

Primljen / Received: 12.10.2022.

Ispravljen / Corrected: 2.4.2023.

Prihvaćen / Accepted: 11.4.2023.

Dostupno online / Available online: 10.7.2023.

Procjena oštećenja i analiza vjerojatnosti oštećenja i oštetljivosti armiranobetonske zgrade

Autori:

Prof. emer. dr. sc. **Radomir Folić**, dipl. ing. građ.

Sveučilište u Novom Sadu, Srbija

Fakultet tehničkih znanosti

boris.r.folic@gmail.com

Autor za korespondenciju

Dr. sc. **Miloš Čokić**, dipl. ing. građ.

Termoenergo Inženjering, Srbija

cokicmilos@gmail.comDr. sc. **Boris Folić**, dipl. ing. građ.

Sveučilište u Beogradu, Srbija

Strojarski fakultet

Inovacijski centar

boris.folic@gmail.comIzv. prof. dr. sc. **Zoran Brujić**, dipl. ing. građ.

Sveučilište u Novom Sadu, Srbija

Fakultet tehničkih znanosti

zbrujic@uns.ac.rs

Pregledni rad

Radomir Folić, Miloš Čokić, Boris Folić, Zoran Brujić

Procjena oštećenja i analiza vjerojatnosti oštećenja i oštetljivosti armiranobetonske zgrade

Osim sažetoga pregleda literature, rad sadrži komparativnu analizu armiranobetonskih (AB) zgrada pomoću analize indeksa oštećenja (DI) primjenom različitih metodologija. Seizmički odziv peterokatne okvirne AB zgrade, projektirane u skladu s konstrukcijskim normama Eurokod, analiziran je procjenom vjerojatnosti oštećenja i oštetljivosti. U analizi kojoj je cilj određivanje DI-ja i njegovih parametara primijenjena je metodologija Park–Ang. Provedene su nelinearna statička analiza (NSA) i nelinearna dinamička analiza (NDA) te su na temelju dobivenih rezultata oblikovane krivulje vjerojatnosti oštećenja i oštetljivosti koje su obrađene statističkom analizom. Rezultati su izračunani pomoću četiri različita modela DI-ja: model DIPA primjenom rezultata NSA i NDA (M1), modificirani model DIPA primjenom rezultata NSA i NDA (M2), model DIPA primjenom rezultata NSA (M3), te modificirani model DIPA primjenom rezultata NSA (M4).

Ključne riječi:

okvirna AB zgrada, seizmička nelinearna analiza, procjena indeksa oštećenja, vjerojatnost oštećenja, oštetljivost

Subject review

Radomir Folić, Miloš Čokić, Boris Folić, Zoran Brujić

Damage assessment, fragility, and vulnerability analysis of reinforced concrete building

In addition to a concise literature review, this study presents a comparative analysis of reinforced concrete (RC) buildings through damage index (DI) analysis using different methodologies. The seismic response of a five-story RC frame system building, designed in accordance with the EN structural Eurocodes, was analysed through fragility and vulnerability assessments. The Park–Ang methodology was used in the analysis for determining DI and its parameters. Nonlinear static analysis (NSA) and nonlinear dynamic analyses (NDA) were performed, and the fragility and vulnerability curves were constructed using the obtained results and processed through statistical analysis. The results were calculated using four different DI models: the DIPA model using both the NSA and NDA results (M1), modified DIPA model using both the NSA and NDA results (M2), DIPA model using the NSA results (M3), and modified DIPA model using the NSA results (M4).

Key words:

RC framed building, seismic nonlinear analyses, damage index assessment, fragility, vulnerability

1. Uvod

Tijekom snažnih potresa odziv armiranobetonskih (AB) konstrukcija može izazvati različite vrste oštećenja. Stoga suvremena koncepcija projektiranja seizmički otpornih konstrukcija zahtijeva nelinearnu analizu, a razvijene su metode projektiranja utemeljene na ponašanju kako bi se u obzir uzela oštećenja i slom. Mogu se pojaviti različite razine gubitaka ovisno o stupnju oštećenja konstrukcije. Zbog toga je ključno ublažiti potresom izazvanu štetu na konstrukcijama i minimizirati gubitak života i imovine.

Literatura navedena u ovome radu odnosi se na oštećenja AB konstrukcija, uključujući okvire otporne na savijanje (engl. *Moment Resisting Frames - MRF*). Nekoliko se istraživanja odnosilo na razvoj projektiranja utemeljenoga na ponašanju i na procjenu seizmičkoga ponašanja AB konstrukcija, a pitanja njihove vjerojatnosti oštećenja (engl. *fragility*) i oštetljivosti (engl. *vulnerability*) opširnije su analizirana.

Pouzdanost na potresno djelovanje i procjene rizika na temelju analize vjerojatnosti oštećenja prikazane su u [1], dok su smjernice za analizu vjerojatnosti oštećenja, oštetljivosti i rizika konstrukcija prikazane u [2]. Smjernice za analitičku procjenu oštetljivosti za niske zgrade i zgrade srednje visine navedene su u [3]. Opširnija analiza procjene seizmičke vjerojatnosti oštećenja predmet je rada [4], a metode analitičkoga određivanja vjerojatnosti oštećenja za procjenu seizmičkoga rizika prikazane su u radu [5]. Primjena metode postupnoga guranja (engl. *pushover method*) za seizmičko projektiranje konstrukcija i ocjenu postojećih konstrukcija opisana je u [6].

U radu [7] ocjenjuju se indeksi seizmičkih oštećenja za AB zgrade i povezani pojmovi i postupci, dok je pregled procjene oštećenja te vrste građevina prikazan u [8]. Odnos između indeksa oštećenja i mjera oštećenja analiziran je u [9], a odnos između indeksa oštećenja i intenziteta seizmičkoga gibanja tla tijekom potresa na Tajvanu 1999. godine razmotren je u [10]. Opće smjernice vezane uz karakteristične izraze za indekse oštećenja AB konstrukcije prikazane su u [11], a studija korelacije između parametara seizmičkoga ubrzanja i indeksa oštećenja konstrukcija prikazana je u [12]. Nelinearna statička analiza primijenjena je za procjenu seizmičkoga oštećenja AB konstrukcija u radu [13], a u [14] je težište bilo na postupku seizmičke procjene MRF-a utemeljenom na ponašanju. Jedna je od prvih knjiga koja pokriva seizmičko projektiranje AB konstrukcija [15], a [16, 17] pružaju detaljnije informacije o građevinskim AB konstrukcijama. Knjiga [18], koja pokriva i oštećenja i naknadnu obnovu mostova, jedna je od najcitiranijih knjiga na tu temu. U tom smislu, usvajanje dokumenata Savezne agencije za upravljanje kriznim situacijama (engl. *Federal Emergency Management Agency - FEMA*) opsežno je proučavano, s posebnom pažnjom posvećenom FEMA 356 [19] i ASCE [20]. Na razvoj seizmičkoga inženjerstva utemeljenoga na ponašanju značajno je utjecalo objavljivanje rada [21]. O opširnijoj analizi seizmičkoga proračuna utemeljenoga na ponašanju raspravljano je u [22, 23]. Istraživanje [24] bilo je usmjereno na seizmičko

ponašanje i procjenu AB okvira. Metodologija procjene gubitaka od potresa (engl. *earthquake loss estimation methodology*), koju je predložila FEMA i koja je prikazana u [25], primjenjuje se u cijelome svijetu. U Europi najčešće primjenjivana metodologija za procjenu gubitaka od potresa prikazana je u [26]. Metodologija sljedeće generacije procjene seizmičkoga ponašanja postojećih zgrada, uključujući troškove popravka i vrijeme popravka, razmatra se u [27]. Krivulje vjerojatnosti oštećenja (FC) primjenjuju se za procjenu oštećenja konstrukcijskih sustava, kao što je objašnjeno u [28], a procjena oštetljivosti okvirnih AB konstrukcija koja uzima u obzir njihove značajke je razmatrana u [29]. Procjena oštetljivosti i rizika AB konstrukcija analizirana je u [30]. Dokumenti EN za konstrukcije [31–36] primjenjuju se za projektiranje seizmički otpornih konstrukcija. Seizmička procjena AB MRF-a utemeljena na ponašanju prikazana je u [37], a u [38] se razmatra učinkovito analitičko usklađivanje funkcije vjerojatnosti oštećenja primjenom dinamičke analize.

U nelinearnim analizama AB konstrukcija obično se primjenjuje teorijski model naprezanja i deformacija koji su razvili Mander, Priestley i Park za ovijeni beton [39]. Taj model omogućuje uvođenje različitih odnosa naprezanja i deformacija neukrućenih i ukrućenih dijelova u poprečnim presjecima i elementima konstrukcije. Statistička analiza i procjena vrste razdiobe podataka opisani su u [30]. Korelacija konstrukcijskih seizmičkih oštećenja s osnovnim periodom vibracija AB zgrada, koja se često primjenjuje u seizmičkim analizama, analizirana je u [41]. Drugo se istraživanje [42] usredotočilo na metodu procjene konstrukcijskih seizmičkih oštećenja na temelju dinamičkih značajki konstrukcija, dok je procjena seizmičkoga ponašanja AB okvira na temelju oštećenja opisana u [43]. Učinci degradacije na seizmička oštećenja AB zgrada razmatrani su u [44]. Metodologija za primjenu spektra oštećenja kao mjere seizmičkoga intenziteta u istraživanju MRF-a tzv. *Endurance Time* metodom prikazana je u [45]. Kapacitet oštećenja AB konstrukcija primjenom analize utemeljene na ponašanju bio je predmet rada [46]. O procjeni ponašanja i ocjeni oštećenja zgrada izloženih seizmičkom opterećenju raspravljalo se u [47]. U [48] prikazan je razvoj ploha seizmičke vjerojatnosti oštećenja za AB zgrade pomoću nelinearne analize primjenom vremenskih zapisa, što može biti korisno u komparativnoj analizi rezultata dobivenih različitim metodama nelinearne analize.

Pregled procjena potresne oštetljivosti AB konstrukcija prikazan je u [49], a [50] se usredotočuje na predlaganje, usporedbu i raspravu o metodologijama za indekse procjene potresne oštetljivosti za zgrade u graničnim stanjima sloma. U [51] analizirani su rezultati komparativnoga istraživanja metoda procjene potresne oštetljivosti zgrada. U radu [52] raspravlja se o procjeni potresne oštetljivosti okvirnih AB zgrada, dok je oštetljivost zgrada u Australiji opisana u [53]. U [54] ocijenjena je metoda N2 za procjenu oštećenja sistema s više stupnjeva slobode u seizmičkim uvjetima. Glavni konstrukcijski sistemi koji se primjenjuju u Kini i Europi analizirani su u [55]. O procjeni šteta nakon potresa za AB zgrade na temelju preostale seizmičke otpornosti raspravlja se u radu [56], a rad [57] ocjenjuje metode

analitičkoga određivanja vjerojatnosti oštećenja i modele oštećenja i gubitaka za AB zgrade. U radu [58], projekt ATC-58-2 sažeto je prikazao razvoj kriterija proračuna nove generacije utemeljenih na ponašanju koji se odnose na nove i postojeće zgrade. Procjena potresne oštetljivosti postojećih AB zgrada razmatrana je u [59]. Oštetivost i vjerojatnost oštećenja okvirne AB konstrukcije analizirani su primjenom nelinearne analize uz uporabu vremenskih zapisa u [60]. U [61] se raspravljalo o procjeni seizmičkoga rizika zgrada, a [62] predlaže mehanički model seizmičkoga oštećenja za AB primjenom izraza za procjenu indeksa oštećenja (engl. *damage index* - DI) kao linearne kombinacije plastične deformacije i raspodjele energije. U [63] postignut je napredak u DI izravnim modificiranjem modela Park–Ang uklanjanjem nedostataka povezanih s fizičkim značenjem DI-ja. U analizi seizmičkoga odziva zgrade u ovome su radu primijenjene baze podataka [64, 65], a metodologija predložena u [66] primijenjena je za odabir i skaliranje (engl. *scaling*) [67, 68]. Procjena DI-ja Park–Anga za razine ponašanja AB MRF-a prikazana je u [69], dok je procjena seizmičkoga oštećenja AB konstrukcija primjenom nelinearne statičke analize razmatrana u [70]. Istraživanje [71] analiziralo je procjenu seizmičke vjerojatnosti oštećenja za visoke AB zgrade u južnoj euro-mediteranskoj zoni, a u [72] primijenjen je seizmički indeks oštećenja za klasifikaciju oštećenja konstrukcija. O modifikaciji DI-ja Park–Anga radi uključivanja učinaka naknadnih potresa na AB konstrukcije opširnije se raspravljalo u [73], dok je procjena DI-ja Park–Anga za višeetažne ravninske okvire pomoću ekvivalentnih sistema s jednim stupnjem slobode analizirana u [74]. U [75] proučavani su učinci obrazaca seizmičkoga opterećenja na visinsku raspodjelu pomaka, a u [76] prikazani su rezultati komparativne procjene seizmičkoga rizika postojećih AB zgrada. Rezultati opširnije analize krivulja vjerojatnosti oštećenja postojećih AB zgrada utemeljene na specifičnim razinama ponašanja konstrukcije prikazani su u [77].

Metodologija za razvoj indeksa potresne oštetljivosti za AB zgrade na temelju nelinearne parametarske analize bila je predmet rada [78], dok je procjena krivulja oštetljivosti za AB konstrukcije metodom indeksa oštetljivosti prikazana u [79]. U radu [80] dan je pregled metodologija procjene potresne oštetljivosti, dok se [81] usredotočuje na razvoj jedinstvenoga okvira za potresnu oštetljivost AB zgrada. Naposljetku, u [82] je istražena procjena ponašanja AB konstrukcije okvir-zid primjenom analize vjerojatnosti oštećenja, što je izvan dosega konstrukcijskih sistema o kojima se raspravlja u ovome radu te traži daljnje istraživanje.

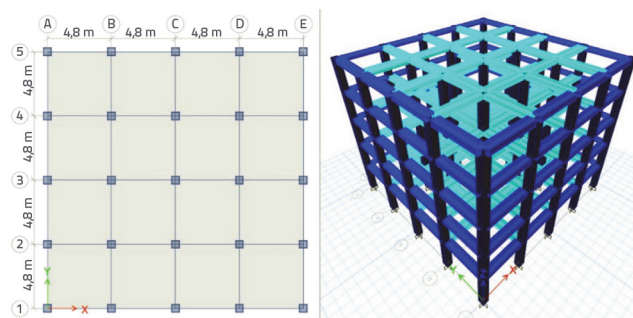
Cilj je ovoga istraživanja analizirati seizmički odziv AB zgrade primjenom metoda nelinearne statičke analize (NSA) i nelinearne dinamičke analize (NDA). Svrha je ovoga istraživanja bila odrediti DI pomoću parametara dobivenih primjenom NSA i NDA uporabom programskoga paketa [83]. Dobivene vrijednosti DI-ja uspoređene su procjenom vjerojatnosti oštećenja i oštetljivosti, a funkcije su izračunane za svako stanje oštećenja. Za dobivanje krivulja vjerojatnosti oštećenja i oštetljivosti primijenjene su dvije metode. U prvoj su metodi

krivulje usklađene na temelju vjerojatnosti prekoračenja (PoE) stanja oštećenja. U drugoj su metodi krivulje izračunane linearnom regresijskom analizom. Uspoređeni su rezultati dobiveni tim dvjema metodama. Težište je ovoga istraživanja utvrditi pouzdanost rezultata dobivenih pomoću četiri različita modela DI-ja: model Park–Ang koji primjenjuje rezultate NSA i NDA (M1), modificirani model Park–Ang koji primjenjuje rezultate NSA i NDA (M2), model Park–Ang koji primjenjuje rezultate NSA (M3), i modificirani model Park–Ang DI koji primjenjuje rezultate NSA (M4). Jedan je od ciljeva bio dobiti vrijednosti DI-ja, vjerojatnosti oštećenja i oštetljivosti primjenom samo parametara NSA te ih usporediti s rezultatima dobivenim primjenom metoda NDA i NSA. Taj pristup pojednostavnjuje postupak proračuna i smanjuje vrijeme potrebno za određivanje DI-ja i procjenu vjerojatnosti oštećenja i oštetljivosti. Istraživanje je provedeno na jednom konstrukcijskom modelu okvirne AB zgrade, a rezultate pristupa treba istražiti na različitim konstrukcijskim modelima.

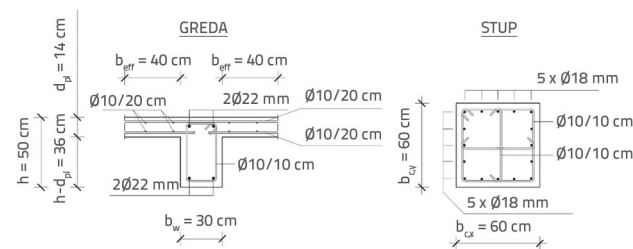
2. Konstrukcijsko modeliranje i analiza

2.1. Geometrijske i materijalne značajke

Predmet analize bio je okvirni konstrukcijski sustav poslovno-stambene zgrade s pet etaža (prizemlje + četiri kata), kako je prikazano na slici 1. Duljine su pojedinačnih raspona u oba smjera 4,8 m, što čini ukupne duljine zgrade 19,2 m u oba smjera; visina je prvoga kata 3,6 m, a visine su ostalih katova 3,2 m, što čini ukupnu visinu zgrade 16,4 m. Svi vertikalni elementi prizemlja upeti su na najdonjoj razini konstrukcije. Model zgrade, koji je detaljno opisan u [60], izračunan je pomoću programa ETABS [83]. Svojstva poprečnih presjeka prikazana su na slici 2.



Slika 1. Tlocrt zgrade (lijevo); numerički model (desno), prema [60]



Slika 2. Geometrijska svojstva i armatura, prema [60]

2.2. Opterećenja i djelovanja te modalna analiza

Opterećenja koja djeluju na konstrukciju uključuju stalna opterećenja (G), promjenjiva pokretna opterećenja (Q), i seizmičko opterećenje (S). Uzeto je da je vrijednost stalnoga trajnog opterećenja $g_{pl} = 3,0 \text{ kN/m}^2$ i da je intenzitet promjenljivoga pokretnog opterećenja $q = 2,0 \text{ kN/m}^2$ na svim katovima osim na krovu, gdje iznosi $q_R = 1,0 \text{ kN/m}^2$. Opterećenje od vlastite težine fasadnih elemenata jednako je $g_f = 10,0 \text{ kN/m}$. Za proračun utjecaja potresa na konstrukciju primijenjen je elastični spektralni odziva, tip 1, za tlo tipa C, s PGA od $a_g = 0,2 \cdot g$ [60].

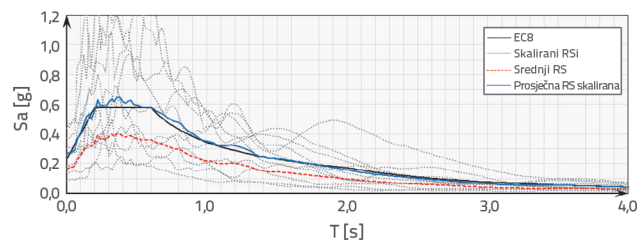
Provedena je modalna analiza kako bi se odredili osnovni periodi vibracija sistema i njegovih vlastitih oblika. Utvrđeno je da je sistem torzijski krut i da su dominantni translacijski svojstveni oblici. U NDA je primijenjeno Rayleighovo viskozno (masa-tangencijalna krutost) proporcionalno prigušenje [60]. Opterećenja i djelovanja na konstrukciju te modalna analiza opisani su u [60]. Temeljni period T_1 bio je 0,735 s (80,41 % mase), dok je T_2 bio 0,213 s (92,69 % mase u zbroju).

2.3. Opterećenja i djelovanja te modalna analiza

Za izvođenje jednosmjerne NDA upotrijebljeno je deset akcelorograma (slika 3. i tablica 1.).

Ti zapisi odgovaraju tipu tla C [31]. Glavni je kriterij za odabir zapisa potresa bio da srednja vrijednost odabranih i skaliranih zapisa treba odgovarati elastičnom spektru odziva EN1998-1 [31] primijenjenom u analizi. Podaci THA (engl. *Time History Analysis*- THA) skalirani su pomoću zajedničkog faktora skaliranja $F_s = 1,61$, što je dobiveno metodom najmanjih kvadrata. Skalirani

akcelorogrami primjenjuju se za NDA, s povećanjem $\Delta\text{PGA} = 0,1 \text{ g}$, u rasponu ukupnoga faktora skaliranja od 0,1–1,0 g. Cijeli je postupak detaljno opisan u [60].



Slika 3. Spektri odziva i podaci TH (engl. *Time History* - TH), prema [60]

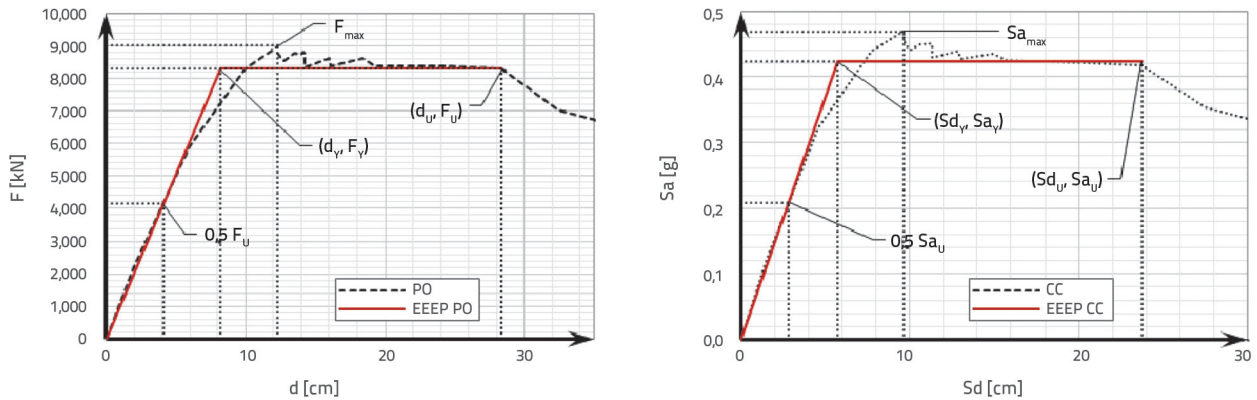
2.4. Model za nelinearnu analizu

U modelima za postelastičnu analizu primijenjene se sljedeće pretpostavke i pojednostavnjenja [60]:

- proračun uključuje učinke logike drugoga reda (P - Δ)
- kako bi se opisalo nelinearno ponašanje materijala, njegova se nelinearna svojstva primjenjuju za opisivanje ponašanja betona [35, 39] i čelika za armiranje [36, 39]
- ponašanje armiranoga betona opisano je histerezijskim modelom Takede, dok je za armaturu primijenjen kinematički model histereze
- stupovi i grede modelirani su kao ovijeni AB elementi sa zaštitnim slojem betona
- grede su modelirane kao "L" i "T" presjeci, s efektivnom širinom AB ploče
- AB ploče modelirane su kao krute dijafragme.

Tablica 1. Podaci o potresima upotrijebljeni u NDA

ID br.	Mjesto potresa	ID potresa (Komponenta/orijentacija)	ID/kod stanice	Datum/Vrijeme	M_w	Izvorni PHA [cm/s ²]
EQ01	Spitak, Armenija	213 (Y)	173	07.12.1988. 07:41:24	6,7	179,580
EQ02	Manjil, Zapadni Iran	230 (Y)	189	20.6.1990. 21:00:08	7,4	87,045
EQ03	Umbria Marche, središnja Italija	286 (Y)	221	26.9.1997. 09:40:30	6,0	218,340
EQ04	Umbria Marche, središnja Italija	286 (Y)	224	26.9.1997. 09:40:30	6,0	106,660
EQ05	Alkion, Grčka	559 (X)	214	15.6.1995. 00:15:51	6,5	55,501
EQ06	Düzce, Turska	497 (Y)	3139	12.11.1999. 16:57:20	7,2	112,320
EQ07	Umbria, središnja Italija	EMSC-20161030_0000029 (N-S)	CNE	30.10.2016. 06:40:18	6,5	288,280
EQ08	Emilia-Romagna, Italija	IT-2012-0011 (N-S)	MOG0	29.5.2012. 07:00:02	6,0	167,075
EQ09	Adana, Turska	TK-1998-0063 (E-W)	0105	27.6.1998. 13:55:53	6,2	271,955
EQ10	Emilia-Romagna, Italija	IT-2012-0011 (N-S)	MIR08	29.5.2012. 07:00:02	6,0	242,970



Slika 4. Krivulja kapaciteta (lijevo) i krivulja postupnoga guranja (desno) bilinearne aproksimacije, prema [60]

3. Rezultati nelinearne analize

3.1. Nelinearna statička analiza

Određivanje popuštanja $(d_v, F_v) = (8, 19 \text{ cm}, 8283, 23 \text{ kN})$, krajnjega kapaciteta $(d_u, F_u) = (28, 39 \text{ cm}, 8283, 23 \text{ kN})$, spektralnoga popuštanja $(S_{d_v}, S_{a_v}) = (5, 72 \text{ cm}, 0, 423 \text{ g})$ i spektralnoga krajnjega kapaciteta $(S_{d_u}, S_{a_u}) = (21, 42 \text{ cm}, 0, 423 \text{ g})$ provedeno je pomoću metode EEEP, kao što je detaljno opisano u [60].

3.2. Točke ponašanja stanja oštećenja

Točke ponašanja stanja oštećenja određuju se na isti način kao u [60], pomoću točaka ponašanja praga, primjenom DI-ja kao referentnoga parametra. Za izračunavanje krivulje vjerojatnosti oštećenja primijenjene su metode opisane u [26, 62, 71, 74]. Za izračunavanje vrijednosti DI-ja primijenjena su četiri modela utemeljena na dvije metode proračuna i dvije metode analize:

- Model 1 (M1): DI je izračunan metodom koju su predložili Park i Ang [62], primijenjene u [71]; izračunava se na temelju rezultata NSA i NDA postupnim guranjem:

$$DI_{M1} = DI_{PA}^{NDA} = \frac{D_{\max}^{NDA}}{D_u^{NSA}} + \beta \cdot \frac{1}{F_y^{NSA} \cdot D_u} \cdot E_H^{NDA} \quad (1)$$

(ako $F_u < F_y$, F_y je zamijenjen F_u)

- Model 2 (M2): DI je izračunan modificiranom metodom Parka i Anga [62] opisane u [74], a vrijednosti su dobivene iz rezultata NSA i NDA postupnim guranjem. Taj model uključuje vrijednost pomaka pri popuštanju u dijelu jednadžbe i faktor popuštanja u odnosu između maksimalnoga pomaka krova d_{\max} i konačnoga pomaka krova konstrukcije, koji su izračunani pomoću NSA:

$$DI_{M2} = DI_{MOD}^{NDA} = \frac{D_{\max}^{NDA} - D_y^{NDA}}{D_u^{NSA} - D_y^{NSA}} + \beta \cdot \frac{1}{F_y^{NSA} \cdot D_u} \cdot E_H^{NDA} \quad (2)$$

(ako $F_u < F_y$, F_y je zamijenjen F_u)

- Model 3 (M3): DI je izračunan metodom koju su predložili Park i Ang [62, 71]; izračunava se samo na temelju rezultata NSA postupnim guranjem:

$$DI_{M3} = DI_{PA}^{NSA} = \frac{d_p^{NSA}}{d_u^{NSA}} + \beta \cdot \frac{1}{a_y^{NSA} \cdot d_u} \cdot E_H^{NSA} \quad (3)$$

(ako $F_u < F_y$, F_y je zamijenjen F_u)

- Model 4 (M4): DI je izračunan modificiranom metodom Parka i Anga [62] predloženom u [26, 74]; izračunava se samo na temelju rezultata NSA. Taj model uključuje vrijednost pomaka pri popuštanju u dijelu jednadžbe i faktor popuštanja u odnosu između maksimalnoga pomaka krova d_{\max} i konačnoga pomaka krova konstrukcije, koji su izračunani pomoću NSA:

$$DI_{M4} = DI_{MOD}^{NSA} = \frac{d_p^{NSA} - d_y^{NSA}}{d_u^{NSA} - d_y^{NSA}} + \beta \cdot \frac{1}{a_y^{NSA} \cdot d_u} \cdot E_H^{NSA} \quad (4)$$

(ako $F_u < F_y$, F_y je zamijenjen F_u)

pri čemu je $\beta = 0,15$ za AB konstrukcije [63], a D_{\max}^{NDA} je najveći pomak krova pod potresom, dobiven primjenom NDA, na temelju podataka THA; D_p^{NDA} je ciljni spektralni pomak krova pod istim potresom, ali dobiven primjenom odgovarajućih spektara odziva u NSA. D_u^{NSA} je krajnji pomak krova na bilinearnoj krivulji postupnoga guranja, a d_u^{NSA} krajnji pomak krova na odgovarajućoj bilineariziranoj krivulji kapaciteta; obje vrijednosti određene su pomoću NSA.

F_y^{NSA} je sila popuštanja na bilineariziranoj krivulji postupnog guranja, a a_y^{NSA} vrijednost spektralnoga ubrzanja pri popuštanju na odgovarajućoj bilineariziranoj krivulji kapaciteta. Obje su vrijednosti određene pomoću NSA; D_y^{NDA} je prvi pomak pri popuštanju kada E_y dosegne vrijednost različitu od nule, dobivenu pomoću NDA; d_y^{NSA} je pomak vrha pri popuštanju na bilineariziranoj krivulji kapaciteta dobivenoj pomoću NSA. D_y^{NDA} ima različitu vrijednost za svaki skup podataka TH i svaku mjeru intenziteta (IM, pri čemu je IM = PGA); vrijednost d_y^{NSA} se određuje na bilineariziranoj krivulji kapaciteta i ima konstantnu vrijednost.

E_H^{NDA} je histerezna energija apsorbirana tijekom seizmičkoga djelovanja, a dobiva se pomoću NDA i primjenjuje u M1 i M2.

$$E_H^{NDA} = \int_{E(t=0)}^{E(t=n)} dE \geq 0 \tag{5}$$

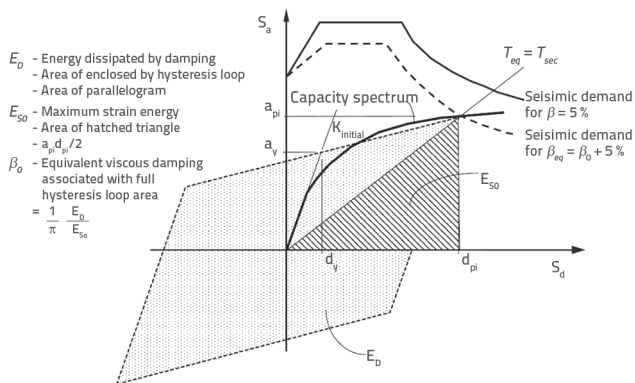
s rubnim uvjetima od $t = 0$ do $t = n$, prema [60].

E_H^{NSA} je histerezna energija utrošena prigušenjem, koja je dobivena pomoću NSA, izračunana prema [84] i primijenjena u M3 i M4.

$$E_H^{NSA} = 4 \cdot (a_y^{NSA} \cdot d_p^{NSA} - a_p^{NSA} \cdot d_y^{NSA}) \tag{6}$$

Određuje se na način prikazan na slici 5, a ima različite vrijednosti za svaki skup podataka TH i IM.

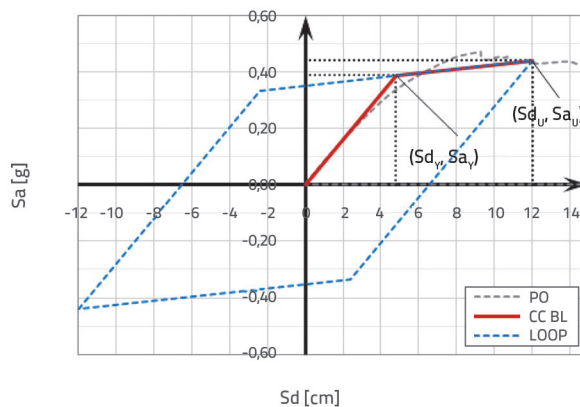
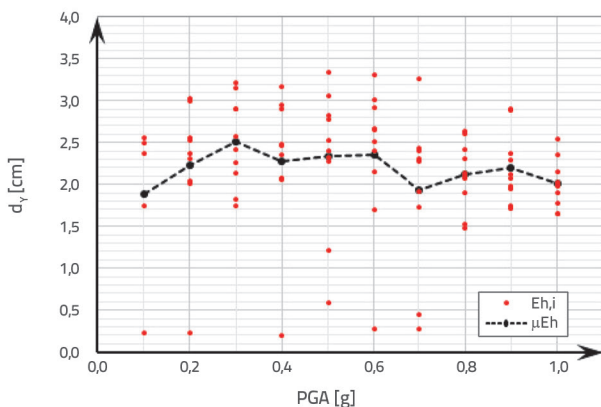
Vrijednosti pomaka pri popuštanju (d_p), kao što je prikazano na slici 6. (lijevo), primijenjene su u procjeni DI-ja na temelju rezultata NDA. Shema na slici 6. (desno) prikazuje postupak izračunavanja histerezne energije za postupak NSA i izračunavanje DI-ja na temelju rezultata.



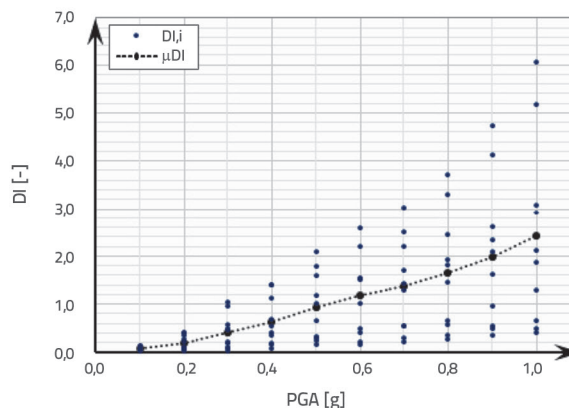
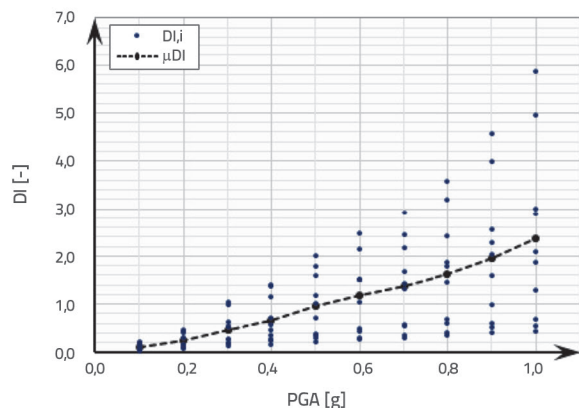
Slika 5. Izvođenje histerezne energije E_H^{NSA} , prema [19]

Vrijednosti DI-ja za sva četiri modela proračuna prikazane su na slikama 7. i 8. Te su vrijednosti primijenjene za daljnju procjenu funkcija vjerojatnosti oštećenja i oštetljivosti.

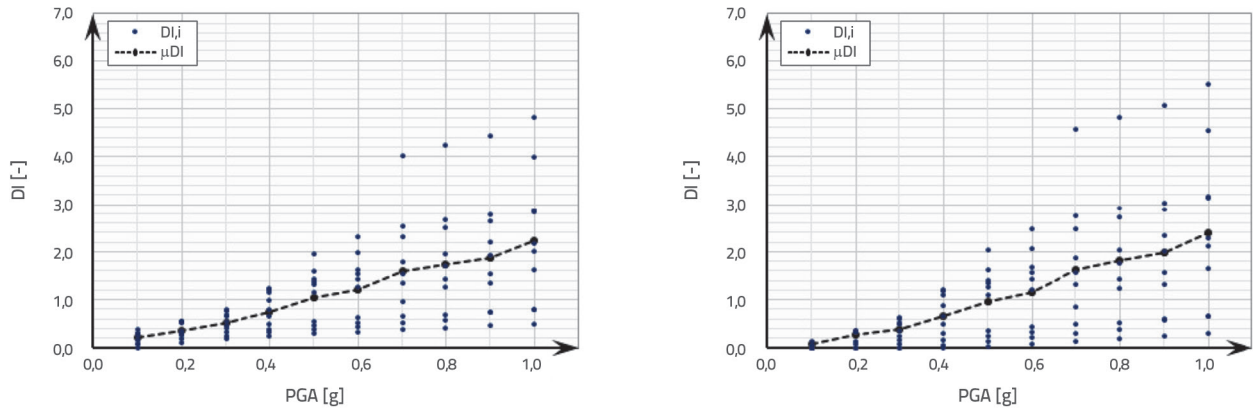
Vrijednosti DI-ja za sva četiri proračunska modela prikazane su na slici 9. Te su vrijednosti primijenjene za daljnju procjenu funkcija vjerojatnosti oštećenja i oštetljivosti.



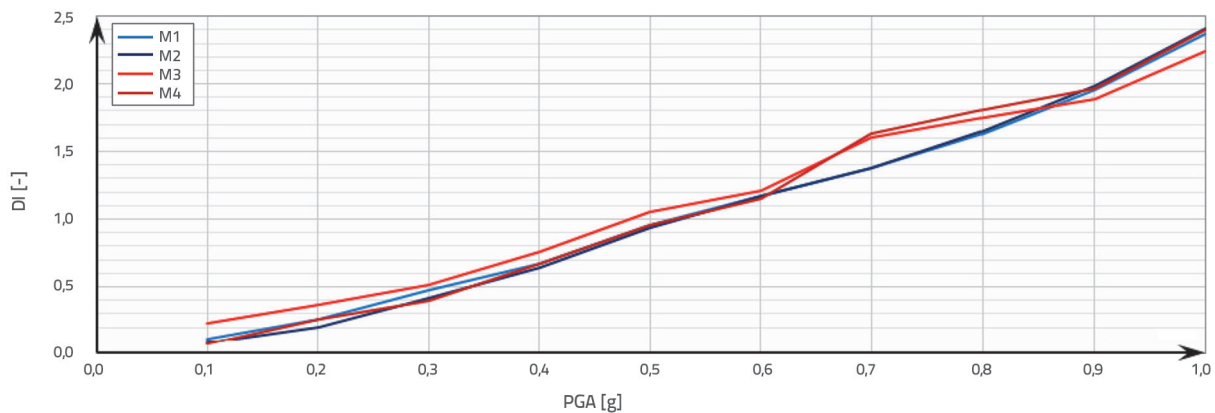
Slika 6. Prve vrijednosti pomaka pri popuštanju dobivene pomoću NDA (lijevo) i metoda izračunavanja apsorbirane histerezne energije iz rezultata postupnoga guranja dobivenih pomoću NSA (desno), prema [60]



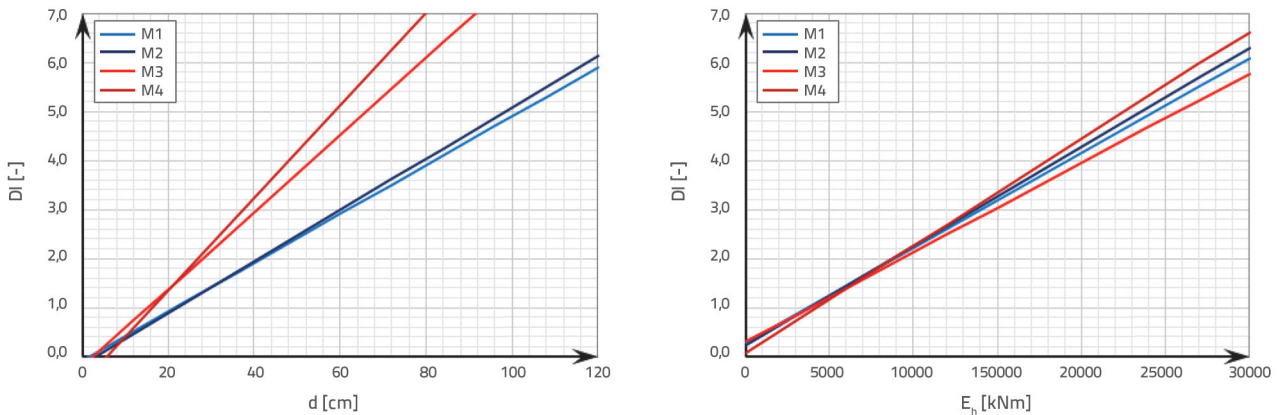
Slika 7. Vrijednosti indeksa oštećenja (DI) za M1 (lijevo) i M2 (desno)



Slika 8. Vrijednosti indeksa oštećenja za M3 (lijevo) i M4 (desno)



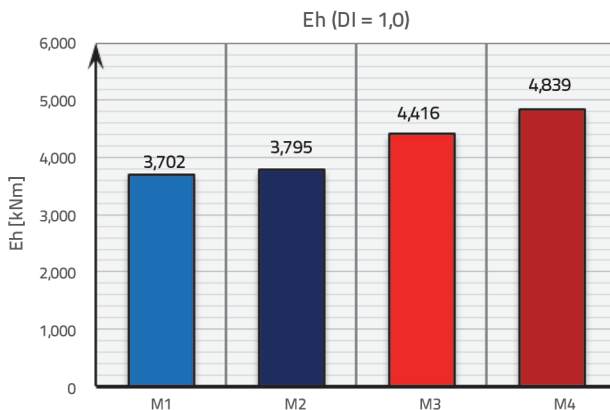
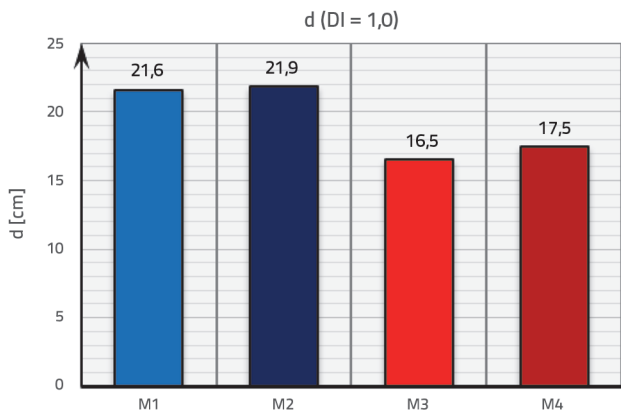
Slika 9. Vrijednosti indeksa oštećenja za M1–M4



Slika 10. Usporedba odnosa d –DI (lijevo) i E_h –DI (desno) za M1–M4

Provedena je linearna regresijska analiza kako bi se odredio odnos između vrijednosti DI-ja i krovnoga pomaka d za sva četiri proračunska modela. Slično tome, provedena je linearna regresijska analiza kako bi se odredio odnos između DI-ja i vrijednosti utrošene energije, E_h , za sve modele proračuna. Linearni odnosi i vrijednosti korelacije prikazani su u izrazima (7). Linearni odnosi između DI-ja i d i između DI-ja i E_h prikazani su na slici 10.

$$\begin{aligned}
 DI_{M1} &= 0,0497 \cdot d - 0,0720; R = 0,9831 \\
 DI_{M1} &= 0,000193 \cdot E_h + 0,285479; R = 0,9168 \\
 DI_{M2} &= 0,0523 \cdot d - 0,1449; R = 0,9842 \\
 DI_{M2} &= 0,000202 \cdot E_h + 0,233458; R = 0,9129 \\
 DI_{M3} &= 0,0786 \cdot d - 0,1900; R = 0,9980 \\
 DI_{M3} &= 0,000182 \cdot E_h + 0,305668; R = 0,9947 \\
 DI_{M4} &= 0,0941 \cdot d - 0,5126; R = 0,9938 \\
 DI_{M4} &= 0,000218 \cdot E_h + 0,079639; R = 0,9970
 \end{aligned}
 \tag{7}$$



Slika 11. Usporedba d (lijevo) i Eh (desno) za DI = 1,0 (M1–M4)

Usporedba rezultata izvršena je za DI = 1,0, pri čemu konstrukcija gubi nosivost i nalazi se u stanju potpunoga oštećenja konstrukcije (slika 11.). Iako odnos između funkcija prikazanih na slici 11. nije u potpunosti opisan, može se zaključiti da će primjenom proračunskih modela M1 i M2, utemeljenih na metodama NSA i NDA, konstrukcija postići vrijednost DI = 1,0, s vrijednostima pomaka krova većima od onih dobivenih proračunskim modelima M3 i M4 u rasponu od 23,2–32,5 % i nižom vrijednosti histerezne energije u rasponu od 14,1–23,5 %.

3.3. Statistička analiza rezultata

Za svaku distribuciju PGA i DI vrijednosti odgovaraju lognormalnoj distribuciji. Slijedi da odnos između ln(PGA) i ln(DI) ima normalnu distribuciju za svaki ln(PGA) u log-log prostoru. Statistička analiza rezultata provedena je na isti način kao što je opisano u [60].

4. Rasprava o rezultatima

4.1. Analiza vjerojatnosti oštećenja

FC i PoE stanja oštećenja (DS) izračunani su pomoću izraza (8):

$$P_{DS_i/IM_j} \left(\mu_{LN,IM_j}^{EDP_i}, \sigma_{LN,IM_j}^{EDP_i} \right) = 1 - \theta \left(\frac{\ln EDP_i - \mu_{LN,IM_j}^{EDP_i}}{\sigma_{LN,IM_j}^{EDP_i}} \right) \quad (8)$$

Detaljnije objašnjenje postupka proračuna i parametara jednadžbe dano je u [60].

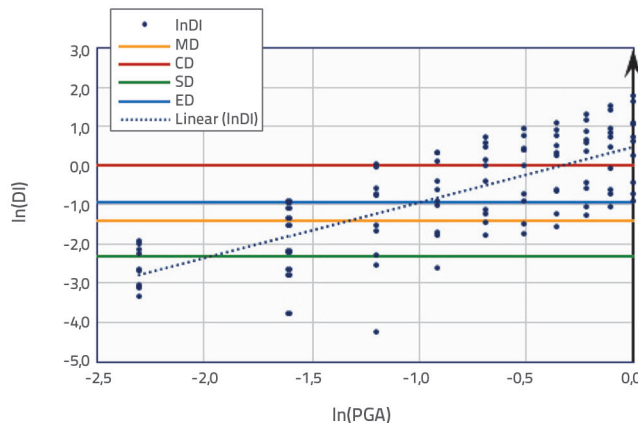
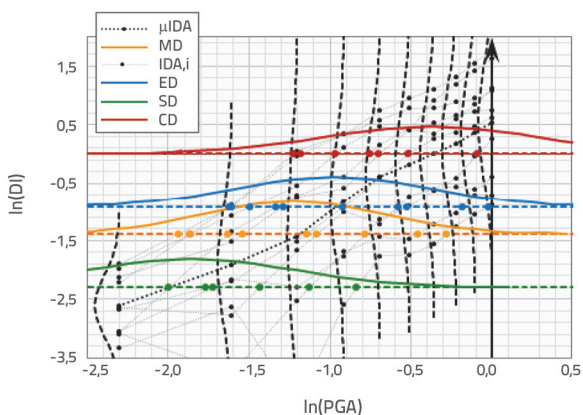
Usklađivanje krivulje (CF) i linearna regresija (LR) primijenjeni su za izračunavanje FC-a pomoću analitičke funkcije kumulativne distribucije (CDF) za lognormalnu distribuciju:

$$P_{DS_i/IM} \left(\mu_{LN,DS_i}^{IM}, \sigma_{LN,DS_i}^{IM} \right) = \theta \left| \frac{\ln IM - \mu_{LN,DS_i}^{IM}}{\sigma_{LN,DS_i}^{IM}} \right| \quad (9)$$

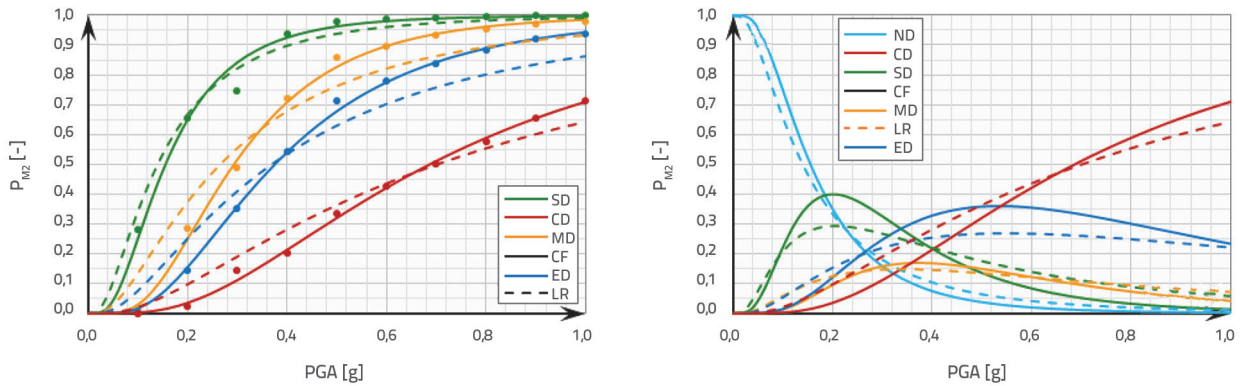
Postupak je detaljno opisan u radu [60].

Vrijednosti stanja oštećenja definirane su kao neznatno oštećenje ($DI_{SD} = 0,10$), umjereno oštećenje ($DI_{MD} = 0,25$), znatno oštećenje ($DI_{ED} = 0,40$) i potpuno oštećenje ($DI_{CD} = 1,00$), prema [74].

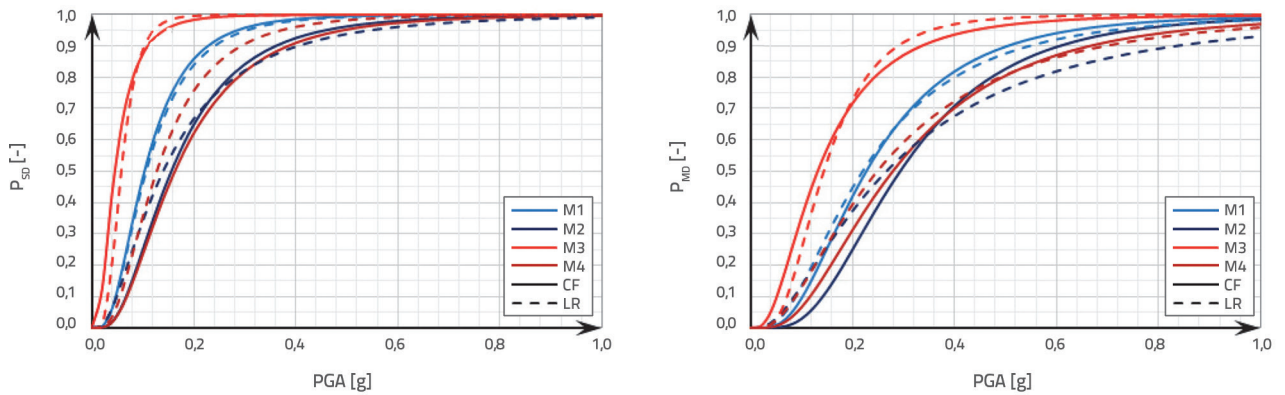
Rezultati konstrukcijske analize primijenjene u metodi CF za izračunavanje FC-a i njihove distribucije prikazani su na slici 12. (lijevo), dok su rezultati konstrukcijske analize primijenjene u metodi LR za izračunavanje FC-a i njihove linearne funkcije odnosa između IM i EDP prikazani na slici 12. (desno).



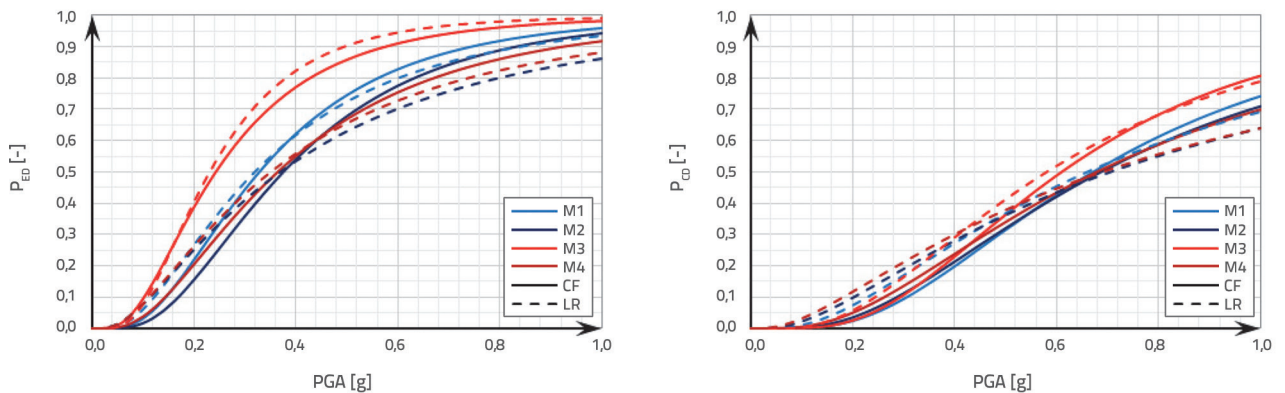
Slika 12. Primjer procjene PoE određenoga DS-a za svaki IM (lijevo) i metoda linearne regresije (desno) za M2



Slika 13. Krivulje vjerojatnosti oštećenja (lijevo) i funkcije gustoće vjerojatnosti - PDF (desno) za M2



Slika 14. Krivulje vjerojatnosti oštećenja za pojavu SD-a (lijevo) i MD-a (desno) za M1-M4



Slika 15. Krivulje vjerojatnosti oštećenja za pojavu ED-a (lijevo) i CD-a (desno) za M1-M4

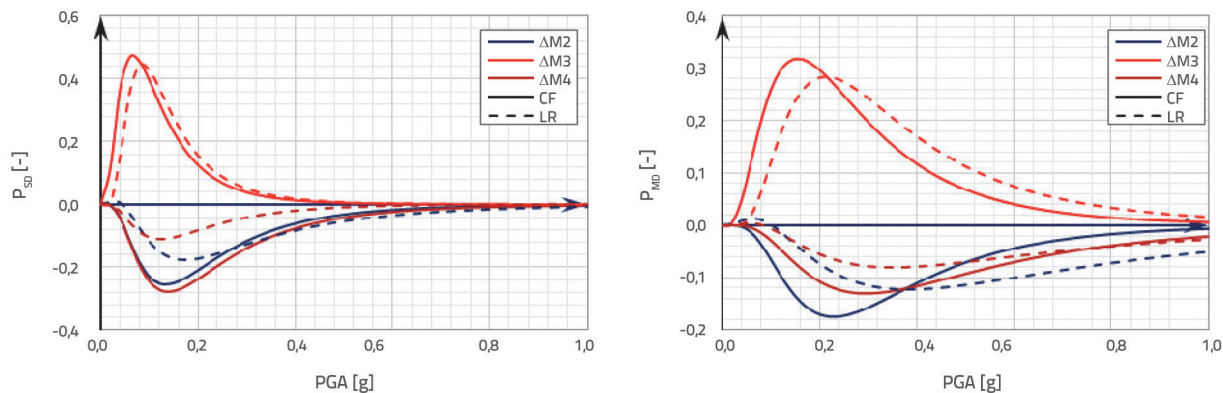
Na temelju dobivenih rezultata izračunani su FC i funkcije gustoće vjerojatnosti (PDF). Primjer M2 prikazan je na slici 13. za sva četiri modela određivanja DI-ja. PDF-ovi za pojavu različitih stanja oštećenja izračunani su pomoću jednadžbi opisanih u [2, 38]:

$$P_{DS0} = 1 - P_{DS1}[IM_j, \mu_{LNjDS1}, \sigma_{LNjDS1}]$$

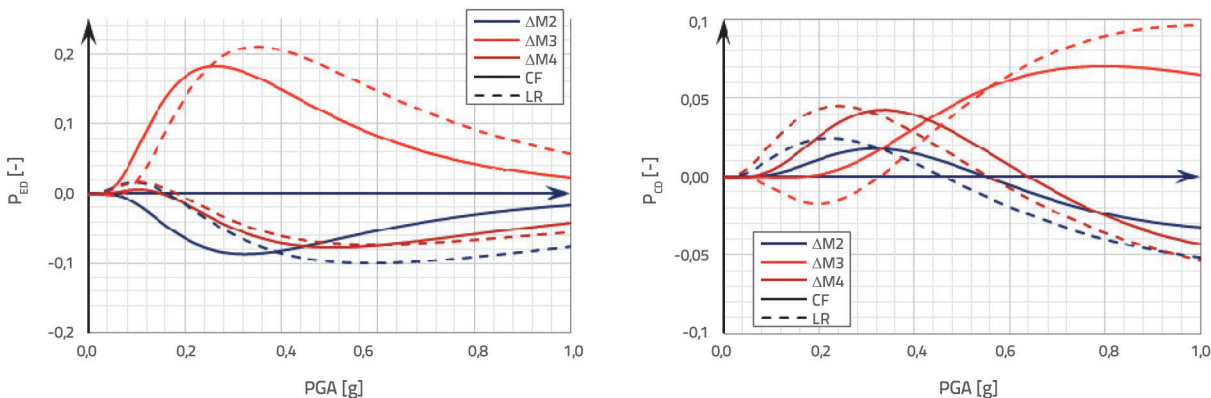
$$P_{DS1} = P_{DS1}[IM_j, \mu_{LNjDS1}, \sigma_{LNjDS1}] - P_{DS1+1}[IM_j, \mu_{LNjDS1+1}, \sigma_{LNjDS1+1}] \quad (10)$$

$$P_{DSn} = P_{DSn}[IM_j, \mu_{LNjDSn}, \sigma_{LNjDSn}]$$

Nakon izračunavanja FC-a, konstrukcijski odzivi AB zgrade uspoređeni su za svako stanje oštećenja (slike 14. i 15.). Vidljivo je da se modeli M1-M4 međusobno razlikuju za određenu vrijednost, a postoje razlike u pristupu analizi i metodi izračunavanja krivulje. Međutim, za obje metode izračunavanja krivulje vjerojatnosti oštećenja rezultati dobiveni primjenom modela M2 s kombiniranim (NSA i NDA) pristupom vrlo su slični onima dobivenim primjenom modela M4, pri čemu su vrijednosti DI-ja i parametri izračunani samo pomoću NSA. Oba su modela modificirani modeli Park-Ang izračunavanja DI-ja.



Slika 16. Razlika između krivulja vjerojatnosti oštećenja za referentni model M1 za SD (lijevo) i MD (desno)



Slika 17. Razlika između krivulja vjerojatnosti oštećenja za referentni model M1 za ED (lijevo) i CD (desno)

Za funkcije koje se odnose na funkcije kumulativne distribucije (CDF) ili FC zaključci vezani uz odnose između PDF-a isti su kao oni spomenuti za CDF.

Za usporednu analizu rezultata primijenjena su četiri proračunska modela M1–M4. Kao usporedni referentni model u prvom koraku iteracije odabran je model M1. Razlike između FC-a (slike 16. i 17.) izračunanih pomoću svih modela izračunane su pomoću sljedećih jednačbi:

$$\Delta P_{DI}^{M_i} = P_{DS_i|IM_j}^{M_i} - P_{DS_i|IM_j}^{M_{ref}} \tag{11}$$

$$\Delta MDF_{DI}^{M_i} = MDF_{DS_i|IM_j}^{M_i} - MDF_{DS_i|IM_j}^{M_{ref}} \tag{12}$$

pri čemu je P PoE određenoga stanja oštećenja, indeks DS_j je određeno stanje oštećenja, IM_j je vrijednost mjere intenziteta, DI je DI , MDF je srednji faktor oštećenja, dok su M_i i M_{ref} analizirani i referentni model.

Vrijednosti M2 i M4 bile su bliže M1 nego M3. Kao što je prethodno navedeno, najmanja je razlika dobivena između M2 i M4. Treba dodatno uspoređivati i analizirati ove modele.

4.2. Analiza oštetljivosti

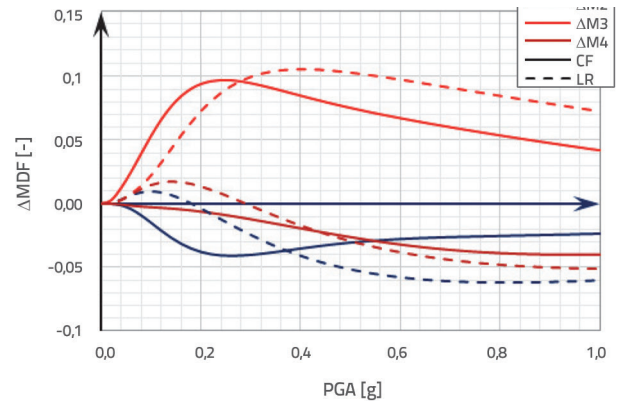
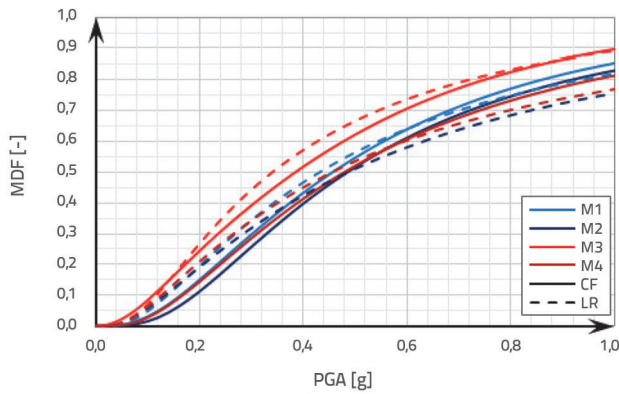
Krivulje oštetljivosti izračunane su prema metodi opisanoj u [60] na temelju vjerojatnosti oštećenja prema jednačbi i postupku opisanoj u [3]:

$$E(C|IM) = \sum_{i=0}^n E(C|DS_i) \cdot P(DS_i|IM) \tag{13}$$

pri čemu je n broj razmatranih DS (DS), $P(DS_i|IM)$ je vjerojatnost oštećenja, $E(C|DS_i)$ i $E(C|IM)$ su kumulativna distribucija troška (ili gubitka) prema [3]. Vrijednosti $E(C|DS_i)$ preuzete su iz [5]. Rezultati su uspoređeni i prikazani na slici 18. Budući da su krivulje oštetljivosti izračunane na temelju parametara vjerojatnosti oštećenja, odnos između rezultata bit će isti kao u slučaju procjene vjerojatnosti oštećenja, što

Tablica 2. Funkcije faktora oštećenja tipologije zgrada prema [3]

Ljestvica oštećenja	E(C DS _j)			
	Neznatno	Umjereno	Znatno	Potpuno
Stanje oštećenja	2 %	10 %	50 %	100 %

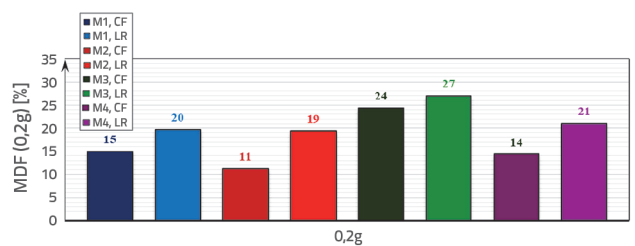


Slika 18. Krivulje oštetljivosti za M1–M4 (lijevo) i razlika između krivulja oštetljivosti za referentni model M1 (desno)

implicira da su vrijednosti M2 i M4 bliže M1 nego M3. Također je vidljivo da je, kao što je prethodno navedeno, najmanja razlika između M2 i M4 te da ove modele treba dodatno uspoređivati i analizirati.

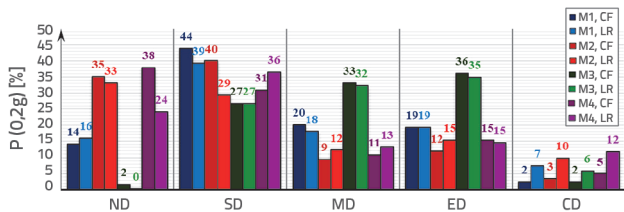
4.3. Komparativna analiza rezultata

Usporedba krivulja vjerojatnosti oštećenja i oštetljivosti pomoću numeričke usporedbe modela za svaki PGA nije pogodna, jer je već prikazana vizualnom usporedbom na slikama 16. do 18. Ona opisuje razlike između rezultata dobivenih primjenom različitih modela DI-ja i različitih metoda analize odziva konstrukcije. Razlike između modela i metoda prikazane su na slikama 19. i 20. za proračun s $PGA = 0,2 \text{ g}$. Međutim, na slikama 19. i 20. ne može se uočiti jasan obrazac, osim očitoga odstupanja u M3 u usporedbi s drugim modelima.

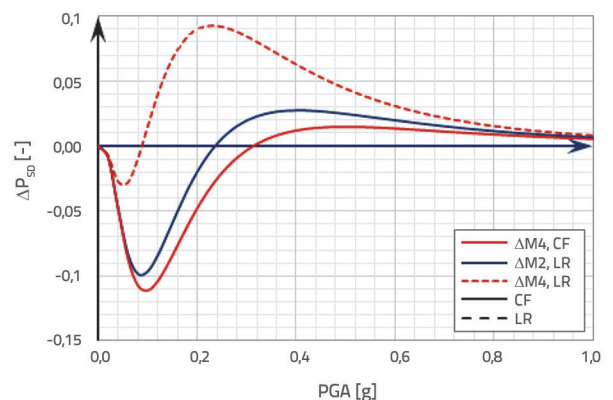
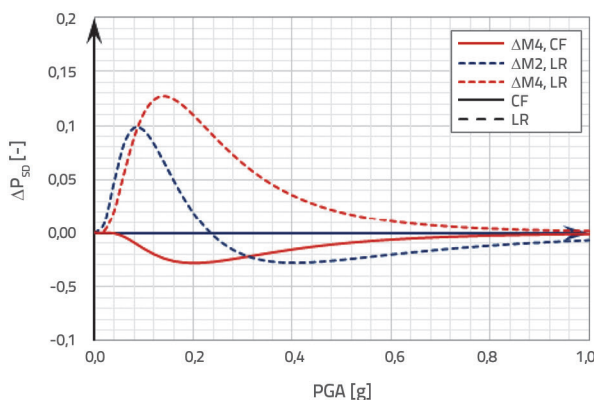


Slika 20. PoE određenoga MDF-a za M1–M4 za $PGA = 0,2 \text{ g}$

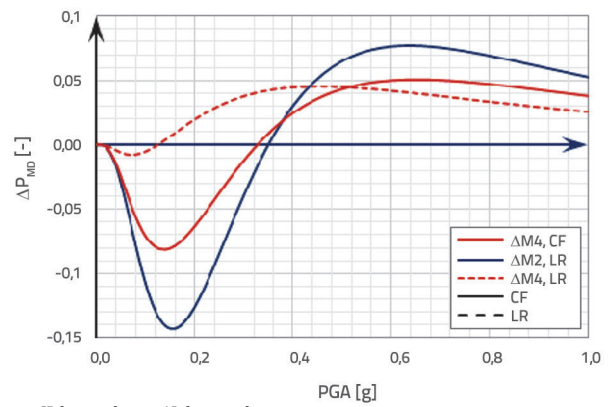
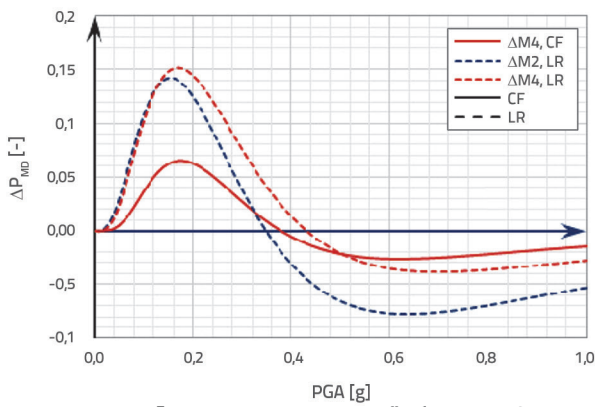
Na slikama 21. do 25. ne može se uočiti jasan obrazac, osim jasnoga odstupanja u M3 u usporedbi s drugim modelima. U daljnjoj analizi će se rezultati vjerojatnosti oštećenja i oštetljivosti promatrati pomoću samo dva modela: modificiranoga modela Park–Ang DI-ja izračunanoga pomoću parametara NSA i NDA (M2), koji bi trebali dati najpreciznije informacije o seizmičkom odzivu konstrukcije, jer uključuju najveće pomake krova pod potresom D_{max}^{NDA} , dobivene pomoću NDA, konačni pomak krova na bilineariziranoj krivulji postupnoga guranja D_u^{NSA} , silu popuštanja na bilineariziranoj krivulji postupnoga guranja F_y^{NSA} , prvi pomak pri popuštanju D_y^{NDA} i apsorbiranu histereznu energiju tijekom potresa E_H^{NDA} te model s parametrima koji odgovaraju onima danima u M2, ali su dobiveni samo pomoću NSA (M4). Ta su dva modela imala najslabije rezultate dobivene primjenom CF-a ili metode LR. Kao referentni usporedni model odabran je model M2.



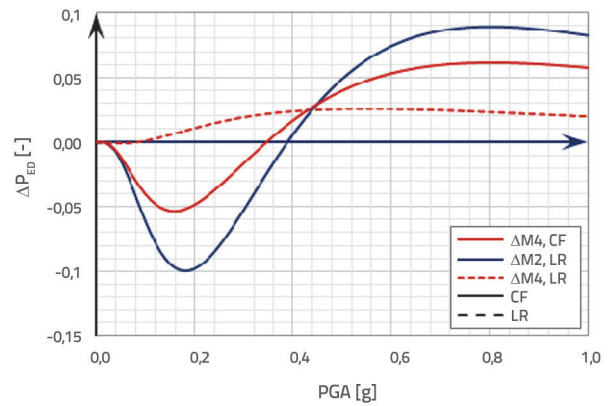
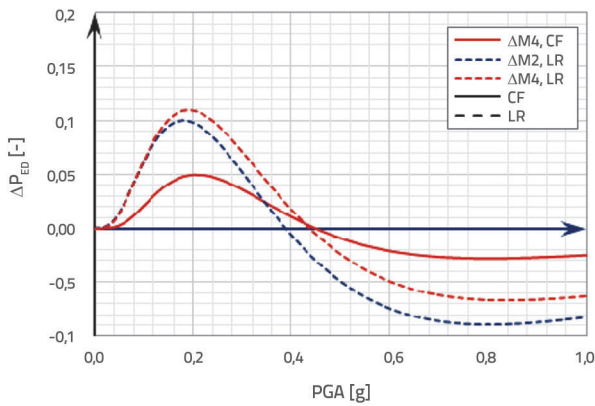
Slika 19. PoE određenoga DS-a za M1–M4 za $PGA = 0,2 \text{ g}$



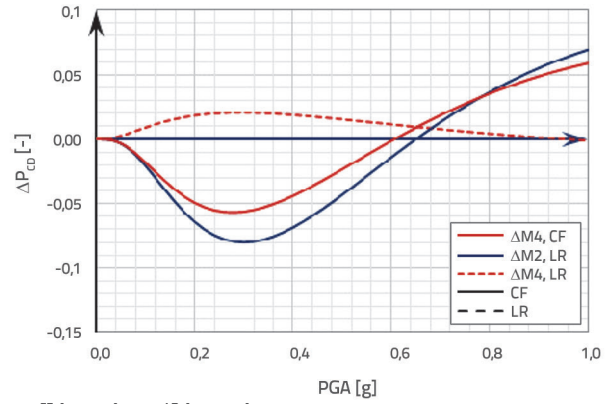
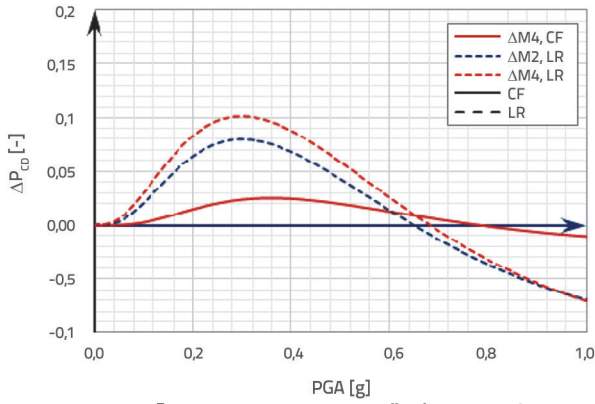
Slika 21. Razlika između krivulja vjerojatnosti oštećenja za referentni model $M2^{CF}$ (lijevo) i $M2^{LR}$ (desno) za SD



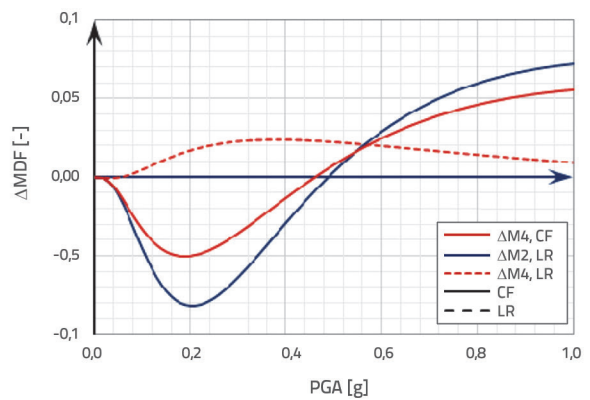
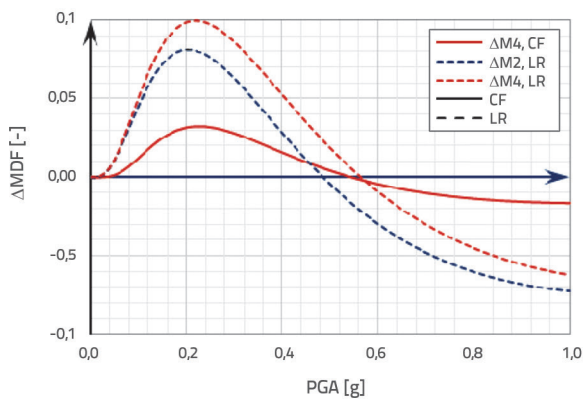
Slika 22. Razlika između krivulja vjerojatnosti oštećenja za referentni model $M2^{CF}$ (lijevo) i $M2^{LR}$ (desno) za MD



Slika 23. Razlika između krivulja vjerojatnosti oštećenja za referentni model $M2^{CF}$ (lijevo) i $M2^{LR}$ (desno) za ED



Slika 24. Razlika između krivulja vjerojatnosti oštećenja za referentni model $M2^{CF}$ (lijevo) i $M2^{LR}$ (desno) za CD

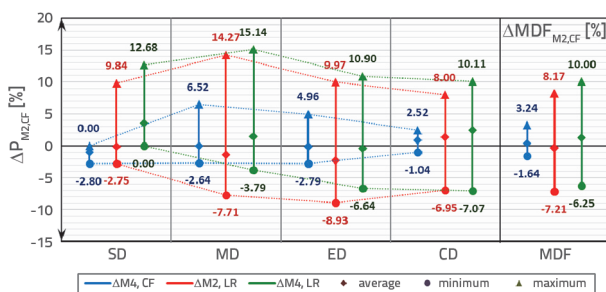


Slika 25. Razlika između krivulja vjerojatnosti oštećenja za referentni model $M2^{CF}$ (lijevo) i $M2^{LR}$ (desno)

Ako je $M2^{CF}$ odabran kao referentni model, najmanja odstupanja u vrijednosti PoE za sve DS i u analizi oštetljivosti bit će u slučaju $M4^{CF}$ modela, a slijede ga modeli $M2^{LR}$ i $M4^{LR}$, kao što je i predviđeno. Rasponi između odstupanja prikazani su na slikama 21. do 25. (lijevo). Kada je $M2^{LR}$ odabran kao referentni model, najmanja odstupanja u vrijednosti PoE za sve DS i u analizi oštetljivosti bit će u slučaju $M4^{LR}$ modela, a slijede ga modeli $M2^{CF}$ i $M4^{CF}$, kao što je i predviđeno. Rasponi između odstupanja prikazani su na slikama 21. do 25. (desno).

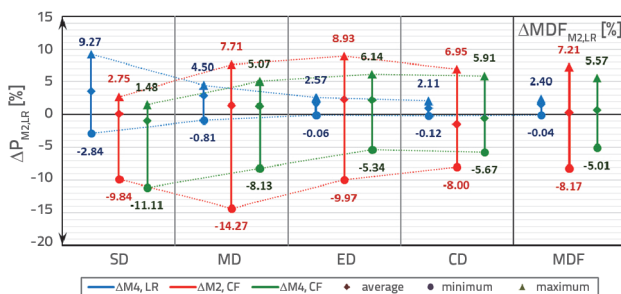
Rezultati odstupaju u rasponu od $-2,80\%$ do $+6,52\%$ u analizi vjerojatnosti oštećenja i u rasponu od $-1,64\%$ do $+3,24\%$ u analizi oštetljivosti kada se $M4^{CF}$ uspoređuje s referentnim modelom $M2^{CF}$, što je slučaj kada su vrijednosti DI-ja dobivene pomoću NSA i NDA ($M2^{CF}$) i samo NSA ($M4^{CF}$), primjenom metode podešavanja krivulje za izvođenje FC-a na temelju PoE analize DS-a (slika 26.).

U slučaju rezultata dobivenih metodom linearne regresije za izvod FC-a, u usporedbi s referentnim modelom $M2^{CF}$, razlika je između rezultata veća, u rasponu od $-8,93\%$ do $+14,27\%$ u analizi vjerojatnosti oštećenja i od $-7,21\%$ do $+8,17\%$ u analizi oštetljivosti za $M2^{LR}$ i od $-7,07\%$ do $+15,14\%$ u analizi vjerojatnosti oštećenja i od $-6,25\%$ do $+10,00\%$ u analizi oštetljivosti za $M4^{LR}$ (slika 26.).



Slika 26. Maksimalna i minimalna razlika između krivulja vjerojatnosti oštećenja za referentni model $M2^{CF}$

Rezultati odstupaju u rasponu od $-2,84\%$ do $+9,27\%$ u analizi vjerojatnosti oštećenja i u rasponu od $-0,04\%$ do $+2,40\%$ u analizi oštetljivosti kada se $M4^{LR}$ uspoređuje s referentnim modelom $M2^{LR}$ primjenom metode linearne regresije za izvod FC-a na temelju PoE analize DS-a (slika 27.).



Slika 27. Maksimalna i minimalna razlika između krivulja vjerojatnosti oštećenja za referentni model $M2^{LR}$

U slučaju rezultata dobivenih metodom usklađivanja krivulje za izvod FC-a, u usporedbi s referentnim $M2^{LR}$ modelom, razlika je između rezultata veća, u rasponu od $-14,27\%$ do $+8,93\%$ u analizi vjerojatnosti oštećenja i od $-8,17\%$ do $+7,21\%$ u analizi oštetljivosti za $M2^{LR}$ i od $-11,11\%$ do $+6,14\%$ u analizi vjerojatnosti oštećenja i od $-5,01\%$ do $+5,57\%$ u analizi oštetljivosti za $M4^{LR}$ (slika 27.).

5. Zaključak

U radu je opisano izračunavanje i analiza procjene indeksa oštećenja (DI) te vjerojatnosti oštećenja i oštetljivosti za okvirnu AB konstrukciju od 5 katova odabranu za studiju slučaja. Za izračunavanje DI-ja primijenjena su četiri proračunska modela ($M1-M4$), a vrijednosti su dobivene na temelju rezultata NSA i NDA. Za dobivanje FC-a primijenjene su dvije metode: metoda usklađivanja krivulje vjerojatnosti oštećenja, koja se temelji na izračunavanju vjerojatnosti prekoračenja odgovarajućih stanja oštećenja, i na linearnoj regresiji, pri čemu se uspostavlja linearni odnos u log-log prostoru između vrijednosti DI-ja i PGA. Krivulje oštetljivosti određene su na temelju rezultata procjene krivulje vjerojatnosti oštećenja i vjerojatnosti prekoračenja odgovarajućih stanja oštećenja kao funkcije srednjega faktora oštećenja. Te su analize dale osnovu za kasnije komparativne analize. Na kraju se navode preporuke i zaključci utemeljeni na rezultatima.

Što se tiče približno određenih linearnih odnosa DI-pomak krova, može se zaključiti da će modeli $M1$ i $M2$ (utemeljeni na metodama NSA i NDA) dati manje vrijednosti DI-ja za iste vrijednosti pomaka krova u usporedbi s modelima $M3$ i $M4$ (utemeljenima na NSA), uz uvjet da vrijednosti iznose $DI_{M3} = 0,12$ i $DI_{M4} = 0,32$. To znači da će nakon početnoga formiranja manjega stupnja oštećenja konstrukcija pokazati veći stupanj oštećenja za manje vrijednosti pomaka ako se primjenjuju $M3$ i $M4$, a ne $M1$ i $M2$. Proračuni koji primjenjuju $M1$ i $M2$ pružili su manje konzervativan odnos između DI-ja i pomaka krova za veće stupnjeve oštećenja. Nadalje, odnos između energije utrošene histereznim ponašanjem i DI-ja bio je sličan u svim modelima. Rezultati vrijednosti DI-ja i navedenih odnosa prikazani su u obliku odnosa DI-PGA, a vrijednosti DI-ja vezane uz PGA usporedive su za sva četiri modela. Međutim, kada se primjenjuju $M3$ i $M4$ (modeli utemeljeni na NSA), vrijednost DI-ja zgrade bila je malo veća ili konzervativnija za većinu vrijednosti PGA.

Rezultati izračunavanja krivulja vjerojatnosti oštećenja pokazuju male varijacije u rezultatima za sve modele pri pojedinoj vrijednosti te su uočene manje razlike utemeljene na pristupima analizi i metodama izračunavanja krivulje. Međutim, rezultati dobiveni modelom $M2$, koji kombinira NSA i NDA, vrlo su slični rezultatima dobivenima modelom $M4$, koji primjenjuje samo metodu NSA za obje metode izračunavanja krivulja vjerojatnosti oštećenja. Oba modela primjenjivala su modificirane modele Park-Ang izračunavanja

DI-ja. Rezultati analize razlike između izvedenih krivulja vjerojatnosti oštećenja i oštetljivosti pokazali su da najmanja razlika postoji između modela M2 i M4, a jasno je uočeno odstupanje u M3, a potom i M1, u usporedbi s tim modelima. Velika sličnost između rezultata dobivenih pomoću M2 i M4 utvrđena je primjenom CF ili metode LR za izračunavanje krivulja oštetljivosti.

Rezultati pokazuju da se model M4, koji isključivo primjenjuje NSA za izračunavanje DI-ja, može primijeniti za pojednostavnjenje postupka opisanoga modelom M2, koji primjenjuje NDA i NSA. Postupci modela M4 manje su složeni i oduzimaju manje

vremena od postupaka modela M2. Oni također zadovoljavaju zahtjeve inženjerske prakse za preciznošću. Stoga se metodologije za procjenu indeksa oštećenja, vjerojatnosti oštećenja i oštetljivosti primijenjene u ovom radu mogu primijeniti na različite vrste zgrada.

Zahvala

Ovaj je rad podržalo Ministarstva prosvjete, znanosti i tehnološkog razvoja Republike Srbije (Ugovor br. 451-03-80/2022-01/1 od 19.12.2022.).

LITERATURA

- [1] Sfahani, M.G., Guan, H., Loo, Y.C.: Seismic Reliability and Risk Assessment of Structures Based on Fragility Analysis - A Review, *Adv. Struct. Engl.*, 18 (2015), pp. 1653–1669
- [2] Porter, K.A.: *Beginner's Guide to Fragility, Vulnerability and Risk*, University of Colorado Boulder, Boulder, CO, USA, 2015., DOI:10.1007/978-3-642-35344-4_256.
- [3] D'Ayala, D., Meslem, A., Vamvatsikos, D., Porter, K., Rossetto, T., Silva, V.: *Guidelines for Analytical Vulnerability Assessment of Low/Mid-Rise Buildings*, GEM Technical Report 2015-08 V1.0.0, 2014., <https://doi.org/10.13117/GEM.VULN-MOD.TR2014.12>.
- [4] Korkmaz, K.A.: Evaluation of seismic fragility analysis, *Proceedings of the 14th World Conf. on Earth. Eng.*, China, 2008.
- [5] Moussa, A., Christou, P., Kyriakides, N.: The developments of the analytical fragility methods in seismic risk assessment-A review, *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*, 3 (2016) 16, pp. 70-81
- [6] Ggadigone, V.S., Takkalaki, S.R., Patil, V.A.: Seismic assessment of reinforced concrete framed structures, *Intern. J. on Recent and Inov. Trends in Comp. and CC*, 6 (2016) 5, pp. 262-267.
- [7] Kappos, A.J.: Seismic damage indices for RC buildings: evaluation of concepts and procedures, *Progress of structural engineering materials*, 1 (1997) 1, pp. 78-87
- [8] Makhloof, D.A., Ibrahim, A.R., Ren, X.: Damage Assessment of Reinforced Concrete Structures through Damage Indices: A State-of-the-Art Review, *CMES-Computer Modeling in Eng. & Sciences*, 128 (2021) 3, pp. 849–874
- [9] Cosenza, E., Manfredy, G.: Damage indices and damage measures, *Prog. Struct. Engl. Mater.*, (2000) 2, pp. 50-59
- [10] Miyakoshi, J., Hayashi, Y.: Correlation of Building Damage with Indices of Seismic Ground Motion Intensity During the 1999 Chi-Chi Taiwan Earthquake, *Proceedings of the International Workshop on Annual Commemoration of Chi-Chi Earthquake*, Taipei, Taiwan, 2000.
- [11] Sadeghi, K., Angin, M.M.: Characteristic Formulas of Damage Indices for Reinforced Concrete Structures: A General Guideline, *Academic Research International*, 3 (2018) 9.
- [12] Elenas, A., Meskouris, K.: Correlation study between seismic acceleration parameters and damage indices of structures, *Engineering Structures*, 23 (2001) 6, pp. 698-704
- [13] Zemeeruddin, M., Saleemuddin, K.K.M., Sangle, K.K.: Seismic damage assessment of RC structure using non-linear static analysis, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21 (2017), pp. 119-1
- [14] Zemeeruddin, M., Sangle, K.K.: Damage assessment of RC moment resisting frames using performance-based seismic evaluation procedure, *J. King Saud Univ.-Engl. Sci.*, 33 (2021), pp. 227–239
- [15] Park, R., Paulay, T.: *Reinforced Concrete Structures*, John Wiley & Sons, New York, USA, 1975.
- [16] Paulay, T., Priestley, M.J.N.: *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*, John Wiley & Sons, New York, USA, 1992., pp. 767
- [17] Fardis, M.N.: *Seismic Design, Assessment and Retrofitting of Concrete Buildings*, Based on EN-Eurocode 8; *Geotechnical and Earthquake Engineering*, Springer, 8 (2009), pp. 743
- [18] Priestley, M.J.N., Seible, F., Calvi, G.M.S.: *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, John Wiley & Sons, New York, USA, 1996.
- [19] ASCE: FEMA356: *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, USA, 2000.
- [20] ASCE: *Seismic Evaluation of Buildings*, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 2006., pp. 41-13
- [21] *Structural Engineers Association of California: SEAOC Vision 2000 Committee: Performance-based Seismic Engineering*, Sacramento, CA, USA, 1995.
- [22] Priestley, M.J.N.: *Performance Based Seismic Design*, *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand, 2000.
- [23] Krawinkler, H.: *Challenges and Progress in Performance-Based Earthquake Engineering*, *Proceedings of the International Seminar on Seismic Engineering for Tomorrow-In Honor of Professor Hiroshi Akiyama*, Tokyo, Japan, 1999.
- [24] Hastemoglu, H.: Seismic performance evaluation of reinforced concrete frames, *IOSR J. of Mechanical and Civil Eng.*, 12 (2015) 5, pp. 123-131
- [25] Hazus®-MH 2.1.: *Earthquake Loss Estimation Methodology, Advanced Engineering Building Module (AEBM), Technical and User's Manual*, Department of Homeland Security, FEMA, Mitigation Division, Washington, DC, USA, 2009.
- [26] Milutinović, Z.V., Trendafiloski, G.S.: RISK-UE: An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns, Contract: EVK4-CT-2000-00014, WP4 *Vulnerability of Current Buildings*, pp. 110, http://www.civil.ist.utl.pt/~mlopes/conteudos/DamageStates/Risk%20UE%20WP04_Vulnerability.pdf, 1.1.2021.

- [27] Federal Emergency Management Agency: FEMA P-58 Next-Generation Seismic Performance Assessment Methodology for Buildings, Volume 1 - Methodology, Report FEMA P-58-1, Washington, D.C., 2018.
- [28] Borele, S.V., Datta, D.: Damage Assessment of Structural System Using Fragility Curves, *J. Civ. Eng. Environ. Technol.*, (2015) 2, pp. 72–76
- [29] Olteanu, I., Barbat, A.H., Budescu, M.: Vulnerability Assessment of Reinforced Concrete Framed Structures Considering the Effect of Structural Characteristics, *Open Civ. Eng. J.*, (2015) 9, pp. 321–329
- [30] Olteanu, I., Vargas, Y.F., Barbat, A.H., Budescu, M., Pujades, L.G.: Vulnerability and Risk Evaluation for a Reinforced Concrete Frame, *Bull. Polytech. Inst. Iasi.*, 57 (2011), pp. 59–60
- [31] European Committee for Standardization (CEN): EN1998-Part 1, Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance-Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings, Brussels, Belgium, 2004.
- [32] European Committee for Standardization (CEN): EN1998-Part 3, Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance-Part 3: Assessment and Retrofitting of Buildings, Brussels, 2004.
- [33] European Committee for Standardization (CEN): EN 1990. ICS 91.010.30, Basis of Structural Design, Brussels, Belgium, 2005.
- [34] European Committee for Standardization (CEN): EN1991, Eurocode 1: Actions on Structures-Part 1-1: General Actions-Densities, Self-weight, Imposed Loads for Buildings, Brussels, 2002.
- [35] European Committee for Standardization (CEN): EN1992-Part 1, Eurocode 2: Design of Concrete Structures-Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings, Brussels, Belgium, 2004.
- [36] European Committee for Standardization (CEN): EN1998-Part 2, Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance-Part 2: Bridges, Brussels, Belgium, 2005.
- [37] Zemeeruddin, M., Sangle, K.K.: Performance-based seismic assessment of RC moment resisting frames, *J. King Saud. Univ. Eng. Sci.*, 33 (2021), pp. 153–165
- [38] Baker, J.W.: Efficient analytical fragility function fitting using dynamic structural analysis, *Earthq. Spectra*, 31 (2015), pp. 579–599
- [39] Mander, J., Priestley, M., Park, R.: Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, *J. Struct. Eng.*, 114 (1988), pp. 1804–1825
- [40] MathWave Technologies: EasyFit software: Version 5, <http://www.mathwave.com>, 1.1.2021.
- [41] Eleftheriadou, A. K., Karabinis, A. I.: Correlation of Structural Seismic Damage with Fundamental Period of RC Buildings, *Open Journal of Civil Engineering*, (2013) 3, pp. 45–67
- [42] Wang, M., Gao, L., Yang, Z.: Structural seismic damage assessment method based on structural dynamic characteristics, *Research Square*, 2022.
- [43] Ae-Heo, Y., Kunnath, K.: Damage-based seismic performance evaluation of reinforced concrete frames, *International J. of Concrete Structures and Materials*, 7 (2013) 3, pp. 175–183
- [44] Khoshrafter, A., Albasnia, R., Raof, F.F.: The effect of degradation on seismic damage of RC buildings, *Advances in Environmental Biology*, 75 (2013) 5, pp. 861–867
- [45] Maleki-Amin, M.J., Estekanchi, H.E.: Application of damage spectra as seismic intensity measures in endurance time method for steel moment-resisting frames, *Scintia Iranica*, 24 (2017) 1, pp. 53–64
- [46] Spandana, K., Raju, Y.K., Satyanarayana, G.V.V., Manchalwar, A.: Damage capacity on RC structures using performance based analysis, *E3S Web of Conferences* 309, No. 01203, 2012.
- [47] Chandrasekaram, S., Serino, G., Gupta, V.: Performance evaluation and damage assessment of buildings subjected to seismic loading, *Structures under Shock and Impact X*, WIT Transaction on the Built Environment, 98 (2008), pp. 313–322
- [48] Seyedi, D.M., Gehl, P., Douglas, J., Davenne, L., Mezher, N., et al.: Development of seismic fragility surfaces for reinforced concrete buildings by means of nonlinear time-history analysis, *Earth. Eng. & Struct. Dynamics*, 39 (2010), pp. 91–108
- [49] Rahman, A., Ullah, S.: Seismic vulnerability assessment of RC structures: A review, *ATE-90214062*, *Asian Transactions*, (2013) 1.
- [50] Marasco, S., Noori, A.Z., Domaneschi, M., Cimellaro, G.P.: Seismic vulnerability assessment indices for buildings: Proposals, comparisons and methodologies at collapse limit states, *Intern. J. of Disaster Risk Reduction*, 63 (2021), pp. 1–15
- [51] Alam, N. Shahria Alam, M., Tesfamariam, S.: Buildings' seismic vulnerability assessment methods: A comparative study, *Nat Hazards*, 65 (2012), pp. 405–424, <https://doi.org/10.1007/s11069-011-0082-4>
- [52] Cherifi, F., Farsi, M., Kaci, S.: Assessment of seismic vulnerability of RC frame buildings, *MATEC Web of Conferences* 149, 2018.
- [53] Lamantarna, E., Lam, N., Tsang, H.H., Wilson, J., Gad, E., Goldsworthy, H.: Review of methodologies for seismic vulnerability assessment of buildings, *Proceedings of the Australian Earthq. Eng. Society*, Lorne, Victoria, 2014.
- [54] Yaghmaeei-Sabegh, S., Zafavand, S., Makeremi, S.: Evaluation of N2 method for damage estimation of MDOF systems, *Earthquake and Structures*, 14 (2018) 2, pp. 155–165
- [55] Xin, D., Daniell, J.E., Wenzel, F.: State of the art of fragility analysis for major building types in China with implementations for intensity – PGA relationship, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.*, 2018.
- [56] Maeda, M., Nakano, Y., Lee, K.S.: Post-Earthquake damage evaluation for RC buildings based on residual seismic capacity, *Proceedings of the 13th WCEE*, Vancouver, B.C., Canada, 2004.
- [57] Martins, L., Silva, V., Merques, M., Crowley, H., Delgado, R.: Evaluation of analytical fragility and damage-to-loss models for reinforced concrete buildings, *Proceedings of the Sec. Eur. Conf. on Earthquake Eng. and Seismology*, 2014., pp. 12
- [58] Hamburger, R.O., Hooper, J.D., Gillengerten, J. D., Dwelley-Samant, L., Heintz, J., Mahoney, M.: The ATC-58-2 Project Further Development of Next Generation Performance-based Design Criteria, *Proceedings of the 16WCEE*, Santiago de Chile, Chile, 2017.
- [59] El-Betar, S.A.: Seismic vulnerability evaluation of existing RC buildings, *HBRC J.*, 14 (2018), pp. 189–197
- [60] Folić, R., Čokić, M.: Fragility and Vulnerability Analysis of an RC Building with the Application of Nonlinear Analysis, *Buildings: Selected Papers from the 1st Croatian Conference on Earthquake Engineering (1CroCEE)*, 11 (2021) 9, pp. 390, <https://doi.org/10.3390/buildings11090390>
- [61] Maio, R.A., Tsionis, G., Sousa, M.L., Dimova, S.L.: Review of fragility curves for seismic risk assessment of buildings in Europe, *Proceedings of the 16th World Conference on Earthquake Engineering*, Santiago Chile, Chile, 2017.
- [62] Park, Y.J., Ang, A.H.S.: Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete, *J. Struct. Eng.*, 111 (1985), pp. 722–739

- [63] Lađinović, Đ., Folić, R.: Application of improved damage index for designing of earthquake resistant structures, Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, 2004.
- [64] Ambraseys, N., Smit, P., Sigbjornsson, R., Suhadolc, P., Margaris, B.: Internet-site for European Strong-motion Data, European Commission, Research-directorate General, Environment and Climate Programme, <http://www.isesd.hi.is>, 1.1.2021.
- [65] ORFEUS: Engineering Strong Motion Database, <https://esm-db.eu/>, 11.1.2021.
- [66] Fahjan, Y.M.: Selection and Scaling of Real Earthquake Accelerograms to Fit the Turkish Design Spectra, Digest, 19 (2008), pp. 1231–1250
- [67] NIST GCR 11-917-15: Selecting and Scaling Earthquake Ground Motions for Performing Response-history Analyses, NEHRP Consultants Joint Venture for U.S. Department of Commerce National Institute of Standards and Technology Engineering Laboratory, Gaithersburg, MD, USA, 2011.
- [68] Bisch, P., Carvalho, E., Degee, H., Fajfar, P., Fardis, M., Franchin, P., Kreslin, M., Pecker, A., Pinto, P., Plumier, A., et al.: Eurocode 8: Seismic Design of Buildings-Worked Examples, EC 8: Seismic Design of Buildings, Publications Office of the European Union, Lisbon, Portugal, 2012.
- [69] Pazoki, M., Tasnimi, A.A.: Assessment of the Park & Ang Damage Index for Performance Levels of RC Moment Resisting Frames, Proceedings of the 7th International Conference on Seismology & Earthquake Engineering, 2015.
- [70] Mohd, Z., Mohd, S., Sangle, K.K.: Seismic damage assessment of reinforced concrete structure using non-linear static analyses, KSCE Journal of Civil Engineering, 21 (2017) 4, pp. 1319–1330
- [71] Pejović, J., Janković, S.: Seismic fragility assessment for reinforced concrete high-rise buildings in Southern Euro-Mediterranean zone, Bull. Earthq. Engl., 14 (2016), pp. 185–212
- [72] Sinha, R., Shiradhonkar, S.R.: Seismic Damage Index for Classification of Structural Damage – Closing the Loop, Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, 2012.
- [73] Bastami, M., Ebrahimi, B.: Modification of Park-Ang Damage Index to Accommodate Effect of Aftershocks on RC Structures, Journal of Seismology & Earthquake Engineering, 21 (2019) 4, pp. 21–35
- [74] Ghosh, S., Datta, D., Katakdhond, A.A.: Estimation of the Park–Ang damage index for planar multi-storey frames using equivalent single-degree systems, Eng. Struct., 33 (2011), pp. 2509–2524
- [75] Ganjavi, B., Amiri, J.V., Amiri, G.G., Amrei, S.A.R.: Effect of Seismic Loading Patterns on Height-Wise Distribution of Drift, Hysteretic Energy and Damage in Reinforced Concrete Buildings, Journal of Applied Sciences, 22 (2007) 7, <https://doi.org/10.3923/jas.2007.3431.3441>
- [76] Kassem, M.M., Nazri, F.M., Farsangi, E.N., Tan, C.G.: Comparative seismic RISK assessment of existing RC building, Structures, 32 (2021), pp. 889–913
- [77] Vona, M.: Fragility curves of existing RC buildings based on specific structural performance levels, Open J. of Civil Engineering, (2014) 4, pp. 120–134
- [78] Kassem, M.M., Nazri, F.M., Farsangi, E.N.: Development of seismic vulnerability index methodology for reinforced concrete buildings based on nonlinear parametric analysis, Methods, 10 (2019) 6, pp. 199–211
- [79] Belheouane, F.I., Bensaibi, M.: Assessment of vulnerability curves using vulnerability index method for reinforced concrete structures, Intern. J. of Structural and Construction Engineering, 7 (2013) 6, pp. 483
- [80] Kassem, M.M., Nazri, F.M., Farsangi, E.N.: The seismic vulnerability assessment methodologies: A State-of-the-Art Review, Ain Shams Engineering Journal, 11 (2020), pp. 849–864
- [81] Kassem, M.M., Nazri, F.M., Farsangi, E.N., Oztuk, B.: Development of a uniform seismic vulnerability framework for reinforced concrete building typology, Journal of Building Engineering, 47 (2022), No. 103838
- [82] Desai, K., Sheth, R., Patel, K.: Performance evaluation using fragility analysis of RC frame /wall structures, RT&A, 16 (2021) 1, pp. 187–195
- [83] Computers and Structures Inc.: ETABS, version 17, <https://www.csiamerica.com/>, 11.1.2021.
- [84] Applied Technology Council: ATC-40 Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, Report No. SSC 96-01, 1 (1996), <https://www.atccouncil.org/pdfs/atc40toc.pdf>, 11.1.2021.