udaljene više od 90 km [2]. U radovima [3, 4] Anagnostopoulos analizira dokaze i vrste sudara konstrukcija oštećenih u ranijim potresima.

Sudaranje je složena pojava koja se u postupku modeliranja povezuje s određenim nesigurnostima. U modeliranju se za analizu sudara primjenjuju dva osnovna pristupa: stereomehanički pristup i pristup kontaktnih elemenata [5]. U stereomehaničkom se pristupu za određivanje brzine tijela u sudaru nakon udara primjenjuje zakon očuvanja količine gibanja i koeficijent restitucije. Zbog svoje jednostavnosti i primjene metode konačnih elemenata, danas je za modeliranje sudara najčešći pristup kontaktnih elemenata. U ovom se radu takvi elementi, koji dolaze u međusobni kontakt uslijed dinamičkog opterećenja, nazivaju sudarnim elementima. Na te se elemente može primijeniti linearni elastični, nelinearni elastični ili viskoelastični zakon ponašanja.

Linearni sudarni element je najjednostavniji kontaktni element kojim se koristi u modeliranju udara. Taj element u modeliranju ove vrste primjenjuju i Stoykovich [6], Maison i Kasai [7, 8] te Karayannis i Favvata [9]. Treba međutim napomenuti da se u tom elementu ne uzima u obzir gubitak energije tijekom udara.

S druge strane, linearni viskoelastični model uzima u obzir gubitak energije tijekom udara. Shatoff i drugi koriste taj element u analizi ponašanja plinom hlađenih elemenata reaktora [10]. Anagnostopoulos [11] te Anagnostopoulos i Karamaneas [12] analiziraju sudar konstrukcija i pritom se također služe tim elementom.

Hertz je razvio kontaktni model, koji je po njemu dobio ime, a Goldsmith je dokazao da se taj model u velikoj mjeri podudara s eksperimentalnim podacima [5].

Lankarani i Nikravesh [13] predlažu kontaktni model *hertzdamp* u kojem se zajedno s nelinearnim prigušivačem koristi i nelinearno elastična opruga. Muthukumar i Desroches primijenili su taj element u analizi sudara susjednih konstrukcija s jednim stupnjem slobode. Oni su ustanovili da je utjecaj sudara zanemariv kada je omjer perioda dviju susjednih konstrukcija veći od 0,7 [14, 15].

Jankowski predlaže model nelinearnog viskoelastičnog sudarnog elementa i navodi da je primjenom tog elementa, umjesto elastičnih ili linearnih elemenata, postigao dobru podudarnost između rezultata numeričkog modeliranja i

eksperimentalnih rezultata [16]. On je primijenio taj model u analizi sudara dviju susjednih trokatnih konstrukcija, te je ustanovio da je sila sudara značajna za projektiranje lakše konstrukcije [17].

Mahmood i drugi usporedili su rezultate modela nelinearnog viskoelastičnog i *hertzdamp* sudara s eksperimentalnim rezultatima i pritom su ustanovili da se primjenom tih modela javljaju manje pogreške u vezi s pomakom i brzinom [18]. Vaseghi i Jalali usporedili su numeričke rezultate *hertzdamp*, linearnog i nelinearnog elastičnog i viskoelastičnog modeliranja sudara s odgovarajućim eksperimentalnim podacima, te su ustanovili da je podudarnost odziva brzine dobra kod elastičnih modela. Pokazalo se da je model *hertzdamp* najprikladniji za predviđanje sile sudara. Nisu ustanovljene značajne razlike između raznih modela sudarnih elemenata u vezi s pomakom [19].

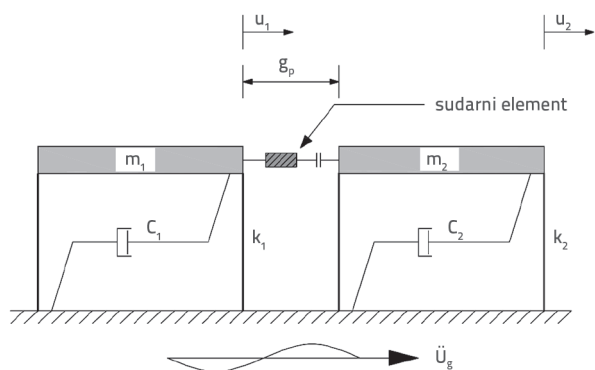
Oštećenja konstrukcije može biti uvjetovano pomakom, duktilnošću, apsorpcijom energijom, krutošću itd. Stanje konstrukcije može se odrediti pomoću indeksa oštećenja. Kod većine indeksa oštećenja vrijednost 0,0 je stanje bez oštećenja dok vrijednost 1,0 označava stanje sloma. Veletsos i Newmark koriste duktilnost kao indeks oštećenja [20]. Lybas i Sozen predlažu da se kao indeks oštećenja usvoji omjer početne krutosti i sekantne krutosti, što odgovara maksimalnoj deformaciji [21]. Park i Ang predlažu indeks oštećenja koji je zapravo kombinacija omjera maksimalne i granične deformacije i histerezne energije [22]. Roufaei i Meyer definiraju indeks oštećenja pomoću savojne fleksibilnosti [23]. McCabe i Hall [24] uveli su indeks oštećenja koji se temelji na kvadratnom rasapu energije. Osim toga, Fajfar je predložio indeks oštećenja za elastične savršeno plastične sustave koji se temelji na energiji [25].

U ovom se radu analizira sudar dviju susjednih okvirnih konstrukcija: peterokatne konstrukcije s tri polja i peterokatne konstrukcije s pet polja. Za analizu utjecaja vrste sudara primijenjeni su različiti sudarni elementi u prostoru između susjednih konstrukcija. Ti su elementi programirani pomoću programa Visual C++ nakon čega su dodani u arhivu OpenSees. Nelinearni dinamički proračuni odziva u vremenu obavljani su za osam zapisa kretanja tla u raznim intervalima između okvira. Na kraju je određen indeks oštećenja prema Park-Angu, nazvan Park-Angov indeks oštećenja, pri čemu su u obzir uzeti razni sudarni elementi.

2. Sudarni elementi i indeks oštećenja

Na slici 1. prikazane su kao primjer dvije konstrukcije s jednim stupnjem slobode, sa sudarnim elementom između njih, pod utjecajem seizmičke pobude (\ddot{U}_g). Do sudara može doći ako je relativni pomak na dva kraja ($u_1 - u_2$) sudarnog elementa veći od njegovog intervala (g_p). Odzivi susjednih konstrukcija s jednim stupnjem slobode međusobno su ovisni, tj. ovisi o svojstvima konstrukcija kao što su vrijednosti masa (m_1 i m_2), krutosti (k_1 i k_2) i prigušenja (ekvivalentne vrijednosti: C_1 i C_2). Karakteristike sudarnog elementa mogu se povezati

sa svojstvima konstrukcija s jednim stupnjem slobode kao što su mase, gustoće (ρ_1 i ρ_2), koeficijenti restitucije (e_1 i e_2), popuštanje i granična naprezanja sudarnog materijala, oblik sudarnog tijela itd. Ta svojstva povećavaju složenost pojave sudaranja. Radi jednostavnosti, sudarni elementi koji se analiziraju u ovom radu uključuju linearne ili nelinearne elastične i viskoelastične sudare.



Slika 1. Susjedne konstrukcije s jednim stupnjem slobode, sa sudarnim elementom između njih

2.1. Linearno elastični sudarni element

Ovaj kontaktni model je najjednostavniji sudarni element, a predstavljen je linearno elastičnom oprugom s međuprostorom. Sila sudara tog elementa izražava se kao:

$$\begin{aligned} F_1 &= 0 & \text{ako je } \delta(t) &\leq 0 \\ F_1 &= k_1 \delta(t) & \text{ako je } \delta(t) &> 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\delta = u_1 - u_2 - g_p \quad (2)$$

gdje je F_1 sila sudara, u_1 i u_2 označavaju pomake susjednih tijela, a g_p je međuprostor koji predstavlja početnu udaljenost između dvaju tijela. Ako dođe do preklapanja tijela, sudarni se element može aktivirati i primiti silu. Krutost sudarnog elementa k_1 jednaka je ravninskoj krutosti kruće konstrukcije, ili krutosti koja je dvadeset puta veća od krutosti kata [11], ili nekoj neograničenoj vrijednosti [7, 8].

2.2. Linearno viskoelastični sudarni element

Ovaj sudarni element zapravo je linearno elastični sudarni element koji je u vezi s linearnim viskozim prigušivačem. Stoga taj element može uzeti u obzir efekt energije koja se raspršuje tijekom sudara. Njegova kontaktna sila opisuje se kako slijedi:

$$\begin{aligned} F_1 &= 0 & \text{ako je } \delta(t) &\leq 0 \\ F_1 &= k_1 \delta(t) + C_k \dot{\delta}(t) & \text{ako je } \delta(t) &> 0 \end{aligned} \quad (3)$$

$$C_k = 2\xi \sqrt{k_1 \left(\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \right)} \quad (4)$$

$$\xi = - \frac{\ln e}{\sqrt{\pi^2 + (\ln e)^2}} \quad (5)$$

$$\dot{\delta} = \dot{u}_1 - \dot{u}_2 \quad (6)$$

gdje C_k predstavlja ekvivalentni prigušivač ili sudarni element; m_1 , m_2 , \dot{u}_1 i \dot{u}_2 su mase i brzine tijela koja se sudaraju, dok je e koeficijent restitucije [11]. Goldsmith predlaže da vrijednost koeficijenta restitucije betonskih tijela iznosi $e = 0,65$ [5].

2.3. Nelinearno elastični sudarni element

Ovaj element djeluje kao nelinearna elastična opruga. Sudarna sila tog elementa dobiva se iz

$$\begin{aligned} F_1 &= 0 & \text{ako je } \delta(t) &\leq 0 \\ F_1 &= k_h \delta(t)^{3/2} & \text{ako je } \delta(t) &> 0 \end{aligned} \quad (7)$$

gdje je k_h nelinearna kontaktna krutost:

$$k_h = \frac{4}{3\pi(h_1 + h_2)} \left[\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right] \quad (8)$$

$$R_i = \sqrt[3]{\frac{3m_i}{4\pi\rho_i}} \quad (9)$$

$$h_i = \frac{1 - \gamma_i}{\pi \cdot E_i} \quad (10)$$

gdje su ρ_i , E_i , γ_i i R_i gustoća, modul elastičnosti, Poissonov koeficijent i ekvivalentni polumjer tijela koja se sudaraju [5].

2.4. Sudarni element hertzdamp

U ovom sudarnom elementu nelinearna elastična opruga povezana je s nelinearnim viskozim prigušivačem. Njegova sudarna sila može se izračunati iz sljedeće formule:

$$\begin{aligned} F_1 &= 0 & \text{ako je } \delta(t) &\leq 0 \\ F_1 &= k_h \delta^{\frac{3}{2}} \left[1 + \frac{3(1 - e^2)}{4(v_1 - v_2)} \dot{\delta}(t) \right] & \text{ako je } \delta(t) &> 0 \end{aligned} \quad (11)$$

gdje su v_1 i v_2 brzine tijela prije sudara [13].

2.5. Nelinearno viskoelastični sudarni element

U ovom se elementu istovremeno ostvaruje nelinearno elastično i viskozno ponašanje, a eliminira se sila prigušenja uslijed negativne brzine. Sila sudara u ovom modelu izračunava se kako slijedi:

$$\begin{aligned} F(t) &= \bar{\beta} \delta^{\frac{3}{2}}(t) + \bar{c}(t) \dot{\delta}(t) & \text{ako je } \delta(t) > 0, \dot{\delta} > 0 \\ F(t) &= \bar{\beta} \delta^{\frac{3}{2}}(t) & \text{ako je } \delta(t) > 0, \dot{\delta} \leq 0 \\ F(t) &= 0; & \text{ako je } \delta(t) \leq 0 \end{aligned} \quad (12)$$

$$\bar{c}(t) = 2\xi \sqrt{\bar{\beta} \sqrt{\delta(t)} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}} \quad (13)$$

$$\nu_{cr} = \frac{9\sqrt{5}}{2} \frac{1 - e^2}{e(e(9\pi - 16) + 16)} \quad (14)$$

gdje su $\bar{\beta}$ i \bar{c} krutost i ekvivalentno prigušenje sudarnog elementa, a $\bar{\beta}$ se izražava na temelju eksperimentalnih rezultata [16].

Na temelju eksperimentalnih rezultata Jankowski je predložio koeficijent restitucije u funkciji relativne brzine prije sudara koji bi se mogao primijeniti u numeričkom modeliranju. Za kontakt između čelika i čelika, vrijednost e izražava se kako slijedi:

$$e = -0,0039v^3 + 0,00440v^2 - 0,1867v + 0,7299 \quad (15)$$

gdje je v relativna brzina prije sudara [26].

U ovom se radu za analizu koristi program OpenSees [27]. Programi drugih sudarnih elemenata razvijeni su u programskom jeziku Visual C++ te su zatim dodani u arhivu programa OpenSees. Jednadžba (15) se koristi u programiranju za izračunavanje koeficijenta restitucije. Vaseghi i Jalali [19] provjerili su usklađenost numeričkih i eksperimentalnih podataka.

2.6. Indeks oštećenja

Indeksi oštećenja često služe za izražavanje stanja konstrukcije u slučaju potresa. Park i Ang predlažu da se kao indeks oštećenja usvoji odnos između omjera maksimalne i krajnje deformacije i histerezne energije:

$$DI_{PA} = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \frac{\beta}{\delta_u p_y} \int dE_h \quad (16)$$

gdje su δ_m , δ_u i p_y maksimalne granične deformacije pod monotonim opterećenjem te čvrstoća pri popuštanju. U ovom se radu rotacija (θ) i moment (M) definiraju kao deformacija i čvrstoća. $\int dE_h$ označava histereznu energiju koju apsorbira element tijekom potresa. β je nenegativna konstanta smanjenja čvrstoće, a iznosi 0.025 za čelični element izrađen od širokopojasnog H profila [22]. Granična rotacija pod monotonim prirastom opterećenja (θ_u) može se povezati s rotacijom pri popuštanju (θ_v) pomoću granične duktilnosti (μ_u):

$$\theta_u = \mu_u \cdot \theta_v \quad (17)$$

Prema normi FEMA356 (poglavlje 5., tablice 5. i 6.), smatra se da granična rotacija do rotacije popuštanja duktilnih savojnih elemenata (μ_u) iznosi 11, [28].

Indeks oštećenja konstrukcije može se generirati pomoću korelacije više indeksa oštećenja elemenata i njihove apsorbirane energije. Te korelacijske formule iskazuju se kako slijedi:

$$DI_{kat} = \sum (\lambda)_{element} (DI)_{element} \quad (18)$$

$$(\lambda)_{element} = \left(\frac{E_i}{\sum E_i} \right)_{element}$$

$$DI_{ukupno} = \sum (\lambda)_{kat} (DI)_{kat} \quad (19)$$

$$(\lambda)_{kat} = \left(\frac{E_i}{\sum E_i} \right)_{kat}$$

gdje su DI_{PA} i E_i Park-Angov indeks oštećenja i apsorbirana energija i -tog elementa ili kata. Apsorbirana energija E_i određuje se za svaki element i kat. λ_i je omjer apsorbirane energije i -tog elementa ili kata i ukupne energije elemenata kata ili konstrukcije [29]. Ako je $DI_{PA} = 1,0$ tada se radi o potpunom slomu. Može se zamijetiti da vrijednost δ_m obično nije jednaka nuli. Stoga čak i ako član nije oštećen, DI_{PA} ima vrijednost koja nije jednaka nuli. Međutim, ako je element u elastičnom stanju, tada je apsorbirana energija jednaka nuli te ona, prema jednadžbama (18) i (19), ne utječe na indeks oštećenja kata ili konstrukcije.

3. Modeliranje okvira i analiza

Utjecaji različitih sudarnih elemenata određuju se pomoću nelinearne dinamičke analize dvaju susjednih petokatnih čeličnih okvira od kojih jedan ima tri, a drugi pet polja. Dužina polja je 5 m, a visina kata iznosi 3,2 m. Vrijednosti trajnog opterećenja i pokretnog opterećenja lijevog okvira (s tri polja) iznose 29418 i 9806 N/m. Opterećenja desnog okvira (s pet polja) dvaput su veća nego kod lijevog okvira. To se može povezati s analizom utjecaja sudarne sile na lakši okvir. Maseni udio pokretnog opterećenja iznosi 20 %. Kod okvira s tri i pet polja, prosječna masa katova iznosi 50100 i 165000 kg. Kategorija tla C definirana je prema USGS (eng. *U.S. Geological Survey*) [30]. Za projektiranje okvira korišten je iranski zakon za protupotresno projektiranje građevina (Standard 2800) [31] i iranski priručnik za čelične okvire (koji odgovara dokumentu AISC-ASD89 [32]). Prema Standardu 2800, okviri odabrani u ovom radu imaju srednju vrijednost.

Glavni periodi okvira s tri i pet polja su 1,080 i 0,912 s. Prema Standardu 2800, ako zgrade imaju manje od osam katova i ako su od niže i srednje vrijednosti, tada se svaki kat zgrade treba odmaknuti od granice okolnog terena za 0,5 % njegove visine. Drugim riječima, ta dva okvira trebaju se odmaknuti jedan od drugoga za 1 % njihove visine. Dakle, ta se dva okvira trebaju udaljiti jedan od drugog za 0,16 m. Prema dokumentu UBC97, susjedne se građevine trebaju odmaknuti za barem Δ_{MT} :

$$\Delta_{MT} = \sqrt{(\Delta_{M1})^2 + (\Delta_{M2})^2} \quad (20)$$

gdje su Δ_{M1} i Δ_{M2} maksimalni neelastični pomaci od susjednih konstrukcija, a izračunavaju se pomoću

$$\Delta_M = 0,7 R \Delta_S \quad (21)$$

Tablica 1. Pomaci tla odabrani za analizu

Naziv potresa	Datum	Mjerna stanica	Komponenta	PGA [g]	Udaljenost [km]	Magnituda
Loma Prieta	18.10.1989.	47381 Gilroy Array	G03090	0,37	14,4	Ms (7,1)
Superstitt Hills	24.11.1987.	01335 El Centro Imp, Co, Cent	B-ICC000	0,36	13,9	Ms (6,6)
Northridge	17.1.1994.	90091 LA - Saturn St	STN110	0,44	30,0	Ms (6,7)
Whittier Narrows	1.10.1987.	90077 Santa Fe Springs - E Joslin	A-EJS048	0,43	10,8	Ms (5,7)
Chi-Chi	20.9.1999.	TCU074	TCU074-W	0,59	13,67	Ms (7,6)
Cape Mendocino	25.4.1992.	89156 Petrolia	PET000	0,59	9,5	Ms (7,1)
Chi-Chi	20.9.1999.	TCU079	TCU079-W	0,74	10,04	Ms (7,6)
Duzce	12.11.1999.	Bolu	BOL000	0,73	17,6	Ms (7,3)

PGA - vršna ubrzanja tla (eng. peak ground acceleration), Ms - magnituda površinskih valova (eng. surface-wave magnitude)

Tablica 2. Krutost sudarnih elemenata između raznih katova susjednih okvira

Krutost elementa	Krutost sudarnih elemenata				
	Prvi kat	Drugi kat	Treći kat	Četvrti kat	Peti kat
Linearna krutost [N/m]	$6,37 \times 10^9$	$1,6 \times 10^9$	$8,01 \times 10^8$	$4,71 \times 10^8$	$2,65 \times 10^8$
Nelinearna krutost [N/m ^{1,5}]	$131,0 \times 10^9$	$131,0 \times 10^9$	$131,0 \times 10^9$	$131,0 \times 10^9$	$131,0 \times 10^9$

gdje je R numerički koeficijent koji predstavlja inherentnu povećanu nosivost i globalnu duktilnost sustava koji se odupiru bočnoj sili [33]. U ovom se radu u obzir uzima jednadžba (20). Međutim, ona služi za izračunavanje razmaka susjednih građevina sličnih svojstava. Prema Standardu 2800, vrijednost R iznosi 7. Δ_s je proračunski odzivni pomak za slučaj proračunskog opterećenja; on za desni okvir iznosi 0,052, a za lijevi 0,043. Prema dokumentu UBC, Δ_{MT} iznosi 0,331 m.

Za analizu susjednih okvira odabrano je osam pomaka tla iz baze podataka PEER [34] za jake pomake u tlu klase C. Karakteristike tih pomaka prikazane su u tablici 1. Radi analize smjera pobude, ti su pomaci zasebno inducirani u dva smjera (lijevi prema desno i desni prema lijevo). Pretpostavljeno je da ti odabrani pomaci tla idu od lijeve strane prema desnoj, te da se smjer može promijeniti (od desne strane prema lijevoj) množenjem podataka sa -1. Analize su obavljene pomoću programa OpenSees [27], a za programiranje je odabran alat Visual C++. Dakle, Visual C++ upotrijebljen je za programiranje novih sudarnih elemenata te da se omogući njihovo korištenje u OpenSeesu. Element greda-stup s uprosječenim plastičnim parametrima odabran je za modeliranje greda i stupova. Usvajeno je da je svaki kat kruta dijafragma kako bi se eliminirale uzdužne sile u gredama. Vrijednosti korištene u analizama iznosile su: naprezanje pri popuštanju (240 MPa), Poissonov koeficijent (0,3), modul elastičnosti (200 GPa), gustoća (7850 kg/m³) i otvrdnjavanje čelika pri deformaciji (3 %). Ovisnost brzine o koeficijentu restitucije izračunana je prema jednadžbi (15). Krutost linearno elastičnih i viskoelastičnih elemenata između svakog kata za dvadeset puta je veća od krutosti kata za čvršći okvir. Krutost nelinearnih elemenata dobivena je iz jednadžbi (8) do (10). Jednadžbe (4) i (13) korištene su za izračunavanje koeficijenata prigušenja linearnih i nelinearnih viskoelastičnih elemenata.

Vrijednosti krutosti za razne sudarne elemente iskazane su u tablici 2. U okviru analize sudara konstrukcija obavljeno je 1360 proračuna odziva u vremenu. Intervali analize iznosili su 0,001 s. Međutim, u nekim slučajevima u kojima dolazi do konvergencije, taj je interval smanjen na 0,00025 s.

4. Rezultati

Sudar dvaju okvira između kojih se nalazi sudarni element analizira se na 17 udaljenosti od 0,00 do 0,16 m, s intervalima od 0,01 m. U nekim slučajevima sudarna sila na razmaku od 0,16 m nije jednaka nuli. Zato su obavljene neke dodatne analize, i to posebno radi određivanja odgovarajućih razmaka u kojima je sila sudara jednaka nuli. Popuštanje i maksimalne rotacije elemenata određuju se na svakoj udaljenosti pomoću histereznih krivulja, a indeksi oštećenja elemenata izračunavaju se prema jednadžbi (16). Nakon toga se za elemente izračunavaju apsorbirane energije, a indeksi oštećenja se za svaki kat dobiva iz više indeksa oštećenja i apsorbirane energije komponenata pomoću jednadžbe (18). Prema jednadžbi (19), na sličan način se izračunava i indeks oštećenja okvira: iz indeksa oštećenja i apsorbirane energije katova. Indeks oštećenja 1,0 znači popuštanje kata ili okvira. Međutim, u nekim slučajevima, ako se izbrišu indeksi oštećenja veći od 1,0, tada se ne može analizirati utjecaj primjene raznih sudarnih elemenata. Stoga su indeksi oštećenja veći od 1,0 prikazani u tablicama i grafovima samo u svrhu uspoređivanja učinaka primjene raznih sudarnih elemenata. Rezultati pokazuju da primjena raznih udarnih elemenata tek malo utječe na indeks oštećenja teškog okvira s pet polja, u usporedbi s lakim okvirom s tri polja. Što se tiče ekstenzivnih rezultata, za okvir s pet polja daje se sumarni prikaz više indeksa oštećenja. Rezultati za okvir s tri polja objašnjeni su

Tablica 3. Maksimalni i minimalni IO (IO = indeks oštećenja) petokatnog okvira za smjerove pobude L-R (lijevo-desno) i R-L (desno-lijevo), prema modelu *hertzdamp*

Pomak tla	Smjer	Maksimalni IO sa sudarom	Interval maksimalnog IO	Minimalni IO sa sudarom	Interval minimalnog IO	IO bez sudara	Interval kada je sila sudara nula (0.00)
Loma Prieta	L-R	0,2794	0,01	0,2391	0,07	0,2366	0,13
	R-L	0,2392	0,07	0,2177	0,03	0,2366	0,13
Superstition Hills	L-R	0,3189	0,11	0,2712	0,01	0,3189	0,11
	R-L	0,3189	0,09	0,2850	0,00	0,3189	0,09
Northridge	L-R	0,9272	0,03	0,9259	0,02	0,9263	0,04
	R-L	0,9319	0,12	0,8729	0,02	0,9263	0,19
Whittier Narrows	L-R	0,2838	0,00	0,2736	0,01	0,2800	0,10
	R-L	0,3022	0,00	0,2796	0,04	0,2800	0,11
Chi-Chi (TCU074)	L-R	1,1344	0,00	1,0200	0,16	1,0314	0,17
	R-L	1,2149	0,03	1,0015	0,14	1,0314	0,19
Cape Mendocino	L-R	0,7248	0,03	0,6967	0,01	0,7157	0,13
	R-L	0,7157	0,16	0,6766	0,01	0,7157	0,17
Duzce	L-R	0,7416	0,00	0,6721	0,06	0,6874	0,16
	R-L	0,7015	0,01	0,6669	0,03	0,6874	0,10
Chi-Chi (TCU079)	L-R	1,0192	0,16	0,9567	0,01	1,0198	0,18
	R-L	1,0188	0,16	0,9305	0,00	1,0198	0,18

Tablica 4. Maksimalni i minimalni indeksi oštećenja (IO) okvira s tri polja za smjerove pobuda L-R i R-L za *hertzdamp* model

Pomak tla	Smjer	Maksimalni IO sa sudarom	Interval maksimalnog IO	Minimalni IO sa sudarom	Interval minimalnog IO	IO bez sudara	Interval kada je sila sudara nula (0.00)
Loma Prieta	L-R	0,2498	0,07	0,1197	0,00	0,2457	0,13
	R-L	0,2659	0,09	0,1721	0,00	0,2457	0,13
Superstition Hills	L-R	0,2411	0,08	0,1403	0,00	0,2411	0,11
	R-L	0,2411	0,09	0,1509	0,00	0,2411	0,09
Northridge	L-R	0,6975	0,00	0,6528	0,02	0,6585	0,04
	R-L	0,6621	0,02	0,6032	0,03	0,6585	0,19
Whittier Narrows	L-R	0,2369	0,01	0,2042	0,03	0,2246	0,10
	R-L	0,2254	0,04	0,1631	0,00	0,2246	0,11
Chi-Chi (TCU074)	L-R	1,1330	0,05	0,9543	0,00	1,0429	0,17
	R-L	1,0819	0,12	0,8094	0,02	1,0429	0,19
Cape Mendocino	L-R	0,5510	0,01	0,4508	0,12	0,4508	0,13
	R-L	0,5841	0,01	0,4445	0,11	0,4508	0,17
Duzce	L-R	0,5711	0,04	0,4676	0,00	0,5368	0,16
	R-L	0,6148	0,04	0,5368	0,10	0,5368	0,10
Chi-Chi (TCU079)	L-R	0,8403	0,10	0,6418	0,03	0,8164	0,18
	R-L	0,8974	0,07	0,7896	0,01	0,8164	0,18

mного detaljnije. Model *hertzdamp* uzima u obzir prigušenje, pa su tu nesigurnosti manje. Stoga se odzivi dobiveni primjenom raznih modela sudara uspoređuju s rezultatima analize pomoću modela *hertzdamp*.

Tablica 3. sadrži rezultate dobivene primjenom raznih sudarnih elemenata na ukupne maksimalne i minimalne

indekse oštećenja okvira s pet polja, sa sudarom i bez njega, prema modelu *hertzdamp*. Tu se vidi da se ukupni indeksi oštećenja za teže okvire sa sudarom, u usporedbi s indeksima oštećenja bez sudara, mijenjaju za manje od 5,5 %, uz neke iznimke (Loma Prieta, Chi-Chi (TCU074) i Superstition Hills).

Tablica 5. Maksimalne apsolutne razlike (%) IO kod okvira s tri polja za razne sudarne elemente, te usporedba rezultata modeliranja *hertzdamp*

Pomak tla	Smjer	Maksimalni IO za linearno elastični model sudara	Maksimalni IO za linearno viskoelastični model sudara	Maksimalni IO za nelinearno elastični model sudara	Maksimalni IO za nelinearno viskoelastični model sudara
Loma Prieta	L-R	6,55	6,81	3,09	2,02
	R-L	12,92	2,69	16,28	1,17
Superstitn Hills	L-R	38,38	7,43	19,89	3,59
	R-L	16,35	6,44	9,83	2,70
Northridge	L-R	1,26	0,76	1,02	0,54
	R-L	13,88	4,68	7,15	5,89
Whittier Narrows	L-R	11,79	4,16	1,49	2,50
	R-L	13,44	6,83	2,05	1,92
Chi-Chi (TCU074)	L-R	3,91	6,26	2,80	2,20
	R-L	6,40	3,66	5,55	2,51
Cape Mendocino	L-R	9,94	4,11	4,66	2,08
	R-L	4,95	4,22	5,01	2,99
Duzce	L-R	10,06	2,64	4,99	0,62
	R-L	3,10	3,19	1,60	1,33
Chi-Chi (TCU079)	L-R	7,42	5,44	5,47	3,41
	R-L	10,54	4,84	11,34	7,89

Iz tablice 3. vidljivo je da smjer seizmičke pobude može utjecati na indeks oštećenja i razmak potreban radi eliminiranja sile sudara. Sudar može dovesti do povećanja tj. smanjenja oštećenja u raznim intervalima.

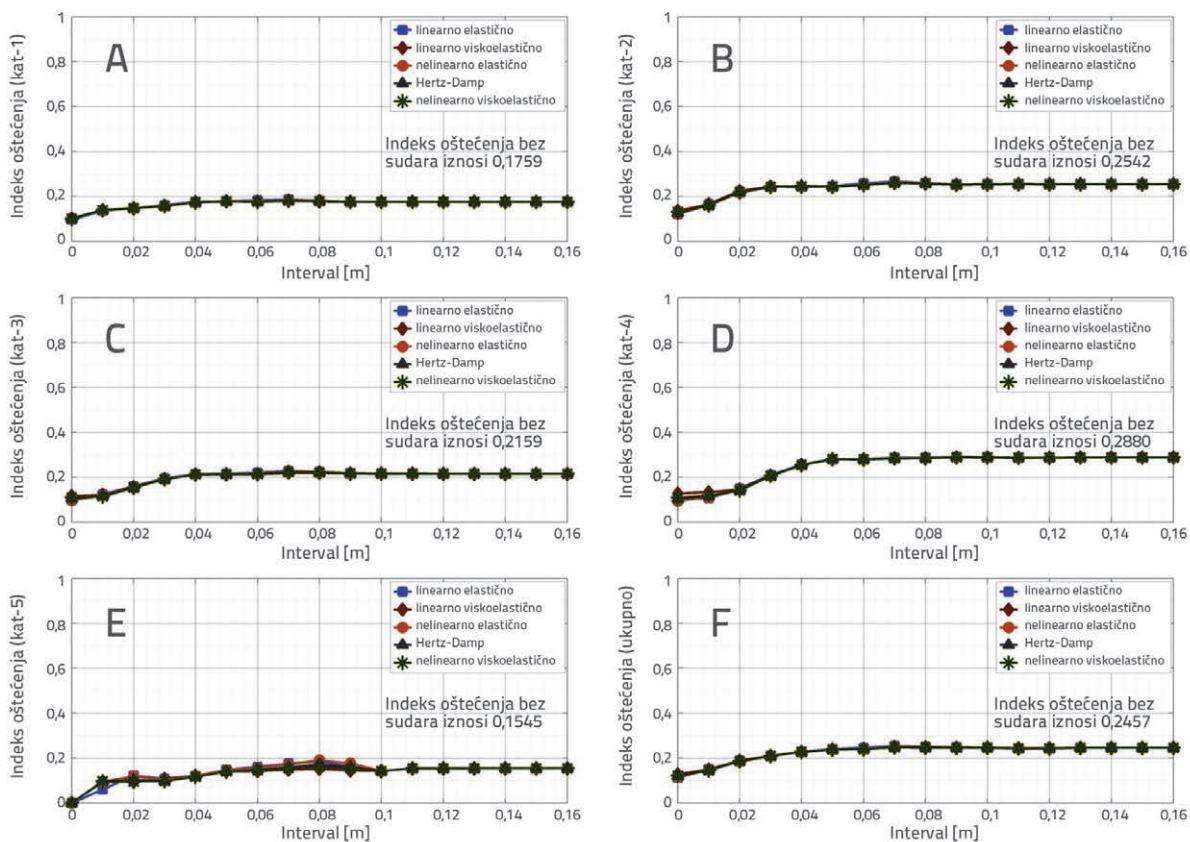
Rezultati pokazuju da primjena sudarnih elemenata mijenja ukupni indeks oštećenja za najviše (5,5 %) i to za sve razmake i pomake tla. Međutim ta je vrijednost ograničena na 11,73 % za indeks oštećenja katova. Maksimalni Park-Angovi indeksi oštećenja za katove konstrukcija s tri polja i za čitave konstrukcije prikazani su na slikama od 2. do 9. gdje se vide razni sudarni elementi, razmaci i pomaci tla. Zbog ograničenog prostora, u radu su prikazani Park-Angovi indeksi oštećenja za određene slučajeve: Loma Prieta (slika 2. i 3.), Superstitn Hills (slika 4. i 5.), Northridge (slika 6. i 7.) i Duzce (slike 8. i 9.). Maksimalni indeksi oštećenja za okvir s tri polja, bazirani na sudarnom elementu *hertzdamp*, prikazani su u tablici 4. Tablica 5. pokazuje apsolutne maksimalne razlike indeksa opterećenja za razne sudarne elemente. Prema slikama od 2. do 9. te prema tablici 5., indeks oštećenja se može promijeniti na osnovi odabira sudarnog elementa, što je vidljivije kod nižih vrijednosti vršnih ubrzanja tla (eng. *peak ground acceleration* - PGA) u ograničenom broju razmaka među građevinama. Međutim, kod viših vrijednosti PGA, utjecaj na indekse oštećenja može biti manji, ali u većem broju razmaka među građevinama. Očito je da odabir sudarnog elementa utječe na indekse oštećenja katova a ne utječe na ukupni indeks oštećenja. Može se uočiti da primjena elastičnih i viskoelastičnih sudarnih elemenata uglavnom dovodi do većih i manjih oštećenja. Stoga se može reći da je primjena

elastičnih sudarnih elemenata konzervativna; međutim, oni ne mogu uzeti u obzir gubitak energije pri sudaru, što može dovesti do jače sile sudara i do nerealnog modeliranja. Pretpostavlja se da je $\theta_u = 11 \times \theta_v$. Stoga, samo za popuštajući element i bez apsorpcije energije iz prvog dijela jednadžbe (16), indeks oštećenja iznosi barem:

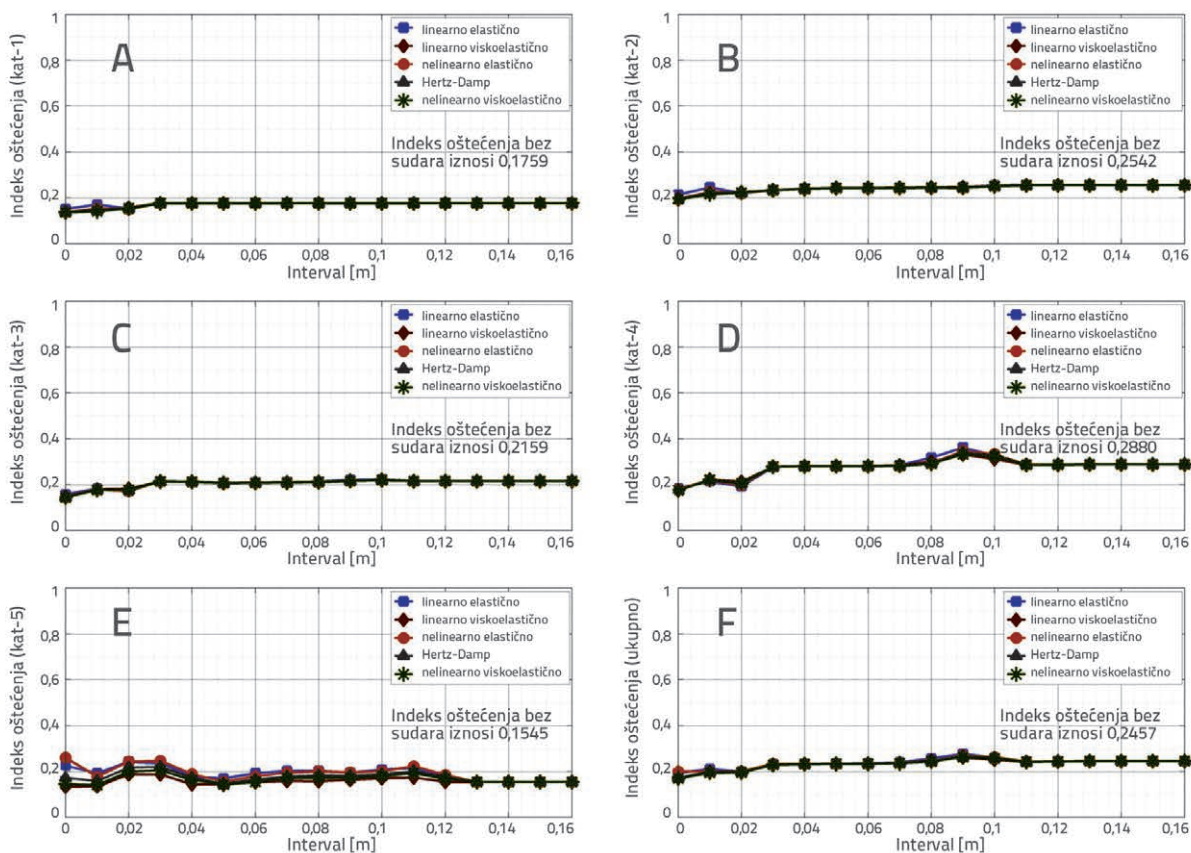
$$D_{PA} = \frac{\theta_m}{\theta_u} = \frac{\theta_v}{11 \times \theta_v} = \frac{1}{11}.$$

Na slikama 5.a i 5.b može se uočiti da sile sudara nekih udarnih elemenata dovode do popuštanja elemenata, ali i da su energije koje apsorbiraju elementi niske. Stoga se kod nekih elemenata bilježi indeks oštećenja od barem 1/11. Zbog niske apsorpcije energije, to ne može bitno utjecati na ukupan indeks oštećenja, kao što se vidi na slici 5.f.

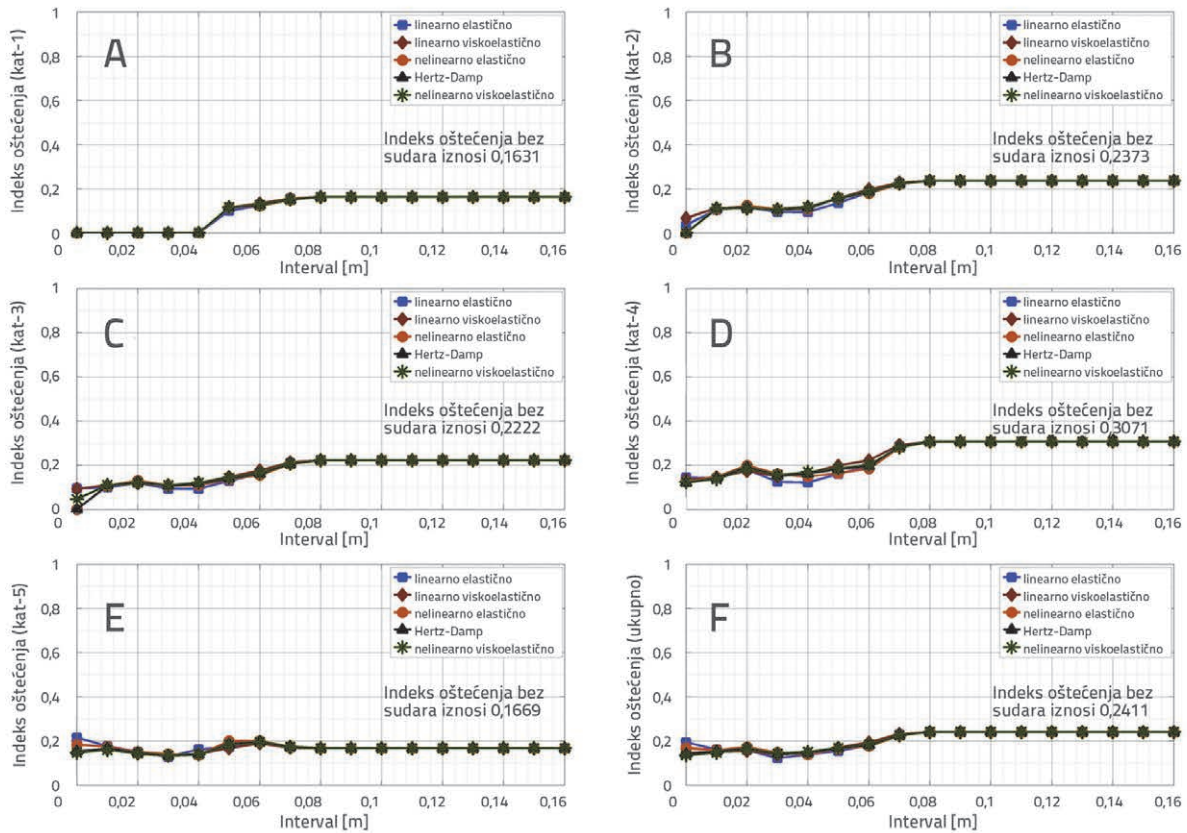
Iz slika od 2. do 9. i iz tablice 4. se vidi da smjer seizmičke pobude bitno utječe na oštećenje lakšeg okvira. Na primjer, na slikama 2.e i 3.e može se vidjeti da je oštećenje petog kata jednako nuli u smjeru od lijeve strane prema desnoj u nultom intervalu. Međutim, u smjeru od desne strane prema lijevoj, u nultom intervalu, oštećenje raste u odnosu na stanje bez sudara. Isto tako može se vidjeti na slikama 6., 7., 8. i 9. da je oštećenje nekih katova u jednom smjeru pobude manje, ali je u suprotnom smjeru veće od stanja bez sudara. S druge strane vidi se na slici 8.f da u nekim intervalima raste razina oštećenja dok se u drugima smanjuje za isti smjer pobude. Iz slika 8. i 9. vidi se da je oštećenje nekih katova ili čitavog okvira u intervalima koji nisu jednaki nuli veće od oštećenja u nultim intervalima; zanimljivo je da niti jedan razmak između



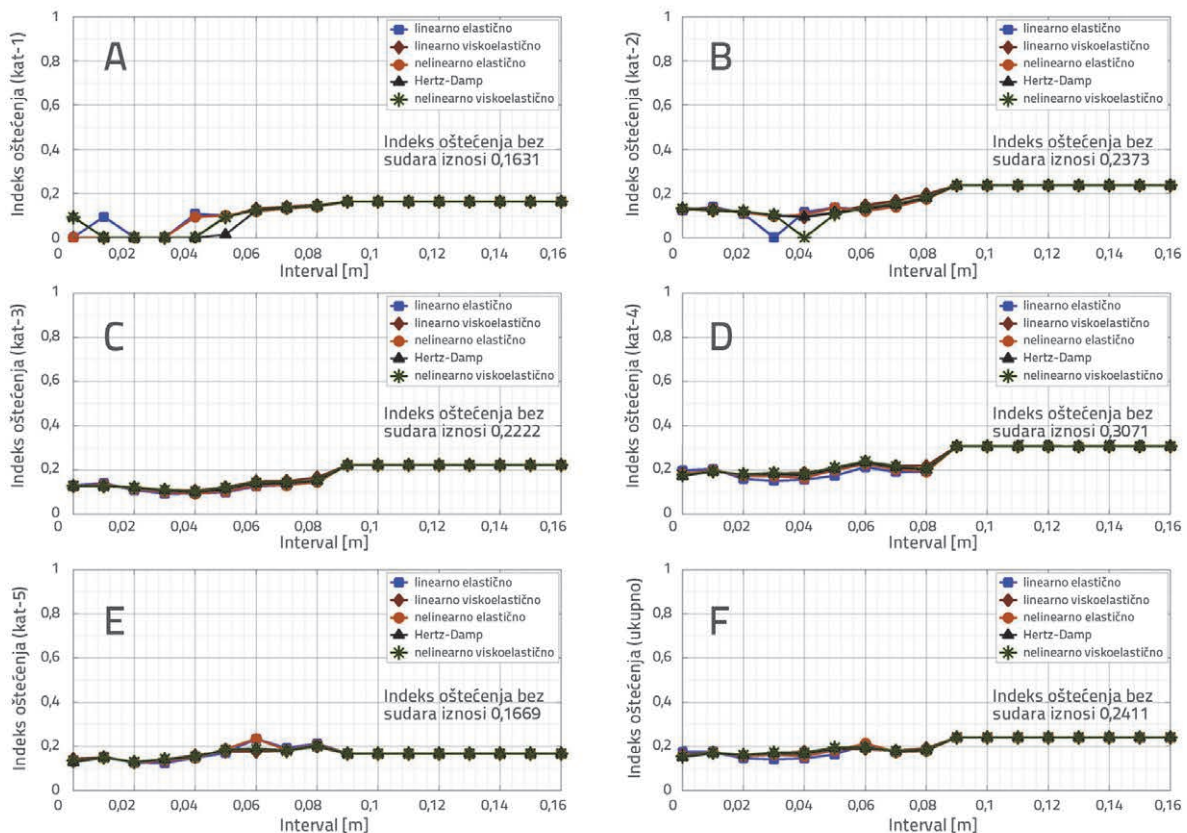
Slika 2. Park-Angov indeks oštećenja u raznim razmacima za Loma Prietu, lijevo-desno, A-prvi, B-drugi, C-treći, D-četvrti, E-peti kat i F-ukupno okvir



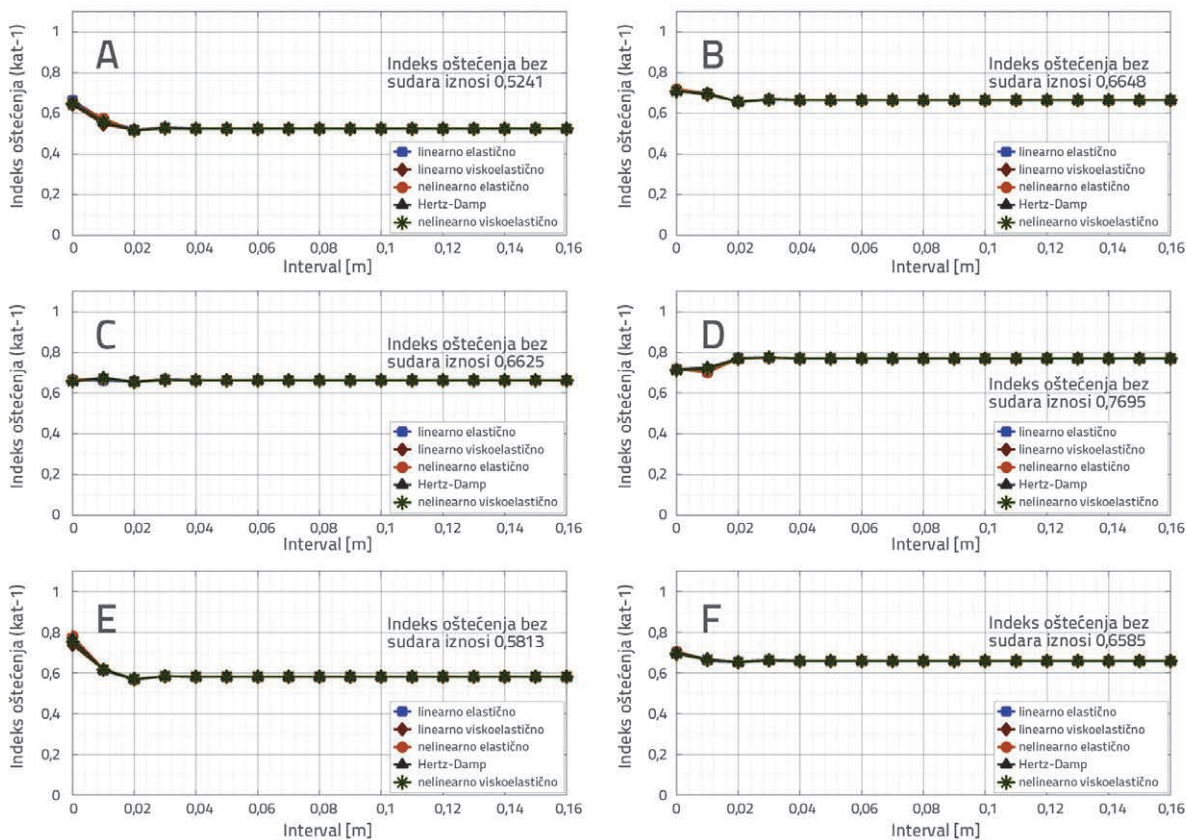
Slika 3. Park-Angov indeks oštećenja u raznim razmacima za Loma Prietu, desno-lijevu, A-prvi, B-drugi, C-treći, D-četvrti, E-peti kat i F-ukupno okvir



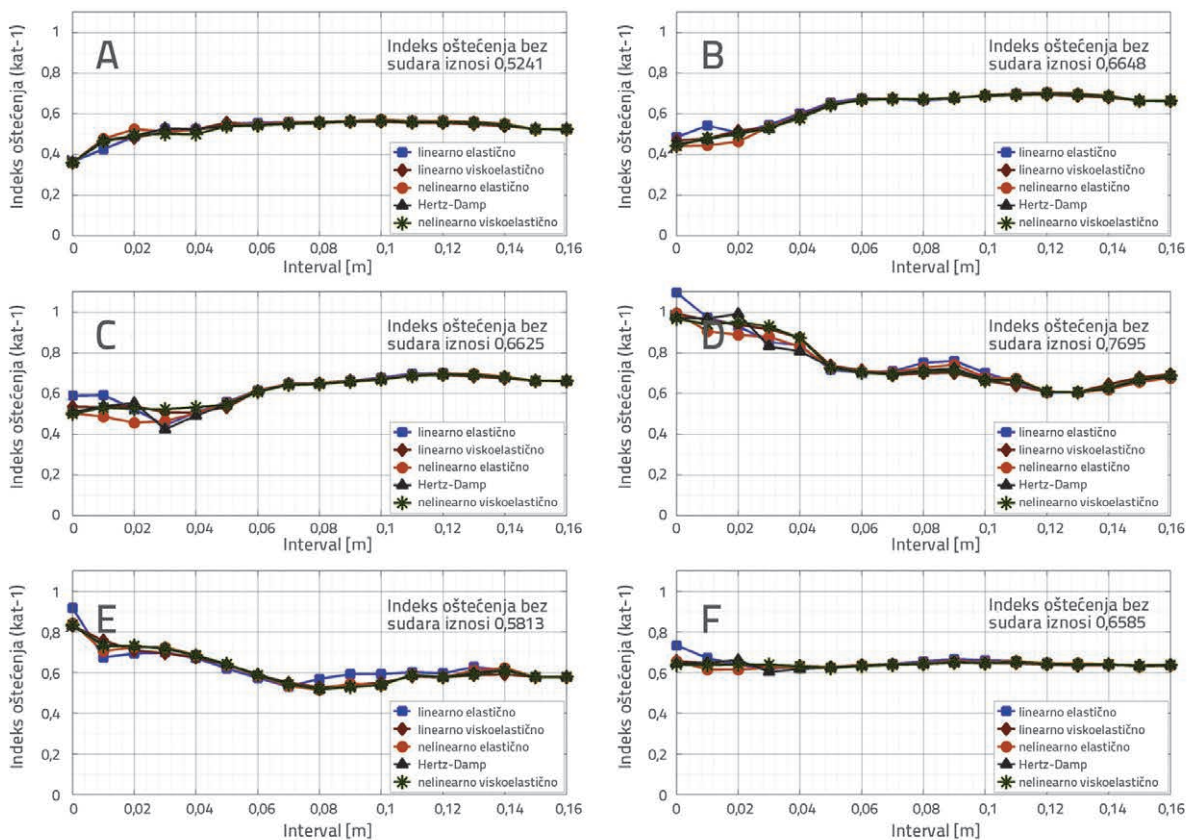
Slika 4. Park-Angov indeks oštećenja u raznim razmacima za Superstition Hills, lijevo-desno, A-prvi, B-drugi, C-treći, D-četvrti, E-peti kat i F-ukupan okvir



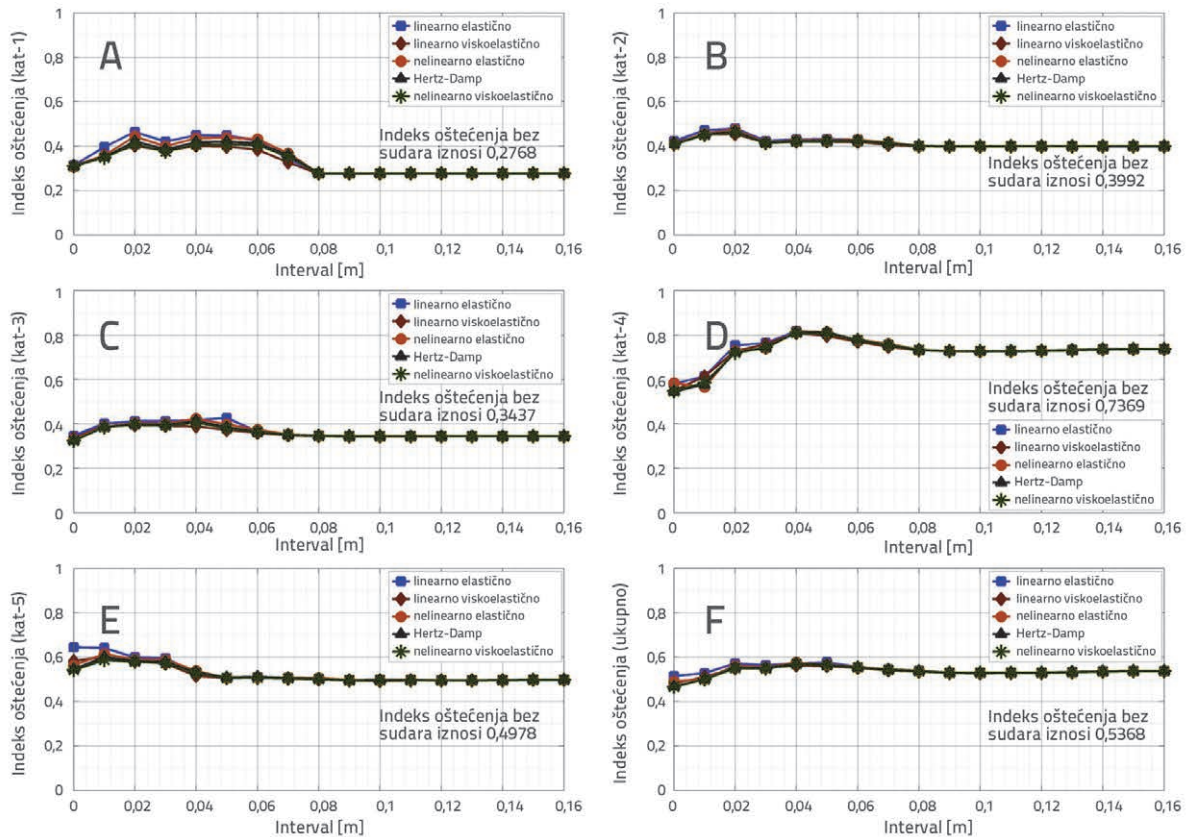
Slika 5. Park-Angov indeks oštećenja u raznim razmacima za Superstition Hills, desno-lijevno, A-prvi, B-drugi, C-treći, D-četvrti, E-peti kat i F-ukupan okvir



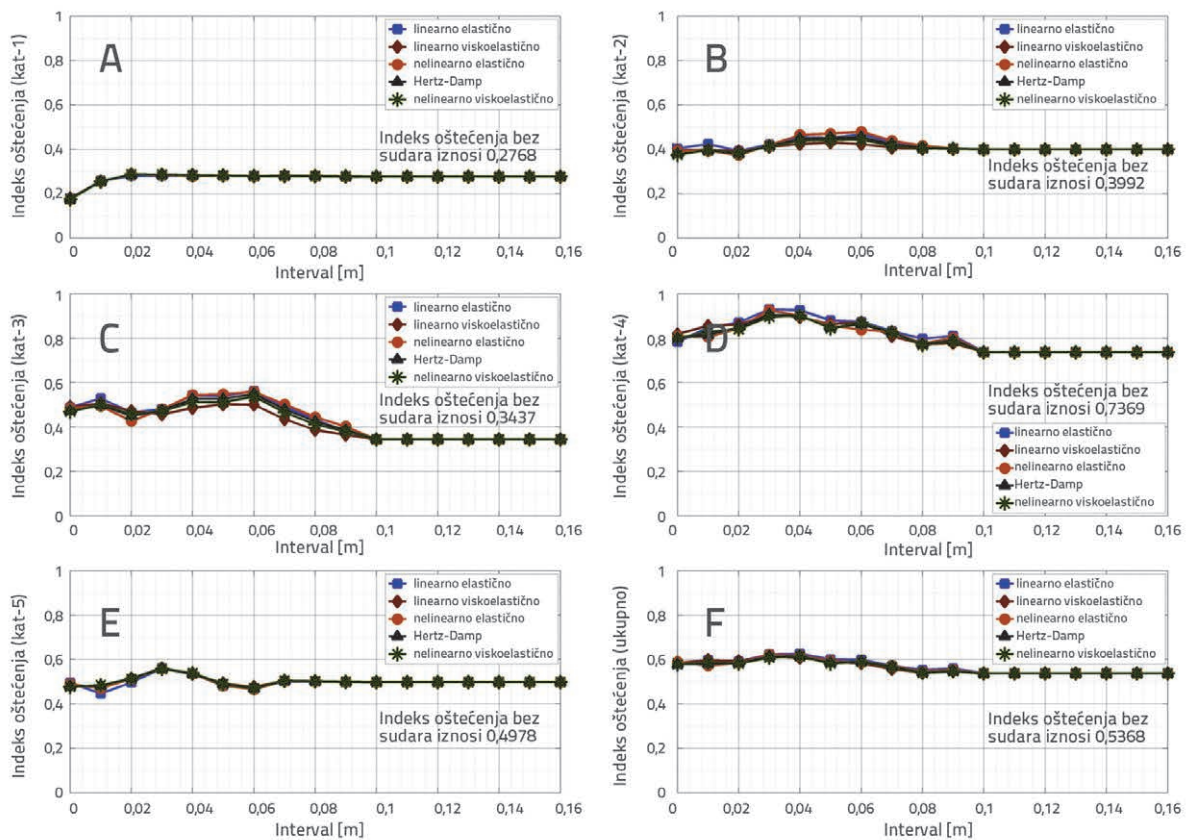
Slika 6. Park-Angov indeks oštećenja u raznim razmacima za Northridge, lijevo-desno, A-prvi, B-drugi, C-treći, D-četvrti, E-peti kat i F-ukupan okvir



Slika 7. Park-Angov indeks oštećenja u raznim razmacima za Northridge, desno-lijevo, A-prvi, B-drugi, C-treći, D-četvrti, E-peti kat i F-ukupan okvir



Slika 8. Park-Angov indeks oštećenja u raznim razmacima za Duzce, lijevo-desno, A-prvi, B-drugi, C-treći, D-četvrti, E-peti kat i F-ukupan okvir



Slika 9. Park-Angov indeks oštećenja u raznim razmacima za Duzce, desno-lijevo, A-prvi, B-drugi, C-treći, D-četvrti, E-peti kat i F-ukupan okvir

Tablica 6. Maksimalne apsolutne razlike (%) IO u intervalu od 0.16 m bez sudara, za model *hertzdamp*

Pomak tla	Smjer	IO u intervalu od 0,16 m za okvir s tri polja	IO za okvir s tri polja bez sudara	Razlika [%]	IO u intervalu od 0,16 m za okvir s pet polja	IO za okvir s pet polja bez sudara	Razlika [%]
Northridge	R-L	0,6363	0,6585	3,37	0,9296	0,9263	0,36
Chi-Chi (TCU074)	L-R	1,0555	1,0429	1,21	1,0200	1,0314	1,11
	R-L	1,0331	1,0429	0,94	1,0133	1,0314	1,75
Cape Mendocino	R-L	0,4508	0,4508	0,00	0,7157	0,7157	0,00
Chi-Chi (TCU079)	L-R	0,8164	0,8164	0,00	1,0194	1,0198	0,04
	R-L	0,8450	0,8164	3,50	1,0188	1,0198	0,10

susjednih građevina nije siguran. Stoga se preporučuje povećanje razmaka između susjednih konstrukcija i to sve dok utjecaj sudara ne postane zanemariv.

Prema tablici 3. ili 4., kod nekih su pomaka tla sudarne sile jednake nuli u intervalima koji prelaze 1 % od visine okvira (0,16 m). Indeksi oštećenja za te slučajeve kada je interval jednak 0,16 m, te za sudarni model *hertzdamp*, prikazani su u tablici 6. U istoj se tablici vidi da razmak iznosi 1 % od visine okvira i da može bitno utjecati na sudarne sile. Međutim, prema jednadžbi (20), razmak iz dokumenta UBC od 0,331 m ipak je konzervativan, čak i za vršna ubrzanja tla veća od 0,7 g.

5. Zaključak

U ovom se radu analiziraju utjecaji raznih sudarnih elemenata. Ti su elementi računalno obrađeni i dodani u arhivu OpenSees. Zatim su za osam pomaka tla obavljene nelinearne dinamičke analize da bi se istražio sudar dviju petokatnih okvirnih konstrukcija u raznim intervalima od 0,0 do 0,16, u razmacima/inkrementima od po 0,01 m. Prikazan je također i izračun Park-Angovog indeksa oštećenja. Razlika u masi između desnog i lijevog okvira omogućila je odgovarajuću analizu teškog konstrukcijskog sudara.

Rezultati pokazuju sljedeće:

- Da bi se odredile karakteristike linearnih i nelinearnih viskoelastičnih elemenata, potrebno je pretpostaviti stanje krutosti; međutim, stupanj nesigurnosti je manji kod nelinearnih elastičnih elemenata i *Hertzdamp* elemenata. Stoga se sudarni element *Hertzdamp* može smatrati prikladnim za modeliranje sudara u kojem se u obzir uzima gubitak energije tijekom sudara.
- Odabir elementa sudara utječe na Park-Angov indeks oštećenja. Općenito uzevši, modeli sudara s linearnim i nelinearnim elastičnim elementima generiraju maksimalne Park-Angove indekse oštećenja. Primjena elastičnih elemenata sudara smatra se skoro konzervativnom. Krutost koja je dvadeset puta veća od katne krutosti građevine može se smatrati prikladnom za modeliranje linearno elastičnog udarnog elementa.
- Sudar može smanjiti ili povećati oštećenje pojedinačnih katova ili ukupnog okvira u raznim intervalima. Sudar također može promijeniti stupanj oštećenja na pojedinačnim katovima. Stoga se preporučuje povećanje razmaka između susjednih građevina sve dok utjecaj sudara ne postane zanemariv.
- Razmak od 1 % od visine građevine može bitno smanjiti utjecaj sudara na indeks oštećenja. Propis UBC za određivanja razmaka između susjednih građevina smatra se konzervativnim.

LITERATURA

- [1] Rosenblueth, E., Meli, R.: The 1985 Earthquake: Causes and Effects in Mexico City, *Concrete International*, 8, pp. 23–34, 1986.
- [2] Kasai, K., Maison, B.F.: Observation of Structural Pounding Damage from 1989 Loma Prieta Earthquake, *Proceeding Of 6th Canadian Conference of Earthquake Engineering*, Toronto, Canada, pp. 735–742, 1991.
- [3] Anagnostopoulos, S.A.: Earthquake Induced Pounding: State Of The Art, *Proceedings of the 10th European Conference on Earthquake Engineering*, Balkema, Rotterdam, 2, pp. 897–905, 1995.
- [4] Anagnostopoulos, S.A.: Building Pounding Re-Examined: How Serious A Problem Is It?, *Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering*, Acapulco, Mexico, Paper No: 2108, 1996.
- [5] Goldsmith, W.: *Impact: The Theory and Physical Behaviour of Colliding Solids*, Dover Pub, Inc., Edward Arnold, London, England, 1960.
- [6] Stoykovich, M.: Nonlinear Effects in Dynamic Analysis and Design of Nuclear Power Plant Components: Research Status and Needs, *Nuclear Engineering and Design*, 50, pp. 93–114, 1978.
- [7] Maison, B.F., Kasai, K.: Analysis for Type of Structural Pounding, *Journal of Structural Engineering*, 116, pp. 957 – 975, 1990.
- [8] Maison, B.F., Kasai, K.: Dynamics of Pounding When Two Buildings Collide, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 21, pp. 771 – 786, 1992.

- [9] Karayannis, C., Favvata, M.: Earthquake-Induced Interaction between Two Adjacent Reinforced Concrete Structures with Non-Equal Heights, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34, pp. 1-20, 2005.
- [10] Shatoff, H.D., Thompson, R.W., Lee, T.H.: Nonlinear Dynamic Analysis of Prismatic Elements for High-Temperature Gas-Cooled Reactor Cores, *Nuclear Engineering and Design*, 59, pp. 185-195, 1980.
- [11] Anagnostopoulos, A.: Pounding Of Buildings in Series during Earthquakes, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 16, pp. 443-456, 1988.
- [12] Anagnostopoulos, A., Karamaneas, C.: Use of Collision Shear Walls to Minimize Seismic Separation and to Protect Adjacent Buildings from Collapse due to Earthquake-Induced Pounding, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 37, pp. 1371-1388, 2008.
- [13] Lankarani, H.M., Nikraves, P.E.: A Contact Force Model With Hysteresis Damping for Impact Analysis of Multibody Systems, *Journal of Mechanical Design ASME*, 112, pp. 369-376, 1990.
- [14] Muthukumar, M., Desroches, R.: Evaluation of Impact Models for Seismic Pounding, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, Paper No: 235, 2004.
- [15] Muthukumar, M., Desroches, R.: A Hertz Contact Model with Nonlinear Damping for Pounding Simulation, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 35, pp. 811-826, 2006.
- [16] Jankowski, R.: Non-Linear Viscoelastic Modelling of Earthquake-Induced Structural Pounding, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34, pp. 595-611, 2005.
- [17] Jankowski, R.: Earthquake-Induced Pounding Between Equal Height Building with Substantially Different Dynamic Properties, *Engineering Structure*, 30, pp. 2818-2829, 2008.
- [18] Mahmoud, S., Chen, X., Jankowski, R.: Structural Pounding Model with Hertz Spring and Nonlinear Damper, *Applied Sciences*, 8, pp. 1850-1858, 2008.
- [19] Vaseghi-Amiri, J., Jalali, S.G.: Study of Different Contact Elements in Poundings of Steel Buildings, *Journal of Modelling in Engineering*, 9, pp. 1-19, 2011.
- [20] Veletsos, A.S., Newmark, N.M.: Effect Of Inelastic Behaviour on the Response of Simple Systems to Earthquake Motions, *Proceedings of 2th World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo, 2, pp. 895-912 1960.
- [21] Lybas, J., Sozen, M.A.: Effect of Beam Strength Ratio on Dynamic Behaviour of Reinforced Concrete Coupled Walls, Report SRS No. 444, University of Illinois, Urbana Champaign, USA, 1977.
- [22] Park, Y.J., Ang, A.H.S.: Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete, *Journal of Structural Engineering*, 111, pp. 722-739, 1985.
- [23] Roufaiel, M.S.L., Meyer, C.: Analytical modelling of hysteretic behaviour of R/C frames, *Journal of Structural Division*, 113, pp. 429-444, 1987.
- [24] McCabe, S.L., Hall, W.J.: Assessment of Seismic Structural Damage, *Journal of Structural Engineering*, 115, pp. 2166-2183, 1989.
- [25] Fajfar, P.: Equivalent ductility factors, taking into account low-cycle fatigue, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 21, pp. 837-848, 1992.
- [26] Jankowski, R.: Experimental Study on Earthquake-Induced Pounding between Structural Elements Made of Different Building Materials, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Short Communication, DOI: 10.1002/Eqe.941, 2009.
- [27] OpenSees Manual, <http://opensees.berkeley.edu/>, Web page.
- [28] FEMA, Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA 356, Washington, D.C., USA, 2000.
- [29] Reinhorn, A.M., Kunnath, S.K., Valles-Mattox, R.: IDARC 2D Version 4.0: Users Manual, Department Of Civil Engineering, State University of New York At Buffalo, 1996.
- [30] U.S. Geological Survey, <http://www.usgs.gov/>, Web page.
- [31] Standard 2800, Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, Building and Housing Research Center, Tehran, Iran, 2006.
- [32] AISC-ASD, Specification for Structural Steel Buildings: Allowable Stress Design and Plastic Design, USA. 1989.
- [33] ICBO, Uniform Building Code (UBC), International Conference of Building Officials, Whittier, California, USA, 1997.
- [34] Peer Database, http://peer.berkeley.edu/peer_ground_motion_database, Web page.