

# METODE PRORAČUNA POTRESNE OTPORNOSTI – ENERGETSKE METODE

## SEISMIC DESIGN METHODS – ENERGY-BASED DESIGN

Mislav Stepinac<sup>1</sup>, Filip Borak<sup>1</sup>, Iztok Šušteršič<sup>2</sup>, Igor Gavrić<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Kačićeva 26, 10000 Zagreb

<sup>2</sup>InnoRenew CoE, Livade 6, 6310 Izola - Isola, Slovenija

### SAŽETAK

U radu je dan kratak osvrt na trenutno projektiranje konstrukcija otpornih na potres. U ovom radu prikazane su i sažete najnovije spoznaje u pogledu proračuna potresno otpornih građevina, s najosnovnijim primjerima i kritičkim osvrtom na trenutno stanje propisa i budućnosti projektiranja na potres. Fokus rada bio je prikazati novije metode kao što su metode zasnovane na trošenju energije. Predstavljene su trenutačni zahtjevi i problemi pri proračunu konstrukcija energetskim metodama te predstavljene dijagrami toka vezanim za spomenutu metodu.

**Ključne riječi:** potres, rizik, hazard, osjetljivost, energetske metode

### ABSTRACT

This paper gives a brief overview of the current design of earthquake resistant structures. The paper presents and summarizes the latest insights regarding the design of earthquake resistant buildings, with the most basic examples and a critical review of the current state of regulations and the future of seismic design. The focus of the paper was to present newer methods such as energy-based design. Current requirements and problems in the design of structures by energy-based design are presented. Shown flow-diagrams serve to understand the procedures more clearly.

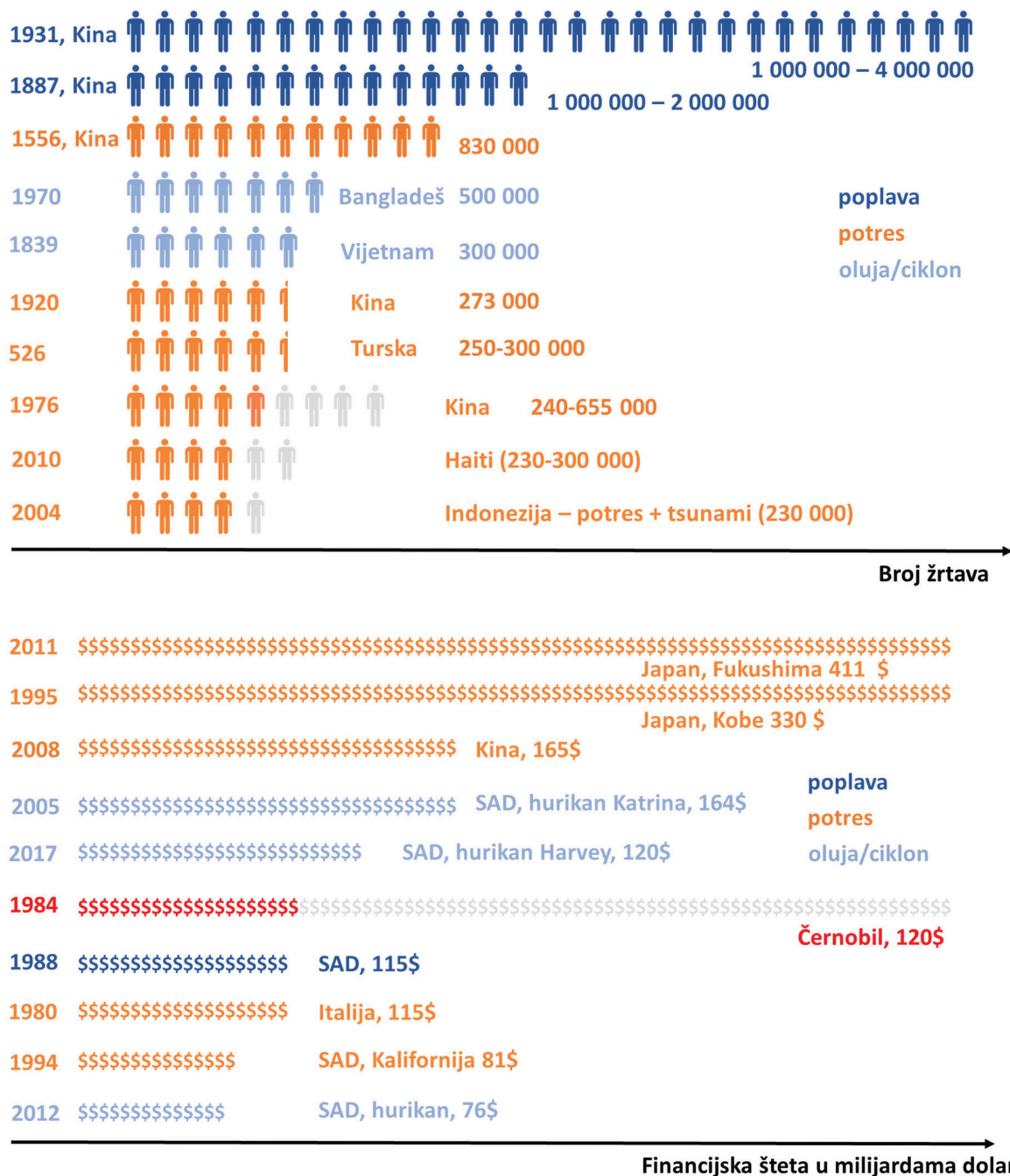
**Keywords:** earthquake, risk, hazard, vulnerability, energy-based design

### 1. UVOD

#### 1. INTRODUCTION

Potres je prirodna, nepredvidiva i razorna pojava koja se javlja u nepravilnim razmacima, a ima ogromne posljedice, kako za okoliš tako i za cijele sustave, gradove i zajednice. Zbog svoje nasumičnosti, nedostatku vidljivih uzroka i jačini destrukcije vrlo često spada u kategoriju elementarnih nepogoda i katastrofa koje za posljedicu imaju i ljudske žrtve. Iako potres nije najrazornija prirodna posljedica u pogledu gubitaka ljudskih života, vrlo jaki potresi na dulji period mogu paralizirati cijela područja i države te onemogućiti normalno funkcioniranje stanovništva na dugi vremenski period. Na slici 1 prikazano je deset najrazornijih prirodnih katastrofa u povijesti s ljudskim žrtvama te uspoređeno s financijskim izdacima za otklanjanje utjecaja nepogode. Vrlo je jednostavno za zaključiti da su upravo potresi ti koji financijski najviše opterećuju i uništavaju cijele zajednice.

Intenzivnije istraživanje potresa i prikupljanje podataka vezanih uz potres i potresno djelovanje rezultirali su otvaranjem potpuno novih grana znanosti (npr. seizmologija), ali i u pomacima u projektiranju potresno sigurnih građevina (Slika 2). Ispitivanja i bilježenja potresa ukazali su i na nepouzdanost i nepredvidljivost budućih potresa na koje konstrukcije moraju biti projektirane. Štete od potresa nastaju kao direktna posljedica dinamičkog odgovora konstrukcije na kretanje tla. Najefikasniji pristup za ograničavanje šteta od djelovanja potresa je projektiranje konstrukcija otpornih na potres. Kako je inženjerska praksa tek u 20. stoljeću počela ozbiljno promatrati potres [1] tako se i metode proračuna postepeno razvijaju i usavršavaju.



Slika 1 Posljedice elementarnih nepogoda a) deset najsmrtonosnijih prirodnih katastrofa, b) deset najsmrtonosnijih prirodnih katastrofa

Figure 1 Natural disasters consequences – comparison of a) human losses (10 deadliest natural disasters) with b) financial costs of disasters (the 10 most expensive natural disasters)

Normativni okvir za projektiranje konstrukcija Eurokod 8 je upravo u procesu nadopune i za cilj ima uvrstiti najnovija saznanja i alternativne pristupe pravilnog projektiranja potresne otpornosti građevinskog fonda. Postepeno se razvijaju metode proračuna, od metoda temeljenim na silama, preko metoda temeljenih na pomacima pa do suvremenih metoda temeljenih na trošenju energije.

Za razliku od uobičajene prakse gdje su djelovanja na konstrukciju pretežito statička (ili kvazistatička), odziv konstrukcije linearan te je proračun više-manje deterministički, kod potresa se javljaju dinamička djelovanja, nelinearni odzivi konstrukcije i nasumična, odnosno stohastička predviđanja i proračuni.



*Slika 2* Povijest istraživanja potresa

*Figure 2* Research of earthquakes throughout the history

Potres je samim time najsloženije od svih djelovanja koje djeluje na konstrukciju te su za sigurno projektiranje građevina otpornih na potres potrebne posebne i drugačije vještine.

Za razliku od većine ostalih dinamičkih utjecaja na konstrukciju, utjecaj potresa nije nametnut na konstrukciju već generiran samom konstrukcijom. Iz navedenog slijedi da će se dvije konstrukcije, smještene u neposrednoj blizini, drugačije ponašati u pogledu deformacija i djelovanja koje na njih djeluju, ovisno o njihovoj masi, krutosti, nosivosti i duktilnosti. Stavljanjem po strani mase, perioda (funkcija mase i krutosti) i prigušenja (glavni izvor prigušenja je disipacija i apsorpcija energije nelinearnim deformacijama), odziv konstrukcije ovisi o složenom odnosu krutosti, nosivosti i duktilnosti. Pojednostavljeno govoreći, krutost diktira periode vibracije, nosivost diktira područja u kojima konstrukcija može pretrpjeti nepovratna oštećenja jer apsorbira i disipira energiju i samim time vodi do neelastičnog duktilnog odziva, a duktilnost, slično kao i prigušenje, diktira periode odziva i smanjenje u amplitudama vibracija. Upravo zbog nepredvidljivosti potresnog djelovanja razvile su se probabilističke metode koje za krajnji cilj imaju sigurno i pouzdano projektiranje novih građevina.

U posljednje vrijeme nekoliko razornih potresa pogodilo je čitave države (Haiti, Nepal), a koji su u pitanje doveli trenutnu praksu u predviđanju potresa i u dimenzioniranju konstrukcija otpornih na potres. U ovom radu prikazane su i sažete najnovije spoznaje u pogledu proračuna potresno otpornih građevina, s najosnovnijim primjerima i kritičkim osvrtom na trenutno stanje propisa i budućnosti projektiranja na potres.

## 2. PROJEKTIRANJE PREMA VAŽEĆIM NORMAMA

### 2. SEISMIC DESIGN ACCORDING TO THE VALID NORMS

Prve smjernice vezane uz potresno djelovanje na konstrukcije pojavile su se početkom 20. stoljeća u Italiji te je potres promatran u vidu zamjenjujuće statičke sile. Dinamički utjecaji uvršteni su u preliminarne verzije seizmičkih normi 50-tih godina, a prvi pokušaji ozbiljnijeg normiranja počeli su 70-tih godina prošlog stoljeća. Trenutni razvoj analitičkih seizmičkih metoda temelji se na postepenom uvrštavanju nelinearnog ponašanja u proračun. Povijest razvoja normi s posebnim osvrtom na najznačajnije norme i propise u visokorazvijenim zemljama opisan je u radu Fajfara [2].

Trenutni svjetski najvažniji seizmički propisi kao npr. Eurokod 8 [3], ASCE-7 [4], NBCC [5], FEMA [6] još uvijek su u velikom dijelu orijentirani na proračun seizmičkog djelovanja na osnovi ekvivalentnih statičkih sila, ali s opcijom korištenja i kompliciranijih metoda kao što su metode postepenog guranja ili numeričkim integracijama u vremenskim intervalima (eng. Time history analize).

Osnovni ciljevi pravilnog projektiranja građevinskih konstrukcija na djelovanje potresa su: zaštita ljudskih života, kritična postrojenja moraju ostati u funkciji te ograničenje šteta.

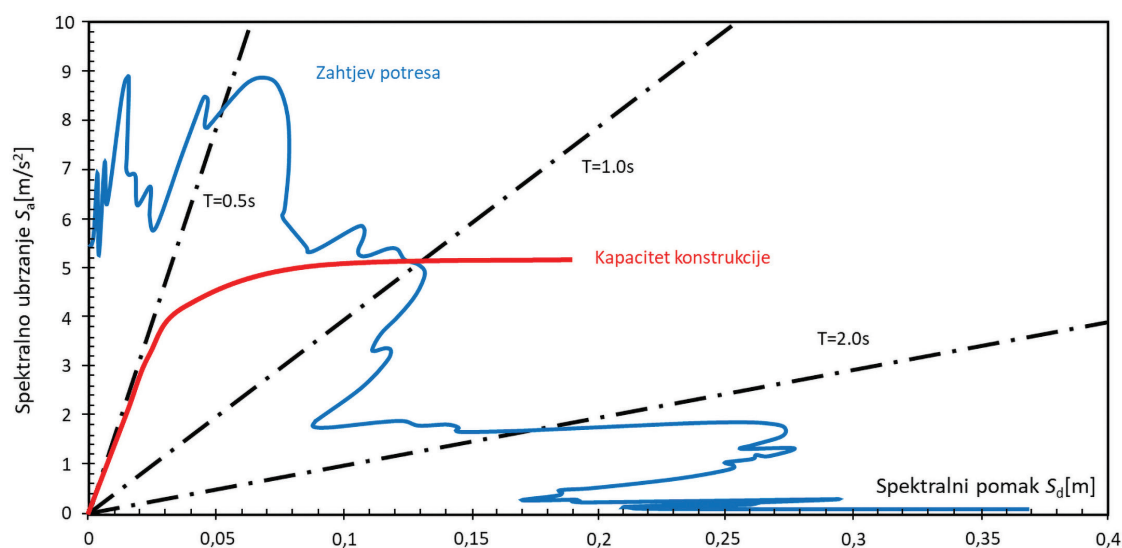
Prema Eurokodu 8, postoje četiri različite metode proračuna: linearna analiza primjenom ekvivalentnog statičkog djelovanja, modalna analiza spektrima odziva, nelinearna statička

metoda postupnog guranja, nelinearna dinamička analiza u vremenu. Potrebno je pronaći ravnotežu između zahtijevane preciznosti i kompleksnosti analize što vrlo često predstavlja problem u praksi. Iako su linearne analize široko prihvaćene u inženjerskoj praksi, vrlo često se događaju slučajevi krive interpretacije numeričkih rezultata dobivenih komercijalnim programskim paketima. Jedan od najučestalijih problema je npr. neaktivacija 90% masa prilikom korištenja modalne analize. Jedan od osnovnih zadataka u analizi građevina na utjecaje potresa je usporedba između zahtjeva koji proizlaze iz opterećenja potresom i kapaciteta nosive konstrukcije. Kapacitet konstrukcije mora biti takav da minimalno može ispuniti sve zahtjeve koji proizlaze iz mjerodavnog intenziteta potresa. Na slici 3 prikazani su dvije spektralne veličine, spektralno ubrzanje većemo za zahtjev potresa i potrebnu nosivost, a spektralni pomak za deformabilnost konstrukcije. Ako krivulja kapaciteta prodire kroz krivulju zahtjeva, promatrana građevina će izdržati predviđeni potres (uz manja ili veća oštećenja, ovisno o veličini nelinearnih deformacija).

Kako je već spomenuto, potres moramo promatrati preko pojmova dinamika, nelinearnost i stohastika. Prva dva pojma donekle su uvedena u propise ali još uvijek je u uporabi deterministički proračun temeljen na povratnom periodu.

Osnovna metoda u uporabi je modalna analiza, a vrlo često za jednostavnije objekte koristi i metoda ekvivalentne sile. Metode postupnog guranja imaju određena ograničenja i koriste se većinom za postojeće konstrukcije jer omogućuje dodatnu informaciju o očekivanom odzivu konstrukcije te daje uvid u konstrukcijske aspekte koji kontroliraju ponašanje tijekom jakih potresa. U Eurokodu 8 koristi se N2 metoda postupnog guranja [8,9].

Eksplisita nelinearna metoda postoji u propisima, ali nije obavezna za uporabu. Trenutna najnaprednija deterministička metoda je nelinearna dinamička analiza u vremenu koja se koristi za građevine specijalne namjene i objekte od posebnog značaja. Osnovne prednosti su mogućnost modeliranja nelinearnog ponašanja materijala, geometrijske nelinearnosti, definiranje kontakata, prigušenja, identifikacija prostornih distribucija neelastičnosti, ali ima i značajne nedostatke kao što su vrlo velik broj pretpostavki u svim fazama projektiranja, od ubrzanja tla do nelinearnog modeliranja te uzima puno vremena za proračun. Zbog svoje kompleksnosti, vrlo rijetko se koristi. Metoda koja bi u obzir uzela tri ključna čimbenika (dinamika, neelastičnost i nasumičnost) je trenutno prekomplikirana za normalnu inženjersku praksu, ali postoje znanstveni pomoci ka prilagodbi složenih probabilističkih proračuna na prihvatljiv način za inženjere.



Slika 3 Kapacitivno projektiranje (modificirani dijagram iz [7])

Figure 3 Capacity design (modified from [7])



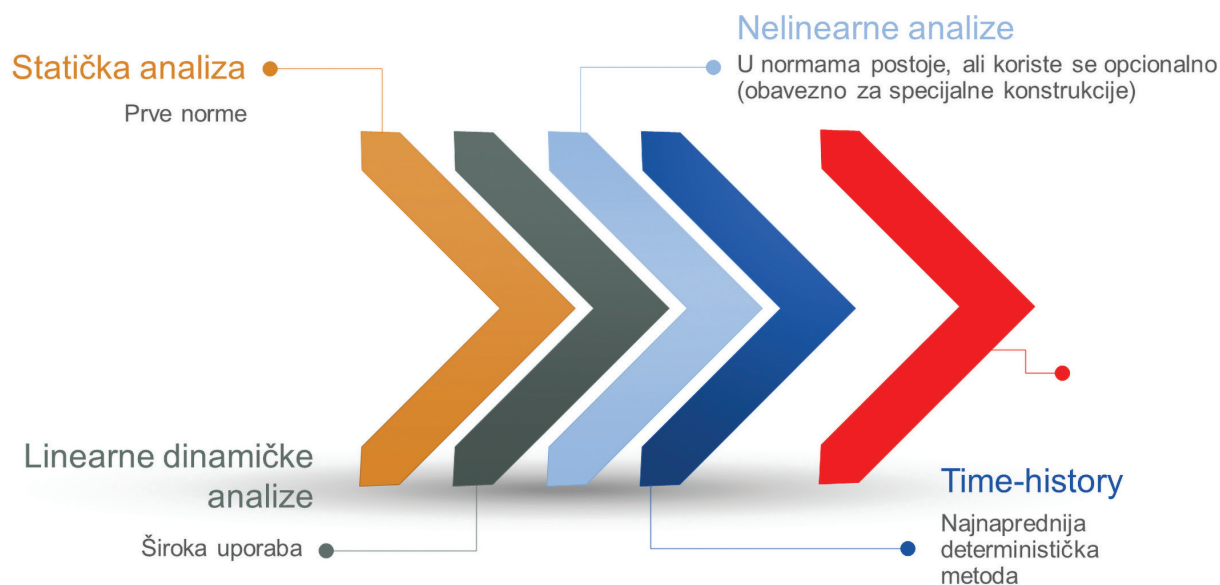
Kako prilikom projektiranja potresa u sam proces uvodimo niz nepouzdanosti (ubrzanje tla, odgovor konstrukcije, modeliranje konstrukcije) u budućnosti će eksplicitni probabilistički pristup koji u obzir uzima prekoračenja graničnih stanja vjerojatno biti implementiran u postojeće norme. Trenutno su probabilističke nepouzdanosti uzete u obzir u analizi seizmičkog hazarda i definiranju različitih koeficijenata sigurnosti, gdje zapravo eksplicitni probabilistički pristup, koji omogućuje kvantificiranje rizika, još ne postoji (uz izuzetak dijela američkih normi). Tzv. „Performance-based“ projektiranje [10,11] ima za cilj poboljšati odlučivanja u procjeni seizmičkog rizika preko novih metoda proračuna i ocjene stanja konstrukcija koje imaju probabilističku osnovu. Sama metoda ne odnosi se na to kako se konstrukcija mora izgraditi, već ukazuje na to kako se sama konstrukcija i njeni dijelovi moraju ponašati kada je konstrukcija izgrađena. Tj., metoda je usredotočena na ishod odnosno ponašanje građevine, a ne na specifični način projektiranja, metode gradnje ili vrste materijale koji će se koristiti za postizanje željenog ishoda. Međutim, kako naprednije metode vrlo često nailaze na opiranje velikog dijela inženjera, ali i dijela znanstvene zajednice, vrlo je vjerojatno da suvremene metode procjene potresne otpornosti neće biti unutar norme kao obavezne, već kao jedne od metoda koje se mogu koristiti.

Međutim, i ta mala prilagodba veliki je korak ka korak ka novijem i vjerojatno pouzdanijem projektiranju potresno sigurnih konstrukcija u budućnosti.

### 3. ENERGETSKI PRISTUP

#### 3. ENERGY-BASED DESIGN

Jedan od ciljeva znanstvenih istraživanja je razvoj metoda za povećanje otpornosti konstrukcija i prilagodba konstrukcija nametnutim djelovanjima. Što se tiče seizmičke opasnosti, u proteklom desetljeću su postignuti značajni rezultati u pogledu razumijevanja potresnog djelovanja na konstrukcije, ali nedavni događaji ističu da su socijalne, ekonomske i ekološke posljedice u urbanim područjima pogođenim potresima još uvijek vrlo velike. Prvi pokušaj uzimanja u obzir potresa kao djelovanja u potresnom inženjerstvu je bio preko metoda temeljenih na silama. Smatra se da potres izaziva sile koje djeluju na konstrukcijske elemente, koji moraju biti dimenzionirani tako da im se odupru. Zbog ekonomskih razloga, proračunske sile su manje od onih za koje je potrebno da konstrukcija ostane u elastičnom području za vrijeme potresa. Drugim riječima, dozvoljava se ozbiljnije oštećenje, ali isto oštećenje nije moguće kvantificirati niti točno odrediti.



Slika 4 Postojeće metode proračuna i budući trendovi

Figure 4 Seismic design methods and future development of codes

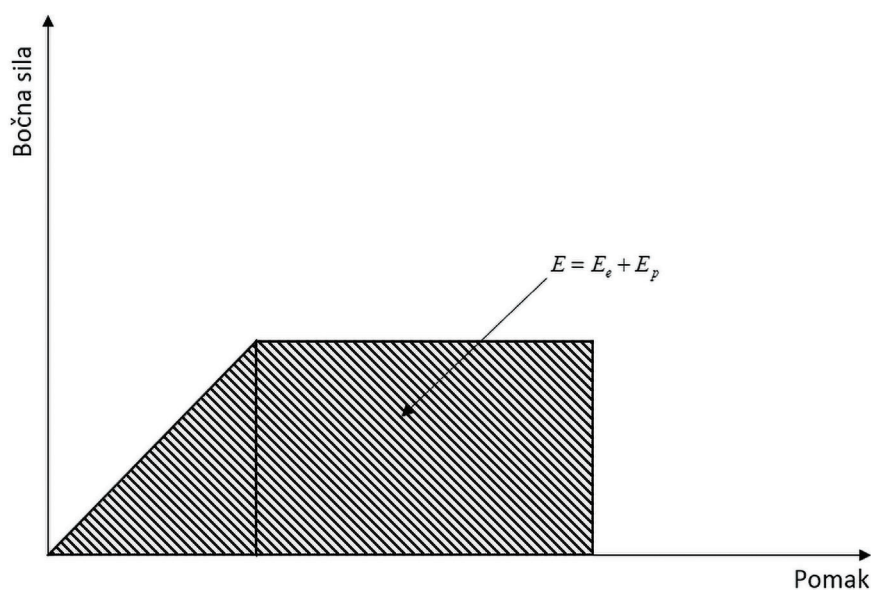
Ujednačena procjena seizmičkog rizika povezana sa konstruktivnim i nekonstruktivnim oštećenjima nije moguća pomoću metoda temeljenih na silama.

Zbog niza nedosljednosti metoda temeljenih na silama 90-ih godina dolazi do razvitka metoda temeljenih na pomaku [12]. Takve metode kvantificiraju oštećenja u vidu maksimalne plastične deformacije, ali izbjegavaju direktnu procjenu kumulativne plastične deformacije, što je još jedna važna značajka oštećenja. Zapravo, kumulativne plastične deformacije ključne su za procjenu i obnovu starih građevina te proračunu novih konstrukcija na dugotrajno gibanje tla. Metode temeljene na pomaku sadrže nedostatke povezane s uporabom nelinearnih statičkih postupaka postupnog guranja, elastičnog spektra odgovora i ekvivalentnog viskoznog prigušenja.

Potreba da se u obzir uzme smanjenje štete i prevencija kolapsa dovela je do toga da se metode temeljene na silama pokušaju zamijeniti učinkovitijim metodama, kao što su energetske metode i metode temeljene na pomaku. Metode temeljene na pomaku usvojene su širom svijeta, ali sadrže neke značajne nedostatke kao što su nemogućnost prikaza kumulativne štete kao i određene metodološke nedosljednosti povezane s verzijom koja je uvedena u postojeće građevinske norme [13]. Kako bi ti nedostaci bili riješeni, u nekoliko posljednjih godina proučavaju se alternativni pristupi, a jedan od novijih pristupa je energetska pristup.

Prvi prijedlog energetske metode projektiranja u potresnom inženjerstvu je dao Housner [1]. Predložio je jednadžbu za proračun utrošene energije temeljene na spektru odziva brzine i povezoao je s konstrukcijskim oštećenjima. Na temelju Housnerove ideje, Kato i Akiyama [14] razvili su osnovu za energetska metoda koja se bavila oštećenjima građevina uzrokovana potresom. Temeljni uvjet pri proračunu konstrukcije, gdje djelovanje mora biti manje od otpornosti vrijedi i u ovom slučaju, tj. seizmički zahtjev (seismic demand) mora biti manji od kapaciteta konstrukcije (capacity) [15]. U jednadžbu kapaciteta konstrukcije spada suma kinetičke energije, disipirana energija preko viskoznih prigušivača, histerezna energija te energija koja se troši deformiranjem.

U seizmički zahtjev spadaju djelovanja na konstrukciju, u ovom slučaju seizmički utjecaji potresa na konstrukciju. Na kraju odgovora konstrukcije, kinetička i potencijalna energija teže u nulu, dok je histerezna energija usko povezana s kumulativnim oštećenjem. Pretpostavka je da se jedan dio energije unesene potresom troši elastičnim ponašanjem, dok se preostali značajni dio troši neelastičnim ponašanjem konstrukcije. Dakle, cilj je da energija koja se može potrošiti elastičnim i neelastičnim načinom bude veća nego energija vanjskog djelovanja na konstrukciju, tj. potresa. Disipirana energija može se prikazati kao površina ispod dijagrama sila – pomak, kao na slici 5 (elastično i plastično ponašanje konstrukcije).



*Slika 5 Disipacija energije  
prilikom seizmičkih utjecaja*

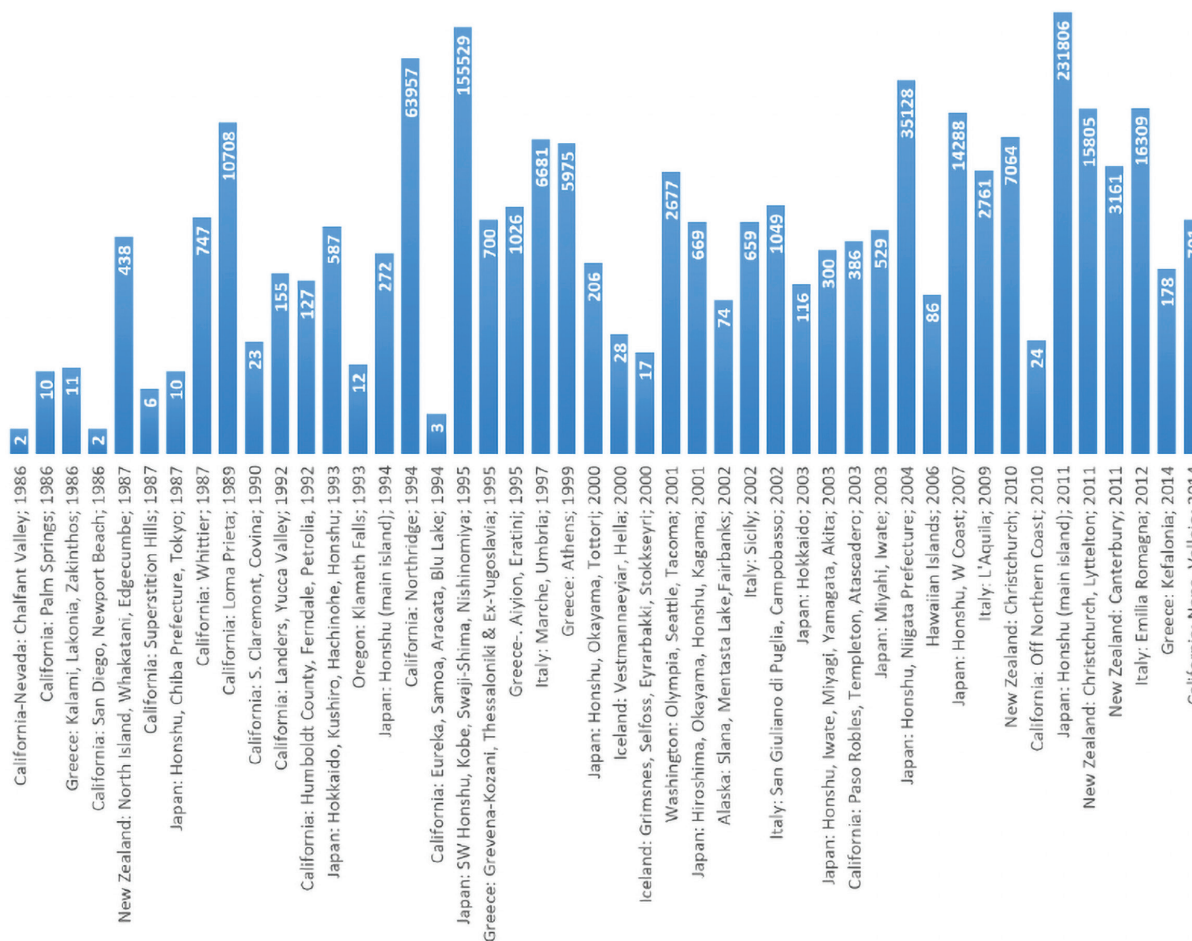
*Figure 5 Dissipation of the  
energy during seismic actions*

Tok energije (tj. raspodjela energije po katovima) realnog neelastičnog sustava s više stupnjeva slobode nije dovoljno istražena. Najveća nepoznanica, odnosno nedostatak znanja je energetska kapacitet elemenata i sustava. Postojeći neriješeni problemi također su prepreka za razvoj učinkovitijih strategija za proračun prikladnih seizmičkih uređaja. Također, važeća europska norma Eurokod 8, nije usvojila energetska pristup kao jedan od načina proračuna konstrukcije.

Usporedno s metodama temeljenim na pomaku, energetska pristup je temeljen na energetskoj ravnoteži građevine. Dosadašnje studije su pokazale da energetska pristup može riješiti problem ograničenja metoda temeljenih na pomaku, uzimajući u obzir kumulativna oštećenja. Postojeće građevine su posebno osjetljive na kumulativna oštećenja te se stanje dodatno pogoršava starenjem i propadanjem. Najvažniji preostali izazovi za implementaciju energetske metode u postojeći normativni okvir su [16]:

1. Procjena energetske kapaciteta elemenata i sustava
2. Predviđanje raspodjele seizmičke energije u konstrukciji pri prirastu neelastičnog odziva
3. Procjena količine gibanja koja se disipira prigušenjem
4. Doprinos energetskeo jednadžbi ravnoteže od potencijalne energije svih težina oslonjenih na vertikalne elemente s velikom dužinom
5. Energetska usmjereno projektiranje sustava za disipaciju energije ili drugih metoda zaštite
6. Najbolji način implementacije energetske principa u postojeće norme

Potrebno je istaknuti da iako je u posljednjim desetljećima postignut ogroman napredak u vidu zaštite od potresa, društveno – ekonomski gubitci, kao i ekološke posljedice uzrokovane nedavnim potresima u razvijenim zemljama su i dalje vrlo velike. Na slici 6 je prikazana procijenjena šteta (milijuni dolara) od potresa magnitude 5.5 ili više.



Slika 6 Procijenjena šteta (milijuni dolara) od potresa magnitude 5.5 ili više [16]

Figure 6 Estimated damage (millions of dollars) from an earthquake of magnitude 5.5 or greater [16]

Budućnost projektiranja potresno otpornih konstrukcija temelji se upravo na energiji, odnosno prihvatu seizmičkog intenziteta sa čim većom disipacijom potresne energije. Iako osnovni koncepti i metode postoje, potrebno ih je doraditi i poboljšati.

Trenutni proces revizije konstrukcijskih Eurokodova temelji se na poboljšanju metoda proračuna, odnosno na potrebi za boljim postupcima za procjenu seizmičkog rizika i smanjenje potresnih utjecaja na okolinu, odnosno građevinski fond [17]. Inovativni koncepti o pasivnoj konstrukcijskoj zaštiti preko uređaja za disipaciju energije predmet su istraživanja brojnih istraživača i metode proračuna se intenzivno razvijaju kako bi bile implementirane u novu generaciju Eurokoda. Upravo potonje čini energetska metoda za smanjenje rizika još bitnijom, jer je ona jedini racionalni način za najučinkovitije projektiranje energetski disipativnih konstrukcija.

Glavni ciljevi energetske metode usmjereni su na:

1. Seizmički intenzitet temeljen na količini energije
2. Seizmički zahtjev i odgovarajuće parametre zahtjeva konstrukcije temeljene na energiji
3. Energetski kapacitet konstrukcije
4. Smanjenje rizika temeljeno na energetskim metodama

#### Seizmički intenzitet temeljen na količini energije

Posebnu pažnju je potrebno pridodati dosadašnjim problemima, kao utjecaju neelastičnog ponašanja (npr. duktilno i neduktilno ponašanje). Umjetno stvorene seizmičke zapise potrebno je revidirati.

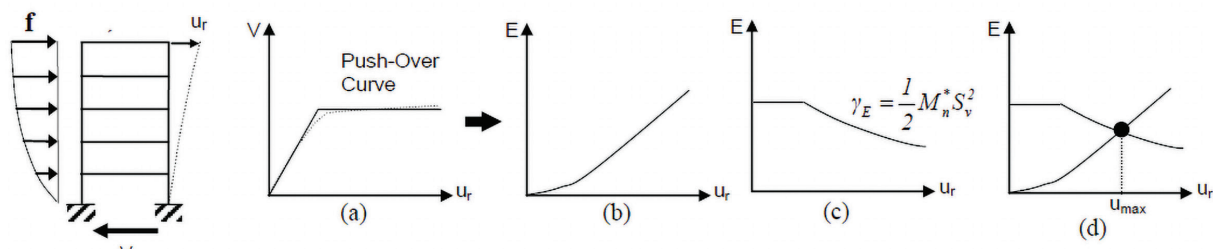
Intenzitete trošenja energije potrebno je usporediti u skalarnom i vektorskom obliku zajedno s metodama predviđanja akceleracije tla.

#### Seizmički zahtjev i odgovarajuće parametre zahtjeva konstrukcije temeljene na energiji

Seizmički zahtjevi moraju biti usredotočeni na energetska ocjenjivanje zgrada.. Procjena seizmičkih zahtjeva uključuje predviđanje raspodjele energije plastičnih deformacija. Energetska projektiranje također mora biti usredotočeno i na konstrukcijske elemente, nekonstrukcijske elemente te na disipatore energije. Raspodjelu energije plastičnih deformacija po katovima (tok energije) potrebno je istraživati ispitivanjem načina nastanka oštećenja, osjetljivost s obzirom na seizmičke ulazne podatke i neelastično ponašanje kao i na slučajne i predviđene nepouzdanosti. Potrebno je provjeriti viskozno prigušenje kako bi se izbjegle fiktivne sile prigušenja kao posljedica pogrešnog predviđanja neelastičnog odgovora.

#### Energetski kapacitet konstrukcije

Vezano uz mjere energetske kapaciteta, veliki broj statičkih, cikličkih i dinamičkih ispitivanja provedenih proteklih godina potrebno je sistematizirati i kvalitativno ocijeniti. Što se tiče kolapsa konstrukcijskih sustava, naširoko korišteni nelinearni postupci temeljeni na silama i pomacima se ne mogu nositi sa stvarnim mehanizmima otkazivanja. Zapravo, trenutne nelinearne statičke metode temeljene na silama ne uzimaju u obzir raspodjelu sila i mehanizme disipacije energije, dok metode temeljene na pomacima potcjenjuju deformacije u slabijim područjima konstrukcije.



**Slika 7** Predložena metoda energetske pristupa: (a) pushover krivulja, (b) krivulja kapaciteta, (c) krivulja zahtjeva, (d) određivanje zahtjevanog pomaka [18]

**Figure 7** Energy based design: (a) pushover curve, (b) capacity curve, (c) demand curve (d) determining the required displacement [18]



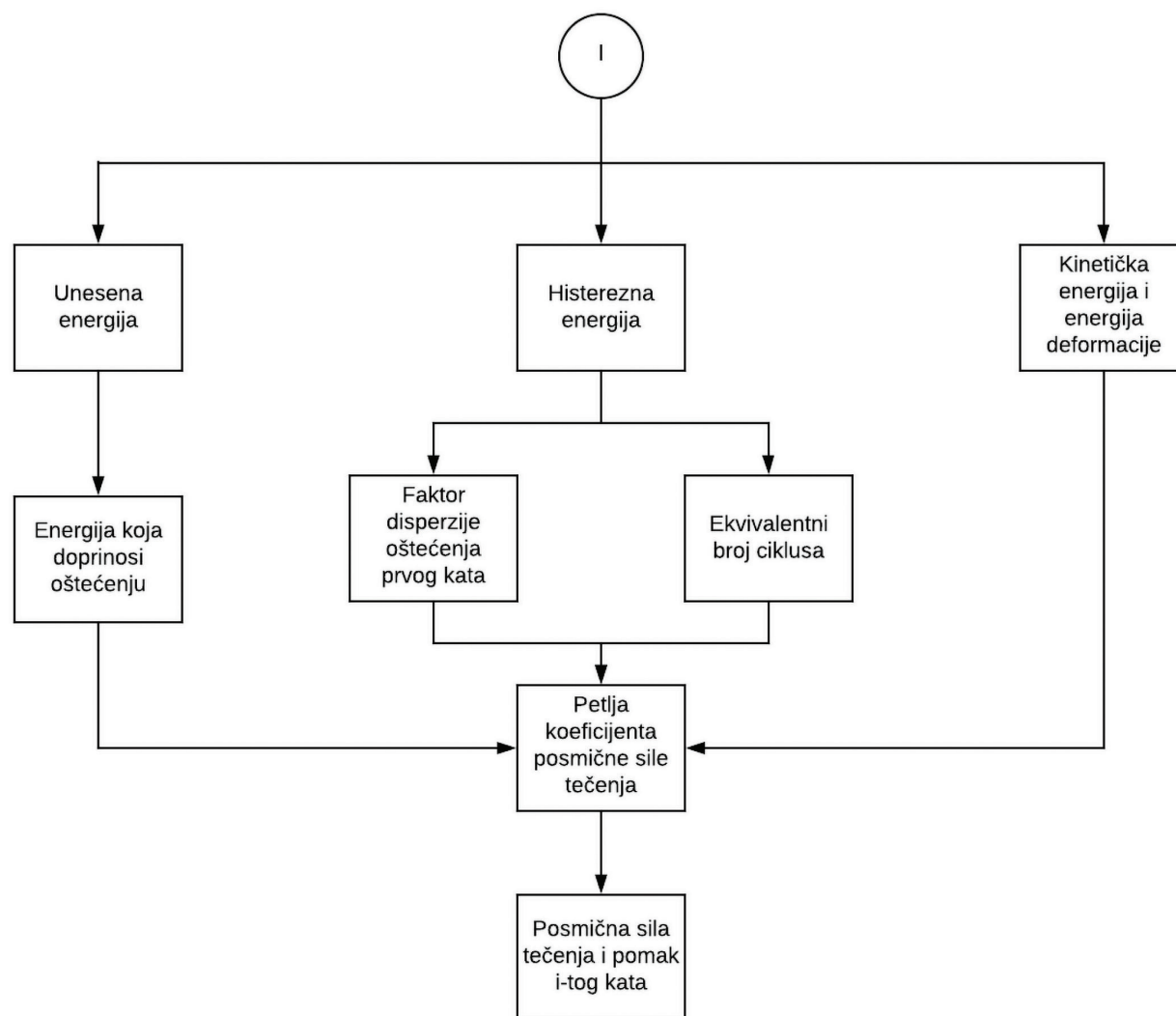
Zbog tog razloga, na razini konstrukcije, potrebno je razviti nove nelinearne metode temeljene na energiji. Također, želi se izbjeći proizvoljni odabir podova ili krova kao definiciju upravljajućeg parametra u krivulji kapaciteta, a odnosit će se na pojedinačne ili višemodalne analize. Potrebno je razviti i nove postupke za procjenu kapaciteta kolapsa u smislu konačne energije disipacije iz dosadašnjih saznanja o konačnoj sposobnosti disipacije energije konstruktivnih elemenata i toka energije.

Točka sjecišta krivulje kapaciteta (slika 7 (b)) i krivulje zahtjeva (slika 7 (c)) određuje očekivanu razinu odgovora konstrukcije. Parametri odziva koji su potrebni se mogu izvući iz presjeka tih dviju krivulja, kao što je prikazano na slici 7 (d).

### Smanjenje rizika temeljeno na energetskim metodama

U svrhu ublažavanja rizika energetskim pristupom, zadatak je baviti se projektiranjem uređaja za disipaciju energije kod zgrada. Trenutno su metode temeljene na silama i pomacima dobro uhodane metode za projektiranje i smanjenje rizika u području potresnog inženjerstva. Ne očekuju se izuzetna poboljšanja na tom području, dok s druge strane energetske metode imaju izniman potencijal jer su prethodne studije već pokazale da se postojeći problemi mogu riješiti pomoću njih.

Na slici 8 prikazan je dijagram toka proračuna konstrukcije energetskim pristupom.



*Slika 8* Dijagram toka proračuna po energetskom principu [19]

*Figure 8* The flowchart for a energy-based design proposed by [19]

Grede i stupovi određuju se pomoću pravila za plastični proračun konstrukcije. Pojava plastičnih zglobova pretpostavlja se na krajevima greda i u dnu stupova. Plastični momenti na krajevima greda dobiveni su preko izraza:

$$M_{pbi} = \beta_i M_{pbr}$$

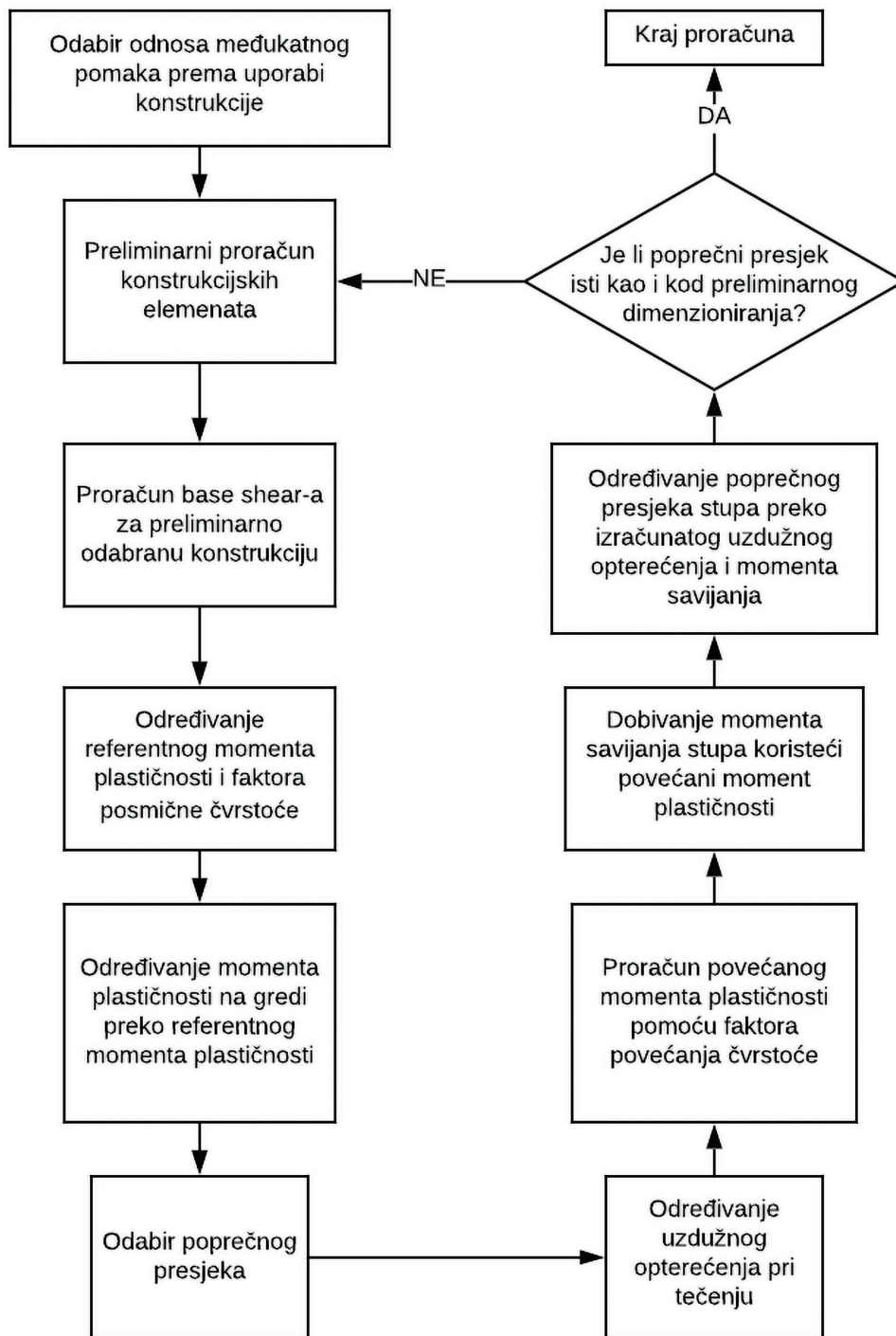
Gdje su:

$\beta_i$  – faktor posmične čvrstoće

$M_{pbr}$  – referentni moment plastičnosti

Dimenzioniranje stupova se vrši nakon dimenzioniranja greda. Plastični moment na dnu stupa  $M_{pcj}$  dobije se množeći  $M_{pbi}$  s faktorom povećanja čvrstoće  $\xi$ .

(1)

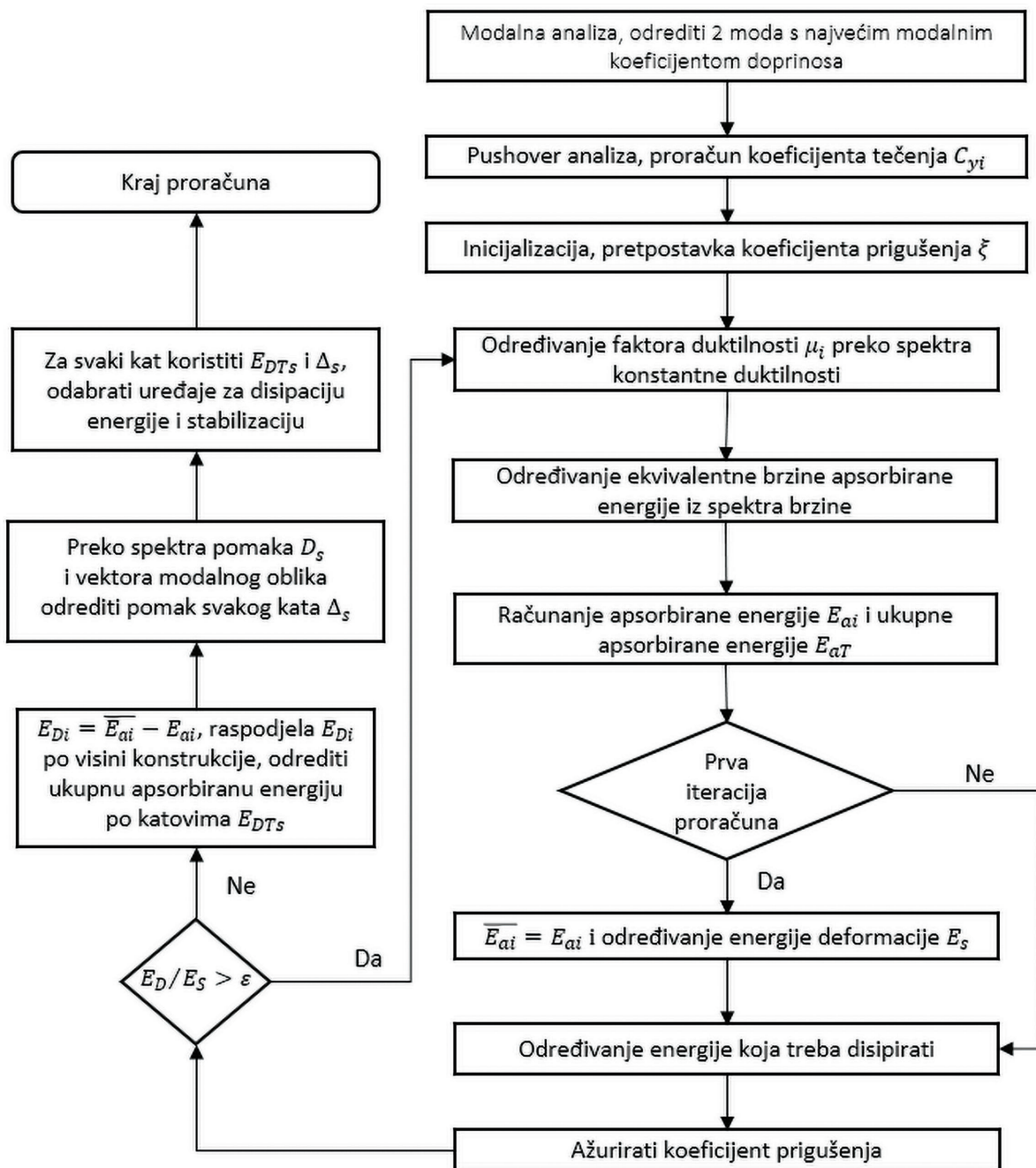


Slika 9 Dijagram toka proračuna po energetsom principu [20]

Figure 9 The flowchart for a energy-based design proposed by [20]

Slično istraživanje na čeličnoj konstrukciji proveli su i Enderami i ostali [21]. Primjer verifikacije energetske metode na stvarnom primjeru seizmičke obnove postojeće konstrukcije dali su Ternezi i ostali [22], a primjer seizmičkog ojačanja armiranobetonske konstrukcije seizmičkim damperima, uz evaluaciju energetske metode predstavljen je u radu [23].

Habibi [24] je predstavio energetska metodu za seizmička ojačanja s pasivnim energetskim disipatorima (Slika 3-6). Pri proračunu se upotrebljava modalna i pushover analiza te je potrebno odrediti apsorbiranu energiju u konstrukciji. Na temelju pomaka katova  $\Delta_s$  dobivenih preko spektra pomaka te ukupne apsorbirane energije dimenzioniraju se uređaji za disipaciju energije i stabilizacije konstrukcije.



Slika 10 Dijagram toka energetske metode za seizmička ojačanja s pasivnim energetskim disipatorima [24]  
 Figure 10 The flowchart for a energy-based design with passive energy dissipators proposed by [24]

## 5. ZAKLJUČAK

### 5. CONCLUSION

Iako postoji značajan napredak u modeliranju i predviđanju potresa i posljedica potresnog djelovanja, još uvijek postoji nekoliko inženjerskih metoda za proračun konstrukcija. Sve metode uključene u trenutne propise imaju određena ograničenja ili se ne mogu primijeniti za određenu vrstu konstrukcija. Prilikom potresa oslobađa se ogromna količina energije koju konstrukcija mora prihvatiti i potrošiti. Razvijaju se metode i načini bolje disipacije energije u samim nosivim konstrukcijama, ali isto i tako metode proračuna temeljene na utrošenoj energiji. Uz postojeće metode, energetski pristupi objašnjeni u ovom radu uvelike bi pridonijeli boljem razumijevanju potresa. Od metoda temeljenih na silama, preko metoda temeljenih na pomacima, novije metode trebale bi biti zasnovane na trošenju seizmičke energije unutar samih konstrukcija. Iako postoje određene inicijative, ova metoda je još uvijek relativno nepoznata. Budućnost projektiranja potresno otpornih konstrukcija zavisi o mnogo čimbenika, a jedan od njih je i pokušaj razrade čim pouzdanije metode u pogledu manjih ograničenja, što metoda temeljena na trošenju energije svakako jest.

## 6. ZAHVALE

### 6. ACKNOWLEDGMENTS

Rad na ovom radu financiran je znanstvenim projektom "Seismic behaviour of multi-storey buildings" čiji osnovni cilj je bio skupiti i usporediti nove metode proračuna potresno otpornih konstrukcija. Projekt je financiran od strane UKF-a (Unity through Knowledge Fund).

*Authors Iztok Šušteršič and Igor Gavrić gratefully acknowledge receiving funding from programme Horizon 2020 Framework Programme of the European Union; H2020 WIDESPREAD-2-Teaming: (#739574) and the Republic of Slovenia as well as funding received from the ForestValue Research Programme which is a transnational research, development and*

*innovation programme jointly funded by national funding organisations within the framework of the ERA-NET Cofund "ForestValue – Innovating Forest based bioeconomy". The results of the Slovenian part of the project were co-financed by Ministry of Education, Science and Sport of the Republic of Slovenia. Iztok Šušteršič would also like to thank the Slovenian Research Agency ARRS for funding the bilateral project BI-US/19-21-014.*

## 7. REFERENCE

### 7. REFERENCES

- [1.] Housner GW. 2 Historical view of earthquake engineering. Int. Geophys., 2002. doi:10.1016/S0074-6142(02)80205-4.
- [2.] Fajfar P. Analysis in seismic provisions for buildings: Past, present and future. vol. 46. 2018. doi:10.1007/978-3-319-75741-4\_1.
- [3.] European Committee for Standardization (CEN), EN 1998-1:2004, Eurocode 8, Design of structures for earthquake resistance, part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings, CEN, Brussels, The Netherlands, 2004. n.d.
- [4.] American Society of Civil Engineers (ASCE), ASCE 7-16, Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures, Reston, Virginia, USA, 2017. n.d.
- [5.] National Research Council of Canada (NRCC), National Building Code of Canada 2015, Associate Committee on the National Building Code, Ottawa, Canada, 2015. n.d.
- [6.] FEMA (2012) Next-generation methodology for seismic performance assessment of buildings, prepared by ATC for FEMA, FEMA P-58. Federal Emergency Management Agency, Washington, DC. n.d.
- [7.] Fardis M. Seismic Design of Concrete Buildings to Eurocode 8. 2015. doi:10.1201/b18097.
- [8.] Fajfar P. A Nonlinear Analysis Method for Performance-Based Seismic Design. Earthq Spectra 2000. doi:10.1193/1.1586128.



- [9.] Fajfar P, Gašperšič P. The N2 method for the seismic damage analysis of RC buildings. *Earthq Eng Struct Dyn* 1996. doi:10.1002/(SICI)1096-9845(199601)25:1<31::AID-EQE534>3.0.CO;2-V.
- [10.] Ghobarah A. Performance-based design in earthquake engineering: State of development. *Eng Struct* 2001. doi:10.1016/S0141-0296(01)00036-0.
- [11.] Priestley MJN. Performance based seismic design. *Bull New Zeal Soc Earthq Eng* 2000. doi:10.4324/9781315733722-4.
- [12.] Powell GH. Displacement-Based Seismic Design of Structures. *Earthq Spectra* 2008. doi:10.1193/1.2932170.
- [13.] Borzi B, Calvi GM, Elnashai AS, Faccioli E, Bommer JJ. Inelastic spectra for displacement-based seismic design. *Soil Dyn Earthq Eng* 2001. doi:10.1016/S0267-7261(00)00075-0.
- [14.] Akiyama H. A prospect for future earthquake-resistant design. *Eng Struct* 1998. doi:10.1016/S0141-0296(97)00016-3.
- [15.] Manfredi G. Evaluation of seismic energy demand. *Earthq Eng Struct Dyn* 2001. doi:10.1002/eqe.17.
- [16.] COST, European network for energy-based seismic assessment, design and risk mitigation. Project proposal. n.d.
- [17.] Tezcan SS, Bal IE, Gulay FG. Seismic Risk Assessment and Retrofitting. 2009. doi:10.1007/978-90-481-2681-1.
- [18.] Leelataviwat S, Saewon W, Goel SC. An energy based method for seismic evaluation of structures. 14th World Conf Earthq Eng World Conf Earthq Eng 2008.
- [19.] Donaire-Avila J, Benavent-Climent A, Lucchini A, Mollaioli F. Energy-Based Seismic Design Methodology : A preliminary approach. 16th World Conf. Earthq. Eng. Santiago, Chile, 9-13 January., 2017.
- [20.] Düzgün M, Bojorquez E, Ruiz SE, Teran-Gilmore A. Energy-based Design of Steel Structures According to the. *Eng Struct* 2012;23:1573–93.
- [21.] Enderami SA, Beheshti-Aval SB, Saadeghvaziri MA. New energy based approach to predict seismic demands of steel moment resisting frames subjected to near-fault ground motions. *Eng Struct* 2014;72:182–92. doi:10.1016/j.engstruct.2014.04.029.
- [22.] Terenzi G, Costoli I, Sorace S, Spinelli P. Verification of an energy-based design procedure for seismic retrofit of a school building. *Procedia Struct Integr* 2018;11:161–8. doi:10.1016/j.prostr.2018.11.022.
- [23.] Benavent-Climent A, Mota-Páez S. Earthquake retrofitting of R/C frames with soft first story using hysteretic dampers: Energy-based design method and evaluation. *Eng Struct* 2017;137:19–32. doi:10.1016/j.engstruct.2017.01.053.
- [24.] Habibi A, Chan RWK, Albermani F. Energy-based design method for seismic retrofitting with passive energy dissipation systems. *Eng Struct* 2013;46:77–86. doi:10.1016/j.engstruct.2012.07.011.

## AUTORI · AUTHORS

### • Mislav Stepinac

Završio je 2008. godine Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, gdje je i 2015. godine obranio doktorsku disertaciju na Katedri za drvene konstrukcije. Od 2019. radi kao docent na Katedri za betonske i zidane konstrukcije gdje je nositelj kolegija Potresno inženjerstvo i Montažne armiranobetonske konstrukcije. Aktivno sudjeluje u procjenama stanja svih vrsta postojećih konstrukcija, a posebno zidanih, drvenih i građevina kulturne baštine. Aktivan je u izradi nove generacije Eurokoda, član nekoliko COST akcija i aktivni član u HZN-u. Ima iskustva i u modeliranju konstrukcija snimljenih dronovima. Tijekom svoga rada objavio je 11 izvornih znanstvenih radova u časopisima te preko 30 radova na konferencijama s međunarodnom recenzijom.

### Korespondencija · Correspondence

mstepinac@grad.hr

**• Filip Borak**

Završio je 2019. godine Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu. Za vrijeme školovanja stručno se usavršavao na Institut für Holzbau und Holztechnologie, Graz (Austrija). Od 2019. radi u Stuttgartu u projektnom birou f2k Ingenieure. Bavi se projektiranjem čeličnih, drvenih i betonskih konstrukcija. Od ostalih znanja i vještina izvrsno poznaje programske pakete: AutoCAD, Autodesk Robot, Dlubal RFEM, SCIA Engineer, CSI ETABS, CSI SAP i Sofistik. i brojne druge alate vezane za modeliranje konstrukcija.

**• Iztok Šušteršič**

Voditelj je istraživačke skupine Održiva gradnja s obnovljivim materijalima u Centru izvrsnosti InnoRenew CoE i docent je na Univerzi na Primorskem, Slovenija. Iztok ima veliko iskustvo i u znanstvenom i u praktičnom radu koje je stekao na Sveučilištu u Ljubljani, kao i projektnom uredu CBD d.o.o. Projektirao je preko 200 građevina i radio ili vodio 10 nacionalnih i međunarodnih istraživačkih projekata na temu drvenih i hibridnih konstrukcija te potresnih analiza. Aktivan je u izradi nove generacije Eurokoda, član nekoliko COST akcija i predsjednik drvenih konstrukcija u „Strategic research-innovation partnerships“. Autor je preko 30 članaka i patenata.

**• Igor Gavrić**

Doktorirao je 2013. na University of Trieste, Italija, s temom seizmičko ponašanje CLT građevina. Nakon doktorata radi kao poslijedoktorand na University of Sassari, Italija i FPInnovations u Vancouveru, Kanada. Također, ima i 5 godina iskustva u radu u struci, ponajviše u projektiranju i izvedbi drvenih konstrukcij. Trenutno radi kao istraživač u Centru izvrsnosti InnoRenew CoE (grupa: Održiva gradnja s obnovljivim materijalima) i docent je na Univerzi na Primorskem, Slovenija. Aktivan je u izradi nove generacije Eurokoda, član je CEN/TC250/SC8/WG3 vezano za Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija – drvene konstrukcije