

P. Mitković, N. Obradović, and Lj. Divac

„Sudaranje objekata visokogradnje tokom dejstva zemljotresa“, in Zbornik radova  
Međunarodnog simpozijuma o istraživanjima i primeni savremenih dostignuća u građevinarstvu  
u oblasti materijala i konstrukcija, Vršac, 18-20. oktobar 2017., pp. 254-265

ISBN:978-86-87615-08-3

# XXVII KONGRES I MEĐUNARODNI SIMPOZIJUM O ISTRAŽIVANJIMA I PRIMENI SAVREMENIH DOSTIGNUĆA U GRAĐEVINARSTVU U OBLASTI MATERIJALA I KONSTRUKCIJA

Predrag Mitković<sup>1</sup>  
Nikola Obradović<sup>2</sup>  
Ljubo Divac<sup>3</sup>

## SUDARANJE OBJEKATA VISOKOGRADNJE TOKOM DEJSTVA ZEMLJOTRESA

*Rezime: Savremeni propisi i praksa u projektovanju objekata visokogradnja ne razmatraju u dovoljnoj meri mogućnost da dođe do sudara međusobno bliskih objekata tokom dejstva zemljotresa. U radu je dat kratak osvrt na dosada zabeležene slučajeve sudaranja objekata i analiza nastale štete. Nakon toga, prikazane su metode analize sudaranja dva bliska objekta. Te metode se mogu podeliti grubo na 2D i 3D analize. Date su pretpostavke sa kojima se ulazi u analizu, matematički opis problema, analitička i numerička rešenja. Date su neke smernice za numeričko modeliranje problema i analizu dobijenih rezultata. Izvršen je pregled seizmičkih propisa i aktuelnih istraživanja vezanih za temu sudaranja objekata. Kao zaključak, date su smernice za moguća dalja istraživanja.*

**Ključne reči:** *Zemljotresno inženjerstvo, aseizmičko projektovanje, numerička analiza, sudaranje zgrada.*

## POUNDING OF BUILDING DURING EARTQUAKES

**Summary:** *Contemporary codes and practice in building design do not take adequately as an option pounding and collision of adjacent buildings during earthquake. A brief overview of historic data related to pounding of building and recorded damage is given. After that, methods for building pounding analyses are presented. Those methods can roughly be divided into two groups, 2D and 3D analyses. For both methods, basic assumptions for analysis, the mathematical description, analytical and numerical solutions are presented. Guidelines for numerical analysis and interpretation of obtained results are given. An overview of seismic codes and current research related to building pounding analysis is given. As conclusion, guidelines for future research are given.*

**Key words:** *Earthquake engineering, seismic building design, numerical analysis, building pounding.*

---

<sup>1</sup> master inženjer građevinarstva, asistent-student doktorskih studija, Fakultet Tehničkih nauka, Kneza Miloša 7, Kosovska Mitrovica, [predrag.mitkovic@pr.ac.rs](mailto:predrag.mitkovic@pr.ac.rs)

<sup>2</sup> master inženjer građevinarstva, asistent-student doktorskih studija, Građevinski fakultet, Bulevar Kralja Aleksandra 73, Beograd, [nobradovic@grf.bg.ac.rs](mailto:nobradovic@grf.bg.ac.rs)

<sup>3</sup> master inženjer građevinarstva, inženjer u Stucky d.o.o., Beograd, [ljubo90@gmail.com](mailto:ljubo90@gmail.com)

## 1. UVOD

Mogućnost da dođe do sudara dva objekta, ili dve međusobno nezavisne konstruktivne celine istog objekta tokom dejstva zemljotresa predstavlja veoma bitan kriterijum prilikom projektovanja novih konstrukcija. Najbolja prevencija sudara susednih objekata je da se obezbede dilatacione razdelnice odgovarajućih dimenzija. Ali često, to nije moguće, pogotovo u gradskim jezgrima. Većina starih objekata, uglavnom napravljenih od opeke, se međusobno dodiruje, ili postoji minimalni zazor između njih. Graditelji tih objekata nisu znali da prave grešku, jer je analiza mogućeg sudara objekata tokom zemljotresa mlada i slabo ispitana oblast zemljotresnog inženjerstva [3]. U poslednjih nekoliko decenija, pojavio se veliki broj radova iz ove oblasti. A uporedo sa napretkom računara, razvijeni su moćni softverski paketi za analizu konstrukcija. Zato je teško naći opravdanje za novoizgrađene objekte koji se dodiruju. Kod tih objekata nisu poštovane odredbe propisa o minimalnom rastojanju. Glavni razlog za to nije neznanje projekatanta, nego želja investitora da se dobije objekat što veće korisne površine, odnosno da se maksimalno iskoristi građevinska parcela. Česta je pojava da se u projektu ispoštuje minimalni razmak između elemenata konstrukcije, ali se nakon izvođenja fasade sa termoizolacijom objekti dodiruju.

Posledice sudara objekata tokom zemljotresa mogu biti drastične, odnosno mogu dovesti do rušenja objekata iako objekti mogu biti projektovani u skladu sa svim propisima.

## 2. ZABELEŽENI SLUČAJEVI

Nakon rušenja stepenišnog tornja bolnice „Olive View Hospital,, u Kaliforniji usled sudara sa glavnom zgradom bolnice za vreme zemljotresa San Fernando 1971. godine počinje razmatranje problema sudara objekata [3]. Stepenišni toranj je izgrađen kao nezavistan objekat dilatiran 10cm od glavne zgrade. Usled sudara, ab stubovi koji su podupirali toranj su otkazali i izazvali preturanje tornja.



Slika 1. Srušen toranj bolnice „Olive View Hospital,, Slika preuzeta od NOAA/NGDC, E.V. Leyendecker, U.S. Geological Survey

Posle zemljotresa u Meksiko Siti, 1985. godine, ova tema postaje sve aktuelnija [1]. Kao posledica tog zemljotresa, došlo je do rušenja velikog broja zgrada. Prema [26],

kod 40% srušenih zgrada zabeleženo je da je došlo do sudara, a kod 15% srušenih zgrada sudar je identifikovan kao glavni uzrok rušenja.



Slika 2. Rušenje celog sprata hotela usled uzastopnih udara zgrade levo tokom zemljotresa u Meksiko Siti. Slika preuzeta od C. Arnold, Building Systems Development, Inc.

Oštećenja objekata nakon zemljotresa u Christchurch-u, na Novom Zelandu, 2011, su detaljno opisana u [28]. Kod 6% od 376 ispitanih zgrada značajna oštećenja su bila izrokovana sudarom, a sudar je identifikovan kao glavni uzrok rušenja dve zgrade. A kod 22% ispitanih zgrada su zabeležena oštećenja koja mogu da budu uzrokovana sudarom.

U radu [8] izvršena je detaljna analiza oštećenih objekata nakon zemljotresa Loma Prieta, 1989. godine u južnoj Kaliforniji. Autori tog rada su zabeležili veliki broj oštećenja uzrokovanih sudaranjem zgrada. Najosetljivije su bile stare zidane zgrade u gradskim jezgrima. Težina oštećenja je varirala od oštećenih fasada do oštećenja koja ugrožavaju nosivost i stabilnost objekta.

Opšti zaključak autora prethodno navedenih radova je da se obavezno uzme u obzir mogućnost međusobnog sudara objekata prilikom projektovanja građevinskih konstrukcija.

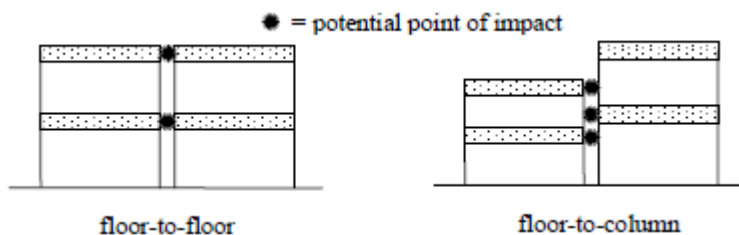
### 3. OPIS PROBLEMA

Do sudara objekata tokom dejstva zemljotresa najčešće dolazi zbog toga što zgrade imaju različite dinamičke karakteristike, nije ispoštovana širina seizmičkih dilatacija i što ne osciluju u istoj fazi [17]. Analiza mogućeg sudara zgrada za vreme zemljotresa je složena i svakako nedovoljno ispitana oblast primenjene mehanike [3]. Problem sudara zgrada je dosta proučavan od velikog broja istraživača [17]. Među prvim radovima iz ove oblasti je [2]. Posmatrano je sudaranje zgrada u nizu usled zemljotresa. U radu [11] je posmatran problem sudaranja dve zgrade različite spratnosti i izvedene su jednačine kretanja zgrada tokom sudara. Brojna eksperimentalne i numeričke analize su date u radovima [6], [7], [12] i [13]. Problem sudaranja seizmički izolovanih zgrada je dat u radovima [9], [21] i [22]. Problem sudara zgrada se može predstaviti kao vibro-udarni problem, odnosno problem ustaljenih prinudnih vibracije dve ili više masa uz povremene sudare [14], [15], [10], [2]. Između masa koje se sudaraju (obično su zgrade posmatrani kao ekvivalentni sistemi sa po jednim stepenom slobode kretanja) su usvajani posebni visko-elastični udarni elementi koji se aktiviraju tek po ostvarivanju kontakta između oscilujućih masa. Pri tome su krutosti ovakvih udarnih elemenata usvajane u

relativno velikom iznosu (znatno većem od krutosti zgrada), čime se simuliraju udarne sile, dok je konstanta viskoznog prigušenja određivana prema proceni disipacije energije tokom sudara, dovodenjem u korelaciju sa koeficijentom restitucije [3]. Koeficijent restitucije predstavlja meru plastičnosti sudara. Ako je sudar potpuno elastičan, onda je vrednost koeficijenta restitucije 1.0, a ako je sudar potpuno plastičan, vrednost koeficijenta restitucije je 0. Koeficijent restitucije se koristi u velikom broju metoda za analizu sudara zgrada [29].

Radovi [18], [19], [20] predstavljaju modernije pristupe na bazi varijacione formulacije kontaktnih problema primenom metode konačnih elemenata. Uslovi ostvarivanja kontakta između zgrada, dakle uslovi sudara zgrada se tretiraju kao veze koje su nametnute diferencijalnim jednačinama kretanja. Vezani problemi u metodi konačnih elemenata se formulišu kao vezani varijacioni problemi i tretiraju se primenom metode Langranžeovih množitelja veza, zatim pomoću tzv. penalty postupka, ili mešovitim pristupom [3].

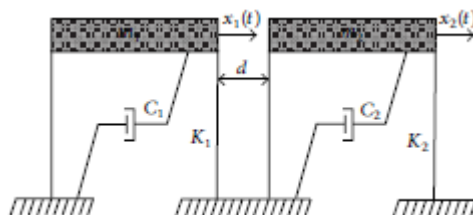
Izbor metode koja se koristi za analizu sudara zgrada zavisi od tipa sudara [29]. Prvi tip sudara zgrada događa se kod zgrada kod kojih su tavanice na istom nivou. Drugi tip se događa kada tavanice nisu na istom nivou. Na slici 3. su prikazana oba tipa sudara. U literaturi je najčešće proučavan prvi tip, dok se mali broj autora bavio drugim tipom sudara.



Slika 3. Tipovi sudara [29]

#### 4. METODE ANALIZE

U dinamici konstrukcija najjednostavniji matematički model predstavlja sistem sa jednim stepenom slobode. U tom modelu, jedna zgrada je predstavljena kao telo sa jednim stepenom slobode, kao što je prikazano na slici 4.



Slika 4. Najjednostavniji model za analizu sudara zgrada [17]  
Jednačine kretanja za sistem na slici glasi [17]:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1(t) \\ \ddot{x}_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 & 0 \\ 0 & C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{imp}(t) \\ -F_{imp}(t) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_g(t) \\ \ddot{x}_g(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

gde su  $x_i(t)$ ,  $\dot{x}_i(t)$ ,  $\ddot{x}_i(t)$ ,  $C_i$ ,  $K_i$  horizontalno pomeranje, brzina, ubrzanje, koeficijent prigušenja i krutost konstrukcije,  $\ddot{x}_g(t)$  ubrzanja tla, a  $F_{imp}(t)$  je sila sudara koja je jednaka nuli kada nije došlo do sudara, a različita od nule kada je došlo do sudara. Uslov sudara je definisan na sledeći način:

$$\delta(t) = x_1(t) - x_2(t) - d \quad (2)$$

Ako je  $\delta(t) \leq 0$ , nije došlo do sudara, a za  $\delta(t) > 0$  je došlo do sudara. U zavisnosti od izabrane metode analize, zavisi kako se određuje sila sudara.

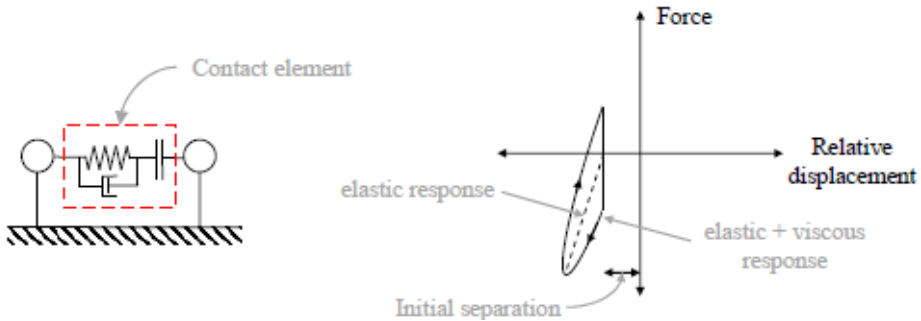
Prethodno je rečeno da metoda analize zavisi od tipa sudara. U nastavku će biti prikazane metode koje se koriste za analizu sudara zgrada kada su tavanice na istom nivou. U radu [30] je dato rešenje problema zasnovano na teoriji sudara iz klasične mehanike. Ako su poznate brzine masa pre sudara, nakon sudara brzine će biti:

$$v'_1 = v_1 - (1+n) \frac{m_2}{m_1 + m_2} (v_1 - v_2) \quad (3)$$

$$v'_2 = v_2 - (1+n) \frac{m_1}{m_1 + m_2} (v_2 - v_1) \quad (4)$$

gde su  $v_1$  i  $v_2$  brzine masa pre sudara, a  $v'_1$  i  $v'_2$  su brzine masa posle sudara, a  $n$  je koeficijent restitucije. Prema [29], mane ove metode su što se prethodne jednačine mogu primeniti samo u trenutku sudara, što ima za posledicu da je nepoznata sila udara, ubrzanje masa i trajanje sudara, što otežava primenu ovog rešenja u analizama vremenskog odgovora konstrukcije.

Druga metoda je metoda kontaktnog elementa. Kontaktni element je specijalna vrsta elementa koji se sastoji od opruge i dampera.



Slika 5 Kontaktni element [29]

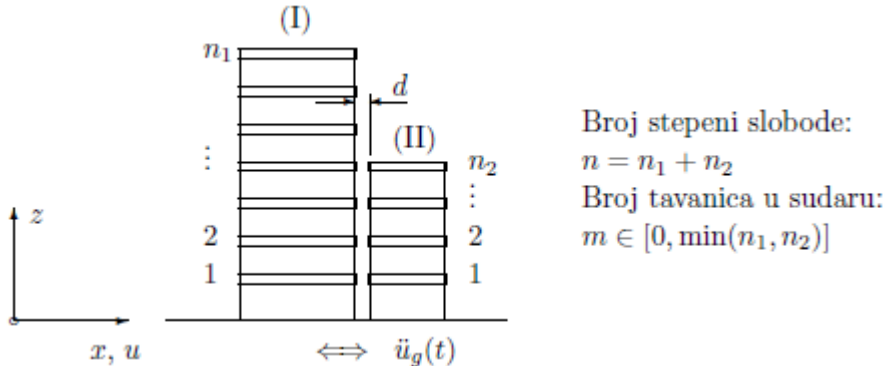
Sila sudara se izražava na sledeći način:

$$F_{imp}(t) = k_s \delta^m(t) + c_{imp}(t) \dot{\delta}(t) \quad (5)$$

gde su  $k_s$  krutost opruge,  $c_{imp}(t)$  koeficijent prigušenja, a  $\delta(t)$  i  $\dot{\delta}(t)$  predstavljaju relativno pomeranje i brzinu. Krutost opruge kontaktnog elementa često ima veliku vrednost i predstavlja lokalnu krutost u tački sudara tokom kratkog trajanja sudara.

Vrednost koeficijenta prigušenja je povezana sa veličinom koeficijenta restitucije. Preporučuje se da se za  $m$  uzme vrednost od 1,0 do 1,5. Prethodni izraz je opšti izraz ako se koriste kontaktni elementi. Dosta autora je dalo predloge kako usvojiti krutost opruge i koeficijent prigušenja kontaktnog elementa. Anagnostopoulos je dao predlog linearnog viskoelastičnog modela [2], Jankowski je dao predlog nelinearnog viskoelastičnog modela [6]. Muthukumar i DesRoches su koristili Hertz-damp-ov model [16].

Prethodne relacije, izvedene za sistem sa jednim stepenom slobode mogu se primeniti i za sisteme sa više stepeni slobode. Posmatraju se dve susedne zgrade simbolički prikazane na slici 6. [3]



Slika 6. Model dve višespratne zgrade iz [3]

Smatra se da je opravdana pretpostavka o dvodimenzionalnom ponašanju obe zgrade. To znači da je raspored masa simetričan i da su vertikalni noseći elementi obe zgrade raspoređeni simetrično u ortogonalnim pravcima, tako da se centri masa i krutosti ne razlikuju bitno u pojedinim etažama. Takođe su usvojene i uobičajene pretpostavke u analizi uticaja horizontalnih sila na zgrade da su tavanice beskonačno krute u svojim ravnima, masa zgrada je koncentrisana na pojedine tavanice i da su vertikalni noseći elementi nosači u ravni. Jednačine kretanja za ovakav sistem glase :

$$\begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_1(t) \\ \ddot{u}_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 & 0 \\ 0 & C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_1(t) \\ \dot{u}_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

gde su  $M_1$  i  $M_2$  dijagonalne matrice masa za oba objekta,  $C_1$  i  $C_2$  su matrice prigušenja,  $K_1$  i  $K_2$  su matrice krutosti za oba objekta, a  $f_1$  i  $f_2$  su seizmičke sile koje deluju na objekte. Načelno, zgrade osciluju međusobno nezavisno. Ako dolazi do sudara tavanica, uslov ostvarivanja sudara između dve tavanice je:

$$u_j^{(I)} - u_j^{(II)} = d \quad (8)$$

gde je sa  $j$  označen broj tavanice. Sudar može da se istovremeno ostvari između više parova tavanica, a najveći broj sudara je jednak broju tavanica niže zgrade. Uslov kontakta se izražava preko:

$$A_m u = d_m \quad (9)$$

gde je  $A$  odgovarajuća pravougaona matrica kontakta reda  $m \times n$ , dok je  $u$  ukupan vektor pomeranja obe zgrade, a  $d_m$  vektor reda  $m$  čiji su elementi jednaki širini dilatacione

razdelnice. Kao posledica sudara, diferencijalne jednačine oscilovanja zgrada nisu više nezavisne, jer postoje nametnute veze date prethodnom relacijom. Sistem jednačina je

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}(t) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}(t) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K & A_m^T \\ A_m^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \lambda_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \\ d_m \end{bmatrix} \quad (10)$$

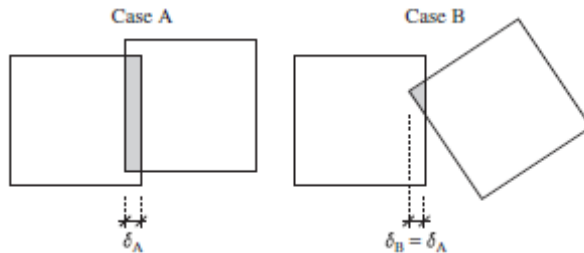
gde je vektor  $\lambda_m$  vektor Langranžeovih multiplikatora veza

$$\lambda_m = \begin{Bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_m \end{Bmatrix} \quad )$$

Langranžeovi multiplikatori predstavljaju unutrašnje udarne sile koje se javljaju između tavanica prilikom sudara. Za rešavanje prethodnih jednačina koriste se numerički postupci.

Za rešavanje dvodimenzionalnih problema se mogu koristiti razni softverski paketi [17]. Posebnu pažnju treba obratiti na način kako se modeliraju kontaktni elementi, odnosno koji model koristiti.

Sve prethodno navedeno važi i za 3D analizu sudara zgrada. Jednačine kretanja su iste, dok najveći problem predstavlja kako formulisati uslov sudara zgrada. Formiranje matematičkog modela sudara i određivanje sile sudara u 3D analizi je sve popularnije među istraživačima [23]. U istom radu je data metodologija za 3D numeričku simulaciju sudara dve bliske zgrade. Poseban osvrt je dat na modeliranje uslova sudara. Kod 2D modela, smatra se da se ne javljaju tangencijalne sile trenja u tački gde je došlo do sudara, dok se u realnim situacijama javljaju tangencijalne sile trenja. Da bi se dobio što tačniji odgovor zgrada tokom dejstva zemljotresa potrebno je uzeti ove dodatne sile.



Slika 7. Različite geometrije sudara zgrada [23]

Veličina sile koja deluje između objekata tokom sudara, zavisi od geometrije sudara, odnosno od osenčene površine (slika 7.). Sila sudara biće veća u slučaju A, nego u slučaju B. Iz toga sledi da krutost kontaktnih elemenata koji se koriste za modeliranje, zavisi od geometrije sudara. Zbog toga se koristi tzv. penalty metode. Prema tim metodama, kontaktne opruge se formiraju tek kada se utvrdi da je došlo do sudara i kada se utvrdi tačna geometrija sudara. Svakako, 3D analiza sudara zgrada je nezamisliva bez upotrebe računarskih programa. U radu [25] je urađena 3D analiza sudara zgrada koja je pokazala da su sile usled sudara najveće na polovini visine zgrada.

Interesantan pristup ovom problem, dat je u radu [4]. Umesto metode konačnih elemenata, kao uobičajenog numeričkog postupka, korišćen je metod primenjenih elemenata (Applied Element Method – AEM), odnosno, računarski program ELS®.



AEM je novi numerički metod, gde se konstrukcija modelira kao skup relativno malih elemenata. Ti elementi su međusobno povezani oprugama. Te opruge mogu da prenesu normalne i smičuće napone između elemenata. Takođe, ova metoda, omogućava primenu naprednih konstitutivnih modela za materijale. U tom radu je izvršena parametarska analiza sudara dve zgrade sa različitim statičkim sistemom, opterećenjima, geometrijom, međusobnim položajem tavanica. Pokazano je da su zgrade sa različitim dinamičkim karakteristikama izuzetno podložne međusobnom sudaranju. Takođe su pokazali, da ako tavanice dva susedna objekta nisu na istom nivou, kao posledica sudara, doći će do velikog povećanja presečnih sila u stubovima. To može da dovede do loma stuba, što dalje vodi do rušenja celog objekta.

## 5. PREGLED PROPISA

U pravilniku o tehničkim normativima za izgradnju objekata visokogradnje u seizmičkim područjima [24], postoji odredba o projektovanju aseizmičkih razdelnica. Ova odredba predviđa projektovanje razdelnica u slučaju da je objekat nepravilan u osnovi ili za objekte sa neujednačenim visinama. Najmanja širina razdelnice iznosi 3.0 cm, a za svaka 3.0 m povećanja visine objekta preko 5 m širina razdelnice se povećava za po 1.0 cm. Za objekte visokogradnje visine preko 15 m kao i za niže fleksibilne konstrukcije, kao što su skeleti bez ukrućenja, širina razdelnica se određuje proračunom, tako da ne sme biti manja od dvostruke vrednosti maksimalnih deformacija susednih segmenata objekata. Sem ovih odredbi, u propisu nisu date nikakve smernice za detaljniji proračun. S obzirom da je ovaj propis donet davno, to nije neobično. U novijim propisima vlada slična situacija.

U Evrokodu 8, deo 1 [5]. u poglavlju 4.4.2.7 su date odredbe vezane za sudaranje između susednih objekata ili konstrukcijski nezavisnih delova istog objekta. Smatra se da neće doći do sudaranja objekata ako je zadovoljeno da za objekte koji ne pripadaju istoj građevinskoj parceli, ako rastojanje između linije razgraničenja parcela do potencijalnih tačaka sudara nije manje od horizontalnog pomeranja zgrade na odgovarajućem nivou. Dok za objekte na istoj parceli, ako rastojanje između njih nije manje od kvadratnog korena od zbira kvadrata (SRSS) od maksimalnih horizontalnih pomeranja dve zgrade ili dve celine na odgovarajućem nivou. Horizontalna pomeranja se računaju prema izrazu:

$$d_s = q_d d_e \quad (12)$$

gde je  $d_s$  pomeranje tačke konstrukcijskog sistema usled projektnog seizmičkog dejstva,  $q_d$  faktor ponašanja za pomeranje, za koji se usvaja da je jednak  $q$  osim ako nije drugačije navedeno, i  $d_e$  pomeranje iste tačke konstrukcijskog sistema koje je određeno prema linearnoj analizi zasnovanoj na projektnom spektru odgovora. Dodatna odredba je da ako su spratne visine zgrada ili nezavisnih celina koje se posmatraju iste, kao i visine susedne zgrade ili nezavisne celine, prethodno navedeno minimalno rastojanje može da bude redukovano sa faktorom 0,7.

Američki propis FEMA( Federal Emergency Management Agency) P-750 donet od strane NEHRP (National Earthquake Hazard Reduction Program) [27], ne daje precizne odredbe za kontrolu mogućnosti sudara zgrada, već samo definiše da objekte treba projektovati tako da razmak između objekata bude dovoljan da ne dođe do sudara objekata pri maksimalnim pomeranjima. Kao i kod EC8, pomeranja treba sračunati kao SRSS kombinaciju horizontalnih pomeranja koja treba da predstavljaju maksimalna

očekivana neelastična pomeranja (uključujući i torziju). Propis dopušta, da ako se dokaže da sudar zgrada neće izazvati opasna oštećenja, razmak između njih može da se smanji. Za konstrukcije sa krutim ab zidovima i krutim dijafragmama, kod kojih se ne mogu dovoljno tačno sračunati horizontalna pomeranja, koriste se minimalna rastojanja iz starijih propisa. U tom slučaju minimalan razmak između objekata treba da bude najmanje 25 mm, uvećan za 13mm za svaka 3 m visine objekta za objekte više od 6 m.

Kao što se može zaključiti, prethodno nabrojani propisi na isti način tretiraju problem sudara objekata. Slična je situacija i sa ostalim seizmičkim propisima [1].

## 6. ZAKLJUČAK

Problem sudaranja zgrada tokom zemljotresa predstavlja izuzetnu temu za istraživače. Iz analizirane literature se može zaključiti da se većina istraživača bavila 2D analizama. Takođe, uglavnom su posmatrane zgrade sa tavanicama na istim nivoima, dok je u praksi češći slučaj da tavanice neće biti na istim nivoima. U novije vreme sve više istraživača se bavi 3D analizom i komplikovanijom geometrijom objekata. Najveći problem predstavlja modeliranje samog sudara, odnosno uslova sudara i određivanje sila koje se tada javljaju. U budućim radovima treba se posvetiti što realnijem opisivanju ponašanja materijala u zoni sudara. Takođe, treba iskoristiti mogućnosti naprednijih numeričkih metoda, kao što je AEM. U prethodnim radovima, nije analiziran uticaj interakcije konstrukcije i tla tokom zemljotresa na proces sudaranja objekata. Autori smatraju da bi u budućim istraživanjima ovo trebalo uzeti u obzir.

## 7. REFERENCE

- [1] Anagnostopoulos, S.A.: Building pounding re-examined: how serious a problem is it, Eleventh world conference on earthquake engineering. Oxford, UK: Pergamon, Elsevier Science, 1996., strana 2108.
- [2] Anagnostopoulos, S.A.: Pounding of buildings in series during earthquakes, Earthquake engineering & structural dynamics, no. 16(3), 1988, str. 443-456.
- [3] Brčić, S.: Dinamika diskretnih sistema: odabrana poglavlja, Studentski kulturni centar, Beograd, 1998.
- [4] Ehab, M, et al.: Earthquake pounding effect on adjacent reinforced concrete buildings, International Journal of Computer Applications, no. 106(9), 2014. str. 27-34.
- [5] EN 1998-1:2004: Proračun seizmički otpornih konstrukcija, deo 1: Opšta pravila, seizmička dejstva i pravila za zgrade, Beograd, 2009.
- [6] Jankowski, R.: Non-linear viscoelastic modelling of earthquake-induced structural pounding, Earthquake engineering & structural dynamics no 34(6), 2005., str. 595-611.
- [7] Jankowski, R.: Theoretical and experimental assessment of parameters for the non-linear viscoelastic model of structural pounding, Journal of Theoretical and Applied Mechanics, no. 45, 2007., str. 931-942.
- [8] Kasai, K., Bruce F.M.: Building pounding damage during the 1989 Loma Prieta earthquake, Engineering structures no. 19(3), 1997., str. 195-207.
- [9] Komodromos, P., et al.: Response of seismically isolated buildings considering poundings, Earthquake Engineering & Structural Dynamics no. 36(12), 2007., str. 1605-1622.

- [10] Liolios, A. A.: Seismic interaction between adjacent structures: A linear complementarity approach for the unilateral elastoplastic-softening contact with friction, Proc. Greek-German Seminar on Struct. Dyn. and Earthquake Engrg. 1988., str. 16-17.
- [11] Maison, B.F., Kazuhiko K.: Dynamics of pounding when two buildings collide, Earthquake engineering & structural dynamics, 21(9), 1992., str. 771-786.
- [12] Mahmoud, S., Jankowski R.: Modified linear viscoelastic model of earthquake-induced structural pounding, Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering 35.C1, 2011., str. 51-62.
- [13] Mahmoud, S., Ayman A., Jankowski, R.: Earthquake-induced pounding between equal height multi-storey buildings considering soil-structure interaction, Bulletin of Earthquake Engineering 11(4), 2013., str. 1021-1048.
- [14] Miller, R.K.: Steady vibroimpact at a seismic joint between adjacent structures, Proc. 7th World Conf. Earthquake Engineering, 1980. str 57-64.
- [15] Miller, R. K., Fatemi, B.: An efficient technique for the approximate analysis of vibro-impact, Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design 105(3), 1983. str. 332-336.
- [16] Muthukumar, S., DesRoches, R.: A Hertz contact model with non-linear damping for pounding simulation, Earthquake engineering & structural dynamics 35(7), 2006. str. 811-828.
- [17] Naderpour, H., et al.: Numerical study on pounding between two adjacent buildings under earthquake excitation, Shock and vibration 2016, 2016. str. 1-8.
- [18] Papadrakakis, M., et al.: A solution method for static and dynamic contact problem of adjacent buildings, Institute of Structural Analysis and Aseismic Research Report, National Technical University, Athens, 1990.
- [19] Papadrakakis, M., Mouzakis, H., Bitzarakis, S.: Dynamic contact between adjacent structures using a formulation with Lagrange multipliers, Structural dynamics 2, 1991. str. 913-920.
- [20] Papadrakakis, M., et al.: A Lagrange multiplier solution method for pounding of buildings during earthquakes, Earthquake engineering & structural dynamics 20(11), 1991., str. 981-998.
- [21] Polycarpou, P.C., Komodromos, P.: Numerical investigation of potential mitigation measures for poundings of seismically isolated buildings, Earthquake and Structures 2(1), 2011. str. 1-24.
- [22] Polycarpou, P.C., Komodromos, P., Polycarpou, A.C.: A nonlinear impact model for simulating the use of rubber shock absorbers for mitigating the effects of structural pounding during earthquakes, Earthquake Engineering & Structural Dynamics 42(1), 2013. str. 81-100.
- [23] Polycarpou, P.C., Papaloizou, L., Komodromos, P.: An efficient methodology for simulating earthquake-induced 3D pounding of buildings, Earthquake Engineering & Structural Dynamics 43(7), 2014. str. 985-1003.
- [24] Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju objekata visokogradnje u seizmičkim područjima, Službeni list SFRJ br 31., 49., 29. 1983.
- [25] Rajaram, C., Ramancharla, P.K.: Three dimensional analysis of pounding between adjacent buildings, Journal of Structural Engineering 41(2), 2014. str.1-11.
- [26] Rosenblueth, E., Meli, R.: The 1985 Mexico Earthquake, Concrete international 8(5), 1986. str. 23-34.
- [27] Building Seismic Safety.: NEHRP recommended seismic provisions for new buildings and other structures (FEMA P-750), Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, 2009.
- [28] Cole, G.L., Dhakal, R.P., Turner, F. M.: Building pounding damage observed in the 2011 Christchurch earthquake, Earthquake Engineering & Structural Dynamics 41(5), 2012. str. 893-913.

- [29] Cole, G., et al.: Building pounding state of the art: Identifying structures vulnerable to pounding damage, 2010. NZSEE Conference Proceedings, 2010. str.11-18.
- [30] Conoscente, J. P., Hamburger, R. O., Johnson, J. J.: Dynamic analysis of impacting structural systems, Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering, 1992. str 3899-3903.