

# Dijagrami seizmičke otpornosti zgrada spomeničke baštine

---

**Morić, Dragan**

*Source / Izvornik:* **Građevinar, 2002, 54, 201 - 209**

**Journal article, Published version**

**Rad u časopisu, Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:133:837534>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-23**



GRAĐEVINSKI I ARHITEKTONSKI FAKULTET OSIJEK  
Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

*Repository / Repozitorij:*

[Repository GrAFOS - Repository of Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek](#)



# Dijagrami seizmičke otpornosti zgrada spomeničke baštine

Dragan Morić

## Ključne riječi

seizmički proračun, seizmička otpornost, spomenička baština, stare zgrade stropna konstrukcija, relativni međuodnosi, mehanizam sloma

## Key words

seismic design, seismic resistance, architectural heritage, old buildings, floor structure, correlations, failure mechanism

## Mots clés

calcul sismique, résistance sismique, patrimoine historique, bâtiments anciens, plancher, relations réciproques relatives, mécanisme de rupture

## Ключевые слова

сейсмический расчёт, сейсмическая устойчивость, культурное наследие, конструкция перекрытия, относительные взаимные отношения, механизм разрушения

## Schlüsselworte

seismische Berechnung, seismische Widerstandsfähigkeit, Denkmalthinterlassenschaft, alte Gebäude, Deckenkonstruktion, relative gegenseitige Beziehungen, Bruchmechanismus

D. Morić

Izvorni znanstveni rad

## Dijagrami seizmičke otpornosti zgrada spomeničke baštine

Prikazan je način determinističke kvantifikacije pojma "seizmička otpornost" krutih zgrada s kamenim zidovima. Postupak se temelji na odnosu proračunskih i kapacitetnih vrijednosti parametara odziva konstrukcije. Pri proračunu su varirani parametri bitni za seizmičku otpornost zgrade. Rezultati provedenih proračuna sistematizirani su da bi se utvrdio međusobni odnos seizmičke otpornosti građevina s različitim stropnim konstrukcijama prema onima s "apsolutno krutim stropovima".

D. Morić

Original scientific paper

## Seismic resistance diagrams for buildings belonging to architectural heritage

The deterministic quantification of the notion of "seismic resistance" of rigid buildings with stone walls is presented. The procedure is based on the relationship between the design and capacity values of structural response parameters. Parameters significant for seismic resistance of buildings were varied as appropriate in the course of the design process. The results of these calculations were systemized in order to determine the relationship between seismic resistance of buildings with different floor structures and those with "absolutely rigid floor structures".

D. Morić

Ouvrage scientifique original

## Diagrammes de la résistance sismique des bâtiments du patrimoine historique

L'article présente le mode de quantification déterministe de la notion « résistance sismique » des bâtiments rigides aux murs en pierres. Le procédé se fonde sur le rapport entre les valeurs de calcul et les valeurs capacitaires des paramètres de la réponse de la construction. Lors du calcul on variait les paramètres essentiels à la résistance sismique du bâtiment. Les résultats des calculs ont été systématisés afin de déterminer le rapport entre la résistance sismique des bâtiments aux planchers variés et celle des bâtiments aux « planchers absolument rigides ».

Д. Морич

Оригинальная научная работа

## Диаграммы сейсмической устойчивости зданий культурного наследия

В работе описан способ детерминистической квантификации понятия "сейсмическая устойчивость" жёстких зданий с каменными стенами. Способ основывается на отношении расчётных и численных мощностных значениях параметров ответа конструкции. При расчёте варьированные параметры были важными для сейсмической устойчивости здания. Результаты проведённых расчётов систематизированы с целью утвердить взаимное отношение сейсмической устойчивости сооружений с различными конструкциями перекрытий, по отношению к зданиям с "абсолютно жёсткими перекрытиями".

D. Morić

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

## Diagramme der seismischen Widerstandsfähigkeit von Gebäuden der Denkmalthinterlassenschaft

Dargestellt ist die Weise der deterministischen Quantifizierung des Begriffs "seismische Widerstandsfähigkeit" starrer Gebäude mit Steinwänden. Das Verfahren ist begründet auf der Beziehung zwischen den Berechnungs- und Kapazitätswerten der Parameter des Konstruktionsrückfalls. Bei der Berechnung variierte man die Parameter die für die seismische Widerstandsfähigkeit des Gebäudes wichtig sind. Die Ergebnisse der Berechnung wurden systematisiert um die gegenseitige Beziehung der seismischen Widerstandsfähigkeit von Gebäuden mit verschiedenen Deckenkonstruktionen und solchen mit "absolut starren Decken" festzustellen.

Autor: Doc. dr. sc. **Dragan Morić**, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Sveučilišta J. J. Strossmayera u Osijeku, Drinska 16a

## 1 Analiza problema

Svaka zgrada koja nema "apsolutno krute stropne ploče" jest konstrukcija čije ponašanje i mehanizam sloma, današnje proračunske metode ne interpretiraju na dostatno zadovoljavajući način. Ukoliko zbog konzervatorskih uvjeta nije dopušteno višekratne zidane građevine spomeničke vrijednosti sanirati ugradbom krutih armiranobetonskih stropnih konstrukcija, konstruktor mora odrediti seizmičku otpornost građevine na način koji propisima nije precizno određen. Razlog te nepreciznosti jest u specifičnostima određenima u zakonskim i tehničkim aktima kada je u pitanju spomenička baština u zonama visokoga seizmičkog rizika. To izaziva nedorečenosti i nesporazume pri procesu odlučivanja i odabira koncepcije ojačavanja takve građevine.

Sudionici procesa su: a) vlasnik/korisnik/investitor s izraženim interesom za funkcionalnost i namjenu prostora, b) služba spomeničke zaštite s interesom za zaštitu spomenika kulture od moguće devastacije i c) konstruktor čija je zadaća osigurati odabranom konstrukcijskom koncepcijom sigurnost, stabilnost građevine te ju u svjetlu valjanih propisa i dokazati.

Zakonski akti kažu da se u slučaju rekonstrukcije građevine koja je spomenik kulture nulte i prve kategorije može odstupiti od nekog od tehničkih svojstava. Suglasnost za odstupanje daje Ministarstvo graditeljstva u suradnji s Ministarstvom kulture.

Ne želeći ulaziti u funkcionalnosti i zaštitu u tom procesu, iznijet ću osobne stavove o položaju i ulozi konstruktora u tom procesu. Oni se mogu svesti na sljedeće konstatacije:

1. Konstruktor često čini pogreške: a) zanemaruje analizu seizmičke otpornosti postojeće konstrukcije i b) kruto ustraje na zadovoljavanju svih, propisima određenih, kriterija seizmičke sigurnosti, iako zakon kaže da to nije u njegovoj nadležnosti.
2. Konstruktor nije kompetentan suditi o problemu devastacije spomeničke vrijednosti i ne smije ustrajati na strogoj primjeni tehničkih aksioma i propisa radi postizavanja potrebne seizmičke otpornosti spomenika.
3. Konstruktor treba prihvatiti tehničko rješenje koje odrede službe zaštite i za njega dokazati razinu sigurnosti. Ako je ona niža od propisima zahtjevanih, odgovornost za tu činjenicu treba preuzeti institucija ili služba koja je smjernice izdala.

Na osnovi navedenih osobnih stavova provedena je analiza cilj koje je bio omogućiti proračun seizmičke otpornosti građevina čije stropne ploče nisu "apsolutno krute" armiranobetonske ploče [1], što je aksiom i gotovo uvi-

jek početna pretpostavka uobičajenih inženjerskih seizmičkih analiza.

U ovom radu prikazan je postupak određivanja kvantificiranog odnosa seizmičke otpornosti građevina s različitim stropnim konstrukcijama prema istoj takvoj građevini koja ima "apsolutno krute stropove". Na temelju (parametarskom studijom) utvrđenih odnosa, sugerira se način određivanja seizmičke otpornosti zgrada s fleksibilnim stropovima pogodan za inženjersku praksu.

## 2 Seizmička otpornost

### 2.1 Općenito

Problem determinističke analize granične seizmičke otpornosti i oštećenja kompleksan je i univerzalno teško rješiv problem.

Pod djelovanjem cikličkog opterećenja, svaki ciklus amplituda kojega dosegne određenu razinu, uzrokuje strukturalne promjene koje konstrukciju dovode bliže stanju sloma. Prema Chungu [2] "oštećenje" označava određenu razinu fizikalne deteorizacije, s precizno definiranim posljedicama s obzirom na preostali kapacitet deformabilnosti i nosivosti, a slomom proglašava specifični nivo štete, bez preostalog kapaciteta deformabilnosti i nosivosti.

Najčešći oblik analize seizmičke otpornosti, u literaturi, svodi se na analizu koeficijenta oštećenja (DR) (*damage ratio*), koji se određuje bilo za konstruktivne elemente (parcijalni), bilo za konstrukciju kao cjelinu (globalni). Analize u kojima se numerički određuje koeficijent oštećenja (DR) (*damage ratio*) zasnivaju se na: maksimalnoj vrijednosti ili maksimalnom području parametra koji objašnjavaju štetu, i koji je u vezi s čvrstoćom, deformacijom ili energijom i kumulativnoj vrijednosti parametara koji objašnjavaju štetu, koja je vezana uz sumu deformacija neelastičnih ciklusa.

Jasno se može zaključiti da je sedamdesetih godina mjera postelastičnih deformacija bio duktilitet, a osamdesetih autori sve više u obzir uzimaju energetski koncept i ciklički slom.

Deterministički pristup, prihvaćen u ovom radu, temelji se na odnosu kapaciteta nosivosti ili deformabilnosti konstrukcije  $\lambda_s$  (*supply*) i stvarno realiziranog odgovora konstrukcije za određeni potres, (*demand*)  $\lambda_d$ . Koncept analitičkog pristupa *supply* i *demand* analizi osniva se na sljedećem uvjetu:

Ako je  $\lambda_d < \lambda_s$ , onda konstrukcija, element, presjek, kat može izdržati potres bez rušenja, odnosno posjeduje seizmičku otpornost za taj "događaj", određenog intenziteta.

Koncept analitičkog pristupa *supply* i *demand* analizi modificirat će se imajući na umu specifičnosti krutih zidanih građevina.

## 2.2 Koeficijent "seizmičkog stanja" konstrukcije

Prema usvojenom analitičkom konceptu međusobnog odnosa realiziranog parametra odgovora konstrukcije ( $\lambda_d$ ) i kapacitetne vrijednosti istog tog parametra odgovora konstrukcije ( $\lambda_s$ ), stanje konstrukcije u potresu deterministički određuje kvocijent tih parametara:

$$\chi = \frac{\lambda_d}{\lambda_s} \quad (1)$$

Interpretacija stanja konstrukcije ovisi o tome:

- kojim parametrima odgovora konstrukcije uopće raspoložemo nakon provedene numeričke analize ( $\lambda_d$ )
- kojim od njih je moguće dovoljno točno odrediti kapacitetne vrijednosti ( $\lambda_s$ ).

Proračun kamenih zgrada, neovisno o stropnim konstrukcijama koje zgrada sadrži, provedena je pseudonelinearnom analizom, koja se sastoji od niza linearnih analiza. Osnovna ideja te numeričke analize modificirana je analizom nelinearnog ponašanja uglova građevine [1]. U njoj su, npr u  $i$ -tom koraku pseudonelinearne analize ( $i$ -ta po redu linearna analiza) rezultati proračuna period osnovnog tona konstrukcije ( $T_i$ ), nakon dosegnutih deformacija u ( $i-1$ )-tom koraku te pomaci i ubrzanja ( $a_i$  i  $u_i$ ) točaka u razinama stropnih konstrukcija, u smjeru djelovanja potresa. Množeći ubrzanja sa pripadnim masama mogu se dobiti katne sile a preko njih i ukupna poprečna sila u prizemlju  $i$ -tog koraka.

Dakle raspolože se sa sljedećim parametrima koji objašnjavaju globalni odgovor konstrukcije pri djelovanju potresa:

1. Parametrom koji prikazuje globalnu degradaciju krutosti konstrukcije ( $T_i/T_0$ ), izraženu kvocijentom perioda osnovnog tona u  $i$ -tom koraku  $T_i$  i perioda osnovnog tona neoštećene građevine  $T_0$ .
2. Parametrom koji prikazuje dosegnutu deformaciju ( $D_i = U_i/U^p$ ), duktilnošću po pomacima u  $i$ -tom koraku.
3. Parametrima kojima se može objasniti energetski koncept: katnim radnim dijagramima odnosa sila-pomak svakog kata i globalnim radnim dijagramom odnosa poprečne sile u prizemlju ( $BS$ ) i pomaka vrha građevine ( $U_i$ ).

Svaki od navedenih parametara može se tretirati kao parcijalni parametar odgovora konstrukcije ( $\lambda_d$ ) <sub>$i$</sub>  u  $i$ -tom koraku numeričke analize i svaki od njih može odrediti parcijalni koeficijent seizmičkog stanja konstrukcije ( $\chi_i$ ) u  $i$ -tom koraku:

$$\chi_i = \frac{(\lambda_d)_i}{\lambda_s} \quad (2)$$

Uvjet da se to postigne jest mogućnost određivanja kapacitetne vrijednosti svakog od navedenih parametara  $\lambda_s$ .

## 2.3 Kapacitetne (supply) vrijednosti parametara odgovora konstrukcije ( $\lambda_s$ )

Analizirat će se tri parametra odgovora konstrukcije i teorijski će se odrediti njihova granična stanja. Parametri su odabrani za cijelu konstrukciju, tako da bi se moglo prikazati globalno stanje građevine.

### 2.3.1 Degradacija krutosti vertikalnih konstruktivnih elemenata, izražena promjenom perioda osnovnog tona građevine ( $T_i/T_0$ ) <sub>$s$</sub> .

Promjenu osnovnog tona, u funkciji maksimalne duktilnosti ( $D$ ) pomaka definirali su Uang & Bertero [3], nakon niza spektralnih nelinearnih analiza na SDOF sustavima, prema izrazu:

$$\left(\frac{T_i}{T_0}\right)_s = 1 + 0,121 \cdot (D-1)^{0,939} \quad (3)$$

Na osnovi ovog izraza i nakon analize mogućih duktilnosti *in plane* i *out of plane* zidova [8], usvojena je granična vrijednost:

$$(\lambda_s)_1 = \left(\frac{T_i}{T_0}\right)_s = 1,50 \quad (4)$$

### 2.3.2 Deformacija po pomacima izražena duktilnošću $D$

Veliki je broj autora u analizi koeficijenata oštećenja (DR) uzimao u obzir dinamičku kumulativnu duktilnost. Tambulkar i Nau [4] su na SDOF sustavima analizirali kumulativnu duktilnost po pomacima, tj. duktilnost realiziranu nakon cikličkog sloma, i uspoređivali ju sa "statičkom" duktilnošću po pomacima, ostvarenim monotonim opterećenjem. Zaključili su da je kod velikih statičkih duktilnosti po pomacima ( $D > 10$ ) kumulativna duktilnost bitno veća od statičke. Međutim za male statičke duktilnosti po pomacima kod krutih konstrukcija ( $2,0 < D < 3$ ), kumulativni duktilitet istog je reda veličine kao i statička po pomacima. Zbog toga se za graničnu vrijednost (supply) duktilnosti usvaja duktilnost *in plane* zidova, određena teorijskim radnim dijagramom [1], vrijednošću:

$$(\lambda_s)_2 = D_s = 3,00 \quad (5)$$

### 2.3.3 Globalno "energetsko" stanje građevine određeno radnim dijagramom odnosa poprečna sila prizemlja ( $BS$ ) - pomak vrha građevine ( $U_{max}$ ).

Idealizirani radni dijagram posmičnog zida paralelnog smjera potresa (*in plane*) određen katnom visinom, ovisi o

vlačnoj čvrstoći  $f_t$ , aksijalnom opterećenju  $\sigma_0$  (određuju posmičnu silu  $H$ ) i modulu posmika  $G$  te geometriji zida [1] i može se konstruirati za svaki zid. Sumiranje radnih dijagrama provodi se po principu da se za konstantni pomak zbraja poprečna sila svih zidova. Sila radnog katnog dijagrama prizemlja poprečna je sila prizemlja ( $BS$ ). U sumiranom radnom dijagramu prizemlja određene su dakle vrijednosti  $(BS)_e$ ,  $(BS)^y$  i  $(BS)^u$  ( $e$  = elastična;  $y$  = na početku oštećenja;  $u$  = ultimativna, slom) Sumiranjem relativnih međukatnih pomaka po katovima dobiju se karakteristične vrijednosti pomaka vrha građevine  $U_e$ ,  $U^y$  i  $U^u$ , koje u kombinaciji s vrijednostima navedenih ( $BS$ ) određuju globalni radni dijagram građevine. Ovako određen radni dijagram jest granična (supply) anvelopa odnosa poprečna sila – pomak.

Fajfar [5], istraživanjem nelinearnih SDOF sustava, konstatira da za krute konstrukcije ulazna energija značajno ovisi o posmičnoj čvrstoći ali i o tipu histerezne krivulje. Ulazna energija raste s opadanjem čvrstoće i širenjem histereze. Istražujući odnos histerezne i ulazne energije ( $E_y/E_F$ ), ustvrdio je da taj odnos kod konstrukcija sa  $\xi = 5\%$  prigušenja iznosi 0,8, a kod konstrukcija sa  $\xi = 2\%$  prigušenja čak 0,9.

Na temelju zaključaka:

- sustavi s malim statičkim duktilnostima po pomacima (krute konstrukcije ( $2,0 < D < 3$ )) imaju malu kumulativnu duktilnost
- odnos histerezne energije prema ulaznoj  $E_y/E_F$ , za krute konstrukcije iznosi 80 do 90%. može se, za takve sustave, dinamička kumulativna duktilnost prikazati statičkom pod monotonim opterećenjem, a akumuliranu sumu energije prigušenja i histerezne energije površinom ispod idealiziranoga globalnoga radnog dijagrama odnosa poprečne sile prizemlja prema pomaku vrha građevine.

Pojam "energetska disipacija" građevine prikazuje se radom ( $W$ ) horizontalne sile prizemlja ( $BS$ ) po pomacima vrha građevine ( $U_{max}$ ), izraženim po jedinici mase građevine.

Taj se parametar dobije kada se površina globalnog radnog dijagrama građevine (dijagram odnosa  $BS-U_{max}$ ) podijeli s težinom građevine.

Granična (supply) vrijednost ( $W$ ), iznosi :

$$(\lambda_s)_3 = W_s = 2,40 \times (BS)^y \times U^y / (G_g) \quad (6)$$

#### 2.4 Seizmička otpornost građevine

Seizmičko stanje građevine jest funkcija triju parametara odziva građevine:

- globalne degradacije krutosti ( $T_i/T_0$ )

- maksimalne duktilnosti horizontalnog pomaka vrha građevine  $D$
- rada poprečne sile prizemlja po pomacima vrha građevine po težini građevine ( $W/G_g$ )

Globalni koeficijent oštećenja građevine, tj. globalni koeficijent seizmičkog stanja ( $\chi$ ) građevine u nekoj fazi numeričke analize ili nakon kompletne analize (nakon svih skaliranih faza) odziva konstrukcije pri potresu određenog intenzitetom  $I = f(a_g^{max})$ , prikazuje se srednjom vrijednošću triju parcijalnih koeficijenata seizmičkog stanja

$$\chi = \frac{\chi_1 + \chi_2 + \chi_3}{3} \quad (7)$$

Parcijalni koeficijenti seizmičkog stanja  $\chi_i$  određeni su kvocijentima realiziranog, tijekom potresa parametra odgovora konstrukcije ( $\lambda_d$ )<sub>i</sub> i prethodno izračunanom graničnom vrijednošću tog istog parametra odgovora konstrukcije ( $\lambda_s$ )<sub>i</sub>, pa je izraz za globalni koeficijent seizmičkog stanja kamenom zidanih građevina:

$$\chi = \frac{W_d}{2,4 \cdot (BS)^y \cdot U^y} + \frac{D_d}{3} + \frac{(T_i/T_0)_d}{1,5} \quad (8)$$

Pojam "seizmička otpornost građevine" određuje stanje građevine pri kojem globalni koeficijent seizmičkog stanja iznosi 1:

$$(\chi) = 1 - \text{Stanje seizmičke otpornosti građevine} \quad (9)$$

Slom građevine određuje stanje građevine pri kojem je globalni koeficijent seizmičkog stanja veći od 1:

$$(\chi) > 1 - \text{Stanje sloma građevine} \quad (10)$$

Na navedeni način određena seizmička stanja građevine treba povezati s nekom veličinom koja jednoznačno određuje veličinu *input* opterećenja (potresa), pri kojem se takvo stanje događa.

Propis i uobičajena projektantska praksa seizmičko opterećenje izražava koeficijentom omjera poprečne sile u prizemlju i težine građevine:  $K = BS/G_g$ .

gdje je:

$BS$  - poprečna sila prizemlja (*Base Shear*),

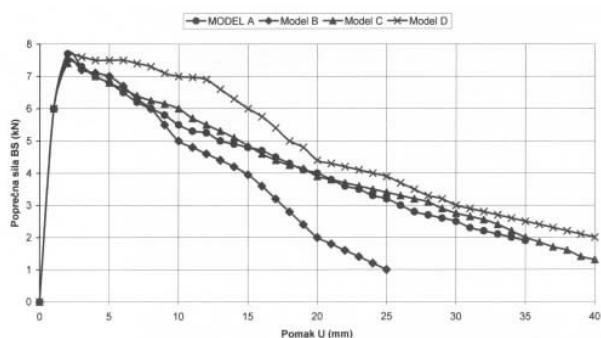
$G_g$  - težine građevine

Na taj se način prejudicira isključivo posmični slom i zanemaruje svaki drugi mogući mehanizam sloma realne građevine, što može dovesti do bitnih pogrešaka pri deklariranju pojma seizmičke otpornosti.

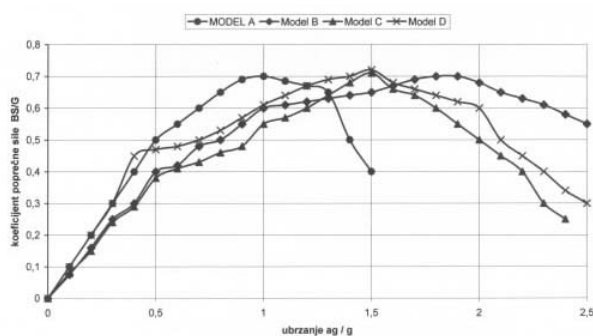
Argumentacija tvrdnje prikazana je na slikama 1. i 2. Eksperimentalnim ispitivanjem na vibro platformi [6] ispitana su četiri modela (model A s drvenim grednikom, model B s armiranobetonskom pločom, model C s drvenim grednikom sa zategama i model D s svodovima i zategama) pri-

bližno iste težine. Na slici 1. prikazan je odnos koeficijenta poprečne sile prizemlja ( $K = BS/G$ ) i pomaka vrha modela ( $U$ ). Ako bi se maksimalna vrijednost koeficijenta  $K$  prihvatila kao veličina kojom se izražava dosegnuta seizmička otpornost građevine, moglo bi se zaključiti da bitnih razlika među modelima nema. Međutim kada pridružimo (slika 2.) navedene koeficijente  $K$  maksimalnim ubrzanjima vibroplatforme  $a_{max}$ , onda se vidi da model A doseže maksimalni koeficijent  $K$  kod bitno nižih ubrzanja tla (pri istom frekventnom sastavu) nego ostali modeli, i da se njegov postelastični slom također zbiva pri bitno nižim ubrzanjima tla. Takav način prikaza intenziteta *input* opterećenja uzima u obzir stvarni mehanizam sloma građevine. Zbog toga se smatra korektnom sljedeća definicija:

Seizmička otpornost građevine je vrijednost ubrzanja tla  $a_g$ , pri kojem globalni koeficijent seizmičkog stanja građevine dosegne stanje seizmičke otpornosti građevine  $\chi = 1$ .



Slika 1. Odnos koeficijenta poprečne sile prizemlja ( $K$ ) i pomaka vrha modela ( $U$ )



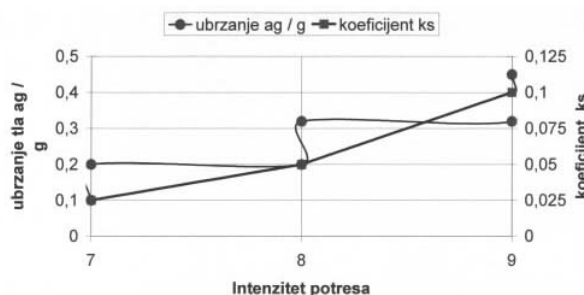
Slika 2. Odnos koeficijenta ( $K$ ) i maksimalnih ubrzanja vibroplatforme (tla)  $a_{max}$

### 2.5 Primjena u inženjerskoj praksi

Kako ovaj način određivanja seizmičke otpornosti (slika 2.) povezati s uobičajnim postupkom proračuna građevina i načiniti ga prikladnim za primjenu

Seizmički proračun prema propisima definira veličinu seizmičkog opterećenja pojmom intenzitet ( $I$ ) i pripadnim

koeficijentom seizmičnosti  $k_s$ . Maksimalno horizontalno ubrzanje tla ( $a_g$ ) također je povezano s intenzitetom potresa ( $I$ ) atenuacijskom funkcijama [7]. Dakle može se preko intenziteta ( $I$ ) potresa međusobno povezati ubrzanje tla ( $a_g$ ) i s koeficijentom poprečne sile prizemlja ( $K$ ). Proporcionalnost odnosa koeficijenta seizmičnosti ( $k_o$ ) i ubrzanja tla ( $a_g$ ), prema porastu intenziteta ( $I$ ), prikazana je na slici 3. i u tablici 1.



Slika 3. Odnos koeficijenta seizmičnosti ( $k_o$ ) i ubrzanja tla ( $a_g$ ), prema porastu intenziteta ( $I$ )

Tablica 1. Odnosi ( $a_g$ )sr.i  $k_s$  za tri zone intenziteta

| Intenzitet potresa ( $I$ ) | VII | VIII | IX   |
|----------------------------|-----|------|------|
| Odnos ( $a_g$ ) sr.        | 1   | 2,08 | 3,80 |
| Odnos $k_s$                | 1   | 2,00 | 4,00 |

Evidentno je da je moguće linearno preslikati vrijednosti seizmičke otpornosti građevine izražene vrijednošću ubrzanja tla ( $a_g$ ) za  $\chi = 1$ ) u projektantski koeficijent poprečne sile prizemlja ( $K$ ). Za modele A, B, C i D [6] sa slika 1. i 2. numerički dobivene vrijednosti seizmičke otpornosti ( $a_g$ ) za  $\chi = 1$ ) trima parametrima odgovora konstrukcije u potpunosti odgovaraju ubrzanju tla pri kojima je registriran maksimalni koeficijent poprečne sile prizemlja  $(BS)_{max}$  [8] i prikazane su u tablici 2.

Tablica 2. Usporedba teorijskih i eksperimentalnih vrijednosti seizmičke otpornosti

| Model   | Teorijska analiza                               | Zrmlk eksperiment             |
|---------|---|-------------------------------|
| Model A | $((a_g) \text{ za } \chi = 1) = 0,99 \text{ g}$ | $(a_g)_{BS} = 1,00 \text{ g}$ |
| Model B | $((a_g) \text{ za } \chi = 1) = 1,76 \text{ g}$ | $(a_g)_{BS} = 1,75 \text{ g}$ |
| Model C | $((a_g) \text{ za } \chi = 1) = 1,56 \text{ g}$ | $(a_g)_{BS} = 1,50 \text{ g}$ |
| Model D | $((a_g) \text{ za } \chi = 1) = 1,58 \text{ g}$ | $(a_g)_{BS} = 1,50 \text{ g}$ |

Na osnovi utvrđenih korelacija evidentni su sljedeći zaključci:

- Projektantski koeficijent poprečne sile prizemlja ( $K = BS/G$ ) jest parametar kojim je moguće deklarirati seizmičku otpornost građevine.
- Potrebno je odrediti odnose kojima će se taj parametar modificirati, tako da njegova na taj način određena vrijednost korektno interpretira mehanizam sloma građevine.

### 3 Parametarska studija

#### 3.1 Općenito

Cilj parametarske studije bio je ustanoviti seizmičku otpornost različitih zidanih građevina. Različitih, prvenstveno s obzirom na konstruktivne zahvate u nivoima stropnih konstrukcija, ali i s obzirom na neke druge parametre koji su bitni za seizmičku otpornost građevina. Bitnim parametrima građevine, neovisno o stropnim konstrukcijama, smatra se: tlocrtna dispozicija s obzirom na smjer potresa, katnost i kvaliteta zida.

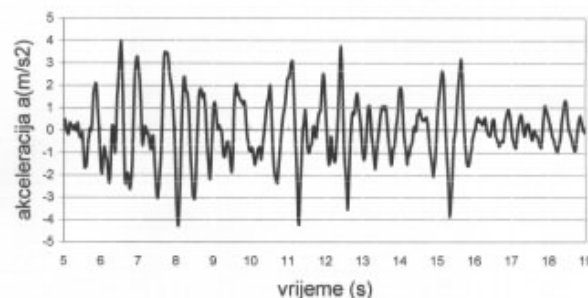
Program parametarske studije optimaliziran je s obzirom na vrijeme i nužnu količinu podataka iz kojih se može doći do potrebnih zaključaka. Parametri su odabrani kako sljedeći:

- stropne konstrukcije (pet različitih tipova): drveni grednik (DG), drveni grednik sa zategama (DZ), spregnuti strop (SP), spregnuti strop sa zategama (SZ) i armiranobetonski strop (AB). Zajedničko za sve stropove je raspon od 5 metara
- tlocrtna dispozicija s obzirom na smjer potresa (L/B). Odabrani segment građevine sastoji se od četiri zida bez otvora. U smjeru potresa dva su zabatna zida duljine  $B = 5\text{m}$ . Paralelni su sa stropnom konstrukcijom i kod modela DG i DZ, stropovi ih ne povezuju. To su zabatni zidovi ili "in plane" zidovi. Razmak zabatnih zidova jednak je duljini  $L$  (m) zidova okomitih na smjer potresa. Kako ova veličina bitno utječe na deformaciju zidova okomitih na smjer potresa odlučeno je pridati joj veliko značenje pa je u ovoj parametarskoj studiji bila tri puta mijenjana i to:  $L = 5\text{m}$  ( $L/B = 1$ );  $L = 10\text{m}$  ( $L/B = 2$ ); i  $L = 16\text{m}$  ( $L/B > 3$ ). Zidovi duljine  $L$  (m), čija je ravnina okomita na smjer potresa, su *out of plane* zidovi.
- kvaliteta zida određena tlačnom čvrstoćom ( $f_c$ ). Odabrana su dva tipa kvalitete zida, teorijski idealizirana s vrijednostima tlačne čvrstoće:  $f_c = 2\text{MPa}$  i  $f_c = 4\text{MPa}$ . Parametar  $f_c$  određuje nelinearni model zabatnih zidova i veznih uglovnih greda modela građevine [1].
- katnost (N). Usvojena je jednaka visina svake etaže  $h = 3\text{m}$ . Stare kamene kuće nemaju takvu uniformnost budući da je visina tzv. etaža *piano nobile* znatno veća od 3m, a gornje su etaže niže od 3m. Parametarska je studija na žalost te činjenice morala isključiti. Odabrane su dvije katnosti:  $N = 3$  i  $N = 5$ . Parametarskom studijom prema navedenim parametrima i njihovim odabranim brojem određeno je ukupno 60 različitih prostornih modela.

#### 3.2 Provedeni proračuni

Literatura [7, 9] a i prethodni potresi određuju najveću vjerojatnost pojave tzv: kalifornijskog tipa potresa na našem

području. Frekventni je sastav takvog potresa relativno niskoperiodični, s maksimalnim ubrzanjima oko 0,4g. Zbog toga je odlučeno koristiti se zapisima potresa iz Crne Gore 15. travnja 1979. Nakon analize spektara svih triju zapisa odlučeno je koristiti se zapisima registriranim u Petrovcu, i to njegovih "najjačih" 14 sekunda (od  $t = 5\text{s}$  do  $t = 19\text{s}$ ),  $a_{max} = 0,43\text{g}$  (slika 4.). Svaki model konstrukcije (njih 60) "podvrgnut" je tom potresu s devet skaliranih *time-history inputa* (tablica 3.). Provedeno je, dakle, 540 proračuna na način opisan u [1]



Slika 4. Input opterećenje primijenjen u parametarskoj studiji (izabrani dio iz akcelograma Petrovac 15. 4. 1979.)

Tablica 3. Skaliranje odabranog opterećenja

| red. broj           | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| skalar              | 0,25 | 0,35 | 0,45 | 0,55 | 0,65 | 0,75 | 0,85 | 0,95 | 1,00 |
| $a_{max}(\text{g})$ | 0,11 | 0,15 | 0,19 | 0,24 | 0,28 | 0,32 | 0,37 | 0,41 | 0,43 |

Nakon svakog "prolaza" analiziraju se pomaci i sile (ubrzanja puta pripadajuće mase), te se za sljedeći, viši skalirani input, određuju redukcija krutosti i povećanje prigušenja, odnosno nove dinamičke karakteristike modela. Dakle za svaki model načinjeno je 9 međusobno ovisnih linearnih proračuna i postproračunskih analiza.

Rezultati provedenih proračuna, za svaku od faza proračuna, sadrže: vlastite oblike slobodnih oscilacija i parametre odgovora konstrukcije u obliku vremenskog zapisa pomaka i ubrzanja karakterističnih čvorova konstrukcija.

#### 3.3 Analiza rezultata provedenih proračuna

Ovdje će se prikazati kratka analiza osnovnih dinamičkih svojstava modela, mehanizama sloma modela i seizmičke otpornosti modela

##### Osnovna dinamička svojstva modela

Osnovna dinamička svojstva građevine (periodi i vlastiti oblici) i potres sa svojim dinamičkim karakteristikama (predominantne periode, amplituda i trajanje) osnovni su parametri o kojima ovisi odgovor konstrukcije. Utvrđeno je da najveći utjecaj na vlastite oblike i periode građevine imaju krutost stropnih konstrukcija i omjer duljine fasadnih *out of plane* zidova ( $L$ ) prema katnoj visini ( $h$ ).

Modeli s krutim stropovima SP, SZ i naročito AB, za sve kombinacije  $L/h$  i sve katnosti imaju zanemarivo mali

efekt karakteristične deformacije *out of plane* zidova u prvom osnovnom tonu. Kod modela DG i DZ, tj. modela s mekanim stropovima uočava se da je taj efekt *out of plane* zidova vrlo izražen za odnos  $L/h > 3$ , dok je za odnos  $L/h = 1,67$  gotovo jednak kao kod modela s krutim stropovima, neovisno o katnosti. To ipak ne znači da se modeli jednako i ponašaju u potresu i da imaju podjednake seizmičke otpornosti, već samo znači da je membranski efekt *out of plane* zidova ovisan o odnosu  $L/h$  i krutosti stropova. Periodi osnovnih tonova modela s krutim stropovima SP, SZ i AB, u elastičnom stanju, vrlo se dobro podudaraju s poznatom empirijskom formulom iz literature [9] gdje je  $T = 0,05 N$  (s), ( $N$  = broj etaža). Kod modela s fleksibilnim stropovima dobiveni su veći periodi. Predlaže se izraz za period osnovnog tona kamenom zidanih građevina koji imaju fleksibilne međukatne konstrukcije:

$$T = 0,09 N (s) \quad (N = \text{broj etaža}) \quad (12)$$

### Mehanizmi sloma

Kod modela s mekanim stropovima (modeli DG i DZ) u početku sudjeluju zabatni i *out of plane* zidovi. Kako je efekt karakteristične deformacije *out of plane* zidova u višim katovima značajan, a reakciju tog efekta trpe uglovi, vrlo brzo dolazi do oštećivanja i sloma uglova u gornjim etažama. Kako se uglovna veza narušava, a strop predaje svu masu *out of plane* zidovima, oni postaju dinamički znatno aktivniji od zabatnih zidova. Progresivnim slomom uglova po visini odozgo prema dolje dolazi do efekta prekomjernih katnih pomaka prvo viših etaža koji premašuju granične pomake i ruše se. Za to vrijeme opterećenje u zabatnim poprečnim zidovima se smanjuje jer uglovi više ne prenose reakcije osciliranja *out of plane* zidova. Utjecaj zatega u sprečavanju ovog efekta je zamjetan kod mekanih stropova. Naime zatege povezuju dva nasuprotna *out of plane* zida, povećavaju im krutost i sprječavaju asinhrono osciliranje. Međutim karakteristična deformacija *out of plane* zida najvišeg kata je i kod modela sa zategama značajna, pa dolazi do sloma uglova progresivno po visini. Ovaj se efekt događa pri nešto višim opterećenjima (približno 60% za zidove niske čvrstoće odnosno 35% za zidove više čvrstoće) nego kada zatega nema. Kada se efekt dogodi oba fasadna zabatna zida sinhrono pojačavaju oscilacije jer zatege u sredini sprečavaju asinhrono osciliranje, a one u uglovima preuzimaju reakcije takve prisilne sinhronizacije, ali tek pošto je došlo do sloma ugla. Kod modela s mekanim stropovima odnosa  $L/h < 2$  momenti savijanja po visini *out of plane* zidova su bitno veći nego kod modela s krutim stropovima, tako da pri nižim intenzitetima potresa dolazi do prekoračenja graničnih momenata i redukcije krutosti *out of plane* zida. Kod modela SP, SZ i AB, koji imaju krute stropove, mehanizam ponašanja tijekom potresa bitno je različit. Takva građevina oscilira sinhrono i najveći dio seizmičkog opterećenja preuzimaju zabatni *in plane* zidovi, pa je njihova vlačna čvrstoća glavni parametar o kojem ovisi seizmička otpornost građevine.

### Seizmička otpornost modela

Koeficijent seizmičkog stanja ( $\chi$ ) konstrukcije izražen je kao srednja vrijednost parcijalnih koeficijenata seizmičkog stanja ( $\chi_i$ ), koji su u funkciji promjene parametara odgovora konstrukcije:

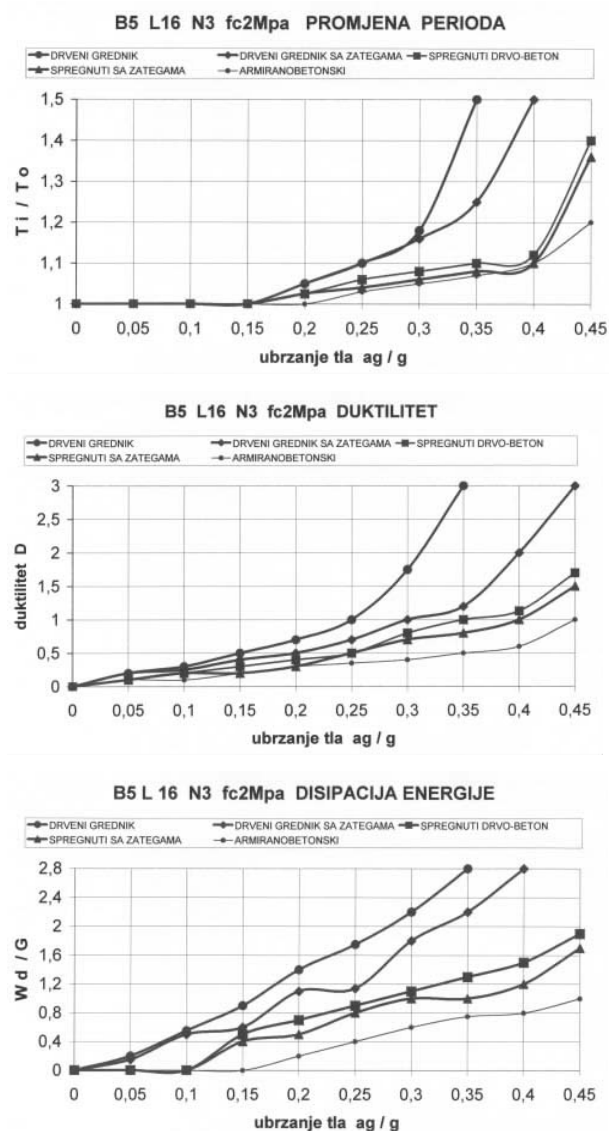
$$\chi = \frac{\chi_1 + \chi_2 + \chi_3}{3} \quad (13)$$

$$\chi_1 = (T/T_0)_d 1,5 \quad (\text{promjena perioda osnovnog tona})$$

$$\chi_2 = D_d/3 \quad (\text{veličina maksimalnih pomaka})$$

$$\chi_3 = (W)_d/(W_s) \quad (\text{energetska disipacija}).$$

Kumulativna promjena navedenih parcijalnih koeficijenata seizmičkog stanja  $\chi_i$ , za model  $L/B = 2$ ,  $N = 5$ ,  $f_c = 2\text{MPa}$ , grafički je prikazana na slici 5.



Slika 5. Kumulativna promjena parcijalnih koeficijenata seizmičkog stanja  $\chi_i$



Na temelju analize koeficijenta "seizmičkog stanja"  $\chi_{sr}$  svih modela iz parametarske studije na kraju proračuna (nakon 9 faza), i njihovih relativnih međuodnosa  $(\chi_{sr})_i/(\chi_{sr})_{AB}$ , utvrđene su vrijednosti međuodnosa seizmičke otpornosti modela koji imaju stropove (DG, DZ, SP i SZ.) prema modelu s armiranobetonskim stropovima (AB).

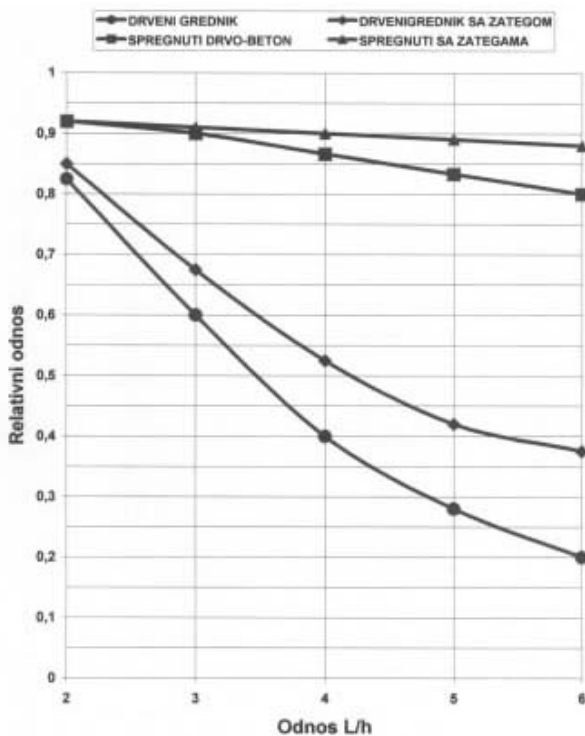
Istraživanjem odnosa karakteristične tlačne čvrstoće  $f_c$  i posmične čvrstoće  $f_t$  zida [8] utvrđen je sljedeći odnos:

$$f_t = 0,086 + f_c^2/350 \quad (14)$$

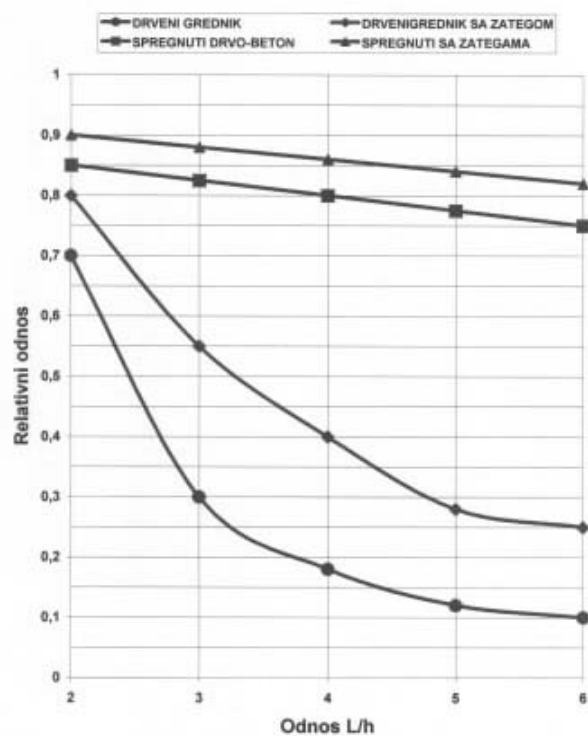
Vrijednost  $f_c = 2\text{MPa}$  predstavlja zide niske vlačne čvrstoće  $f_t < 0,15\text{MPa}$ , dok  $f_c = 4\text{MPa}$  interpretira zide više vlačne čvrstoće  $0,15 < f_t < 0,25\text{MPa}$ .

Za svaki od analiziranih tipova građevina dobivene su vrijednosti koeficijenta redukcije seizmičke otpornosti  $(\chi_i/\chi_{AB})$ , ovisno o tri vrijednosti geometrijske dispozicije građevine (L/h), gdje je L duljina zida okomitog na smjer djelovanja potresa a h katna visina.

Za pojedini tip građevine, na osnovi tih triju vrijednosti načinjeni su dijagrami ovisnosti koeficijenta  $(\chi_i/\chi_{AB})$  o geometrijskoj dispoziciji (L/h). Dijagrami su zapravo regresivne krivulje u područje  $2 < (L/h) < 6$ , što je prikazano na slici 6. (za  $N = 0,3, 0,15 < f_t < 0,25$ ) i na slici 7. (za  $N = 3, f_t < 0,15$ ).



Slika 6. Dijagram odnosa  $(\chi_i/\chi_{AB})$  prema (L/h) za  $N = 3$  i  $0,15 < f_t < 0,25\text{MPa}$



Slika 7. Dijagram odnosa  $(\chi_i/\chi_{AB})$  prema (L/h) za  $N = 3$  i  $f_t < 0,15\text{MPa}$

#### 4 Zaključak

Na osnovi analize dijagrama odnosa seizmičke otpornosti građevina prema istim takvima koje imaju "apsolutno krute stropove" može se zaključiti sljedeće:

- Vrijednosti koeficijenta redukcije seizmičke otpornosti  $(\chi_i/\chi_{AB})$ , ovisne o geometrijskoj dispoziciji (L/h) i kvaliteti zida kamene zgrade, fizikalno objašnjavaju različiti mehanizam sloma koji je direktno u funkciji tipa i vrste stropne konstrukcije.
- Ako pretpostavimo da je seizmičko opterećenje akcelerogramom Petrovac realno moguće, onda na temelju provedene parametarske studije možemo zaključiti da su, s aspekta seizmičke otpornosti, inženjerski gledano.
  - Seizmički dopustive građevine ( $0,8 < (\chi_i/\chi_{ab}) < 1,0$ ):  
Građevine s armiranobetonskim stropnim konstrukcijama uz uvjet da je  $\gamma > 1,5$   
Građevine sa spregnutim stropnim konstrukcijama za  $N < 3$ , kao i za  $N > 3$  i  $L/h < 3$   
Građevine sa stropnim konstrukcijama drveni grednik sa zategama ili bez njih za  $N < 3$  i  $L/h < 2$
  - Seizmički nedopustive građevine ( $(\chi_i/\chi_{AB}) < 0,8$ )  
Građevine sa spregnutim stropnim konstrukcijama za  $N > 3$  i  $L/h > 4$

Građevine sa stropnim konstrukcijama drveni grednik sa zategama ili bez njih za  $N < 3$  i  $L/h > 2$ , kao i sve za koje vrijedi  $N > 3$ .

3. Ako je odlukom mjerodavne službe zaštite odabrana koncepcija sanacije bez "apsolutno krutih stropnih konstrukcija", izrađeni i ovdje prezentirani radni dijagrami mogu se koristiti prema sljedećim uputama u tri navedena koraka:
  - Izraditi uobičajeni proračun seizmičke otpornosti građevine temeljen na metodi ekvivalentnih statičkih sila, uz pretpostavku apsolutno krutih strop-

nih konstrukcija, za intenzitet potresnog opterećenja prema propisima ( $K = k_o \times k_s \times k_d \times k_p$ ).

- Seizmičku otpornost varijante "apsolutno krute stropne ploče" deklarirati produktom  $K \times \gamma_{\min}$ , gdje je ( $\gamma_{\min}$ ) proračunom dobiven minimalni koeficijent sigurnosti posmičnog sloma zidova.
- Ovako određenu seizmičku otpornost varijante "apsolutno krute stropne ploče" reducirati pripadnim koeficijentom redukcije ( $\chi_i/\chi_{AB}$ ) i na taj način deklarirati stvarnu seizmičku otpornost građevine za odabrani tip stropnih konstrukcija.

## LITERATURA

- [1] Morić, D.: *Proračun seizmičkog odziva zgrada bez krutih stropova*, Građevinar 52 (2000) 11, 673.-681.
- [2] Chung, Y. S.; Meyer, C.; Shinozuka, M.: *Seismic Damage Assessment of Reinforced Concrete Members*, Technical Report NCEER-87-0022, October 9, 1987., Columbia University New York
- [3] Uang C.-M.; Bertero, V.: *Use of Energy as a Design Criterion in Earthquake-Resistant Design*, Report No. UCB/EERC-88/18, November 1988., University of California at Berkeley
- [4] *Structural Damage*, Third National USA Conference, 1986., pp 979.-990.
- [5] Fajfar P.; Vidic, T.; Fischinger M.: On Energy Demand and Supply in SDOF systems, Workshop on Nonlinear Seismic Analysis of Reinforced Concrete Buildings, Bled, 13-16 July 1992.
- [6] Tomažević, M.; Lutman M.; Weiss, P.; Velechovsky, T.: *Vpliv togosti stropnih konstrukcij na potresno otpornost starih zidanih zgradb: Preiskave modelov kamenitih hiš –Konačno poročilo*, Elaborat ZRMK/PI- 92/03, Ljubljana 1992.
- [7] Bucić, P.; Cvijanov, D.; Krstulović B.: *Atenuacione funkcije akceleracije potresa*, IV kongres SDGJ, Cavtat, 23-25.4.1986, SDGJ, Zagreb, 1986, Vol. 1, str. 9.-14.
- [8] Morić, D.: *Seizmička otpornost kamenih zgrada s obzirom na dopustive sanacijske zahvate na međukatnim konstrukcijama*, Disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb, 1998.
- [9] Aničić, D.; Fajfar, P.; Petrović B.; Szavits-Nossan, A.; Tomažević, M.: *Zemljotresno inženjerstvo - visokogradnja*, knjiga 642 str., DIP Građevinska knjiga, Beograd, 1990.
- [10] Bayulke, N.: *Behaviour of Brick Masonry Buildings during Earthquakes*, Seminar on Construction in Seismic Zones, Bergamo - Udine, 10-13 May, 1978., IABSE - ISMES, p.III. pp.63.-77.