

# Ciljano ubrzanje u višemodalnoj metodi naguravanja u potresnoj analizi A/B konstrukcija

---

**Balić, Ivan**

**Doctoral thesis / Disertacija**

**2013**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:*

**University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije**

<https://doi.org/10.31534/DocT.030.Ball>

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:123:001609>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-09-22**



*Repository / Repozitorij:*

[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)



UNIVERSITY OF SPLIT

  
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

**Sveučilište u Splitu**  
**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA,**  
**ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

**Ivan Balić, dipl. ing. građ.**

**CILJANO UBRZANJE U VIŠEMODALNOJ**  
**METODI NAGURAVANJA U POTRESNOJ**  
**ANALIZI A/B KONSTRUKCIJA**

**Disertacija**

**Split, 2013.**



**Sveučilište u Splitu**  
**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I**  
**GEODEZIJE**

**Ivan Balić, dipl. ing. građ.**

**CILJANO UBRZANJE U VIŠEMODALNOJ**  
**METODI NAGURAVANJA U POTRESNOJ**  
**ANALIZI A/B KONSTRUKCIJA**

**Disertacija**

**Split, 2013.**

Ivan Balić, dipl. ing. građ.  
Redni broj: 030

**Ova disertacija predana je na ocjenu  
Fakultetu građevinarstva, arhitekture i  
geodezije Sveučilišta u Splitu u svrhu  
stjecanja akademskog stupnja doktora  
tehničkih znanosti u znanstvenom polju  
građevinarstvo.**

**Mentor:** Prof. dr. sc. Boris Trogrlić, dipl. ing. građ

**Komentor:** Prof. dr. sc. Ante Mihanović, dipl. ing. građ.

**Povjerenstvo za ocjenu:** Prof. dr. sc. Željana Nikolić, dipl. ing. građ.

Prof. dr. sc. Boris Trogrlić, dipl. ing. građ.

Prof. dr. sc. Ante Mihanović, dipl. ing. građ.

Prof. dr. sc. Ivica Boko, dipl. ing. građ.

Prof. dr. sc. Damir Varevac, dipl. ing. građ.



**Povjerenstvo za obranu:**

**Prof. dr. sc. Željana Nikolić, dipl. ing. građ.**

**Prof. dr. sc. Boris Trogrlić, dipl. ing. građ.**

**Prof. dr. sc. Ante Mihanović, dipl. ing. građ.**

**Prof. dr. sc. Ivica Boko, dipl. ing. građ.**

**Prof. dr. sc. Damir Varevac, dipl. ing. građ.**

**Rad je obranjen dana: 10. srpnja 2013.**

Tajnica:

**Saša Delić, dipl.iur.**

**Rad sadrži:**

131 stranicu teksta

81 crtež

60 tablica

77 citiranih referenci

*Posvećeno mojoj obitelji*

*Ovom prigodom izražavam iskrenu zahvalnost:*

*voditeljima prof. dr. sc. Anti Mihanoviću i prof. dr. sc. Borisu Trogrliću za pomoć i razumijevanje koje su mi pružili tijekom izrade ovog rada,*

*članovima povjerenstva prof. dr. sc. Željani Nikolić, prof. dr. sc. Ivici Boki i prof. dr. sc. Damiru Varevcu za pregled rada i korisne savjete,*

*dragim prijateljima na podršci,*

*i na kraju najveću i neizrecivu zahvalnost dugujem svojoj djevojci i roditeljima.*

Ivan Balić, dipl. ing. građ.

## **CILJANO UBRZANJE U VIŠEMODALNOJ METODI NAGURAVANJA U POTRESNOJ ANALIZI A/B KONSTRUKCIJA**

### **Sažetak**

U ovom radu izložena je nova nelinearna statička višemodalna metoda naguravanja uz uključivanje većeg iznosa ekvivalentnog viskoznog prigušenja. Prezentiran je pojam *ciljanog ubrzanja*, a potom i formulacija postupka za određivanje ciljanog ubrzanja. Ciljano ubrzanje definirano je kao najmanje ubrzanje baze koje dovodi do graničnog stanja nosivosti konstrukcije, i ono predstavlja najnižu potresnu otpornost. Dobivanje ciljanog ubrzanja postiže se iterativnim postupkom višemodalnim naguravanjem po načelu anvelope. Promatrane su dvije kombinacije modova, i to linearna (L) i kombinacija kvadratnog korijena iz sume kvadrata modova (SRSS). Na primjerima a/b okvirnih i mješovitih okvirnih i zidnih sustava pokazano je da je linearna kombinacija nepovoljnija od korijenske kombinacije zbog dobivene niže razine ciljanog ubrzanja. Interferencijom modova na linearnoj i nelinearnoj razini, također je pokazano da je linearna (L) kombinacija učestalije nepovoljnija od korijenske (SRSS) kombinacije modova.

U sklopu ovog rada razvijena je nova formulacija određivanja ekvivalentnog viskoznog prigušenja sustava. Provedena je validacija metode ciljanog ubrzanja u višemodalnoj metodi naguravanja a/b okvira s dinamičkim odgovorom sustava. Za dinamičku pobudu korišteni su zapisi akcelelograma stvarnih potresa. Uvažavajući izračunato ekvivalentno viskozno prigušenje te iskoristivost krivulje nosivosti do  $3/3$  maksimalog pomaka, usporedbom ciljanog ubrzanja višemodalne metode naguravanja i slomnog vršnog ubrzanja podloge dobivenog dinamičkim odgovorom sustava pokazuje se izvrsno slaganje ciljanog ubrzanja i slomnog vršnog ubrzanja podloge. Time je dokazano da je ekvivalentno viskozno prigušenje izračunato prema novoj formulaciji izloženoj u radu realno i da je znatno veće od onog sugeriranog u literaturi.

Prezentiran je i praktični postupak određivanja ciljanog ubrzanja u višemodalnoj metodi naguravanja, koji može postati jednostavan postupak za praktičnu nelinearnu statičku analizu armirano-betonskih konstrukcija izloženih potresnom djelovanju.

**Ključne riječi:** Ciljano ubrzanje, višemodalna metoda naguravanja, linearna kombinacija modova, ekvivalentno viskozno prigušenje, dinamički odgovor, potresno opterećenje.

Ivan Balić, dipl. ing. građ.

## TARGET ACCELERATION IN MULTIMODAL PUSHOVER METHOD IN SEISMIC ANALYSIS OF R/C STRUCTURES

### Summary

This thesis presents a new nonlinear static multimodal pushover analysis with the inclusion of a large amount of equivalent viscous damping. The term of *target acceleration* and the formulation of the procedure for determining the target acceleration are presented. The targeted acceleration is defined as the minimum acceleration of the base that leads to the ultimate limit state of structure, which represents the lowest seismic resistance. The targeted acceleration is achieved with iterative multimodal pushover method according to the envelope principle. Two combinations of modes are analysed, linear (L) and square root of sum of square combination (SRSS). Examples of presented R/C frames and mixed frame and wall system show that the L combination is more unfavourable than the SRSS combination of modes because of the lower level of the target acceleration. Interference of modes on linear and non-linear level also shows that the linear (L) combination is more frequently unfavourable than the root (SRSS) combination of modes.

As a part of this thesis a new formulation for determining the equivalent viscous damping of construction is developed. A validation of the targeted acceleration method in multimodal pushover procedure with dynamic response of the R/C frames is conducted. Real earthquake accelerograms are used for seismic excitation. Taking into account the calculated equivalent viscous damping and usability of capacity curve up to 3/3 of maximum displacement, by comparing the targeted acceleration of multimodal pushover method and failure peak ground acceleration obtained by dynamic response of construction proves to be an excellent agreement between the target acceleration and the failure peak ground acceleration. This proves that the equivalent viscous damping calculated according to the new formulation exposed in this thesis is real and that it is significantly higher than what is suggested in the literature. A practical procedure for determining the targeted acceleration in multimodal pushover method was shown, which can also become a simple tool for practical nonlinear static analysis of R/C structures exposed to earthquake action.

**Keywords:** Target acceleration, multimodal pushover method, linear combination of modes, equivalent viscous damping, dynamic response, seismic load.

## SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b>	<b>1</b>
1.1 OPĆENITO	1
1.2 OSVRT NA POSTOJEĆE STATIČKE METODE PROCJENE POTRESNE OTPORNOSTI A/B KONSTRUKCIJA	3
1.3 SADRŽAJ RADA	6
<b>2. METODA CILJANOG UBRZANJA U VIŠEMODALNOJ METODI NAGURAVANJA</b>	<b>10</b>
2.1 OPĆENITO O METODI	11
2.2 ODREĐIVANJE CILJANOG UBRZANJA	11
2.2.1 Ciljano ubrzanje prema linearnoj (L) kombinaciji modova	15
2.2.2 Ciljano ubrzanje prema korijenskoj (SRSS) kombinaciji modova	16
2.3 PRIMJERI	17
2.3.1 Primjer 1: 5-katni prostorni armirano-betonski okvir	17
2.3.1.1 Opis modela i proračun vektora opterećenja	17

2.3.1.2	Određivanje ciljanog ubrzanja za smjer $x$	20
2.3.1.3	Određivanje ciljanog ubrzanja za smjer $y$	24
2.3.2	Primjer 2: 9-katni prostorni armirano-betonski okvir	27
2.3.2.1	Opis modela i proračun vektora opterećenja	27
2.3.2.2	Određivanje ciljanog ubrzanja za smjer $x$	29
2.3.2.3	Određivanje ciljanog ubrzanja za smjer $y$	30
2.3.3	Primjer 3: 5-katni prostorni armirano-betonski mješoviti sustav okvira i zidova	33
2.3.3.1	Opis modela i proračun vektora opterećenja	33
2.3.3.2	Određivanje ciljanog ubrzanja za smjer $x$	35
2.3.3.3	Određivanje ciljanog ubrzanja za smjer $y$	36
<b>3.</b>	<b>POJAVNOST KOMBINACIJE MODOVA</b>	<b>40</b>
3.1	TEST POJAVNOSTI LINEARNE (L) I KORIJENSKE (SRSS) KOMBINACIJE MODOVA	41
3.2	ANALIZA LINEARNE (L) I KORIJENSKE (SRSS) KOMBINACIJE MODOVA NA LINEARNOJ RAZINI	44
3.2.1	Analiza L i SRSS kombinacije modova na linearnoj razini na primjeru 5-katnog i 9-katnog a/b okvira	44
3.2.2	Analiza L i SRSS kombinacije modova na linearnoj razini na primjeru vitkog a/b zida	50
3.3	ANALIZA LINEARNE (L) I KORIJENSKE (SRSS) KOMBINACIJE MODOVA NA NELINEARNOJ RAZINI	55
<b>4.</b>	<b>NOVA FORMULACIJA VISKOZNOG PRIGUŠENJA</b>	<b>60</b>
4.1	ODREĐIVANJE VISKOZNOG PRIGUŠENJA SUSTAVA	61
4.2	CILJANO UBRZANJE ZA LINEARNU KOMBINACIJU MODOVA UZ ELASTIČNI SPEKTAR S REALNIM VISKOZNIM PRIGUŠENJEM	68
4.2.1	Ciljano ubrzanje prema linearnoj (L) kombinaciji modova pri 2/3 iskoristivosti pomaka uz elastični spektar s realnim viskoznim prigušenjem	69
4.2.2	Ciljano ubrzanje prema linearnoj (L) kombinaciji modova pri 3/3 iskoristivosti pomaka uz elastični spektar s realnim viskoznim prigušenjem	74



<b>5. CILJANO UBRZANJE VIŠEMODALNE METODE NAGURAVANJA U USPOREDBI S DINAMIČKIM ODGOVOROM SUSTAVA</b>	<b>80</b>
5.1 DINAMIČKI ODGOVOR SUSTAVA	81
5.1.1 Dinamički odgovor 5-katnog prostornog armirano-betonskog okvira - smjer $x$	82
5.1.2 Dinamički odgovor 5-katnog prostornog armirano-betonskog okvira - smjer $y$	85
5.1.3 Dinamički odgovor 9-katnog prostornog armirano-betonskog okvira - smjer $x$	87
5.1.4 Dinamički odgovor 9-katnog prostornog armirano-betonskog okvira - smjer $y$	88
5.2 VALIDACIJA METODE CILJANOG UBRZANJA	89
<b>6. PRAKTIČNA PRIMJENA CILJANOG UBRZANJA U VIŠEMODALNOJ METODI NAGURAVANJA</b>	<b>93</b>
6.1 SINTEZA METODE CILJANOG UBRZANJA ZA PRAKTIČNU PRIMJENU	94
6.2 PRIMJENA METODE - PRIMJERI	96
6.2.1 Primjer 1: 5-katni prostorni armirano-betonski okvir	96
6.2.1.1 Određivanje ciljanog ubrzanja za smjer $x$	96
6.2.1.2 Određivanje ciljanog ubrzanja za smjer $y$	101
6.2.2 Primjer 2: 9-katni prostorni armirano-betonski okvir	106
6.2.2.1 Određivanje ciljanog ubrzanja za smjer $x$	107
6.2.2.2 Određivanje ciljanog ubrzanja za smjer $y$	111
<b>7. ZAKLJUČCI I PRAVCI DALJNIH ISTRAŽIVANJA</b>	<b>118</b>
7.1 ZAKLJUČCI	118
7.2 MOGUĆI PRAVCI DALJNIH ISTRAŽIVANJA	121
<b>8. LITERATURA</b>	<b>123</b>

# 1. UVOD

---

## 1.1 OPĆENITO

U današnje vrijeme postoji veliki broj istraživanja ponašanja armirano-betonskih konstrukcija izloženih potresnom djelovanju. Za analizu potresne otpornosti armirano-betonskih konstrukcija postoji dosta nelinearnih metoda koje su postale i sastavni dio međunarodnih normi za proračun konstrukcija, a u nastavku će biti dan osvrt na postojeće nelinearne metode koje u sebi uključuju metodu postupnog guranja (*pushover method*) za analizu potresne otpornosti armirano-betonskih konstrukcija. Metoda se temelji na pomacima, a usporedbom deformabilne sposobnosti konstrukcije sa zahtjevanim stupnjem deformabilnosti pod utjecajem normiranog potresnog djelovanja moguće je odrediti pouzdanost objekta u odnosu na potres. Metoda se primjenjuje na deformabilne konstrukcije s duktilnim nosivim elementima, a krhki, neduktilni mehanizam sloma ne smije nastupiti niti kod jednog od nosivih elemenata.

U inženjerskoj praksi često su zastupljeni armirano-betonski okvirni sustavi. Linijske konstrukcije su jedne od prvih kod kojih se razvijalo numeričko modeliranje s uvažavanjem materijalne i geometrijske nelinearnosti. Istodobnim uvažavanjem geometrijske i materijalne nelinearnosti u prostornim modelima možemo spoznati konstruktivno držanje sustava koji se

analizira. Veliki broj radova na temu nelinearnih numeričkih modela armirano-betonskih okvira s uzimanjem u obzir materijalne i geometrijske nelinearnosti objavljen je posljednjih desetljeća prošlog stoljeća, a uglavnom se radi o uslojenim modelima armirano-betonskih presjeka po teoriji malih pomaka (Hsu [H1], Scordelis [S3], El-Metwally [E1]). Od materijalno i geometrijski nelinearnih modela nastalih u Hrvatskoj valja spomenuti modele ravninskih okvira sadržanih u radovima i računalnom programu *RAVNEL* (Mihanović, Schonauer [M4]) i model prostornih okvira sadržan u radovima i računalnom programu *NELIN* (Ožbolt [O2], [O3]). Objavljeni radovi u zadnja dva desetljeća opisuju materijalno i geometrijski nelinearne modele prostornih armirano-betonskih okvirnih sustava pri djelovanju uzdužne sile, dvoosnog savijanja i uvrtnja (Izzuddin [I2], [I3], Trogrlić [T1], Valipour [V1]).

U ovom radu korišten je numerički model stabilnosti i nosivosti prostornih armirano-betonskih linijskih konstrukcija za trenutačna statička i nazovistatička djelovanja koji je razvijen na Katedri za teoriju konstrukcija pri Fakultetu građevinarstva, arhitekture i geodeziju u Splitu (Trogrlić [T1], [T2], [T3] i [T4]). Model obuhvaća materijalnu nelinearnost i geometrijsku nelinearnost malih pomaka. Model materijalne nelinearnosti vezan je za odgovor kompozitnog poprečnog presjeka pri nelinearnim svojstvima materijala koji tvore taj poprečni presjek. Modelom geometrijske nelinearnosti postiže se uspostavljanje ravnotežnog stanja na deformiranom položaju. Pri tome je moguća pojava gubitka stabilnosti izvijanjem, uvrtnjem ili izbočenjem grednih elemenata. Opći numerički postupak je inkrementalno iterativni pri čemu se opterećenje nanosi postupno u inkrementalnim koracima od nultog intenziteta pa sve do sloma koji nastaje prekoračenjem nosivosti presjeka i/ili gubitkom stabilnosti elemenata ili konstrukcije kao cjeline. Moguće je stupnjevito nanošenje opterećenja u dvije faze, najprije jedno a potom drugo opterećenje, što je praktično za simulaciju odvojenog vertikalnog (vlastita težina, stalno opterećenje) i horizontalnog djelovanja (potres). Proračun daje prostornu putanju ravnoteže karakterističnog čvora, te slijed plastifikacije kritičnih poprečnih presjeka, odnosno slijed pojave plastičnih zglobova na konstrukciji. Iz analiza je moguće izvući dominantni put nastanka mehanizma. Mogućnost nanošenja opterećenja najprije jedno a potom drugo, omogućuje primjenu nelinearne statičke metode naguravanja u skladu s europskom normom EN 1998.

U praktičnoj primijeni metode naguravanja dominantna je metoda zasnovana na raspodjeli ubrzanja prema prvom modu osciliranja sustava, trokutnoj i jednolikoj raspodjeli ubrzanja po visini konstrukcije. U mnogim radovima promatran je utjecaj viših modova kod nelinearne analize konstrukcija pomoću metode naguravanja sa zaključkom da je znatan njihov utjecaj ali bez kvantificiranja tog utjecaja. Upravo je to bila glavna motivacija za izradu ovog rada, odnosno cilj

je bio da se na nov i originalan način prezentira višemodalna metoda naguravanja uz formulaciju ciljanog ubrzanja tla kao mjera najniže potresne otpornosti sustava.

Ciljevi ovog rada su sljedeći:

- Formulirati pojam ciljanog ubrzanja, a potom formulirati postupak za određivanje ciljanog ubrzanja, definiranog kao najmanje ubrzanje baze koje dovodi do graničnog stanja nosivosti konstrukcije pomoću metode višemodalnog naguravanja, što predstavlja najnižu potresnu otpornost.
- Pokazati koja od dviju promatranih kombinacija modova, i to linearne (L) i korijenske kombinacije sume kvadrata modova (SRSS - *Square Root of Sum of Square*), je kritičnija s obzirom na dobiveno niže ciljano ubrzanje podloge na osnovu analize okvirnih i mješovitih okvirnih i zidnih sustava.
- Pokazati da li je linearna (L) ili korijenska (SRSS) kombinacija modova nepovoljnija analizirajući interferenciju modova na linearnoj i nelinearnoj razini, što je testirano dinamičkim odgovorom jednostupnjevni sustava (JS) uzetih kao vektori dobiveni na osnovu linearno elastičnog modela, na djelovanje serije zapisa akcelelograma stvarnih potresa.
- Razviti novu formulaciju ekvivalentnog viskoznog prigušenja sustava, te uzimajući ga u obzir na takav način, usporedbom ciljanog ubrzanja u višemodalnoj metodi naguravanja i slomnog vršnog ubrzanja podloge dobivenog dinamičkim odgovorom sustava na pobudu serije zapisa realnih akcelelograma potresa ocjeniti njegovu točnost.
- Pokazati kako postupak određivanja ciljanog ubrzanja u višemodalnoj metodi naguravanja može postati relativno jednostavan alat za praktičnu nelinearnu statičku analizu armirano-betonskih konstrukcija izloženih potresnom djelovanju.

## **1.2 OSVRT NA POSTOJEĆE STATIČKE METODE PROCJENE POTRESNE OTPORNOSTI A/B KONSTRUKCIJA**

Metoda naguravanja predstavlja efikasan postupak za nelinearnu analizu potresne otpornosti sustava. U kombinaciji sa spektrom odgovora jednostupnjevni sustava (JS) metodom se dobiva ocjena kapaciteta nosivosti i deformacija konstrukcije usljed djelovanja potresa.

Za procjenu potresne otpornosti konstrukcija u posljednja dva desetljeća intenzivnije se razvija i primjenjuje *nelinearna statička metoda naguravanja* (*Nonlinear static pushover method*). Metoda se temelji na modeliranju materijalno i geometrijski nelinearnog ponašanja konstrukcije uzimajući u obzir potresno djelovanje kao statičko opterećenje.

1975. godine, Freeman i drugi [F14] razvili su brzu nelinearnu metodu procjene opasnosti od potresa, što se može smatrati pretečom današnje metode spektra kapaciteta. 80-tih godina prošlog stoljeća Saiidi i Sozen [S1] predložili su provođenje nelinearne dinamičke analize na ekvivalentnom jednostupnjevnom sustavu. Na osnovu toga Fajfar i Fischinger ([F4], [F5]) razvili su prvu verziju nelinearne *N2 metode*.

Nelinearna metoda proračuna potresne otpornosti implementirana je u razne međunarodne kodove za proračun konstrukcija, te je i preporučena od istraživačkih centara. Aktualni primjeri pojednostavljene nelinearne metode proračuna su *metoda spektra kapaciteta nosivosti* (*Capacity spectrum method*) koja je uvrštena u američke propise ATC 40 [A1] i Japanske norme proračuna (Japanese Building Standard Law [O1]), zatim nelinearni statički postupak koji se primjenjuje u FEMA 273 [F8], te dodatno razvijeni postupak u obliku modificiranog spektralnog ubrzanja – spektralnog pomaka (*Modified acceleration – displacement response spectrum*) primjenjivan u FEMA 356 [F9] i FEMA 440 [F11]. Metoda slična nelinearnom statičkom postupku iz FEMA 273 uvrštena je u nove NEHRP odredbe - FEMA 368 [F10].

*N2 metoda* sastavni je dio europske norme EN 1998-1 (Eurocode 8 [E2]). Europska norma EN 1998-1 uvela je nelinearni proračun konstrukcija, a samo njegovo provođenje prikazano je u Dodatku B (*Annex B*) u kojem je izložen proračun ciljanog pomaka (*target displacement*). Osnovna pretpostavka *N2 metode* je da oblik pomaka konstrukcije ostaje konstantan pri ubrzanju podloge, što ima za posljedicu da su rezultati dobiveni ovom metodom zadovoljavajući za konstrukcije koje osciliraju dominantno u prvom modu. *N2 metoda* kombinira metodu postupnog guranja modela s više stupnjeva slobode sa spektralnom analizom ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode, na osnovu čega se uspoređuje potresni kapacitet konstrukcije i potresni zahtjev izražen spektrom određenog potresa, koji je dan za jednostupnjevni sustav. Potresni zahtjev predstavlja učinke djelovanja na konstrukciju, a prezentiran je spektrom određenog potresa ili spektrom propisanim normom. Obično se definira u obliku elastičnog spektra ubrzanja gdje su spektralna ubrzanja dana kao funkcije osnovnih perioda osciliranja konstrukcije. Spektrom je uzet u obzir određeni koeficijent prigušenja, uobičajeno je 5% prigušenje. Potresni kapacitet je otpornost konstrukcije koja se dobije metodom postupnog guranja. Ciljani pomak definira se kao potresni zahtjev proizašao iz elastičnog spektra odgovora definiranog u ovisnosti o pomaku

ekvivalentnog jednostupnjevskog sustava. Na temelju zahtjevanih spektara za određenu razinu ubrzanja tla i krivulje kapaciteta nosivosti, te lokalnih potresnih zahtjeva prema izračunatom ciljanom pomaku može se procijeniti ponašanje konstrukcije i pojava oštećenja usljed potresnog djelovanja.

Sve ove metode kombiniraju metodu postupnog guranja modela višestupnjevskog sustava sa spektrom odgovora ekvivalentnog jednostupnjevskog sustava. Navedene metode uključuju formulaciju u formatu ubrzanje – pomak. U tom formatu kapacitet nosivosti konstrukcije direktno se može usporediti sa zahtjevom odgovora konstrukcije na potresnu pobudu. Kapacitet nosivosti konstrukcije prezentiran je krivuljom kapaciteta nosivosti u formatu sila – pomak, dobivenom nelinearnom statičkom metodom naguravanja. Potom se poprečna sila na bazi modela i pomak vrha konstrukcije prebace u format spektralno ubrzanje - spektralni pomak (*acceleration – displacement response spectrum – ADRS format*) za ekvivalentni jednostupnjevni sustav. Definiranje potresnog zahtjeva spektra odgovora predstavlja osnovnu razliku između izloženih metoda. Sjecište krivulje kapaciteta nosivosti i zahtjevanog spektra omogućuju procjenu ubrzanja i zahtjevanog ciljanog pomaka.

Razina ciljanog pomaka prema metodi spektra kapaciteta nosivosti određuje se na osnovu krivulje naguravanja i krivulje zahtjeva spektra, a konstruira se iterativnim postupkom u ADRS formatu. Iterativni postupak započinje izborom pretpostavljenog ciljanog pomaka na temelju kojeg se određuje efektivni elastični period i ekvivalentno viskozno prigušenje konstrukcije. Ekvivalentni linearni sustav definiran je s nižom krutosti i većim iznosom prigušenja, a pri tome efektivni elastični period osciliranja sustava odgovara sekantnoj krutosti za maksimalni pomak vrha konstrukcije. Predloženi su različiti postupci određivanja ekvivalentnog viskoznog prigušenja kojima je cilj uzeti u obzir histerezni gubitak energije. Istraživanja na temu razvoja i primjene metode spektra kapaciteta nosivosti prikazana su u radovima [F12] i [F13], a dodatna poboljšanja navedena su kao *AutoCSM metoda* i izložena su u radovima [G4] i [G5]. Daljnja unaprijeđenja metode došla su razvojem *prilagodljive metode spektra kapaciteta (Adaptive capacity spectrum method)* [C1] i razvojem *poboljšane metode spektra kapaciteta (Improved capacity spectrum method)* što je prikazano u radovima [F2], [G1], [L2] i [M6]. Iako se metoda spektra kapaciteta nosivosti može primjeniti na sve konstrukcije, najčešća joj je primjena za provjeru postojećih konstrukcija na horizontalna potresna djelovanja.

Od ostalih metoda korištenih za nelinearnu analizu potresne otpornosti konstrukcija u zadnjem desetljeću koristi se i *DDBD metoda (Direct displacement-based design)*, što je prikazano u radovima (Priestley [P2], [P3], [P4], Panagiotakos [P1], Kowalsky [K4], Loeding

[L3], Moghim [M8] i Chopra [C4]). Metoda se temelji na opisivanju višestupnjevskog sustava ekvivalentnim jednostupnjevskim sustavom, uzimajući u obzir prigušenje, duktilnost konstrukcije i ciljani pomak.

Razna poboljšanja i primijene nelinearne metode naguravanja poput onog u radovima (Fajfar [F1], [F3], [F6] i [F7]) još su aktualna (Čaušević [Č2], Lagaros [L1], Mitrović [M7]). U posljednje vrijeme sve više se razvija i koristi *modalna metoda naguravanja (Modal pushover method)*, kao što je prikazano u radu [C3], a zasniva se na reformulaciji metode spektra kapaciteta nosivosti.

U odnosu na tu metodu razvijena je i *višemodalna metoda naguravanja (Multi-mode pushover procedure)* koja je prikazana u radovima [S2] i [S6]. Razvijena je i *metoda modalnih kombinacija (Modal combination pushover procedure)* [K1], kao i podvarijanta s *prilagodljivom modalnom kombinacijom (Adaptive modal combination)* što je prikazano u radovima [K2], [S5] i [D1].

U prethodno navedenim radovima višemodalne metode naguravanja, tako i u mnogim radovima, kao što su (Chopra [C3], [C5], Goel [G2], [G3], Jiang [J1], Kalkan [K3], Shakeri [S4], i Trogrlić [T6]) promatran je utjecaj viših modova kod nelinearne analize konstrukcija pomoću metode naguravanja sa zaključkom da je znatan utjecaj viših modova.

Vršene su i usporedbe rezultata dinamičke analize armirano-betonskih konstrukcija s metodom naguravanja da bi se dobila ocjena točnosti metode (Mwafy [M9], Čaušević [Č1], Athanassiadou [A2]).

U ovom radu je na novi i originalan način korištena višemodalna metoda naguravanja kako je prikazano u nastavku.

### 1.3 SADRŽAJ RADA

U okviru ovog rada uveden je pojam ciljanog ubrzanja i prikazan je postupak traženja ciljanog ubrzanja tla kao mjera najniže potresne otpornosti sustava. Dobivanje ciljanog ubrzanja postiže se iterativnim postupkom uzastopne primjene nelinearne analize konstrukcije višemodalnom metodom naguravanja.

Kombinacijom metode naguravanja sa spektrom odgovora jednostupnjevskog sustava dobiva se ocjena kapaciteta nosivosti i deformacija konstrukcije usljed djelovanja potresa. Krivulje kapaciteta nosivosti određene su metodom naguravanja za svaki mod zasebno, te zatim prebačene

u ADRS format (spektar odgovora ubrzanje - pomak). Oblik modova i veličine perioda osciliranja konstrukcije određuju se na osnovu linearno elastičnog modela.

Postupak višemodalne metode naguravanja započinje izborom konkretnog elastičnog spektra uključujući u obzir viskozno prigušenje sustava. Potom se bira iznos hipotetskog vršnog ubrzanja tla, uobičajeno ono koje je najniže od svih modova. Za svaki mod pojedinačno, na temelju krivulje kapaciteta nosivosti, određuje se odgovarajuća razina spektralnog ubrzanja i spektralnog opterećenja uzimajući u obzir pomak pri  $2/3$  iskoristivosti pomaka na krivulji nosivosti, odnosno ciljani pomak prema EN 1998 ili u drugom slučaju uzimajući u obzir pomak pri  $3/3$  iskoristivosti pomaka na krivulji nosivosti. Oblik vektora opterećenja odgovara obliku odgovarajućeg moda.

Nadalje, opći slomni vektor opterećenja formira se prema nekim mogućim kombinacijama opterećenja stvarnih modova. Kao moguće modalne kombinacije u radu su prikazane: linearna (L) kombinacija i kombinacija kvadratnog korijena iz sume kvadrata modova (SRSS). Za ovako formirano opterećenje, odnosno opći slomni vektor, pomoću nelinearne analize konstrukcije metodom naguravanja određen je kapacitet nosivosti, odnosno računsko granično opterećenje. Postavljeni zadatak se smatra riješenim kada je u granicama zadane točnosti postignuta jednakost opterećenja iz općeg slomnog vektora i računskog graničnog opterećenja za pretpostavljeno ubrzanje tla. U nekoliko koraka, za odabrano različito hipotetsko ubrzanje i pripadne vektore, postupak vodi brzom rješenju. Dobiveni rezultat daje nam ciljano ubrzanje koje predstavlja najmanje ubrzanje tla koje dovodi do računskog graničnog stanja nosivosti konstrukcije.

U radu je prikazana i nova formulacija za određivanje ekvivalentnog viskoznog prigušenja konstrukcije koje se dobiva izjednačavanjem utrošene energije tijekom jednog ciklusa osciliranja nelinearnog sustava i ekvivalentnog linearnog sustava, uz uvjet da izvršeni rad nelinearnog sustava bude jednak izvršenom radu zamijenjujućeg linearnog sustava sa sekantnom krutosti.

Provedena je i validacija metode ciljanog ubrzanja u višemodalnoj metodi naguravanja s dinamičkim odgovorom sustava na osnovu slomnog vršnog ubrzanja podloge. Za dinamičku pobudu sustava korišteni su zapisi akcelelograma realnih potresa koji su birani na način da kategorija tla na kojoj je potres zabilježen odgovara kategoriji tla projektirane građevine.

Rad je podijeljen u osam poglavlja.

U *prvom poglavlju* općenito je dan osvrt na postojeće statičke nelinearne metode za analizu potresne otpornosti armirano-betonskih konstrukcija te je u okviru toga opisana i višemodalna metoda naguravanja korištena u ovom radu. U primijeni metode naguravanja dominira metoda



zasnovana na raspodjeli ubrzanja prema prvom modu osciliranja sustava, trokutnoj i jednolikoj raspodjeli ubrzanja po visini konstrukcije. U mnogim radovima promatran je utjecaj viših modova sa zaključkom da je znatan njihov utjecaj. Stoga je cilj ovog rada bio da se na nov i originalan način prezentira višemodalna metoda naguravanja uz formulaciju ciljanog ubrzanja tla kao mjera najniže potresne otpornosti sustava, s tim da se u analizu uključi i realni veći iznos viskoznog prigušenja. U sklopu ovog poglavlja prikazani su ciljevi i metodologija rada, te je dan i sadržaj rada.

U *drugom poglavlju* opisan je originalni postupak traženja ciljanog ubrzanja tla kao mjera najniže potresne otpornosti sustava. U okviru toga prikazane su krivulje kapaciteta nosivosti određene metodom naguravanja promatranih armirano-betonskih konstrukcija za svaki mod zasebno, te njihova konverzija u ADRS format (spektar odgovora ubrzanje - pomak) za prethodno odabrani elastični spektar, s tim da su oblici modova i veličine perioda osciliranja određeni na osnovu linearno elastičnog modela. Dobivanje ciljanog ubrzanja postiže se iterativnim putem, višemodalnim naguravanjem po načelu anvelope. Prikazano je višemodalno naguravanje na primjeru 5-katnog i 9-katnog prostornog armirano-betonskog okvirnog sustava, te 5-katnog prostornog armirano-betonskog mješovitog sustava okvira i zidova, linearnom (L) kombinacijom modova i kombinacijom modova kao kvadratnog korijena iz sume kvadrata (SRSS), te su izneseni komentari dobivenih rezultata. Općenitost postupka ne gubi se u analizi okvira veće katnosti niti drugih konstrukcijskih sustava s tim što je nužno uključiti sve više značajne vektore.

U *trećem poglavlju* prikazan je originalni postupak koji ima svrhu pokazati koja je od dvije kombinacije modova, i to linearne (L) i korijenske (SRSS), nepovoljnija u analizi koja je provedena na djelovanje serije od osam odabranih zapisa akcelelograma stvarnih potresa. Analizirani su primjeri 5-katnog i 9-katnog prostornog armirano-betonskog okvirnog sustava u dva smjera kao i samostalni vitki zid. Analiza pojavnosti, odnosno istovremenosti pojave vektora, provedena je na linearnoj i nelinearnoj razini za jednostupnjevne sustave (JS) uzete kao modovi dobiveni na osnovu linearno elastičnog modela, a dinamički odgovor pojedinog jednostupnjevnog sustava dobiven je Newmarkovom metodom srednjeg ubrzanja. U okviru ovog poglavlja opisana je formulacija numeričkog linearnog modela za ocjenu kombinacije modova na linearnoj razini, kao i formulacija numeričkog nelinearnog modela za ocjenu kombinacije modova na nelinearnoj razini. Prikazani su rezultati dinamičkog odgovora za linearan i nelinearan JS sustav i iznijeti su zaključci.

U *četvrtom poglavlju* prikazana je nova formulacija dobivanja ekvivalentnog viskoznog prigušenja sustava pomoću izjednačavanja utrošene energije tijekom jednog ciklusa osciliranja

nelinearnog sustava i ekvivalentnog linearnog sustava. U okviru ovog poglavlja određeno je ciljano ubrzanje u višemodalnoj metodi naguravanja za linearnu (L) kombinaciju modova uz elastični spektar s ekvivalentnim viskoznom prigušenjem definiranim na prethodno opisani način. Analizirana su dva slučaja, i to kada se promatra pomak pri 2/3 i 3/3 iskoristivosti pomaka na krivulji nosivosti uz elastični spektar s izračunatim ekvivalentnim viskoznom prigušenjem, te je dana usporedba dobivenih rezultata.

U *petom poglavlju* prikazani su rezultati dinamičkog odgovora 5-katnih i 9-katnih prostornih armirano-betonskih okvirnih sustava dobiveni programskim paketom za nelinearnu analizu *SeismoStruct*. U okviru ovog poglavlja provedena je validacija metode ciljanog ubrzanja s dinamičkim odgovorom sustava na osnovu slomnog vršnog ubrzanja podloge. Za dinamičku pobudu sustava korišteni su zapisi akcelelograma realnih potresa. Uvažavajući izračunato ekvivalentno viskozno prigušenje sustava, te iskoristivost krivulje nosivosti do 3/3 pomaka, usporedbom ciljanog ubrzanja višemodalne metode naguravanja i slomnog vršnog ubrzanja podloge dobivenog metodom inkrementalne dinamičke analize pokazat će se vrlo dobro slaganje ciljanog ubrzanja i slomnog vršnog ubrzanja podloge čime se dokazuje da je ekvivalentno viskozno prigušenje izračunato na način koji je opisan u četvrtom poglavlju ovog rada realno i da je znatno veće od onog sugeriranog u literaturi.

U *šestom poglavlju* izvršena je sinteza metode ciljanog ubrzanja, te je na analiziranim primjerima 5-katnog i 9-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava pokazana relativno jednostavna primjena određivanja ciljanog ubrzanja u višemodalnoj metodi naguravanja za ocjenu potresne otpornosti sustava uzimajući u obzir elastične spektre s izračunatim realnim ekvivalentnim viskoznom prigušenjem kako je opisano u radu. Korištena je linearna (L) kombinacija modova koja se pokazala nepovoljnijom od kombinacije kvadratnog korijena iz sume kvadrata modova (SRSS), te je računato s 3/3 iskoristivosti pomaka na krivulji nosivosti. Prikazan je i jedan pojednostavljeni postupak za praktičnu primjenu metode ciljanog ubrzanja.

U *sedmom poglavlju* izneseni su najvažniji zaključci ovog rada, temeljeni na rezultatima dobivenim iz istraživanja i analiza provedenih u radu, kao i neki mogući pravci daljnjih istraživanja.

*Osmo poglavlje* sadrži pregled korištene literature.

## **2. METODA CILJANOG UBRZANJA U VIŠEMODALNOJ METODI NAGURAVANJA**

---

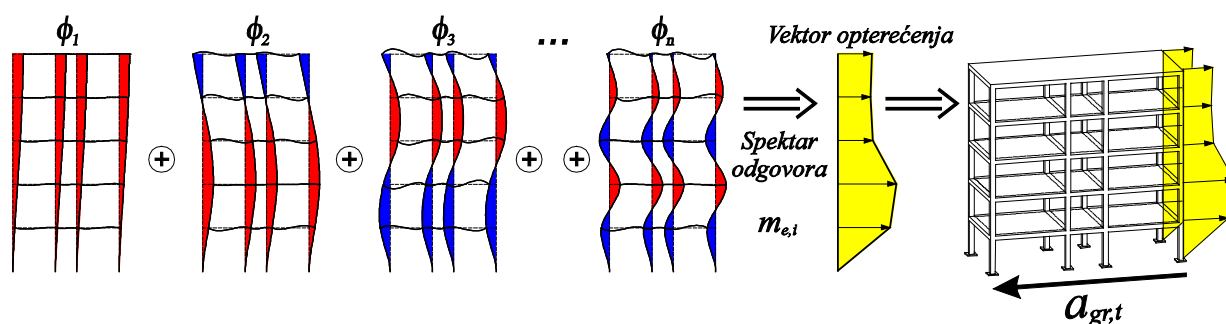
U ovom poglavlju opisan je originalni postupak traženja ciljanog ubrzanja tla kao mjera najniže potresne otpornosti sustava. U okviru toga prikazane su krivulje nosivosti određene metodom naguravanja analiziranih armirano-betonskih konstrukcija za svaki mod zasebno, te je zatim izvršena njihova konverzija u ADRS format (spektar odgovora ubrzanje - pomak) za prethodno odabrani elastični spektar, s tim da su oblici modova i veličine perioda osciliranja određeni na osnovu linearno elastičnog modela.

Dobivanje ciljanog ubrzanja postiže se iterativnim postupkom, višemodalnim naguravanjem po načelu anvelope. Prikazano je višemodalno naguravanje na primjerima 5-katnog i 9-katnog prostornog armirano-betonskog okvirnog sustava, te 5-katnog prostornog armirano-betonskog mješovitog sustava okvira i zidova, linearnom (L) kombinacijom modova i kombinacijom kvadratnog korijena iz sume kvadrata modova (SRSS).

## 2.1 OPĆENITO O METODI

U ovom radu se izlaže jedna novo razvijena metoda višemodalnog naguravanja s ciljem uključivanja viših modova na način da se iterativnim putem zadovolji princip anvelope i odredi najniža potresna otpornost sustava. Primjena metode ciljanog ubrzanja ostvariva je za konkretan elastični spektar. U primjerima prikazanim u ovom radu korišten je spektar tipa 1 za tlo tipa A (parametar tla  $S = 1.0$ ) prema europskoj normi EN 1998 [E2].

Na crtežu 2.1 dan je shematski prikaz metode ciljanog ubrzanja, koja će u nastavku biti detaljnije opisana.



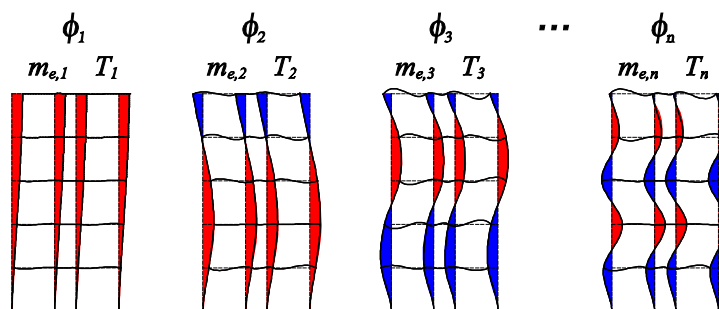
Crtež 2.1 Shematski prikaz metode ciljanog ubrzanja u višemodalnoj metodi naguravanja

Originalno razvijenom metodom ciljanog ubrzanja dolazi se do iznosa ciljanog ubrzanja tla  $a_{gr,t}$ , koje predstavlja najmanje ubrzanje tla koje dovodi analizirani sustav do graničnog stanja nosivosti, te je njime definirana najniža potresna otpornost sustava.

## 2.2 ODREĐIVANJE CILJANOG UBRZANJA

Metoda ciljanog ubrzanja može se primijeniti kroz sljedeći niz koraka kojima je definiran originalni postupak određivanja ciljanog ubrzanja tla  $a_{gr,t}$ :

-Prvo se rješenjem linearne dinamičke zadaće dobiju vlastiti vektori  $\phi_i$ , te podaci o pripadajućim periodima  $T_i$  i sudjelujućim masama  $m_{e,i}$  analiziranog sustava što je prikazano na crtežu 2.2.



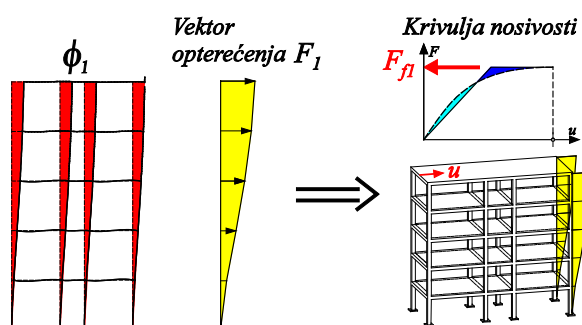
Crtež 2.2 Određivanje svojstava vektora opterećenja

- Potom se izvrši zasebno naguravanje svih značajnih vektora  $\phi_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) koji su uzeti u analizu i dobiju se krivulje nosivosti pojedinog vektora  $\phi_i$ . Oblik vektora opterećenja odgovara obliku odgovarajućeg moda, odnosno vektor opterećenja  $F_i$  za svaki  $i$ -ti mod zasebno, određen je preko faktora intenziteta ukupnog djelovanja  $p_i$ , kao produkt matrice masa  $\mathbf{M}$  i vektora oblika  $\phi_i$ .

$$F_i = p_i \mathbf{M} \phi_i \quad (2.1)$$

Krivulje kapaciteta nosivosti dobivene su numeričkim modelom stabilnosti i nosivosti prostornih linijskih konstrukcija s uvažavanjem materijalne i geometrijske nelinearnosti [T1, T2], a opći numerički postupak je inkrementalno iterativni pri čemu se opterećenje nanosi postupno u inkrementalnim koracima od nultog intenziteta pa sve do sloma. Na taj način određene su slomne poprečne sile  $F_{fi}$  u presjeku pri bazi proračunskog modela za svaki mod pojedinačno.

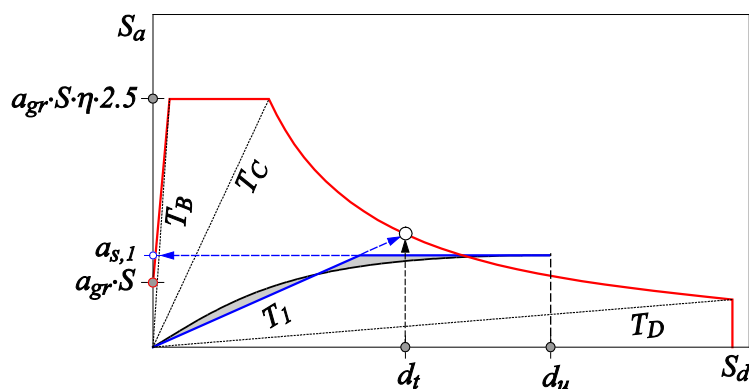
Na crtežu 2.3 prikazano je određivanje krivulje nosivosti vektora  $\phi_1$ , a postupak određivanja krivulja nosivosti svih viših vektora je analogan prikazanom.

Crtež 2.3 Određivanje krivulje nosivosti vektora  $\phi_1$  postupkom naguravanja

- Potom se odabere tip elastičnog spektra (tip 1 ili tip 2) i tip tla na kojem se nalazi analizirana konstrukcija (parametar tla  $S$ ) prema [E2].

- Zatim se izvrši konverzija krivulja nosivosti u ADRS format (spektar odgovora ubrzanje - pomak) za prethodno odabrani spektar.

- Iterativni postupak određivanja ciljanog ubrzanja tla  $a_{gr,t}$  započinje izborom polaznog ubrzanja tla  $a_{gr}$ . Preporuča se kao polazno ubrzanje tla uzeti najmanje granično ubrzanje (najmanje ubrzanje koje izaziva slom) od svih analiziranih modova što odgovara graničnom ubrzanju prvog moda, koje se dobije na temelju krivulje nosivosti vektora  $\phi_1$  uvažavajući 2/3 maksimalnog pomaka  $d_u$  na krivulji nosivosti, odnosno uzimajući u obzir ciljani pomak  $d_t$  prema europskoj normi EN 1998 (Dodatak B) [E2], što je prikazano na crtežu 2.4.



**Crtež 2.4** Proračun potresne otpornosti prvog vektora  $\phi_1$ , odnosno određivanje polaznog ubrzanja tla  $a_{gr}$

Time je određeno i spektralno ubrzanje  $a_{s,1}$ , te poznavajući efektivnu masu aktiviranu prvim vektorom  $m_{e,1}$  određeno je i spektralno opterećenje  $F_1$ .

Uočava se da se do polaznog ubrzanja tla  $a_{gr}$  dolazi traženjem sjecišta perioda  $T_1$  s bilinearnog dijagrama ubrzanje – pomak i srodnog ciljanog pomaka  $d_t$  čime je definiran spektar za to polazno ubrzanje  $a_{gr}$ . U spektru figurira i korekcijski faktor prigušenja  $\eta$  koji je definiran izrazom (2.2), gdje  $\zeta$  predstavlja viskozno prigušenje izraženo u postocima [E2].

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5 + \zeta}} \quad (2.2)$$

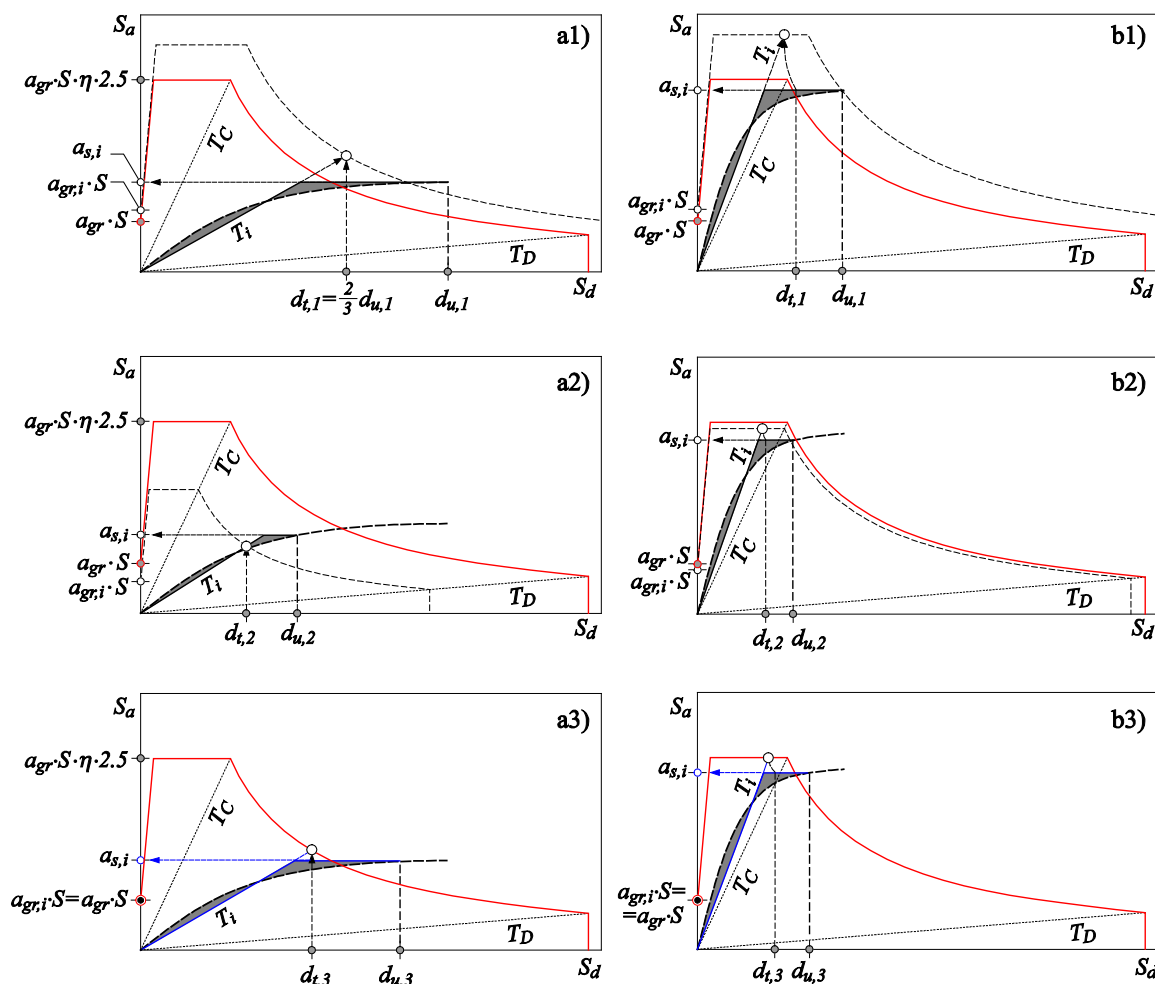
Kod analiziranih primjera u ovom poglavlju računato je s 5% viskoznim prigušenjem ( $\eta=1$ ).

- Za svaki viši mod, na temelju krivulje nosivosti pojedinog moda i prethodno definiranog spektra za polazno ubrzanje tla  $a_{gr}$  određuje se odgovarajuća razina spektralnog ubrzanja  $a_{s,i}$  uvažavajući pravila EN 1998 i Dodatak B, tako da pomak pri slomu  $d_u$  na krivulji nosivosti iznosi 150 % ciljanog pomaka  $d_t$ .

$$d_t = \frac{2}{3} d_u \quad (2.3)$$

Potrebno je odrediti pripadni elastoplastični ekvivalent (bilinearni dijagram ubrzanje - pomak), odnosno dijagram kod kojeg sjecište perioda  $T_i$  i srodnog ciljanog pomaka  $d_t$  pada na spektar za

polazno ubrzanje tla. Drugim riječima, kroz par pokušaja variranjem iskoristivosti pomaka na krivulji nosivosti, mora se pronaći jednakost dobivenog ubrzanja tla  $a_{gr,i}$  s polaznim ubrzanjem tla  $a_{gr}$ , iz čega slijedi spektralno ubrzanje pojedinog moda  $a_{s,i}$ , a sami postupak određivanja spektralnog ubrzanja prikazan je na crtežu 2.5.



Crtež 2.5 Određivanje spektralnog ubrzanja  $a_{s,i}$ : a1)-a3) za  $T_i \geq T_C$ ; b1)-b3) za  $T_i < T_C$  [E2]

Za slučaj kada je period  $T_i \geq T_C$  na crtežu 2.5a1-2.5a3 prikazan je odabrani bilinearni dijagram ubrzanje - pomak. Na crtežu 2.5a1 odabrani dijagram daje veće, a na crtežu 2.5a2 manje ordinate na ADRS krivulji u odnosu na ADRS krivulju za pretpostavljeno ubrzanje tla  $a_{gr}$ . Na crtežu 2.5a3 odabrani dijagram za odgovarajući period  $T_i$  i srodni ciljani pomak  $d_t$  daje sjecište na ADRS krivulji, iz čega slijedi spektralno ubrzanje  $a_{s,i}$ . Sličan postupak provodi se za slučaj ako je  $T_i < T_C$  kada se sjecište traži prema europskoj normi EN 1998 i Dodatku B [E2], što se može vidjeti na crtežu 2.5b1-2.5b3.

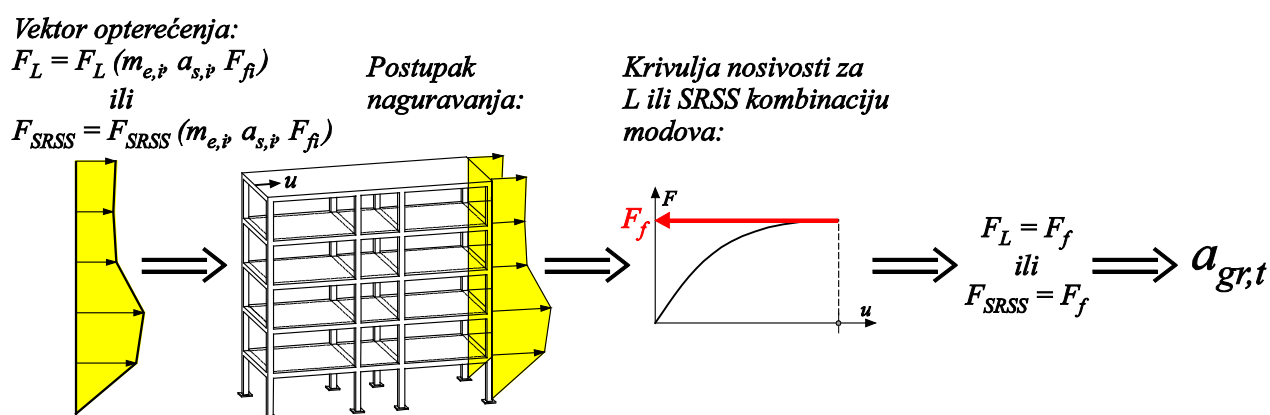
-Nadalje, opći slomni vektor opterećenja formira se prema nekim mogućim kombinacijama opterećenja stvarnih modova. Kao moguće modalne kombinacije u ovom radu su prikazane:

linearna (L) kombinacija i kombinacija kvadratnog korijena iz sume kvadrata modova (SRSS), koje su detaljnije opisane u nastavku.

- Za ovako formirano opterećenje, odnosno opći slomni vektor ( $F_L$  ili  $F_{SRSS}$ ), pomoću nelinearne analize konstrukcije metodom naguravanja određen je kapacitet nosivosti, odnosno računsko granično opterećenje  $F_f$ . Ukoliko za polazno ubrzanje tla  $a_{gr}$  nije postignuta jednakost opterećenja iz općeg slomnog vektora i računskog graničnog opterećenja, tada je potrebno pretpostaviti novo ubrzanje tla  $a_{gr}$  te provesti istu gore opisanu proceduru određivanja spektralnog ubrzanja  $a_{s,i}$  (prikazano na crtežu 2.5) i spektralnog opterećenja  $F_i$  poznavajući efektivnu masu aktiviranu pojedinim  $i$ -tim modom  $m_{e,i}$ .

Postavljeni zadatak se smatra riješenim kada je u granicama zadane točnosti za pretpostavljeno ubrzanje tla  $a_{gr}$  postignuta jednakost opterećenja iz općeg slomnog vektora ( $F_L$  ili  $F_{SRSS}$ , zavisno o kombinaciji opterećenja koja se promatra) i računskog graničnog opterećenja ( $F_f$ ). Iterativnim postupkom koji ima obilježja principa anvelope, za odabrano različito pretpostavljeno ubrzanje tla  $a_{gr}$  i dobivene pripadne vektore opterećenja  $F_i$ , u nekoliko koraka postupak vodi brzom rješenju. Dobiveni rezultat daje nam ciljano ubrzanje tla  $a_{gr,t}$  koje predstavlja najmanje ubrzanje tla koje dovodi do računskog graničnog stanja nosivosti konstrukcije, te je njime definirana najniža potresna otpornost sustava.

Na crtežu 2.6 shematski je prikazano određivanje ciljanog ubrzanja tla.



Crtež 2.6 Shematski prikaz određivanja ciljanog ubrzanja

### 2.2.1 Ciljano ubrzanje prema linearnoj (L) kombinaciji modova

Kako je prethodno navedeno u radu je provedena analiza potresne otpornosti armirano-betonskih sustava opterećenih linearnom (L) kombinacijom modova. Polazno granično



opterećenje  $F_L = \sum F_i$  za linearnu (L) kombinaciju modova ovisi o odabranom polaznom ubrzanju tla  $a_{gr}$ , a može se prikazati u sljedećem obliku prema [T6],

$$F_L = \sum F_i = \sum \pm m_{e,i} a_{s,i} (a_{gr}) F_{fi} / |F_{fi}| \quad (2.4)$$

gdje znak  $\pm$  znači više nepovoljan učinak na karakterističnom presjeku. Karakteristični presjek za primjer armirano-betonskog okvira predstavljen je preko sume momenata savijanja na dnu najnižeg kata. Tijekom izbora predznaka, može se koristiti utjecajna linija za karakteristične vrijednosti.

Izraz  $F_{fi}$  predstavlja slomnu silu za pojedini vlastiti vektor dobivenu postupkom naguravanja. U numeričkom postupku, pretpostavljeno opterećenje se nanosi inkrementalno. Kao rezultat metode naguravanja dobiveno je pridruženo računsko granično opterećenje, odnosno ukupna poprečna sila u presjeku pri osnovi proračunskog modela  $F_f$  cijelog sustava.

Omjer iznosa računskog graničnog opterećenja  $F_f$  i polaznog vektora opterećenja  $F_L$  pokazuje realnost polazne postavke.

Tek kada se dobije njihova jednakost, u granicama zadane računске točnosti, postignut je traženi rezultat odnosno dobiveno je ekstremno granično ubrzanje, tj. ciljano ubrzanje  $a_{gr,t}$  koje je najmanje računsko ubrzanje tla i predstavlja najnižu potresnu otpornost sustava.

## 2.2.2 Ciljano ubrzanje prema korijenskoj (SRSS) kombinaciji modova

U radu je provedena i analiza potresne otpornosti armirano-betonskih sustava opterećenih korijenskom (SRSS) kombinacijom vektora. Korijenska kombinacija, odnosno metoda kvadratnog korijena iz sume kvadrata modova (SRSS) je metoda koja se temeljem razvoja korijena u red, u slučajevima kada dominira prvi sumand, može pojednostavniti kao suma prvog člana i polovice sume svih drugih članova. Polovica sudjelujućeg opterećenja pojedinačnog višeg moda približno je jednaka ukupnom opterećenju koje pripada spektru čije je ubrzanje tla  $a_{gr}/2$  [T6], tako da se pripadna korijenska (SRSS) kombinacija modova približno može opisati izrazom

$$F_{SRSS} = \sum F_i = \pm m_{e,1} a_{s,1} (a_{gr}) F_{f1} / |F_{f1}| + \sum_{i=2}^n \pm m_{e,i} a_{s,i} (a_{gr}/2) F_{fi} / |F_{fi}| \quad (2.5)$$

Potrebno je napomenuti da se spektralna ubrzanja prvog moda  $a_{s,1}$  određuju na osnovu spektra za pretpostavljeno polazno ubrzanje tla  $a_{gr}$ , dok se spektralna ubrzanja viših modova ( $a_{s,i}$ ,  $i=2, \dots, n$ ) određuju na osnovu spektra za ubrzanje tla iznosa  $a_{gr}/2$ . Ostali dio postupka je analogan onom za linearnu (L) kombinaciju modova.

## 2.3 PRIMJERI

U nastavku je prikazan postupak određivanja ciljanog ubrzanja tla na tri primjera prostornih armirano-betonskih sustava. Analizirana su dva primjera prostornih armirano-betonskih okvira, i to 5-katni i 9-katni okvir, te je analiziran i primjer 5-katnog mješovitog sustava okvira i zidova.

Proračun se provodi uz sljedeće pretpostavke i ograničenja: (i) proračun dinamičkih svojstava ( $\phi_i$ ,  $T_i$ ,  $m_{e,i}$ ) provodi se na linearnom modelu okvira, odnosno sustavu okvira i zidova, s međukatnim pločama i ishodišnim modulom elastičnosti  $E_{c0}$ ; (ii) u proračun nije uključen učinak slučajne torzije; (iii) okviri iz prva dva primjera su simetrični u oba smjera.

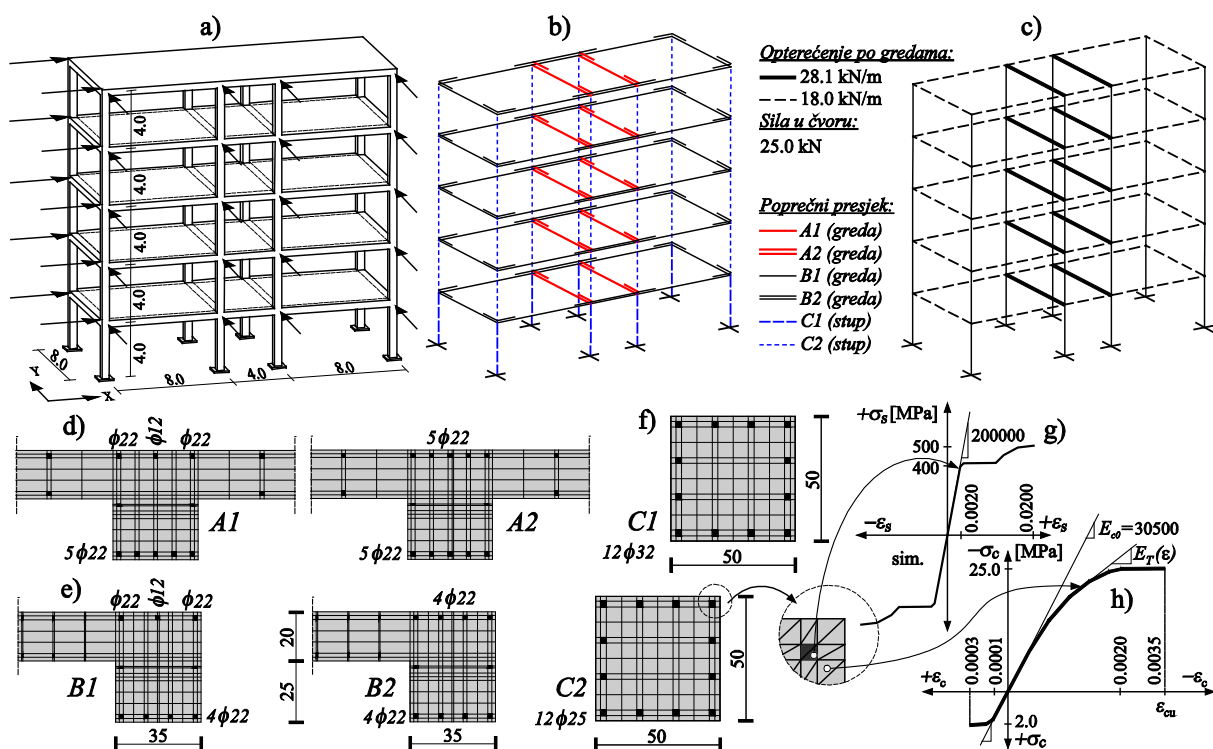
### 2.3.1 Primjer 1: 5-katni prostorni armirano-betonski okvir

#### 2.3.1.1 Opis modela i proračun vektora opterećenja

Analizira se 5-katni prostorni armirano-betonski okvirni sustav dimenzija kako je prikazano na crtežu 2.7a. Dimenzije i diskretizacija poprečnih presjeka greda prikazani su na crtežima 2.7d i 2.7e, a stupova na crtežu 2.7f. Svojstva poprečnih presjeka dodijeljena su okviru kako je pokazano na crtežu 2.7b.

Za proračun vlastitih vektora zadana je vlastita težina modela, dodatno stalno opterećenje po ploči u iznosu  $2.0 \text{ kN/m}^2$  i promjenjivo opterećenje po ploči u iznosu  $2.0 \text{ kN/m}^2$ , te modul materijala  $E_{c0} = 30.5 \text{ GPa}$ , kao ishodišni modul elastičnosti na modelu betona.

Za proračun krivulje nosivosti korišten je numerički model armaturnog čelika i betona prikazan na crtežima 2.7g i 2.7h. Raspodijeljeno opterećenje je zadano po gredama kako je prikazano na crtežu 2.7c, a koncentrirane vertikalne sile u iznosu  $25.0 \text{ kN}$  su zadane u čvorovima na svim križanjima greda i stupova. Ukupna težina modela iznosi  $W = 8290.0 \text{ kN}$ , a ukupna masa modela iznosi  $M = 845.0 \text{ t}$ .



**Crtež 2.7** Primjer 1: **a)** prostorni 5-katni okvir; **b)** oznake poprečnih presjeka; **c)** opterećenje po gredama; **d)-f)** diskretizacije poprečnih presjeka; **g)** model armaturnog čelika; **h)** model betona

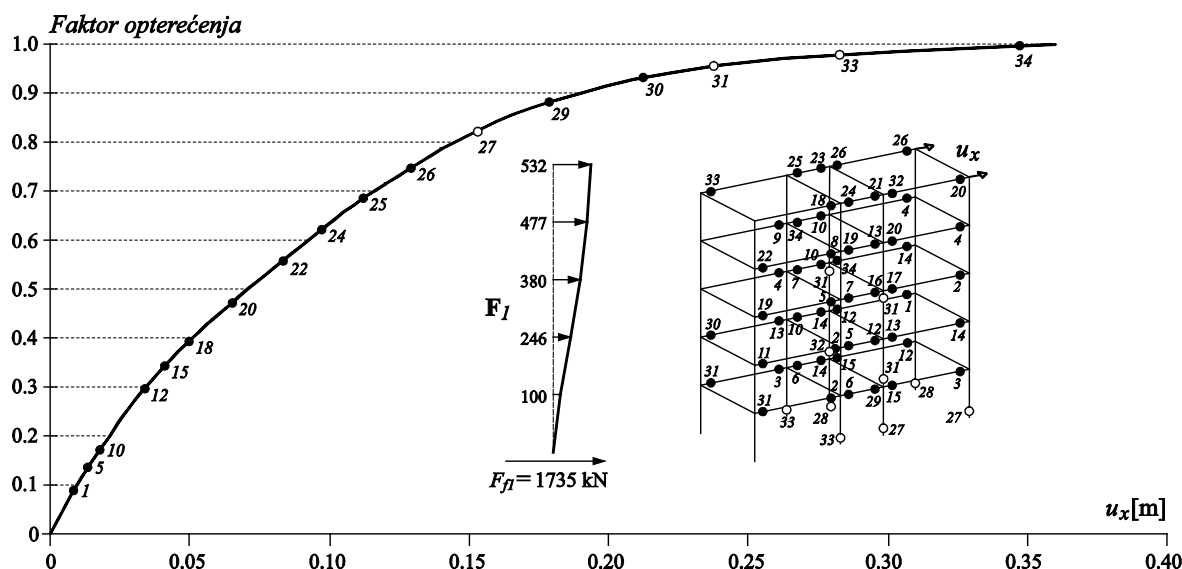
Rješenjem linearne dinamičke zadaće dobiveni su vlastiti vektori  $\phi_i$ , te podaci o pripadajućim periodima  $T_i$  i sudjelujućim masama  $m_{e,i}$ , što je prikazano u tablici 2.1.

Razdioba i intenzitet bočnih horizontalnih sila na 5-katni okvir određena je prema izrazu (2.1). Tako nastali vektor horizontalnog opterećenja u nelinearnom proračunu monotono je povećavan sve do sloma, odnosno dostizanja faktora kritičnog opterećenja. Suma svih horizontalnih sila daje slomnu silu  $F_{fi}$  pojedinog vlastitog vektora. U tablici 2.1 prikazano je i granično ubrzanje  $a_{gr,i}$  svakog pojedinog moda, odnosno ubrzanje koje izaziva slom pojedinog moda.

**Tablica 2.1** Svojstva vektora horizontalnog opterećenja 5-katnog a/b okvira za smjer  $x$

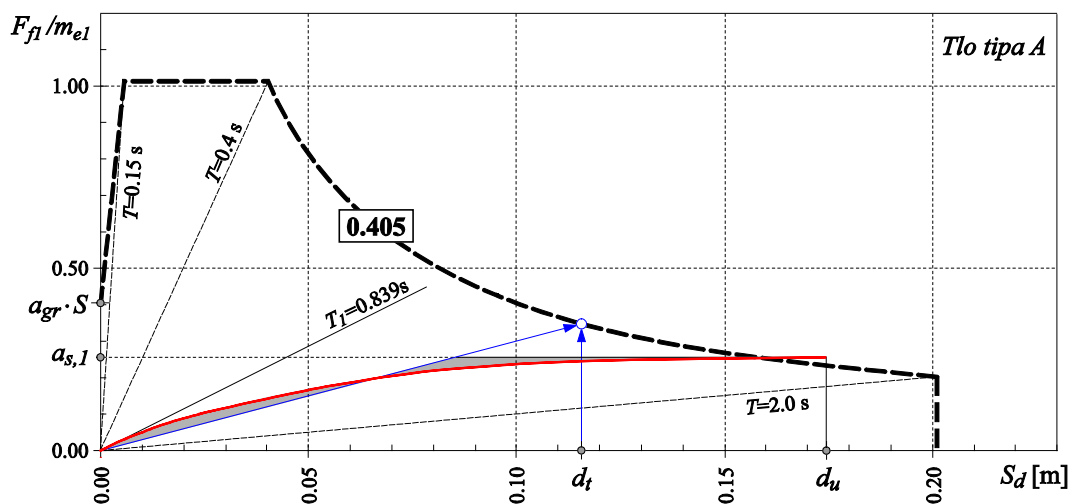
Vektor	$T_i$ [s]	$m_{e,i}$ [%]	$m_{e,i}$ [t]	$F_{fi}$ [kN]	$a_{gr,i}$
$\phi_1$	0.839	81.47	688.42	1735	0.405
$\phi_2$	0.265	10.51	88.81	1823	1.75
$\phi_3$	0.146	4.12	34.81	2786	7.90
$\phi_4$	0.097	1.98	16.73	1954	6.32
$\phi_5$	0.076	0.67	5.66	1838	41.70

Oblik prvog vektora opterećenja u graničnom stanju, pripadna krivulja nosivosti kao i redosljed nastajanja plastifikacijskih zglobova za smjer  $x$  prikazani su na crtežu 2.8. Rani početak plastifikacije je posljedica opterećivanja na način tipičan za metodu naguravanja, gdje se u prvoj fazi zadaje vertikalno gravitacijsko opterećenje te dostiže pripadajuće ravnotežno naponsko – deformacijsko stanje, a u drugoj fazi horizontalno potresno opterećenje. Stoga, plastifikacija počinje neposredno nakon starta druge faze opterećenja.



Slika 2.8 Krivulja nosivosti za vektor  $\phi_I$  (smjer  $x$ ) i slijed plastifikacije presjeka

Konverzija krivulje nosivosti vektora  $\phi_I$  u ADRS format, određivanje elastoplastičnog ekvivalenta kao i graničnog ubrzanja tla za prvi vektor  $a_{gr,1}$ , prikazani su na crtežu 2.9 na primjeru 5-katnog armirano-betonskog okvira u  $x$  smjeru. Dobiveno je granično ubrzanje u iznosu  $a_{gr,1} = 0.405g$ , što predstavlja potresnu otpornost prvog vektora.



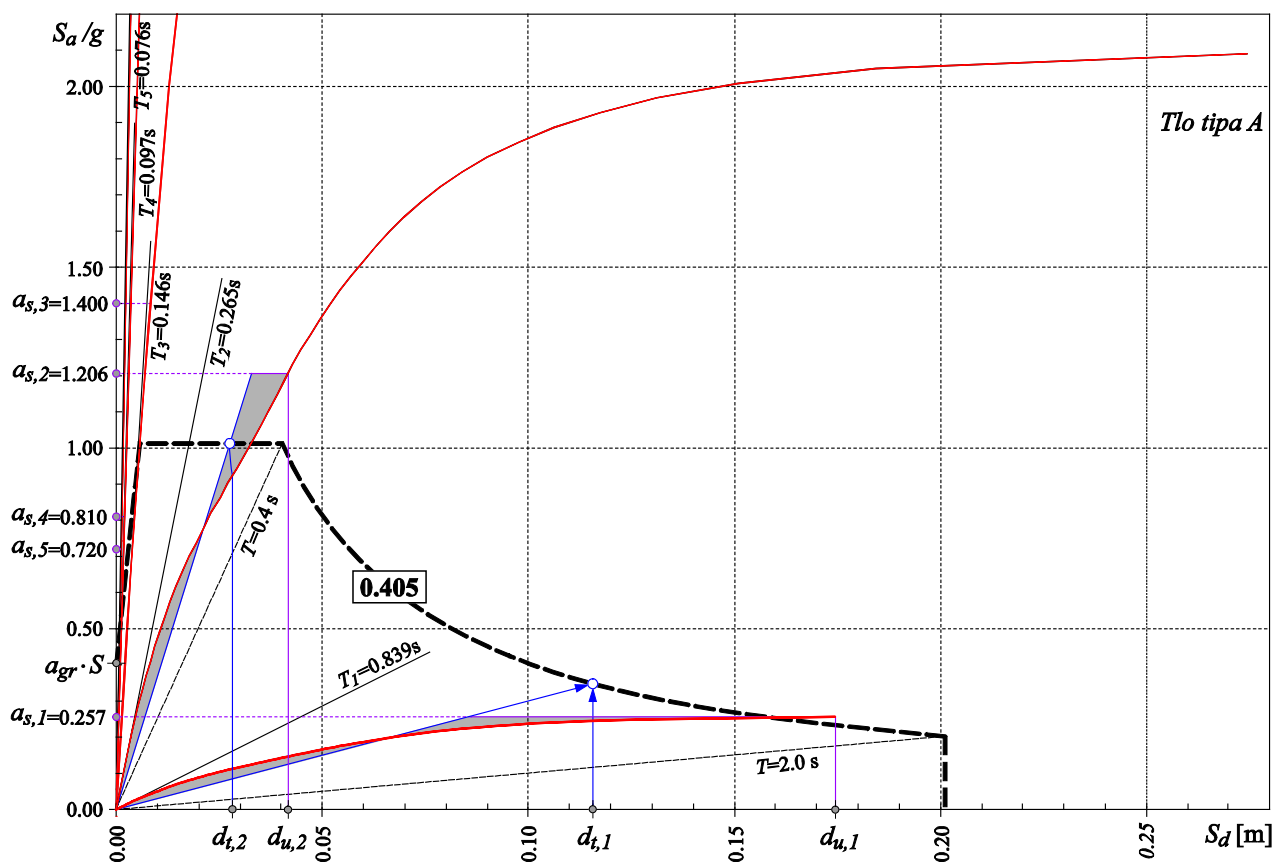
Slika 2.9 Proračun potresne otpornosti prvog vektora

### 2.3.1.2 Određivanje ciljanog ubrzanja za smjer $x$

U okviru ovog poglavlja prikazano je određivanje ciljanog ubrzanja tla na primjeru 5-katnog armirano-betonskog okvira u  $x$  smjeru. Analizirana su dva slučaja naguravanja sustava, i to linearnom (L) i korijenskom (SRSS) kombinacijom modova.

Pri određivanju ciljanog ubrzanja tla  $a_{gr,t}$ , kao polazno ubrzanje tla u prvom koraku iterativnog postupka pretpostavlja se granično ubrzanje dobiveno za prvi vektor, koje iznosi  $a_{gr,1} = 0.405g$ .

Na crtežu 2.10 prikazano je određivanje spektralnog ubrzanja  $a_{s,i}$  promatranih pet modova, 5-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava u  $x$  smjeru, za pretpostavljeno polazno ubrzanje  $a_{gr,1} = 0.405g$ , odnosno pokazan je prvi korak u iterativnom postupku određivanja ciljanog ubrzanja kod linearne (L) kombinacije modova. Na crtežu su prikazani periodi  $T_i$  i krivulje nosivosti promatranih modova. Krivulje nosivosti prvog i drugog moda su vidljive cijele na crtežu, dok su krivulje trećeg, četvrtog i petog moda odsiječene nešto iznad spektralnog ubrzanja iznosa 2.00g.



Crtež 2.10 Određivanje spektralnog ubrzanja modova, 5-katnog a/b okvira u  $x$  smjeru, uz elastični spektralni ubrzanje tla 0.405g (L kombinacija modova)

Spektralna ubrzanja promatranih modova  $a_{s,i}$  dobivena su na temelju krivulja nosivosti vektora  $\phi_i$  uvažavajući  $2/3$  maksimalnog pomaka  $d_u$  na krivulji nosivosti, odnosno uzimajući u obzir ciljani pomak  $d_t$  prema europskoj normi EN 1998 (Dodatak B) [E2], na način kako je opisano u poglavlju 2.2 i prikazano na crtežima 2.4 i 2.5.

U tablici 2.2 prikazana su spektralna ubrzanja promatranih pet modova ( $a_{s,i}$ ,  $i=1,\dots,5$ ) dobivena za polazno ubrzanje tla  $a_{gr}$  iznosa  $0.405g$ . Poznavajući efektivnu aktiviranu masu  $m_{e,i}$  pojedinog moda i dobiveno spektralno ubrzanje  $a_{s,i}$  izračuna se spektralno opterećenje  $F_i$  svakog od promatranih pet modova.

Zatim se odredi polazno granično opterećenje  $F_L = \sum F_i$  za linearnu (L) kombinaciju modova, prema izrazu (2.4), što u prvom koraku iznosi  $F_L = 3437$  kN.

Za ovako formirano opterećenje  $F_L = \sum F_i$ , pomoću nelinearne analize konstrukcije metodom naguravanja određen je kapacitet nosivosti, odnosno računsko granično opterećenje  $F_f$ . Računsko granično opterećenje  $F_f$  dobiveno naguravanjem, u prvom kpraku iznosi  $2303$  kN.

Za polazno ubrzanje tla omjer  $F_f/F_L = 0.67$ , što znači da je potrebno pretpostaviti novo niže ubrzanje tla  $a_{gr}$  te provesti istu gore opisanu proceduru određivanja spektralnog ubrzanja  $a_{s,i}$  i spektralnog opterećenja  $F_i$ , te ponovo na kraju vidjeti dali smo za pretpostavljeno ubrzanje tla  $a_{gr}$  postigli jednakost opterećenja iz općeg slomnog vektora  $F_L$  (polaznog graničnog opterećenja) i računskog graničnog opterećenja  $F_f$  dobivenog naguravanjem.

Iterativni postupak se smatra završenim kada je u granicama zadane točnosti za pretpostavljeno ubrzanje tla  $a_{gr}$  postignuta jednakost opterećenja iz općeg slomnog vektora  $F_L$  i računskog graničnog opterećenja  $F_f$ .

U tablici 2.2 pokazan je tok iterativnog postupka određivanja ciljanog ubrzanja linearne (L) kombinacije modova za smjer  $x$ . Dobiveno ciljano ubrzanje iznosi  $a_{gr,t} = 0.18g$ , a njemu pripadna sila u presjeku pri bazi proračunskog modela iznosi  $F_L = 2197$  kN.

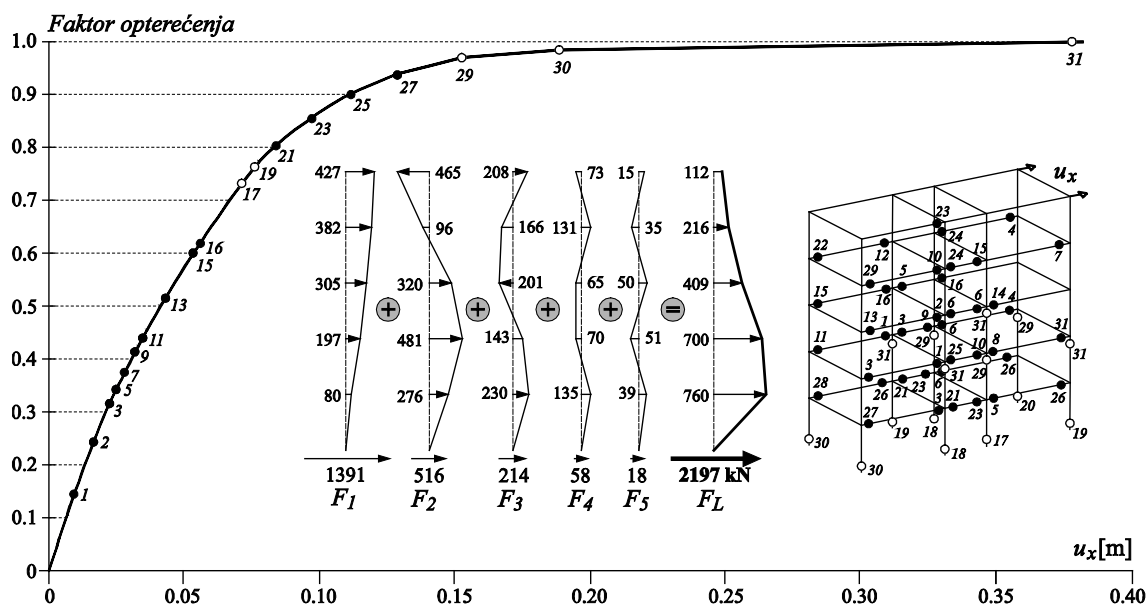
**Tablica 2.2** Ciljano ubrzanje pri linearnoj (L) kombinaciji modova za smjer  $x$

$a_{gr}$	$a_{s,1}$	$F_1$	$a_{s,2}$	$F_2$	$a_{s,3}$	$F_3$	$a_{s,4}$	$F_4$	$a_{s,5}$	$F_5$	$F_L = \sum F_i$	$F_f$	$F_f/F_L$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$	$\delta_5$
0.405	0.257	1735	1.206	1051	1.400	478	0.810	133	0.720	40	3437	2303	0.67	0.63	2.98	3.46	2.00	1.78
0.27	0.244	1648	0.815	710	0.930	318	0.534	88	0.479	27	2790	2232	0.80	0.90	3.02	3.44	1.98	1.77
0.22	0.228	1540	0.700	610	0.750	256	0.443	73	0.390	22	2500	2175	0.87	1.04	3.18	3.41	2.01	1.77
0.19	0.212	1432	0.620	540	0.667	228	0.383	63	0.330	18	2281	2190	0.96	1.12	3.26	3.51	2.02	1.74
<b>0.18</b>	0.206	1391	0.592	516	0.628	214	0.352	58	0.320	18	2197	2197	<b>1.00</b>	1.14	3.29	3.49	1.96	1.78
0.17	0.198	1337	0.585	510	0.608	208	0.338	56	0.308	17	2127	2191	1.03	1.16	3.44	3.58	1.99	1.81

Parametar  $\delta_i$  naveden u tablici, predstavlja omjer dobivenog spektralnog ubrzanja pojedinog moda  $a_{s,i}$  i pretpostavljenog ubrzanja tla  $a_{gr}$ .

$$\delta_i = \frac{a_{s,i}}{a_{gr}} = \delta_i(a_{gr}) \quad (2.6)$$

Na crtežu 2.11 prikazani su vektori opterećenja svih sudjelujućih modova, krivulja nosivosti i redosljed nastajanja plastifikacijskih zglobova za linearnu (L) kombinaciju modova za smjer  $x$ .



Crtež 2.11 Krivulja nosivosti za linearnu (L) kombinaciju modova za smjer  $x$

U nastavku je prikazano određivanje ciljanog ubrzanja tla na primjeru 5-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava u  $x$  smjeru, i to uz opterećenje korijenskom (SRSS) kombinacijom modova.

Postupak određivanja spektralnog ubrzanja  $a_{s,i}$  analiziranih pet modova razlikuje se od gore opisanog postupka uz opterećenje linearnom (L) kombinacijom modova u tome što se kod korijenske kombinacije modova, spektralna ubrzanja prvog moda  $a_{s,1}$  određuju na osnovu spektra za pretpostavljeno polazno ubrzanje tla  $a_{gr}$ , dok se spektralna ubrzanja viših modova ( $a_{s,i}$ ,  $i=2,\dots,5$ ) određuju na osnovu spektra za ubrzanje tla iznosa  $a_{gr}/2$ . To je iz razloga što se korijenska kombinacija modova određuje prema izrazu (2.5), što je prethodno već obrazloženo. Ostali dio postupka je analogan onom za linearnu (L) kombinaciju modova.

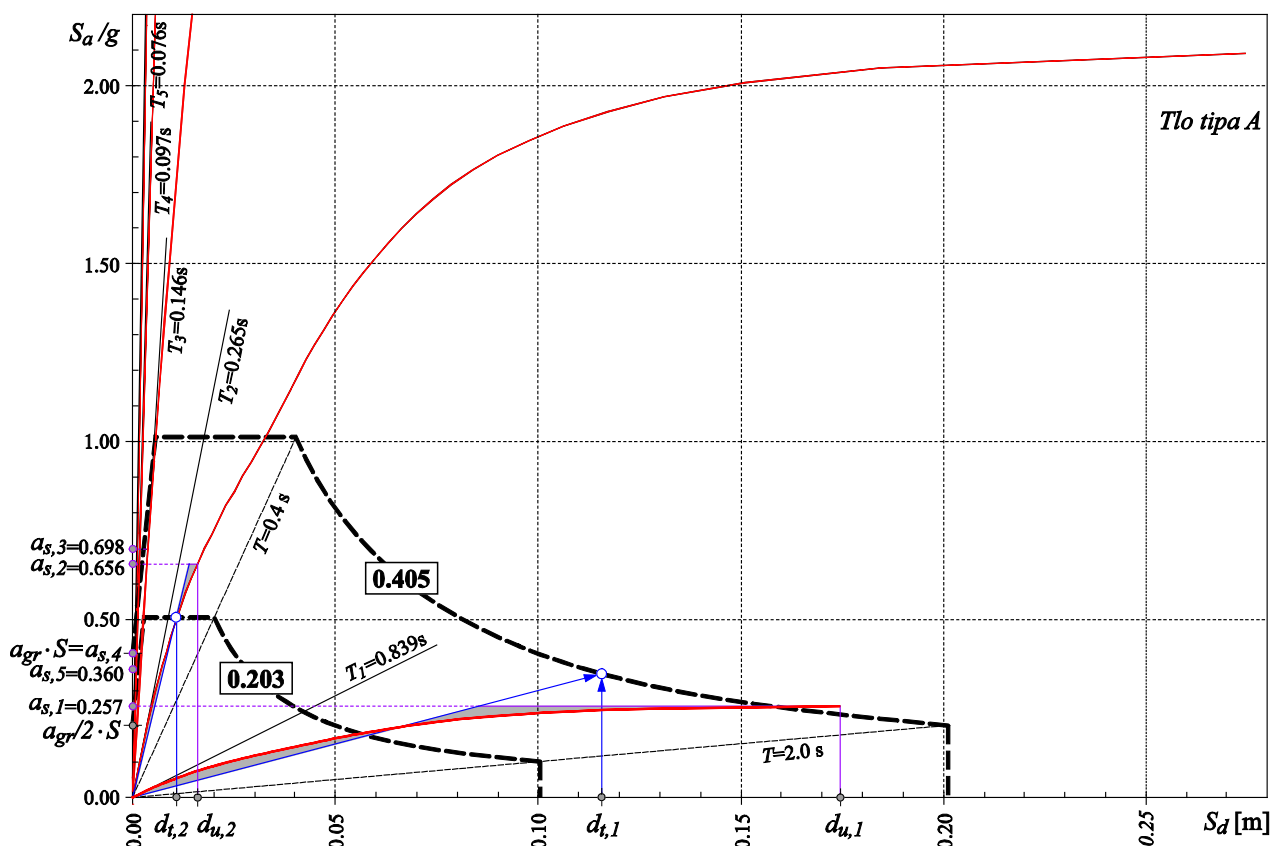
Rezultati za korijensku (SRSS) kombinaciju modova 5-katnog armirano-betonskog okvira za smjer  $x$  prikazani su u tablici 2.3.

**Tablica 2.3** Ciljano ubrzanje pri korijenskoj (SRSS) kombinaciji modova za smjer  $x$

$a_{gr}$	$a_{s,1}$	$F_1$	$a_{gr}/2$	$a_{s,2}$	$F_2$	$a_{s,3}$	$F_3$	$a_{s,4}$	$F_4$	$a_{s,5}$	$F_5$	$F_{SRSS}$ $=\sum F_i$	$F_f$	$F_f/F_{SRSS}$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$	$\delta_5$
0.405	0.257	1735	0.203	0.656	572	0.698	238	0.405	66	0.360	20	2631	2131	0.81	0.63	1.62	1.72	1.00	0.89
0.32	0.250	1688	0.16	0.545	475	0.555	190	0.315	52	0.285	16	2420	2227	0.92	0.78	1.70	1.73	0.98	0.89
0.27	0.244	1648	0.135	0.460	401	0.465	159	0.263	43	0.233	13	2263	2150	0.95	0.90	1.70	1.72	0.97	0.86
<b>0.24</b>	0.236	1594	0.12	0.451	393	0.413	141	0.233	38	0.210	12	2178	2178	<b>1.00</b>	0.98	1.88	1.72	0.97	0.88

Dobiveno ciljano ubrzanje iznosi  $a_{gr,t} = 0.24g$ . Usporedbom izračunatih ciljanih ubrzanja može se zaključiti da je linearna (L) kombinacija modova nepovoljnija od korijenske (SRSS) kombinacije jer slom konstrukcije nastupa pri manjem ciljanom ubrzanju ( $a_{gr,t} = 0.18g$ ) za razliku od ciljanog ubrzanja kod SRSS kombinacije modova ( $a_{gr,t} = 0.24g$ ).

Na crtežu 2.12 prikazano je određivanje spektralnog ubrzanja  $a_{s,i}$  promatranih pet modova, 5-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava u  $x$  smjeru, za pretpostavljeno polazno ubrzanje  $a_{gr,1} = 0.405g$ , odnosno pokazan je prvi korak u iterativnom postupku određivanja ciljanog ubrzanja kod korijenske (SRSS) kombinacije modova.

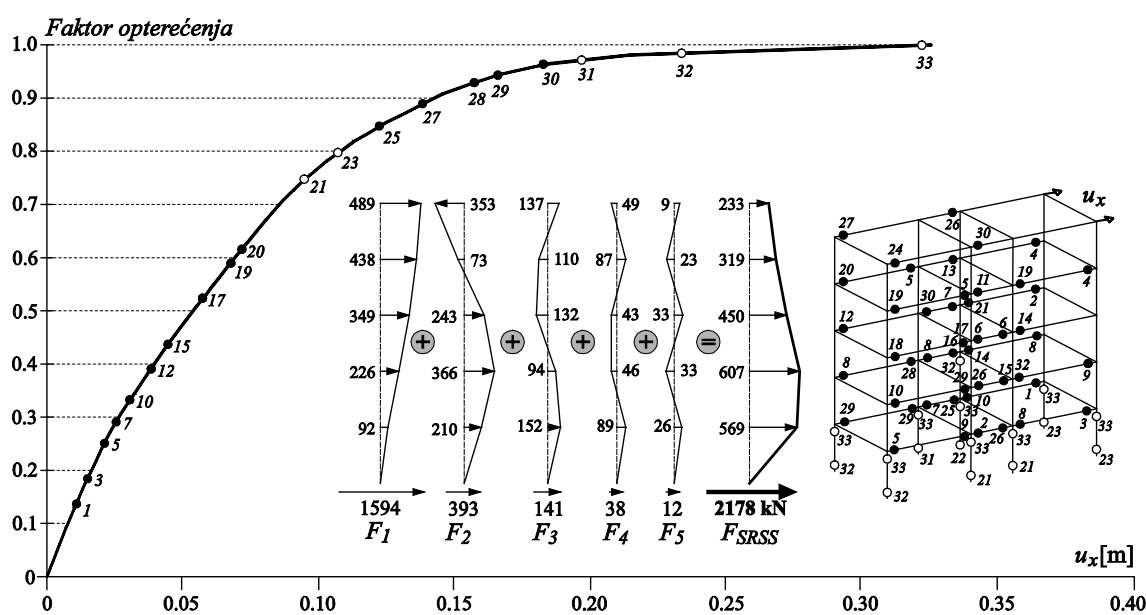


**Crtež 2.12** Određivanje spektralnog ubrzanja modova, 5-katnog a/b okvira u  $x$  smjeru, uz elastični spektralni odgovor tla za ubrzanje tla  $0.405g$  ( $a_{s,1}$ ) i  $0.203g$  ( $a_{s,2}$ - $a_{s,5}$ ), (SRSS kombinacija modova)



Na crtežu 2.12 prikazani su periodi  $T_i$  i krivulje nosivosti promatranih modova koje su odsiječene nešto poviše spektralnog ubrzanja iznosa 2.00g. Uočava se da se za određivanje spektralnog ubrzanja prvog moda koristi spektar čije je ubrzanje tla  $a_{gr,1} = 0.405g$ , dok se za određivanje spektralnog ubrzanja viših modova koristi spektar čije je ubrzanje tla  $a_{gr,1}/2 = 0.203g$ .

Na crtežu 2.13 prikazani su vektori opterećenja sudjelujućih modova, krivulja nosivosti i redosljed nastajanja plastifikacijskih zglobova za korijensku (SRSS) kombinaciju modova za smjer  $x$ .



Crtež 2.13 Krivulja nosivosti za korijensku (SRSS) kombinaciju modova za smjer  $x$

### 2.3.1.3 Određivanje ciljanog ubrzanja za smjer $y$

U nastavku su prikazani rezultati analize 5-katnog armirano-betonskog okvira za smjer  $y$ . Svojstva vektora horizontalnog opterećenja za svaki pojedini mod (period  $T_i$ , sudjelujuća masa  $m_{e,i}$ , slomna sila  $F_{fi}$  i granično ubrzanje  $a_{gr,i}$ ) prikazana su u tablici 2.4.

Tablica 2.4 Svojstva vektora horizontalnog opterećenja 5-katnog a/b okvira za smjer  $y$

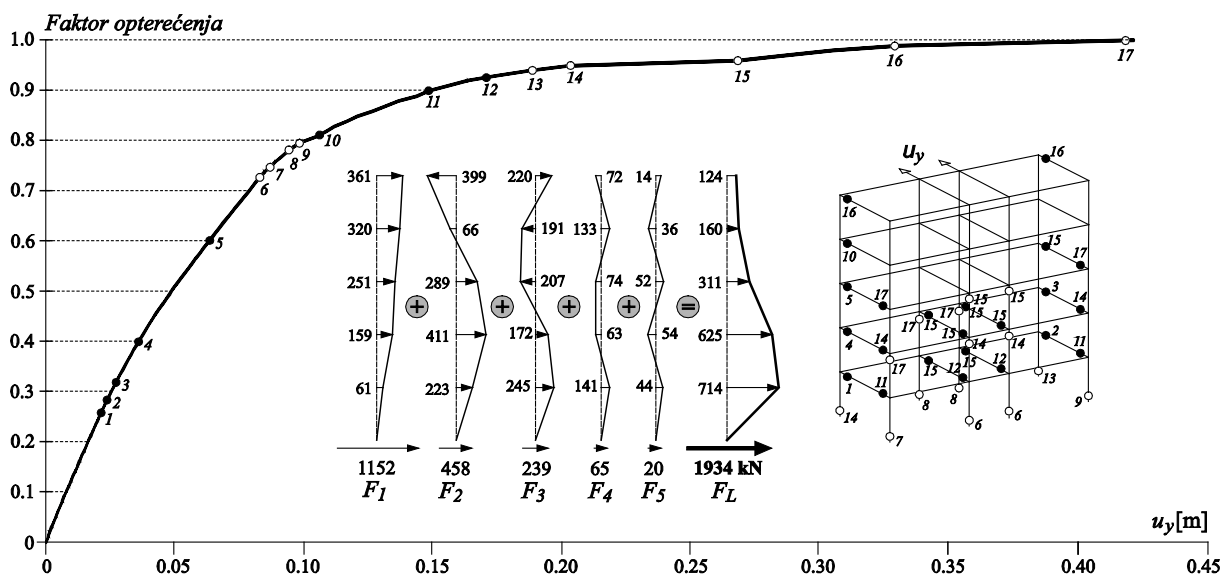
Vektor	$T_i$ [s]	$m_{e,i}$ [%]	$m_{e,i}$ [t]	$F_{fi}$ [kN]	$a_{gr,i}$
$\phi_1$	0.953	80.34	678.87	1427	0.39
$\phi_2$	0.293	10.94	92.44	1572	1.65
$\phi_3$	0.156	4.51	38.11	2593	4.62
$\phi_4$	0.101	2.27	19.18	2146	8.08
$\phi_5$	0.077	0.78	6.59	1576	17.70

Određivanje ciljanog ubrzanja za linearnu (L) kombinaciju modova 5-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava za smjer  $y$  prikazano je u tablici 2.5. Kao polazno ubrzanje u prvom koraku, pretpostavlja se ciljano ubrzanje određeno za prvi vektor, koje iznosi  $a_{gr,1} = 0.39g$ . Iterativnim putem dobiveno ciljano ubrzanje za linearnu (L) kombinaciju modova iznosi  $a_{gr,t} = 0.17g$ .

**Tablica 2.5** Ciljano ubrzanje pri linearnoj (L) kombinaciji modova za smjer  $y$

$a_{gr}$	$a_{s,1}$	$F_1$	$a_{s,2}$	$F_2$	$a_{s,3}$	$F_3$	$a_{s,4}$	$F_4$	$a_{s,5}$	$F_5$	$F_L = \sum F_i$	$F_f$	$F_f/F_L$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$	$\delta_5$
0.39	0.214	1427	1.142	1036	1.388	519	0.803	151	0.698	45	3178	2097	0.66	0.55	2.93	3.56	2.06	1.79
0.25	0.202	1345	0.722	655	0.843	315	0.510	96	0.443	29	2440	1927	0.79	0.81	2.89	3.37	2.04	1.77
0.19	0.184	1225	0.560	508	0.713	267	0.390	73	0.330	21	2094	1927	0.92	0.97	2.95	3.75	2.05	1.74
<b>0.17</b>	0.173	1152	0.505	458	0.638	239	0.345	65	0.308	20	1934	1934	<b>1.00</b>	1.02	2.97	3.75	2.03	1.81

Na crtežu 2.14 prikazani su vektori opterećenja svih sudjelujućih modova, krivulja nosivosti i redosljed nastajanja plastifikacijskih zglobova za linearnu (L) kombinaciju modova za smjer  $y$ .



**Crtež 2.14** Krivulja nosivosti za linearnu (L) kombinaciju modova za smjer  $y$

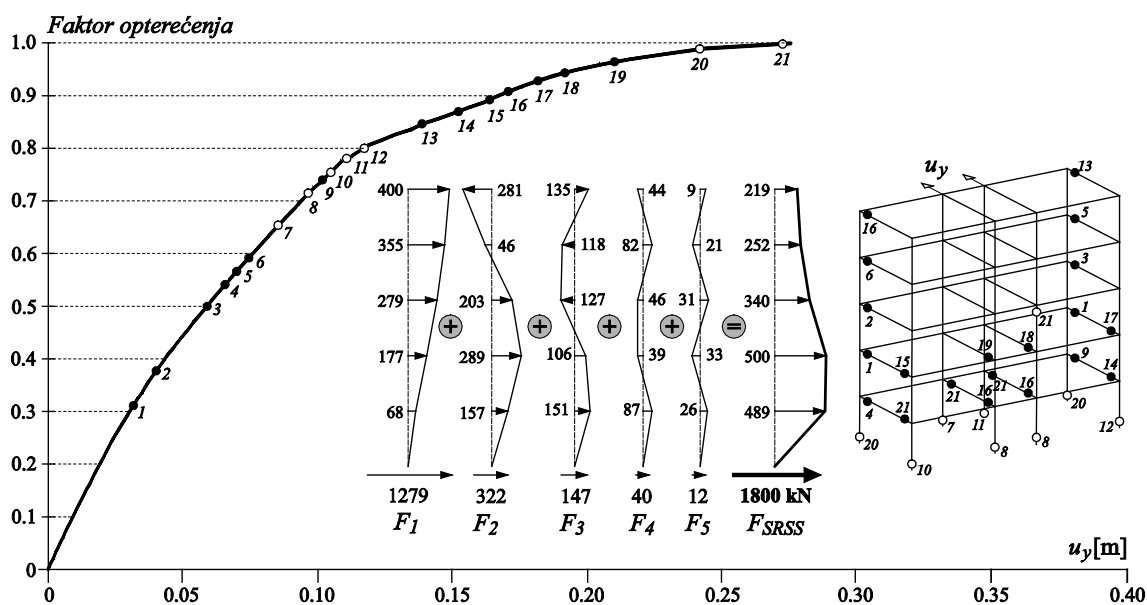
Pronalaženje ciljanog ubrzanja za korijensku (SRSS) kombinaciju modova za smjer  $y$  prikazano je u tablici 2.6. Dobiveno je ciljano ubrzanje iznosa  $a_{gr,t} = 0.21g$ .

**Tablica 2.6** Ciljano ubrzanje pri korijenskoj (SRSS) kombinaciji modova za smjer y

$a_{gr}$	$a_{s,1}$	$F_1$	$a_{gr}/2$	$a_{s,2}$	$F_2$	$a_{s,3}$	$F_3$	$a_{s,4}$	$F_4$	$a_{s,5}$	$F_5$	$F_{SRSS}$ $=\sum F_i$	$F_f$	$F_f/F_{SRSS}$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$	$\delta_5$
0.39	0.214	1427	0.195	0.570	517	0.731	273	0.402	76	0.342	22	2315	1898	0.82	0.55	1.46	1.87	1.03	0.88
0.32	0.211	1405	0.16	0.491	445	0.600	224	0.330	62	0.285	18	2155	1875	0.87	0.66	1.53	1.88	1.03	0.89
0.25	0.202	1345	0.125	0.415	376	0.469	175	0.255	48	0.210	14	1958	1821	0.93	0.81	1.66	1.88	1.02	0.84
0.23	0.198	1319	0.115	0.383	347	0.431	161	0.233	44	0.200	13	1884	1808	0.96	0.86	1.67	1.87	1.01	0.87
<b>0.21</b>	0.192	1279	0.105	0.355	322	0.394	147	0.213	40	0.190	12	1800	1800	<b>1.00</b>	0.91	1.69	1.88	1.01	0.90

Pokazalo se da je i za smjer y linearna (L) kombinacija relevantna, jer slom konstrukcije nastupa pri nižoj razini ciljanog ubrzanja ( $a_{gr,t} = 0.17g$ ) za razliku od ciljanog ubrzanja kod korijenske (SRSS) kombinacije modova ( $a_{gr,t} = 0.21g$ ).

Na crtežu 2.15 prikazani su vektori opterećenja sudjelujućih modova, krivulja nosivosti i redosljed nastajanja plastifikacijskih zglobova za korijensku (SRSS) kombinaciju modova 5-katnog armirano-betonskog okvira za smjer y.

**Crtež 2.15** Krivulja nosivosti za korijensku (SRSS) kombinaciju modova za smjer y

U tablici 2.7 prikazana je usporedba rezultata dobivenog ciljanog ubrzanja i pripadne sile na bazu proračunskog modela za prvi vektor promatran samostalno, te za linearnu (L) i korijensku (SRSS) kombinaciju modova 5-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava za smjerove x i y. Prikazani rezultati dobiveni su za ciljani pomak  $d_t$ , odnosno za 2/3 iskoristivosti pomaka  $d_u$  na krivulji nosivosti, uz elastični spektar s 5% prigušenjem.

**Tablica 2.7** Usporedba ciljanog ubrzanja prvog moda, te L i SRSS kombinacije modova uz 2/3 iskoristivosti pomaka na krivulji nosivosti i elastične spektre s 5% prigušenjem na primjeru 5-katnog a/b okvira

a/b okvir	smjer	Pomak = $d_t = 2/3 d_u$						
		prigušenje [%]	$a_{gr,1}$	$F_I$ [kN]	$a_{gr,t}$	$F_L$ [kN]	$a_{gr,t}$	$F_{SRSS}$ [kN]
5-katni	x	5	0.405	1735	0.18	2197	0.24	2178
5-katni	y	5	0.39	1427	0.17	1934	0.21	1800

Iz dobivenih rezultata može se zaključiti da je ciljano ubrzanje  $a_{gr,t}$  dobiveno višemodalnom metodom naguravanja, bilo linearnom (L) ili korijenskom (SRSS) kombinacijom modova, za sustav 5-katnog armirano-betonskog okvira uz elastične spektre s 5% viskoznim prigušenjem i uz ciljani pomak  $d_t$  na krivulji nosivosti niže od ubrzanja tla dobivenog prema kriteriju ciljanog pomaka za prvi vektor promatran samostalno  $a_{gr,1}$  prema europskoj normi EN 1998 (Dodatak B) [E2].

Uočava se da je dobiveno ciljano ubrzanje linearne (L) kombinacije modova nepovoljnije od korijenske (SRSS) kombinacije modova. Jednako tako, uočava se približno ista razina slomne sile kod linearne i korijenske kombinacije modova što je i logično da se sustav slama pri istom nivou opterećenja.

## 2.3.2 Primjer 2: 9-katni prostorni armirano-betonski okvir

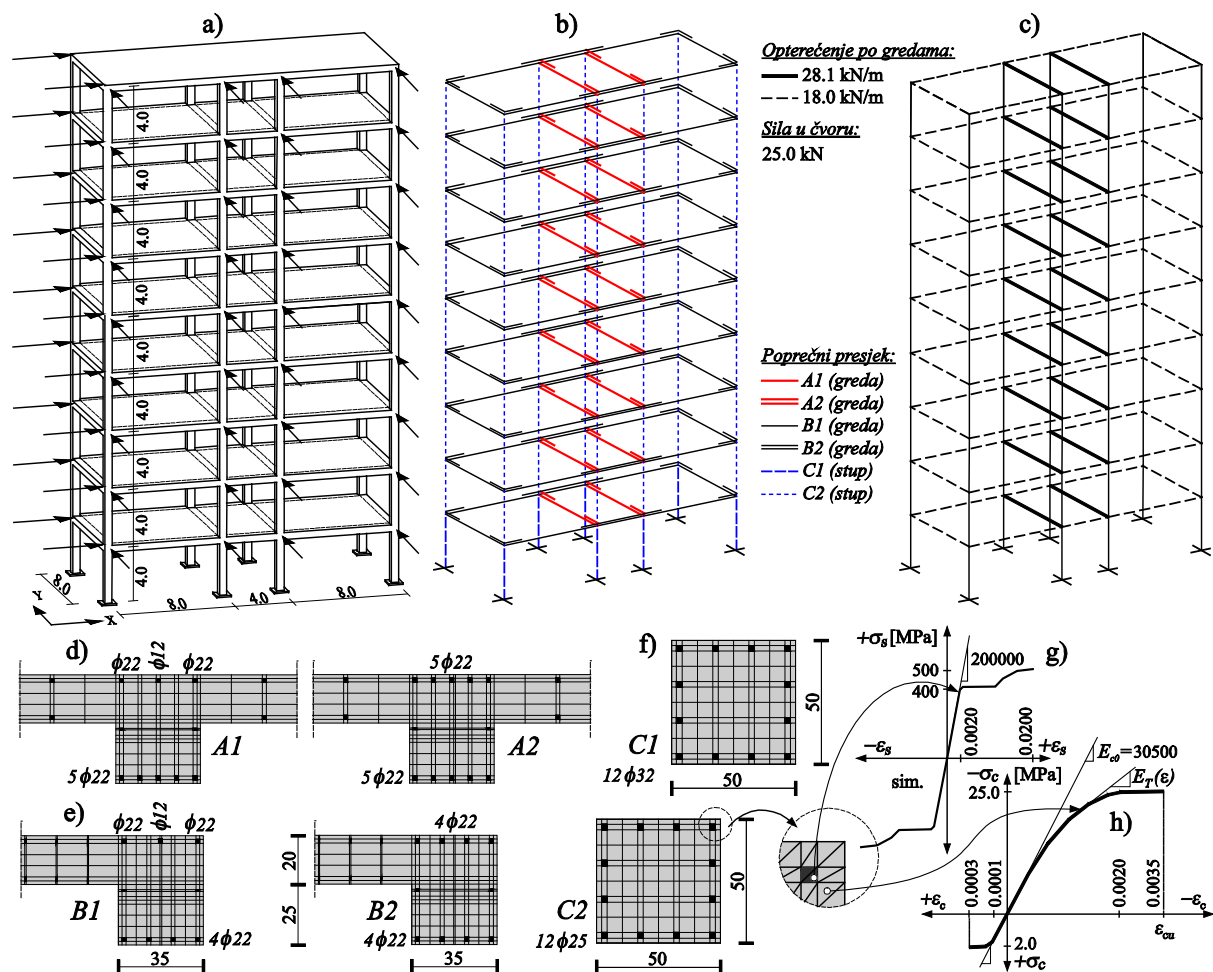
### 2.3.2.1 Opis modela i proračun vektora opterećenja

Analizira se 9-katni prostorni armirano-betonski okvirni sustav dimenzija kako je prikazano na crtežu 2.16a. Dimenzije i diskretizacija poprečnih presjeka greda prikazani su na crtežima 2.16d i 2.16e, a stupova na crtežu 2.16f. Svojstva poprečnih presjeka dodijeljena su okviru kako je pokazano na crtežu 2.16b.

Za proračun vlastitih vektora zadana je vlastita težina modela, dodatno stalno opterećenje po ploči u iznosu  $2.0 \text{ kN/m}^2$  i promjenjivo opterećenje po ploči u iznosu  $2.0 \text{ kN/m}^2$ , te modul materijala  $E_{c0} = 30.5 \text{ GPa}$ , kao ishodišni modul elastičnosti na modelu betona.

Za proračun krivulje nosivosti korišten je numerički model armaturnog čelika i betona prikazan na crtežima 2.16g i 2.16h. Raspodijeljeno opterećenje je zadano po gredama kako je prikazano na crtežu 2.16c, a koncentrirane vertikalne sile u iznosu  $25.0 \text{ kN}$  su zadane u čvorovima

na svim križanjima greda i stupova. Ukupna težina modela iznosi  $W = 14921.0$  kN, a ukupna masa modela iznosi  $M = 1521.0$  t.



**Crtež 2.16** Primjer 2: **a)** prostorni 9-katni okvir; **b)** oznake poprečnih presjeka; **c)** opterećenje po gredama; **d)-f)** diskretizacije poprečnih presjeka; **g)** model armaturnog čelika; **h)** model betona

Rješenjem linearne dinamičke zadaće dobiveni su vlastiti vektori  $\phi_i$ , te podaci o pripadajućim periodima  $T_i$  i sudjelujućim masama  $m_{e,i}$ , što je prikazano u tablici 2.8. Naguravanjem su dobivene slomne sile  $F_{fi}$  za svaki vlastiti vektor i izračunato je granično ubrzanje pojedinog vektora  $a_{gr,i}$ .

**Tablica 2.8** Svojstva vektora horizontalnog opterećenja 9-katnog a/b okvira za smjer  $x$

Vektor	$T_i$ [s]	$m_{e,i}$ [%]	$m_{e,i}$ [t]	$F_{fi}$ [kN]	$a_{gr,i}$
$\phi_1$	1.547	80.44	1223.49	1349	0.45
$\phi_2$	0.502	10.04	152.71	1585	1.48
$\phi_3$	0.286	3.73	56.73	2021	2.88
$\phi_4$	0.194	2.05	31.18	1570	2.33
$\phi_5$	0.143	1.27	19.32	2494	5.26

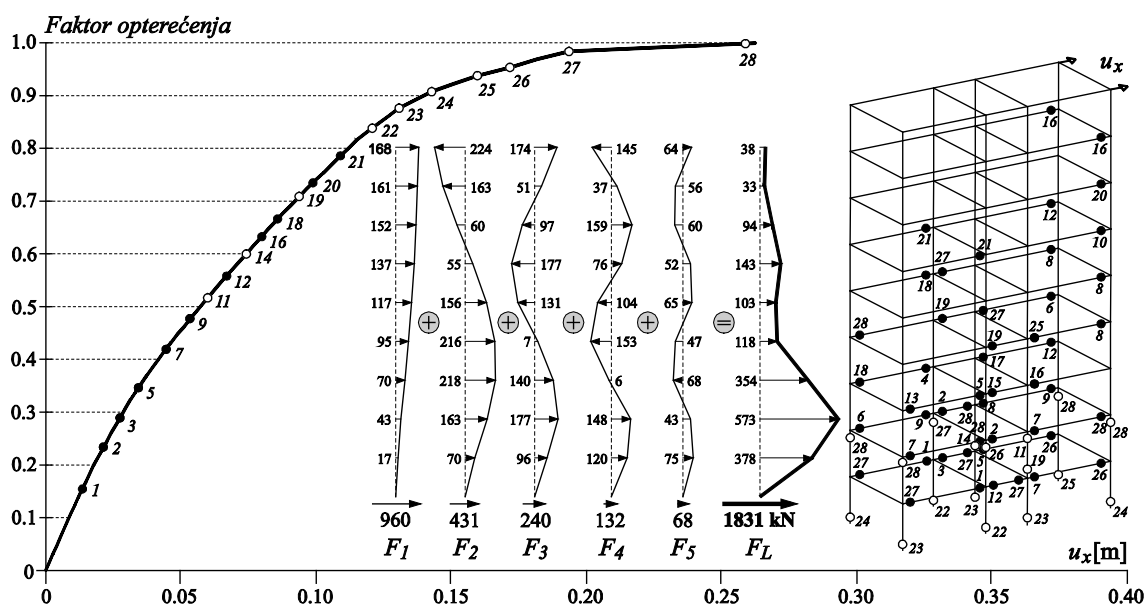
### 2.3.2.2 Određivanje ciljanog ubrzanja za smjer $x$

Određivanje ciljanog ubrzanja za linearnu (L) kombinaciju modova 9-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava za smjer  $x$  prikazano je u tablici 2.9. Kao polazno ubrzanje u prvom koraku, pretpostavlja se ciljano ubrzanje dobiveno za prvi vektor, koje iznosi  $a_{gr,1} = 0.45g$ . Dobiveno ciljano ubrzanje tla iznosi  $a_{gr,t} = 0.115g$ .

**Tablica 2.9** Ciljano ubrzanje pri linearnoj (L) kombinaciji modova za smjer  $x$

$a_{gr}$	$a_{s,1}$	$F_1$	$a_{s,2}$	$F_2$	$a_{s,3}$	$F_3$	$a_{s,4}$	$F_4$	$a_{s,5}$	$F_5$	$F_L = \sum F_i$	$F_f$	$F_f/F_L$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$	$\delta_5$
0.45	0.112	1349	0.835	1251	1.450	807	1.550	474	1.470	279	4160	1997	0.48	0.25	1.86	3.22	3.44	3.27
0.21	0.110	1320	0.468	701	0.780	434	0.788	241	0.690	131	2827	1923	0.68	0.52	2.23	3.71	3.75	3.29
0.15	0.099	1188	0.369	553	0.562	313	0.562	172	0.495	94	2320	1856	0.77	0.66	2.46	3.75	3.75	3.30
<b>0.115</b>	0.080	960	0.288	431	0.431	240	0.431	132	0.360	68	1831	1831	<b>1.00</b>	0.70	2.50	3.75	3.75	3.13

Na crtežu 2.17 prikazani su vektori opterećenja svih sudjelujućih modova, krivulja nosivosti i redosljed nastajanja plastifikacijskih zglobova za linearnu (L) kombinaciju modova za smjer  $x$ .



**Crtež 2.17** Krivulja nosivosti za linearnu (L) kombinaciju modova za smjer  $x$

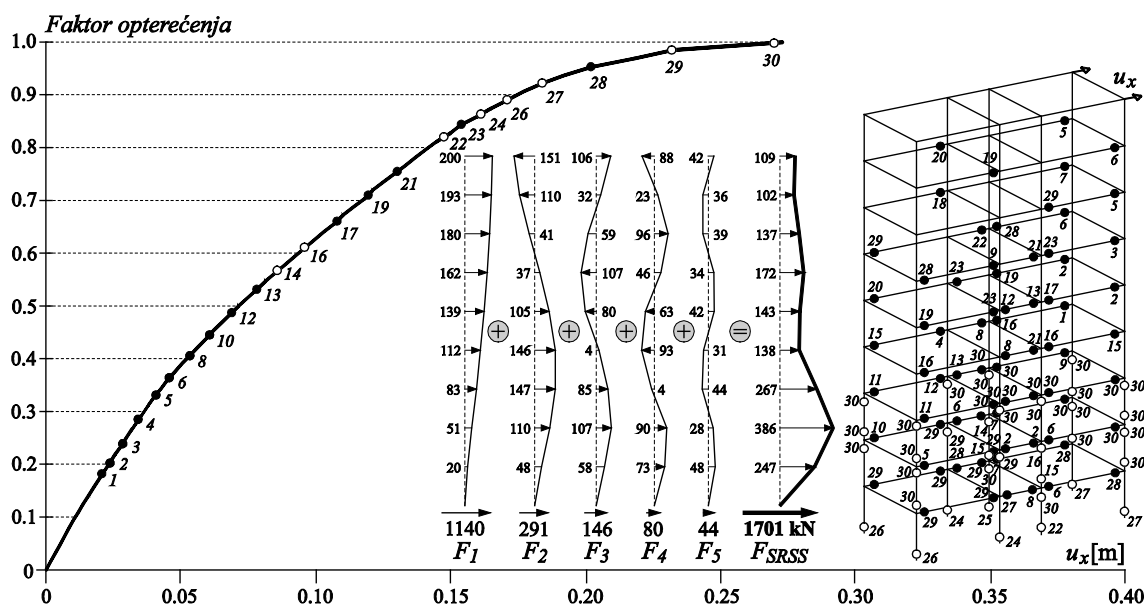
Rezultati za korijensku (SRSS) kombinaciju modova za smjer  $x$  prikazani su u tablici 2.10. Dobiveno je ciljano ubrzanje iznosa  $a_{gr,t} = 0.14g$ .

**Tablica 2.10** Ciljano ubrzanje pri korijenskoj (SRSS) kombinaciji modova za smjer  $x$ 

$a_{gr}$	$a_{s,1}$	$F_1$	$a_{gr}/2$	$a_{s,2}$	$F_2$	$a_{s,3}$	$F_3$	$a_{s,4}$	$F_4$	$a_{s,5}$	$F_5$	$F_{SRSS}$ $=\sum F_i$	$F_f$	$F_f/F_{SRSS}$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$	$\delta_5$
0.45	0.112	1349	0.225	0.506	758	0.850	473	0.838	256	0.743	141	2977	1935	0.65	0.25	1.12	1.89	1.86	1.65
0.30	0.111	1332	0.15	0.369	553	0.562	313	0.562	172	0.495	94	2464	1798	0.73	0.37	1.23	1.87	1.87	1.65
0.22	0.110	1320	0.11	0.288	431	0.412	229	0.412	126	0.360	68	2175	1697	0.78	0.50	1.31	1.87	1.87	1.64
0.16	0.102	1224	0.08	0.222	333	0.300	167	0.300	92	0.255	48	1864	1677	0.90	0.64	1.39	1.88	1.88	1.59
<b>0.14</b>	0.095	1140	0.07	0.194	291	0.262	146	0.262	80	0.232	44	1701	1701	<b>1.00</b>	0.68	1.39	1.87	1.87	1.66

Usporedbom dobivenih ciljanih ubrzanja može se zaključiti da je linearna (L) kombinacija modova kod 9-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava nepovoljnija od korijenske (SRSS) kombinacije jer slom konstrukcije nastupa pri manjem ciljanom ubrzanju ( $a_{gr,t} = 0.115g$ ) za razliku od ciljanog ubrzanja kod SRSS kombinacije modova ( $a_{gr,t} = 0.14g$ ), što je isti slučaj kao i kod 5-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava.

Na crtežu 2.18 prikazani su vektori opterećenja svih sudjelujućih modova, krivulja nosivosti i redosljed nastajanja plastifikacijskih zglobova za korijensku (SRSS) kombinaciju modova 9-katnog armirano-betonskog okvira za smjer  $x$ .

**Crtež 2.18** Krivulja nosivosti za korijensku (SRSS) kombinaciju modova za smjer  $x$ 

### 2.3.2.3 Određivanje ciljanog ubrzanja za smjer $y$

U nastavku su prikazani rezultati analize 9-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava za smjer  $y$ . Svojstva vektora horizontalnog opterećenja za svaki pojedini mod (period  $T_i$ , sudjelujuća masa  $m_{e,i}$ , slomna sila  $F_{fi}$  i granično ubrzanje  $a_{gr,i}$ ) prikazana su u tablici 2.11.

**Tablica 2.11** Svojstva vektora horizontalnog opterećenja 9-katnog a/b okvira za smjer y

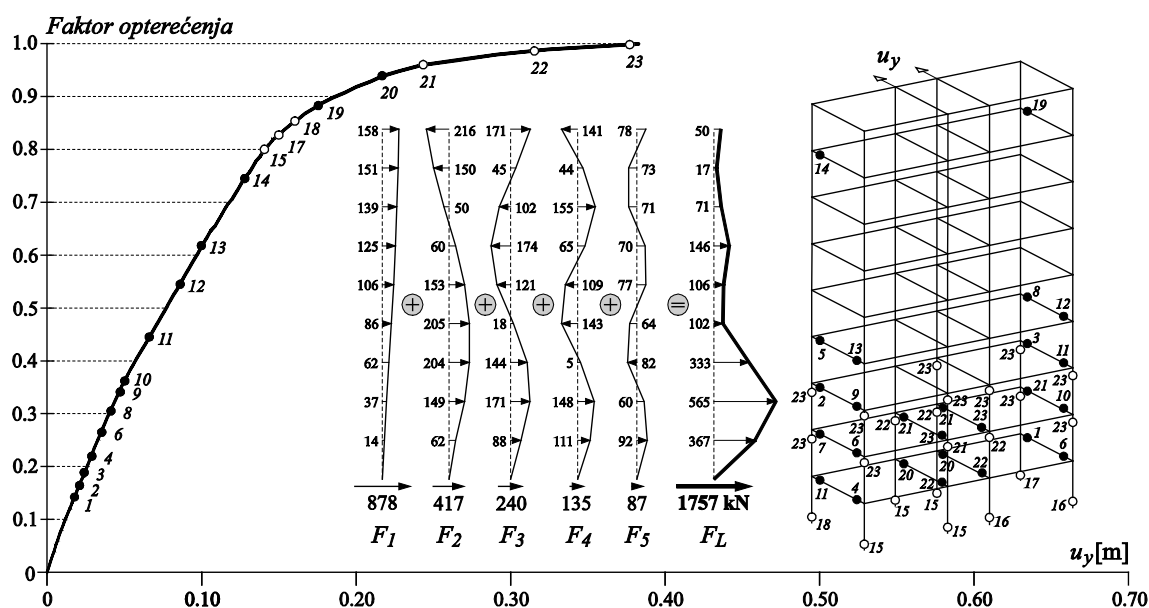
Vektor	$T_i$ [s]	$m_{e,i}$ [%]	$m_{e,i}$ [t]	$F_{fi}$ [kN]	$a_{gr,i}$
$\phi_1$	1.789	79.48	1208.89	1230	0.335
$\phi_2$	0.573	10.34	157.27	1454	1.62
$\phi_3$	0.319	3.89	59.17	1883	3.02
$\phi_4$	0.212	2.19	33.31	1659	3.56
$\phi_5$	0.152	1.41	21.45	2460	5.56

Određivanje ciljanog ubrzanja za linearnu (L) kombinaciju modova 9-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava za smjer y prikazano je u tablici 2.12. Kao polazno ubrzanje u prvom koraku, pretpostavlja se ciljano ubrzanje dobiveno za prvi vektor, koje iznosi  $a_{gr,1} = 0.335g$ . Dobiveno ciljano ubrzanje tla za linearnu (L) kombinaciju modova iznosi  $a_{gr,t} = 0.11g$ .

**Tablica 2.12** Ciljano ubrzanje pri linearnoj (L) kombinaciji modova za smjer y

$a_{gr}$	$a_{s,1}$	$F_1$	$a_{s,2}$	$F_2$	$a_{s,3}$	$F_3$	$a_{s,4}$	$F_4$	$a_{s,5}$	$F_5$	$F_L = \sum F_i$	$F_f$	$F_f/F_L$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$	$\delta_5$
0.335	0.104	1230	0.606	935	1.095	636	1.250	408	1.256	264	3473	1980	0.57	0.31	1.81	3.27	3.73	3.75
0.18	0.093	1103	0.370	571	0.670	389	0.675	221	0.675	142	2425	1867	0.77	0.52	2.06	3.72	3.75	3.75
0.13	0.078	925	0.295	455	0.487	283	0.487	159	0.487	102	1924	1790	0.88	0.60	2.27	3.75	3.75	3.75
<b>0.11</b>	0.074	878	0.270	417	0.413	240	0.413	135	0.413	87	1757	1757	<b>1.00</b>	0.67	2.45	3.75	3.75	3.75

Na crtežu 2.19 prikazani su vektori opterećenja sudjelujućih modova, krivulja nosivosti i redosljed nastajanja plastifikacijskih zglobova za linearnu (L) kombinaciju modova za smjer y.

**Crtež 2.19** Krivulja nosivosti za linearnu (L) kombinaciju modova za smjer y

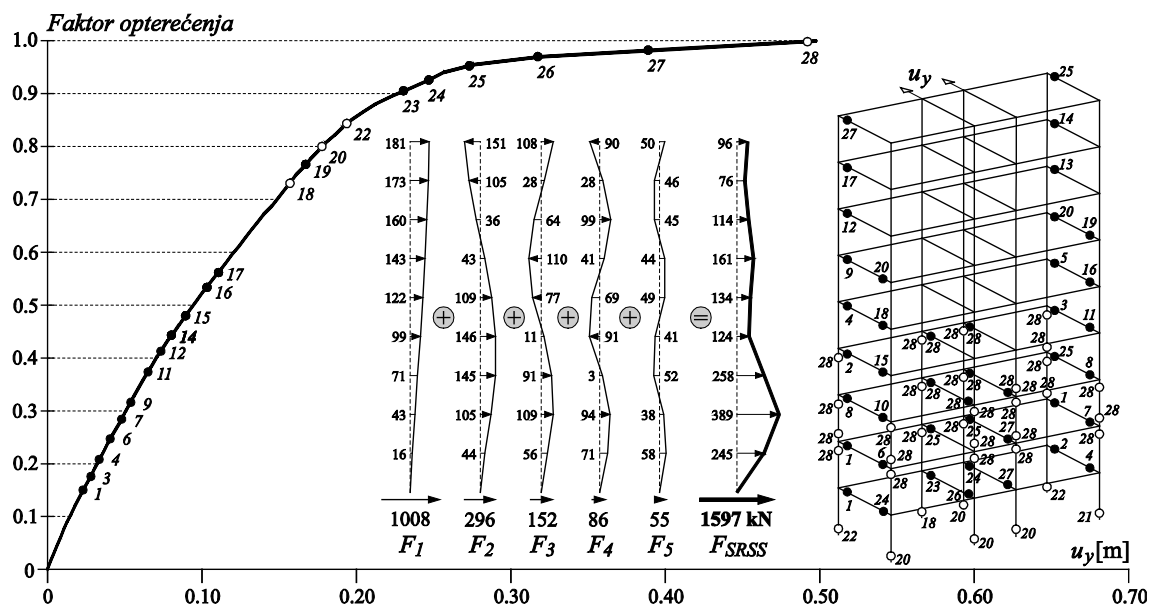


Postupak pronalaženja ciljanog ubrzanja 9-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava za korijensku (SRSS) kombinaciju modova za smjer y prikazan je u tablici 2.13. Dobiveno je ciljano ubrzanje iznosa  $a_{gr,t} = 0.14g$ . Pokazalo se da je i za smjer y linearna (L) kombinacija modova kod 9-katnog okvira također relevantna, jer slom konstrukcije nastupa pri manjem ciljanom ubrzanju ( $a_{gr,t} = 0.11g$ ) za razliku od ciljanog ubrzanja kod korijenske (SRSS) kombinacije modova ( $a_{gr,t} = 0.14g$ ), što je isti slučaj kao i kod 5-katnog okvira.

**Tablica 2.13** Ciljano ubrzanje pri korijenskoj (SRSS) kombinaciji modova za smjer y

$a_{gr}$	$a_{s,1}$	$F_1$	$a_{gr}/2$	$a_{s,2}$	$F_2$	$a_{s,3}$	$F_3$	$a_{s,4}$	$F_4$	$a_{s,5}$	$F_5$	$F_{SRSS}$ $=\sum F_i$	$F_f$	$F_f/F_{SRSS}$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$	$\delta_5$
0.335	0.104	1230	0.168	0.359	554	0.623	362	0.628	205	0.628	132	2483	1837	0.74	0.31	1.07	1.86	1.87	1.87
0.24	0.101	1198	0.12	0.270	417	0.450	261	0.450	147	0.450	95	2117	1715	0.80	0.42	1.13	1.88	1.88	1.88
0.18	0.093	1103	0.09	0.215	332	0.337	196	0.337	110	0.337	71	1811	1594	0.84	0.52	1.19	1.87	1.87	1.87
<b>0.14</b>	<b>0.085</b>	<b>1008</b>	<b>0.075</b>	<b>0.192</b>	<b>296</b>	<b>0.262</b>	<b>152</b>	<b>0.262</b>	<b>86</b>	<b>0.262</b>	<b>55</b>	<b>1597</b>	<b>1597</b>	<b>1.00</b>	<b>0.61</b>	<b>1.37</b>	<b>1.87</b>	<b>1.87</b>	<b>1.87</b>

Na crtežu 2.20 prikazani su vektori opterećenja sudjelujućih modova, krivulja nosivosti i redosljed nastajanja plastifikacijskih zglobova za SRSS kombinaciju modova 9-katnog armirano-betonskog okvira za smjer y.



**Crtež 2.20** Krivulja nosivosti za korijensku (SRSS) kombinaciju modova za smjer y

U tablici 2.14 prikazana je usporedba rezultata dobivenog ciljanog ubrzanja i pripadne sile na bazu proračunskog modela, i to za prvi vektor promatran samostalno, te za linearnu (L) i korijensku (SRSS) kombinaciju modova 9-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava za

smjerove  $x$  i  $y$ . Prikazani rezultati dobiveni su za ciljani pomak  $d_t$ , odnosno za 2/3 iskoristivosti pomaka  $d_u$  na krivulji nosivosti, uz elastični spektar s 5% prigušenjem.

**Tablica 2.14** Usporedba ciljanog ubrzanja prvog moda, te L i SRSS kombinacije modova uz 2/3 iskoristivosti pomaka na krivulji nosivosti i elastične spektre s 5% prigušenjem na primjeru 9-katnog a/b okvira

a/b okvir	smjer	Pomak = $d_t = 2/3 d_u$						
		prigušenje [%]	$a_{gr,l}$	$F_l$ [kN]	$a_{gr,t}$	$F_L$ [kN]	$a_{gr,t}$	$F_{SRSS}$ [kN]
9-katni	x	5	0.45	1349	0.115	1831	0.14	1701
9-katni	y	5	0.335	1230	0.11	1757	0.14	1597

Iz dobivenih rezultata može se zaključiti da je ciljano ubrzanje  $a_{gr,t}$  dobiveno višemodalnom metodom naguravanja, bilo linearnom (L) ili korijenskom (SRSS) kombinacijom modova, za sustav 9-katnog armirano-betonskog okvira uz elastične spektre s 5% viskoznim prigušenjem i pomak pri 2/3 iskoristivosti maksimalnog pomaka na krivulji nosivosti niže od ubrzanja tla dobivenog prema kriteriju ciljanog pomaka za prvi vektor promatran samostalno  $a_{gr,l}$  prema EN 1998 (Dodatak B). Kao i kod 5-katnog sustava, tako i kod 9-katnog okvirnog sustava, dobiveno ciljano ubrzanje linearne (L) kombinacije nepovoljnije je od korijenske (SRSS) kombinacije modova, a razina slomne sile je približno ista kod linearne i korijenske kombinacije modova.

### 2.3.3 Primjer 3: 5-katni prostorni armirano-betonski mješoviti sustav okvira i zidova

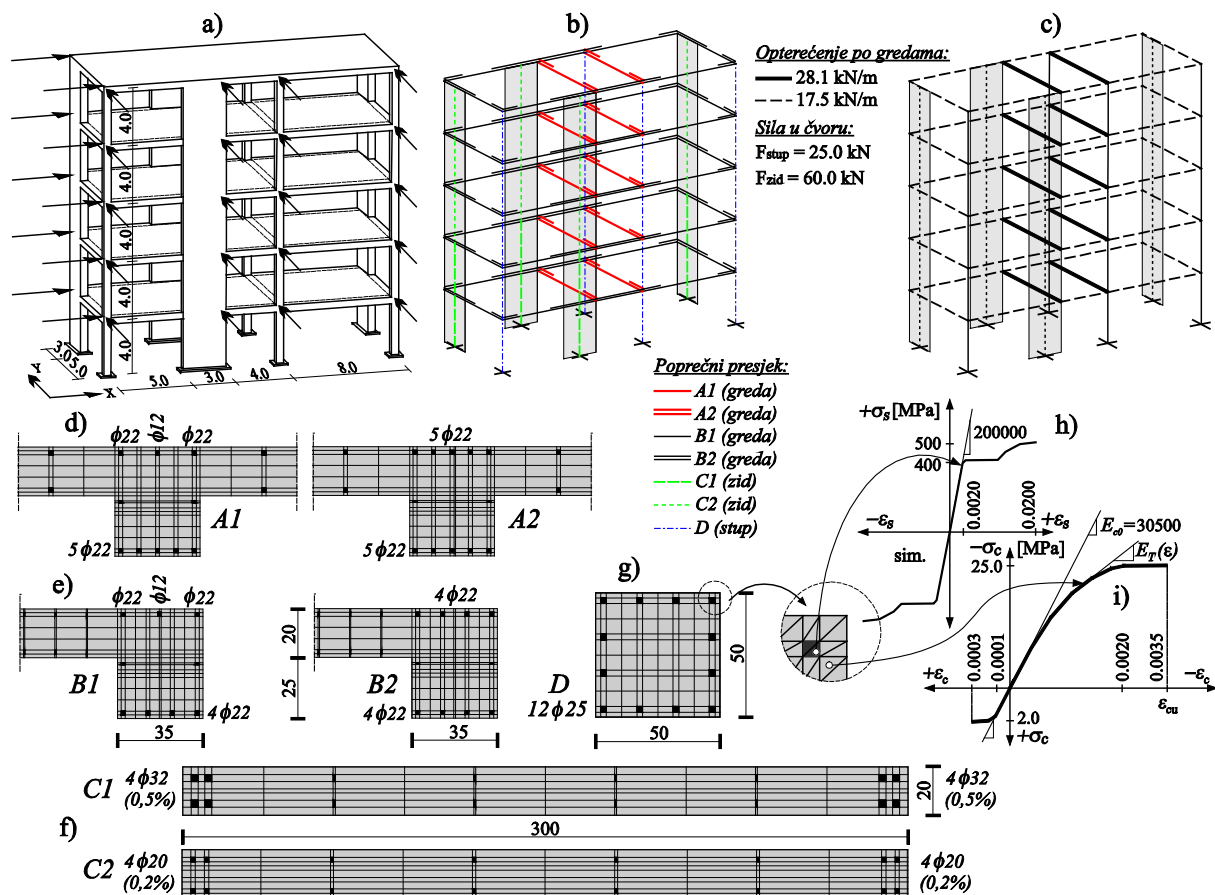
#### 2.3.3.1 Opis modela i proračun vektora opterećenja

Analizira se 5-katni prostorni armirano-betonski mješoviti sustav okvira i zidova dimenzija kako je prikazano na crtežu 2.21a. Dimenzije i diskretizacija poprečnih presjeka greda prikazani su na crtežima 2.21d i 2.21e, zidova na crtežu 2.21f, a stupova na crtežu 2.21g. Svojstva poprečnih presjeka dodijeljena su modelu kako je pokazano na crtežu 2.21b.

Za proračun vlastitih vektora zadana je vlastita težina modela, dodatno stalno opterećenje po ploči u iznosu  $2.0 \text{ kN/m}^2$  i promjenjivo opterećenje po ploči u iznosu  $2.0 \text{ kN/m}^2$ , te modul materijala  $E_{c0} = 30.5 \text{ GPa}$ , kao ishodišni modul elastičnosti na modelu betona.

Za proračun krivulje nosivosti korišten je numerički model armaturnog čelika i betona prikazan na crtežima 2.21h i 2.21i. Raspodijeljeno opterećenje je zadano po gredama kako je

prikazano na crtežu 2.21c, a koncentrirane vertikalne sile u iznosu 25.0 kN su zadane u čvorovima na svim križanjima greda i stupova, odnosno 60.0 kN na križanjima greda i zidova. Ukupna težina modela iznosi  $W = 8850.2$  kN, a ukupna masa modela iznosi  $M = 902.2$  t.



Crtež 2.21 Primjer 3: a) prostorni mješoviti sustav; b) oznake poprečnih presjeka; c) opterećenje po gredama; d)-g) diskretizacije poprečnih presjeka; h) model armaturnog čelika; i) model betona

Rješenjem linearne dinamičke zadaće dobiveni su vlastiti vektori  $\phi_i$ , pripadajući periodi  $T_i$  i sudjelujuće mase  $m_{e,i}$ , što je prikazano u tablici 2.15. Naguravanjem su dobivene slomne sile  $F_{fi}$  za svaki vlastiti vektor i izračunato je granično ubrzanje pojedinog vektora  $a_{gr,i}$ .

Tablica 2.15 Svojstva vektora horizontalnog opterećenja 5-katnog a/b mješovitog sustava okvira i zidova za smjer  $x$

Vektor	$T_i$ [s]	$m_{e,i}$ [%]	$m_{e,i}$ [t]	$F_{fi}$ [kN]	$a_{gr,i}$
$\phi_1$	0.564	73.35	661.73	2394	0.47
$\phi_2$	0.151	9.51	85.80	1830	0.72
$\phi_3$	0.069	4.58	41.32	3015	5.15
$\phi_4$	0.046	1.98	17.86	2390	8.37
$\phi_5$	0.038	0.24	2.17	2732	73.13

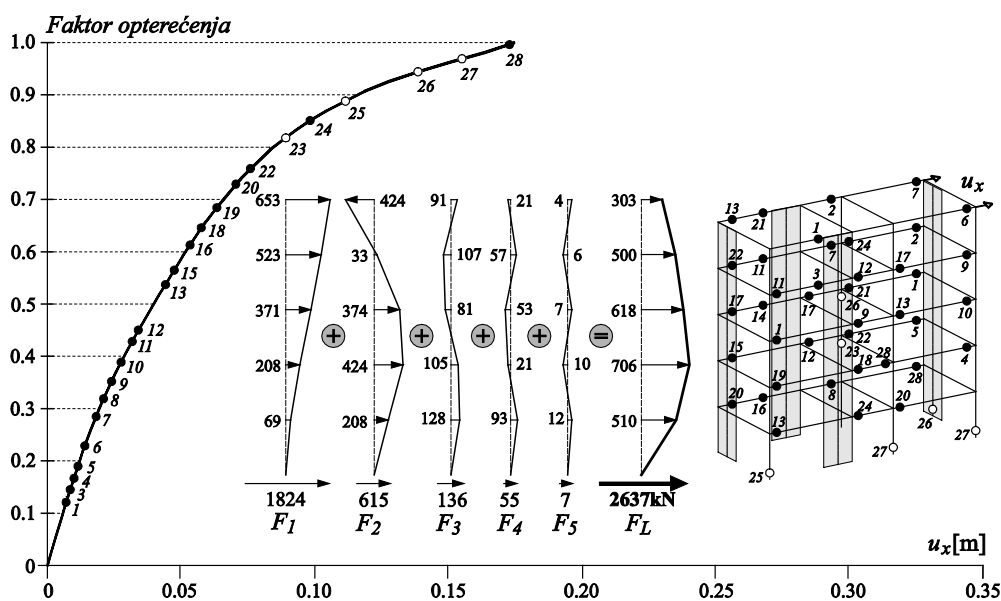
### 2.3.3.2 Određivanje ciljanog ubrzanja za smjer $x$

Određivanje ciljanog ubrzanja za linearnu (L) kombinaciju modova 5-katnog armirano-betonskog mješovitog sustava okvira i zidova za smjer  $x$  prikazano je u tablici 2.16. Dobiveno ciljano ubrzanje iznosi  $a_{gr,t} = 0.195g$ .

**Tablica 2.16** Ciljano ubrzanje pri linearnoj (L) kombinaciji modova za smjer  $x$

$a_{gr}$	$a_{s,1}$	$F_1$	$a_{s,2}$	$F_2$	$a_{s,3}$	$F_3$	$a_{s,4}$	$F_4$	$a_{s,5}$	$F_5$	$F_L = \sum F_i$	$F_f$	$F_f/F_L$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$	$\delta_5$
0.47	0.369	2394	1.558	1311	0.804	326	0.757	133	0.729	15.5	4179	1839	0.44	0.79	3.31	1.71	1.61	1.55
0.21	0.290	1883	0.788	663	0.361	146	0.340	60	0.327	7.0	2759	2897	1.05	1.38	3.75	1.72	1.62	1.56
0.20	0.284	1844	0.750	631	0.344	139	0.323	57	0.312	6.6	2678	2731	1.02	1.42	3.75	1.72	1.62	1.56
<b>0.195</b>	0.281	1824	0.731	615	0.335	136	0.315	55	0.304	6.5	2637	2637	<b>1.00</b>	1.44	3.75	1.72	1.62	1.56

Na crtežu 2.22 prikazani su vektori opterećenja svih sudjelujućih modova, krivulja nosivosti i redoslijed nastajanja plastifikacijskih zglobova za linearnu (L) kombinaciju modova za smjer  $x$ .



**Crtež 2.22** Krivulja nosivosti za linearnu (L) kombinaciju modova za smjer  $x$

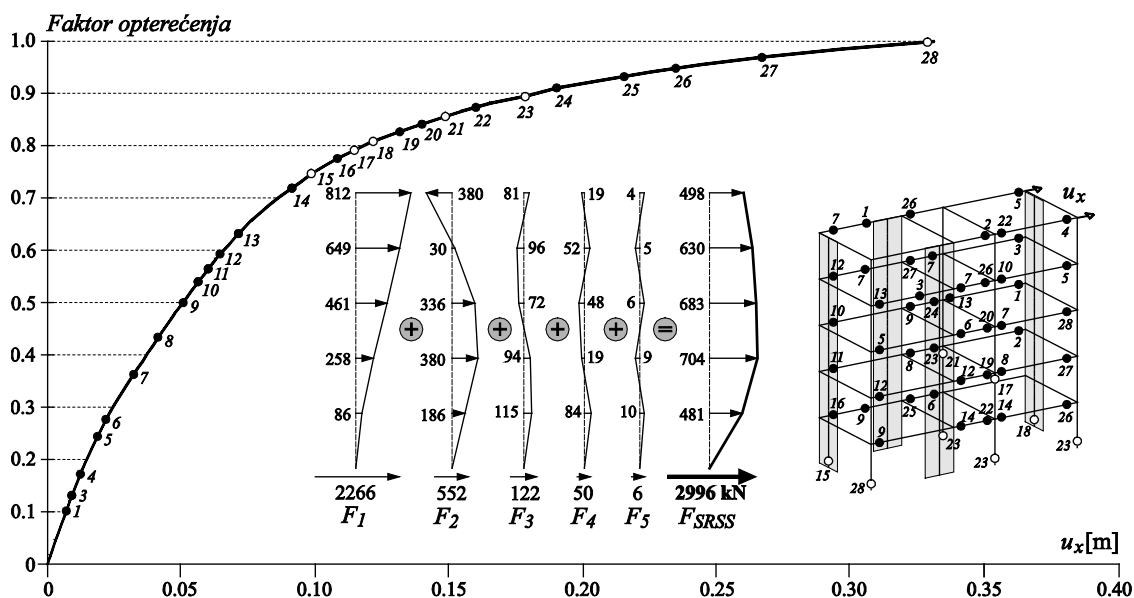
Rezultati za korijensku (SRSS) kombinaciju modova za smjer  $x$  prikazani su u tablici 2.17. Dobiveno je ciljano ubrzanje iznosa  $a_{gr,t} = 0.35g$ .

**Tablica 2.17** Ciljano ubrzanje pri korijenskoj (SRSS) kombinaciji modova za smjer  $x$ 

$a_{gr}$	$a_{s,1}$	$F_1$	$a_{gr}/2$	$a_{s,2}$	$F_2$	$a_{s,3}$	$F_3$	$a_{s,4}$	$F_4$	$a_{s,5}$	$F_5$	$F_{SRSS}$ $=\sum F_i$	$F_f$	$F_f/F_{SRSS}$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$	$\delta_5$
0.47	0.369	2394	0.235	0.881	742	0.404	164	0.380	67	0.366	7.8	3374	2733	0.81	0.79	1.87	0.86	0.81	0.78
0.38	0.359	2330	0.19	0.712	599	0.326	132	0.307	54	0.296	6.3	3122	2997	0.96	0.94	1.87	0.86	0.81	0.78
0.36	0.353	2292	0.16	0.675	568	0.309	125	0.291	51	0.280	6.0	3042	2981	0.98	0.98	1.88	0.86	0.81	0.78
<b>0.35</b>	0.349	2266	0.175	0.656	552	0.300	122	0.283	50	0.263	5.6	2996	2996	<b>1.00</b>	1.00	1.87	0.86	0.81	0.75

Usporedbom dobivenih ciljanih ubrzanja može se zaključiti da je linearna (L) kombinacija modova kod 5-katnog mješovitog sustava okvira i zidova bitno nepovoljnija od korijenske kombinacije jer slom konstrukcije pri linearnoj (L) kombinaciji modova nastupa pri nižoj razini ciljanog ubrzanja ( $a_{gr,t} = 0.195g$ ) za razliku od ciljanog ubrzanja kod SRSS kombinacije modova ( $a_{gr,t} = 0.35g$ ).

Na crtežu 2.23 prikazani su vektori opterećenja svih sudjelujućih modova, krivulja nosivosti i redosljed nastajanja plastifikacijskih zglobova za korijensku (SRSS) kombinaciju modova za smjer  $x$ .

**Crtež 2.23** Krivulja nosivosti za korijensku (SRSS) kombinaciju modova za smjer  $x$ 

### 2.3.3.3 Određivanje ciljanog ubrzanja za smjer $y$

U nastavku su prikazani rezultati analize 5-katnog armirano-betonskog mješovitog sustava okvira i zidova za smjer  $y$ . Svojstva vektora opterećenja za svaki pojedini mod (period  $T_i$ , sudjelujuća masa  $m_{e,i}$ , slomna sila  $F_{fi}$  i granično ubrzanje  $a_{gr,i}$ ) prikazana su u tablici 2.18.

**Tablica 2.18** Svojstva vektora horizontalnog opterećenja 5-katnog a/b mješovitog sustava okvira i zidova za smjer y

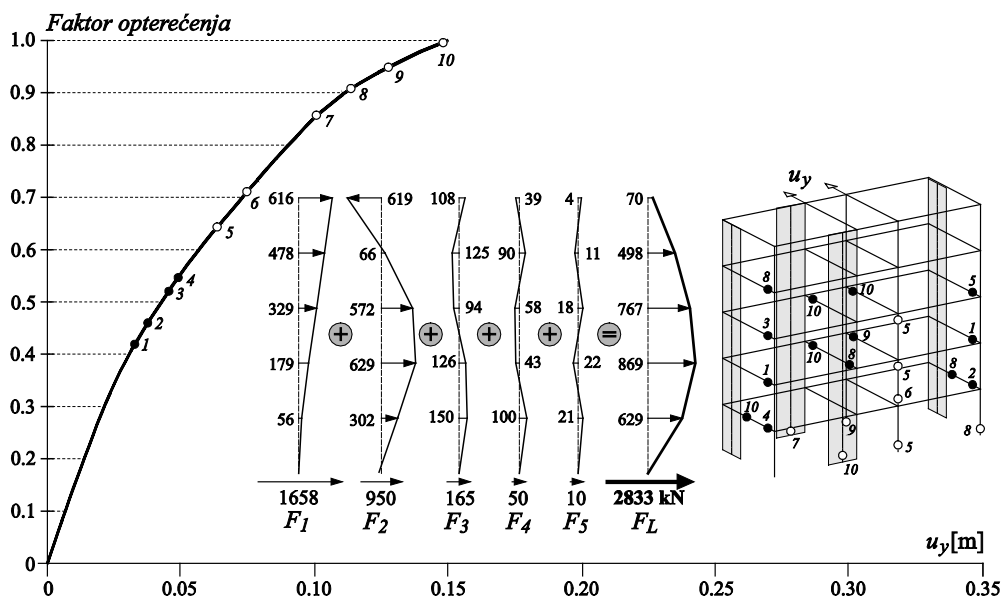
Vektor	$T_i$ [s]	$m_{e,i}$ [%]	$m_{e,i}$ [t]	$F_{fi}$ [kN]	$a_{gr,i}$
$\phi_1$	0.662	71.52	645.22	1875	0.21
$\phi_2$	0.164	16.82	151.74	2985	0.60
$\phi_3$	0.079	6.06	54.67	3443	4.22
$\phi_4$	0.057	2.04	18.40	1818	6.10
$\phi_5$	0.050	0.42	3.79	2149	35.76

Određivanje ciljanog ubrzanja za linearnu (L) kombinaciju modova 5-katnog armirano-betonskog mješovitog sustava okvira i zidova za smjer y prikazano je u tablici 2.19. Dobiveno ciljano ubrzanje tla za linearnu (L) kombinaciju modova iznosi  $a_{gr,t} = 0.17g$ .

**Tablica 2.19** Ciljano ubrzanje pri linearnoj (L) kombinaciji modova za smjer y

$a_{gr}$	$a_{s,1}$	$F_1$	$a_{s,2}$	$F_2$	$a_{s,3}$	$F_3$	$a_{s,4}$	$F_4$	$a_{s,5}$	$F_5$	$F_L = \sum F_i$	$F_f$	$F_f/F_L$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$	$\delta_5$
0.21	0.296	1875	0.774	1152	0.373	200	0.339	61	0.330	12.3	3301	2740	0.83	1.41	3.69	1.78	1.61	1.57
<b>0.17</b>	0.262	1658	0.638	950	0.308	165	0.278	50	0.271	10.1	2833	2833	<b>1.00</b>	1.54	3.75	1.81	1.64	1.59

Na crtežu 2.24 prikazani su vektori opterećenja sudjelujućih modova, krivulja nosivosti i redosljed nastajanja plastifikacijskih zglobova za linearnu (L) kombinaciju modova za smjer y.

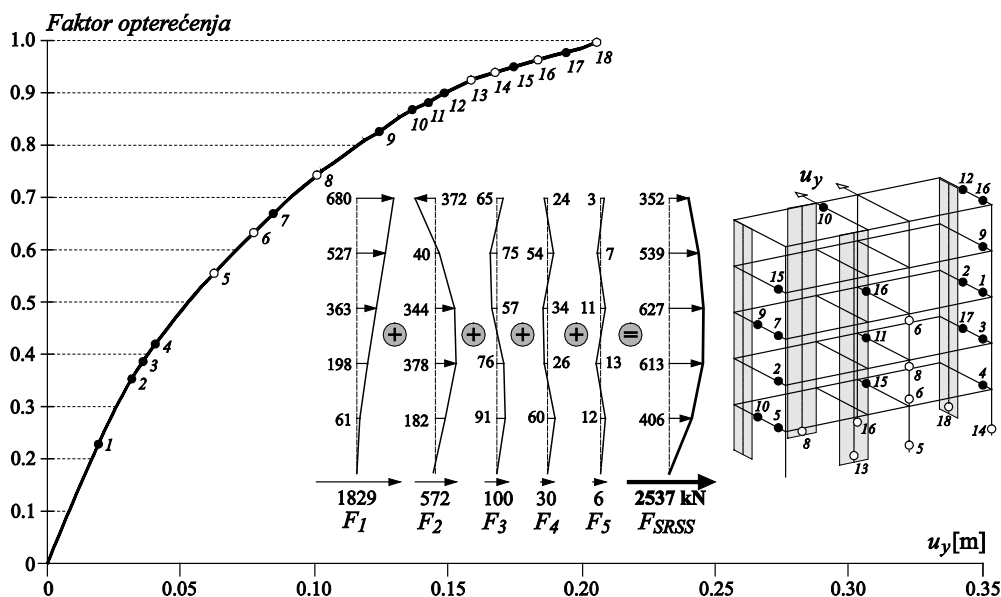
**Crtež 2.24** Krivulja nosivosti za linearnu (L) kombinaciju modova za smjer y

Postupak pronalaženja ciljanog ubrzanja 5-katnog armirano-betonskog mješovitog sustava okvira i zidova za korijensku (SRSS) kombinaciju modova za smjer y prikazan je u tablici 2.20. Dobiveno je ciljano ubrzanje iznosa  $a_{gr,t} = 0.205g$ .

**Tablica 2.20** Ciljano ubrzanje pri korijenskoj (SRSS) kombinaciji modova za smjer y

$a_{gr}$	$a_{s,1}$	$F_1$	$a_{gr}/2$	$a_{s,2}$	$F_2$	$a_{s,3}$	$F_3$	$a_{s,4}$	$F_4$	$a_{s,5}$	$F_5$	$F_{SRSS}$ $=\sum F_i$	$F_f$	$F_f/F_{SRSS}$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$	$\delta_5$
0.21	0.296	1875	0.105	0.394	587	0.192	103	0.171	31	0.167	6.2	2602	2550	0.98	1.41	1.88	0.91	0.81	0.80
<b>0.205</b>	<b>0.289</b>	<b>1829</b>	<b>0.103</b>	<b>0.384</b>	<b>572</b>	<b>0.187</b>	<b>100</b>	<b>0.167</b>	<b>30</b>	<b>0.164</b>	<b>6.1</b>	<b>2537</b>	<b>2537</b>	<b>1.00</b>	<b>1.41</b>	<b>1.87</b>	<b>0.91</b>	<b>0.81</b>	<b>0.80</b>

Na crtežu 2.25 prikazani su vektori opterećenja sudjelujućih modova, krivulja nosivosti i redosljed nastajanja plastifikacijskih zglobova za korijensku (SRSS) kombinaciju modova za smjer y.



**Crtež 2.25** Krivulja nosivosti za korijensku (SRSS) kombinaciju modova za smjer y

Pokazalo se da je i za smjer y linearna (L) kombinacija modova kod 5-katnog mješovitog sustava okvira i zidova također relevantna, jer slom konstrukcije nastupa pri manjem ciljanom ubrzanju ( $a_{gr,t} = 0.17g$ ) za razliku od ciljanog ubrzanja kod korijenske (SRSS) kombinacije modova ( $a_{gr,t} = 0.205g$ ).

U tablici 2.21 prikazana je usporedba rezultata dobivenog ciljanog ubrzanja i pripadne sile na bazu proračunskog modela, i to za prvi vektor promatran samostalno, te za linearnu (L) i korijensku (SRSS) kombinaciju modova 5-katnog armirano-betonskog mješovitog sustava okvira i

zidova za smjerove  $x$  i  $y$ . Prikazani rezultati dobiveni su za  $2/3$  iskoristivosti pomaka  $d_u$  na krivulji nosivosti uz elastični spektar s 5% prigušenjem.

**Tablica 2.21** Usporedba ciljanog ubrzanja prvog moda, te L i SRSS kombinacije modova uz  $2/3$  iskoristivosti pomaka i elastične spektre s 5% prigušenjem na primjeru 5-katnog a/b mješovitog sustava okvira i zidova

mješoviti a/b sustav	smjer	Pomak = $d_t = 2/3 d_u$						
		prigušenje [%]	$a_{gr,l}$	$F_l$ [kN]	$a_{gr,t}$	$F_L$ [kN]	$a_{gr,t}$	$F_{SRSS}$ [kN]
5-katni	x	5	0.47	2394	0.195	2637	0.35	2996
5-katni	y	5	0.21	1875	0.17	2833	0.205	2537

Iz dobivenih rezultata na primjeru 5-katnog armirano-betonskog mješovitog sustava okvira i zidova uz elastične spektre s 5% viskoznim prigušenjem i pomak pri  $2/3$  iskoristivosti pomaka  $d_u$  na krivulji nosivosti može se zaključiti da je ciljano ubrzanje  $a_{gr,t}$  dobiveno višemodalnom metodom naguravanja za linearnu (L) kombinaciju modova nepovoljnije od korijenske (SRSS) kombinacije modova kao i od ubrzanja tla dobivenog prema kriteriju ciljanog pomaka za prvi vektor promatran samostalno  $a_{gr,l}$  prema EN 1998 (Dodatak B), što samo potvrđuje zaključke dobivene na osnovu analiziranih 5-katnih i 9-katnih prostornih armirano-betonskih okvirnih sustava.



### 3. POJAVNOST KOMBINACIJE MODOVA

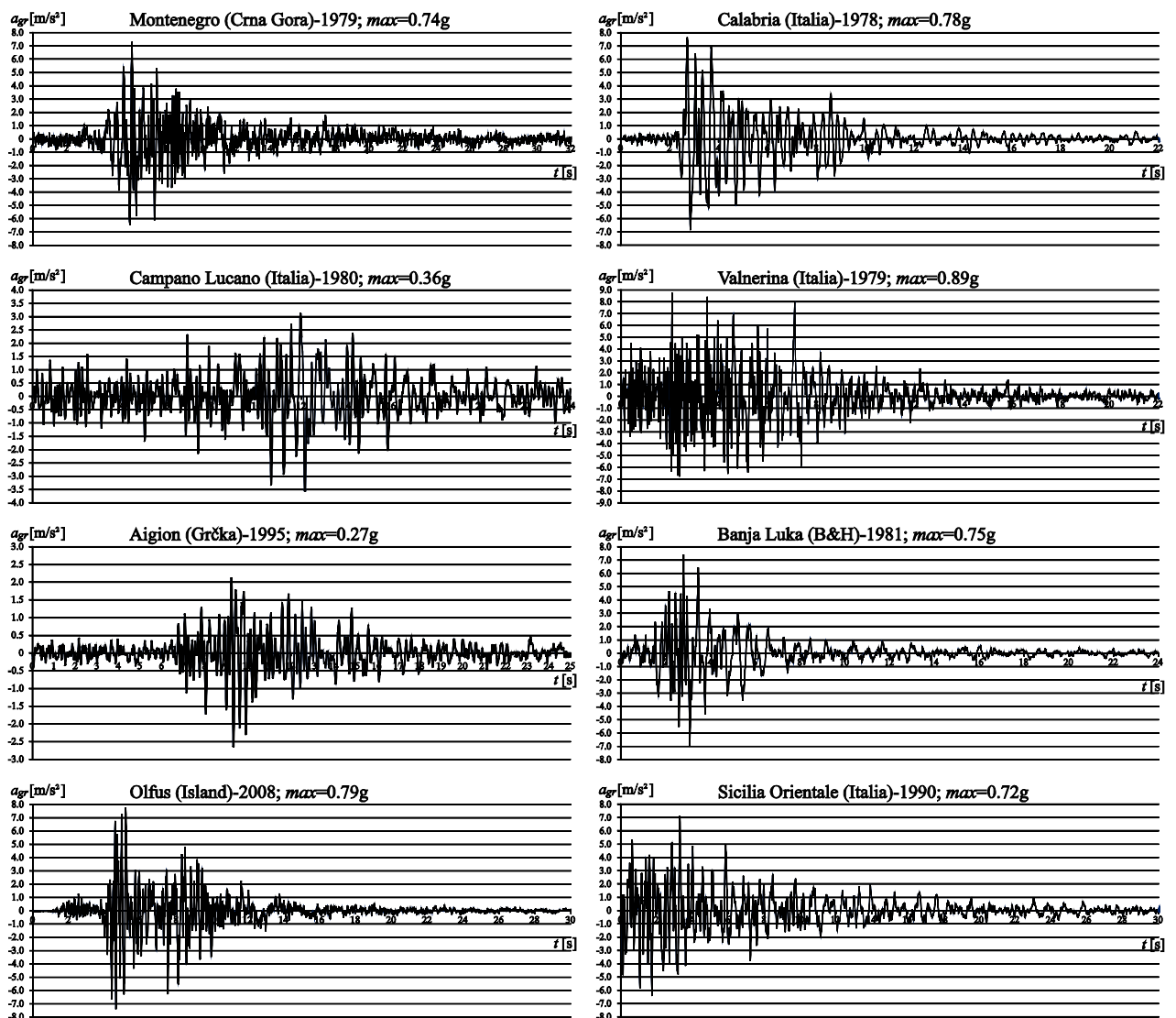
U ovom poglavlju analizirane su dvije moguće kombinacije modova, i to linearna (L) i kombinacija kvadratnog korijena iz sume kvadrata modova (SRSS). Proveden je postupak koji ima svrhu pokazati koja je od navedenih kombinacija modova nepovoljnija na djelovanje serije od osam odabranih zapisa akcelelograma stvarnih potresa.

Sami postupak je pokazan na primjeru 5-katnog i 9-katnog prostornog armirano-betonskog okvirnog sustava koji su opisani u drugom poglavlju ovog rada, ali se općenitost provedenog postupka ne gubi u analizi i drugih konstrukcijskih sustava. Isto tako analiziran je i vitki armirano-betonski zid za dva slučaja, i to zid s manjom i većom masom. Analiza interferencije modova obavlja se na linearnoj i nelinearnoj razini za jednostupnjevne sustave (JS) uzete kao modovi dobiveni na osnovu linearno elastičnog modela. Dinamički odgovor pojedinog JS primjenom vremenskih zapisa realnih potresa u formatu ubrzanje - vrijeme dobiven je Newmarkovom metodom srednjeg ubrzanja. U okviru ovog poglavlja opisana je formulacija numeričkog linearnog modela za ocjenu kombinacije modova na linearnoj razini, kao i formulacija numeričkog nelinearnog modela za ocjenu kombinacije modova na nelinearnoj razini. Prikazani su rezultati dinamičkog odgovora za linearan i nelinearan JS sustav i iznijeti su zaključci.

### 3.1 TEST POJAVNOSTI LINEARNE (L) I KORIJENSKE (SRSS) KOMBINACIJE MODOVA

Postupak koji slijedi ima svrhu provjeriti koja je od promatrane dvije kombinacije modova, i to linearne (L) i kombinacije kvadratnog korijena iz sume kvadrata modova (SRSS), uz istovremenu pojavnost vektora nepovoljnija u analizi na skupu od osam odabranih akcelelograma stvarnih potresa.

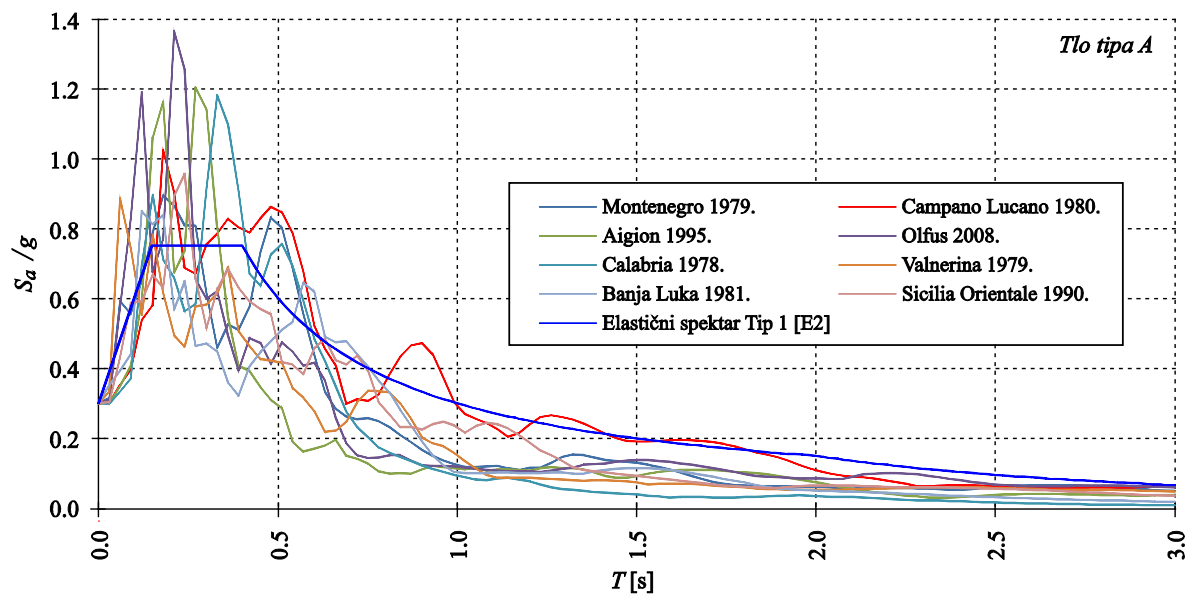
Zapisi akcelelograma preuzeti su iz baze podataka *European Strong-motion Database*, a odabrani potresi su sljedeći: Montenegro (Crna Gora)-1979, Campano Lucano (Italia)-1980, Aigion (Grčka)-1995, Olfus (Island)-2008, Calabria (Italia)-1978, Valnerina (Italia)-1979, Banja Luka (B&H)-1981 i Sicilia Orientale (Italia)-1990, te su prikazani na crtežu 3.1.



Crtež 3.1 Akcelelogrami osam stvarnih potresa preuzetih iz baze podataka *European Strong-motion Database*

Za mnogo zabilježenih potresa koji su se dogodili može se naći cijeli niz vremenskih zapisa ubrzanja potresa koji se vrlo često dosta razlikuju. Razlikuju se i sami vremenski zapisi jednog istog potresa, a razlozi tome su epicentralne udaljenosti i lokalne karakteristike tla na kojima se potres bilježi. Zbog toga je potrebno pažljivo odabrati odgovarajući zapis željenog potresa. Treba težiti da se zapisi akcelelograma stvarnih potresa biraju tako da spektri odgovora izabranih potresa za period jednak prvom vlastitom vektoru sustava ne odstupaju previše od propisanih spektara [I1], odnosno treba birati zapise potresa za koje kategorija tla na kojoj je potres zabilježen odgovara kategoriji tla projektirane građevine.

Za analizu armirano-betonskih sustava u ovom radu su odabrani potresi iz baze podataka *European Strong-motion Database* za tlo klase A (stijena ili druge stijenske geološke formacije uključujući najviše 5 m slabijeg materijala na površini s brzinom širenja poprečnih valova većom od 800 m/s) i prikazani su na crtežu 3.1. Za odabrane potrese određeni su elastični spektri ubrzanja za prigušenje  $\xi = 0.05$  skalirani tako da im maksimalna vrijednost ubrzanja bude jednaka  $a_g S$ , gdje je  $a_g$  projektno ubrzanje tla, a  $S$  parametar tla prema europskoj normi EN 1998-1 (Eurocode 8 [E2]). Elastični spektri ubrzanja prikazani su na crtežu 3.2.



Crtež 3.2 Elastični spektri ubrzanja

Također je potrebno zapis ubrzanja svakog potresa prilagoditi zahtijevanom projektom ubrzanju  $a_g$ . Za potrebe analize kombinacije modova na linearnoj i nelinearnoj razini odabrano je projektno ubrzanje u iznosu 0.30g, te su stoga zapisi ubrzanja promatranih osam stvarnih potresa skalirani tako da im vršno ubrzanje tla iznosi upravo 0.30g.

Analiza linearne (L) i korijenske (SRSS) kombinacije modova obavlja se na linearnoj i nelinearnoj razini za jednostupnjevne sustave (JS), uzete kao vlastiti vektori dobiveni za modele 5-katnog i 9-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava koji su opisani u *primjeru 1* i *primjeru 2*, a prikazani su u drugom poglavlju ovog rada.

Odgovor u vremenu pojedinog jednostupnjevskog sustava, primjenom vremenskih zapisa realnih potresa u formatu ubrzanje - vrijeme, dobiven je Newmarkovom metodom srednjeg ubrzanja.

Jednadžba gibanja jednostupnjevskog sustava koju je potrebno riješiti ima numerički oblik

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f_s(u, \dot{u}) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (3.1)$$

s rubnim uvjetima

$$u_0 = u(0) \quad \dot{u}_0 = \dot{u}(0) \quad (3.2)$$

gdje su:

$m$  - masa jednostupnjevskog sustava,

$c$  - konstanta viskoznog prigušenja ( $c = 2m\omega\zeta$ ),

$\omega$  - kružna frekvencija,

$\zeta$  - koeficijent viskoznog prigušenja,

$f_s$  - elastična sila,

$\ddot{u}_g = a_{gr}$  - ubrzanje podloge, dobiveno iz zapisa akcelelograma stvarnih potresa.

Vanjska sila pobude koju predstavlja izraz s desne strane jednakosti u jednadžbi (3.1) zadana je u nizu diskretnih točaka zapisa akcelelograma realnih potresa.

Odgovor jednostupnjevskog sustava dobiva se u diskretnim vremenskim trenucima  $t_i$  označenih kao vrijeme  $i$ . Pomak, brzina i ubrzanje jednostupnjevskog sustava postaju tada  $u_i$ ,  $\dot{u}_i$ ,  $\ddot{u}_i$ . Sve spomenute veličine u vremenskom trenutku  $i$  moraju zadovoljavati jednadžbu

$$m\ddot{u}_i + c\dot{u}_i + (f_s)_i = (-m\ddot{u}_g)_i \quad (3.3)$$

gdje je  $f_s$  elastična sila koja je za linearni sustav jednaka  $(f_s)_i = ku_i$ , gdje je  $k$  krutost sustava, dok za nelinearni sustav ona ovisi o povijesti pomaka te o brzini u vremenskom trenutku  $i$ .

Kod linearnog sustava računato je s 5% viskoznim prigušenjem, dok kod nelinearnog sustava viskozno prigušenje nije uzeto u obzir jer je ono uključeno kroz nelinearna svojstva JS, odnosno kroz nelinearnu cikličku krivulju nosivosti.

Numerička integracija ostvarena je računalnim programom napisanim u jeziku C++ prema postupku prikazanom u [C2].

## 3.2 ANALIZA LINEARNE (L) I KORIJENSKE (SRSS) KOMBINACIJE MODOVA NA LINEARNOJ RAZINI

### 3.2.1 Analiza L i SRSS kombinacije modova na linearnoj razini na primjeru 5-katnog i 9-katnog a/b okvira

Prvo je analiziran 5-katni prostorni armirano-betonski okvirni sustav iz *primjera 1* koji je prikazan u drugom poglavlju ovog rada. Pri tome je krutost  $k_i$  linearnog jednostupnjevnog sustava (JS) definirana preko poznatog perioda  $T_i$ , odnosno kružne frekvencije  $\omega_i$  i pripadne sudjelujuće mase  $m_{e,i}$  koja odgovara pojedinom vlastitom vektoru  $\phi_i$ .

$$\omega_i = \frac{2\pi}{T_i} \quad k_i = \omega_i^2 m_{e,i} \quad (3.4)$$

U tablici 3.1 prikazani su vlastiti vektori  $\phi_i$  5-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava za smjer  $x$ , te podaci o pripadajućim periodima  $T_i$ , sudjelujućim masama  $m_{e,i}$ , kružnoj frekvenciji  $\omega_i$  i krutosti sustava  $k_i$ . Navedene karakteristike vlastitih vektora predstavljaju svojstva jednostupnjevnog sustava (JS) na kojem se analizira dinamički odgovor uslijed opterećenja zapisom akcelelograma osam realnih potresa.

**Tablica 3.1** Svojstva vlastitih vektora (linearno elastičnih JS) za smjer  $x$

Vektor	$T_i$ [s]	$m_{e,i}$ [%]	$m_{e,i}$ [t]	$\omega_i$ [s <sup>-1</sup> ]	$k_i$ [kN/m]
$\phi_1$	0.839	81.47	688.42	7.489	38610.12
$\phi_2$	0.265	10.51	88.81	23.710	49925.79
$\phi_3$	0.146	4.12	34.81	43.036	64471.51
$\phi_4$	0.097	1.98	16.73	64.775	70195.74
$\phi_5$	0.076	0.67	5.66	82.673	38685.11

U analizu je uzeto pet vlastitih vektora 5-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava, odnosno analizirano je pet jednostupnjevnih sustava (JS) i to za dva smjera ( $x$  i  $y$  smjer).

U tablici 3.2 prikazani su vlastiti vektori  $\phi_i$  5-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava za smjer  $y$ , te podaci o pripadajućim periodima  $T_i$ , sudjelujućim masama  $m_{e,i}$ , kružnoj frekvenciji  $\omega_i$  i krutosti sustava  $k_i$ .

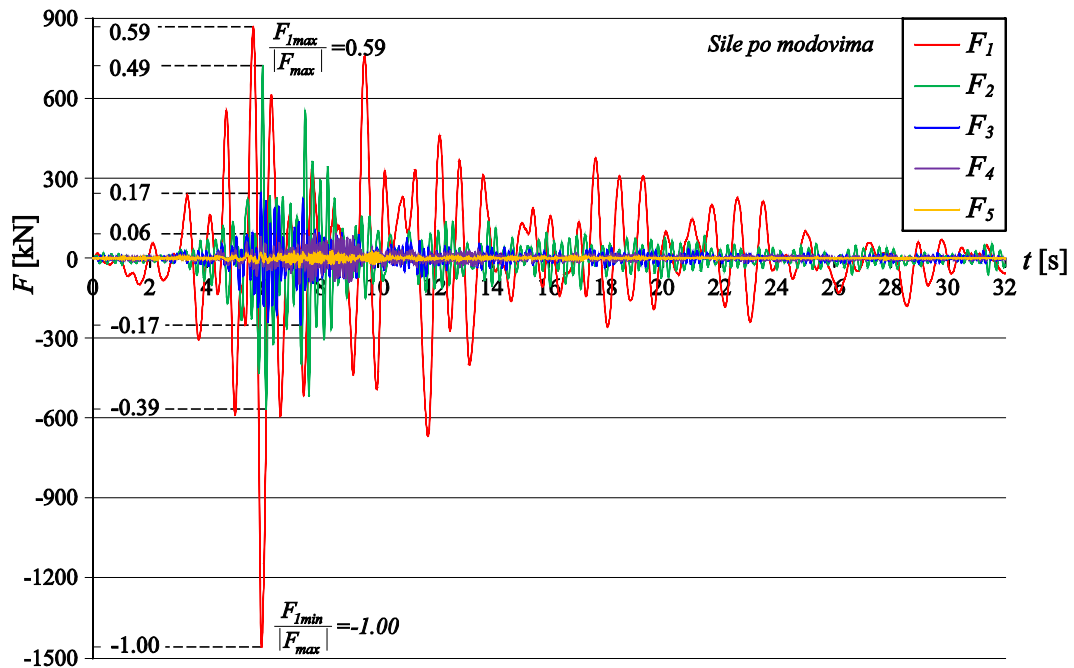
**Tablica 3.2** Svojstva vlastitih vektora (linearno elastičnih JS) za smjer  $y$

Vektor	$T_i$ [s]	$m_{e,i}$ [%]	$m_{e,i}$ [t]	$\omega_i$ [ $s^{-1}$ ]	$k_i$ [kN/m]
$\phi_1$	0.953	80.34	678.87	6.593	29508.88
$\phi_2$	0.293	10.94	92.44	21.444	42508.08
$\phi_3$	0.156	4.51	38.11	40.277	61823.44
$\phi_4$	0.101	2.27	19.18	62.210	74228.21
$\phi_5$	0.077	0.78	6.59	81.600	43879.91

Dinamičkim odgovorom jednostupnjavnog sustava dobivene su poprečne sile u presjeku pri bazi proračunskog modela ( $F_i$ ) kao vremenske funkcije za svaki od promatranih pet vlastitih vektora.

Uvedeno je relativno mjerilo sila prema kojem je najveća sila od svih modova ( $F_{max}$ ) jednaka vrijednosti 1.00 a ostale sile su dane u relativnom odnosu prema njoj.

Na crtežu 3.3 prikazan je dijagram poprečne sile u presjeku pri bazi proračunskog modela ( $F_i$ ) u ovisnosti o vremenu za svih pet analiziranih vlastitih vektora za primjer 5-katnog armirano-betonskog okvira opterećenog u  $x$  smjeru potresnom pobudom Montenegro. Uočava se da u relativnom mjerilu sila, najvećem iznosu sile od svih pet modova ( $F_{max}/=1456$  kN) odgovara vrijednost 1.00.



**Crtež 3.3** Poprečne sile svih pet modova u presjeku pri bazi proračunskog modela 5-katnog a/b okvira u ovisnosti o vremenu za potresnu pobudu Montenegro u  $x$  smjeru

Maksimalne vrijednosti poprečnih sila  $F_{imax}$  svih pet vektora u presjeku pri bazi proračunskog modela koje su prikazane u tablicama 3.3, 3.6, 3.8 i 3.10, usljed djelovanja osam odabranih zapisa potresa, dobivene su na analogan način.

U tablici 3.3 dani su rezultati analize dinamičkog odgovora jednostupnjevnog sustava (JS) koji predstavlja 5-katni armirano-betonski okvir, primjenom zapisa osam realnih potresa u formatu ubrzanje - vrijeme, za smjerove  $x$  i  $y$ , koji prikazuju istovremenu najnepovoljniju kombinaciju linearne superpozicije modova  $F_L$  kao i najnepovoljniju kombinaciju kvadratnog korijena iz sume kvadrata modova  $F_{SRSS}$ .

Tablica 3.3 Usporedba linearne (L) i korijenske (SRSS) kombinacije modova za 5-katni a/b okvir

Montenegro - 5-katni a/b okvir - smjer x					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	$u$ isto vrijeme $t$
0.59	0.49	0.17	0.06	0.02	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-1.00	-0.39	-0.17	-0.07	-0.02	-0.92
					$F_{SRSS}$
					1.08
Campano Lucano - 5-katni a/b okvir - smjer x					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	$u$ isto vrijeme $t$
1.00	0.19	0.07	0.02	0.01	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-0.81	-0.19	-0.06	-0.02	-0.01	0.94
					$F_{SRSS}$
					1.00
Aigion - 5-katni a/b okvir - smjer x					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	$u$ isto vrijeme $t$
0.68	0.94	0.31	0.05	0.01	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-0.64	-1.00	-0.34	-0.07	-0.02	-1.48
					$F_{SRSS}$
					1.05
Olfus - 5-katni a/b okvir - smjer x					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	$u$ isto vrijeme $t$
1.00	0.61	0.24	0.13	0.02	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-0.71	-0.55	-0.18	-0.14	-0.03	-1.02
					$F_{SRSS}$
					1.00
Calabria - 5-katni a/b okvir - smjer x					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	$u$ isto vrijeme $t$
1.00	0.47	0.30	0.06	0.02	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-0.76	-0.49	-0.23	-0.06	-0.02	-1.09
					$F_{SRSS}$
					1.08
Valnerina - 5-katni a/b okvir - smjer x					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	$u$ isto vrijeme $t$
1.00	0.23	0.12	0.04	0.02	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-0.82	-0.24	-0.08	-0.05	-0.02	-0.88
					$F_{SRSS}$
					1.02
Banja Luka - 5-katni a/b okvir - smjer x					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	$u$ isto vrijeme $t$
1.00	0.22	0.14	0.04	0.01	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-0.95	-0.21	-0.14	-0.04	-0.01	0.92
					$F_{SRSS}$
					1.00
Sicilia Orientale - 5-katni a/b okvir - smjer x					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	$u$ isto vrijeme $t$
1.00	0.37	0.14	0.06	0.02	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-0.95	-0.36	-0.13	-0.06	-0.02	1.01
					$F_{SRSS}$
					1.00
Montenegro - 5-katni a/b okvir - smjer y					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	$u$ isto vrijeme $t$
0.83	0.64	0.32	0.12	0.03	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-1.00	-0.52	-0.37	-0.12	-0.04	-1.18
					$F_{SRSS}$
					1.21
Campano Lucano - 5-katni a/b okvir - smjer y					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	$u$ isto vrijeme $t$
1.00	0.24	0.08	0.03	0.01	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-0.88	-0.25	-0.08	-0.03	-0.01	1.09
					$F_{SRSS}$
					1.00
Aigion - 5-katni a/b okvir - smjer y					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	$u$ isto vrijeme $t$
0.78	0.86	0.41	0.06	0.02	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-0.74	-1.00	-0.41	-0.08	-0.02	-1.81
					$F_{SRSS}$
					1.16
Olfus - 5-katni a/b okvir - smjer y					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	$u$ isto vrijeme $t$
1.00	0.65	0.30	0.20	0.04	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-0.88	-0.59	-0.24	-0.20	-0.05	-1.19
					$F_{SRSS}$
					1.02
Calabria - 5-katni a/b okvir - smjer y					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	$u$ isto vrijeme $t$
0.95	0.98	0.43	0.10	0.03	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-0.65	-1.00	-0.40	-0.10	-0.03	-1.27
					$F_{SRSS}$
					1.16
Valnerina - 5-katni a/b okvir - smjer y					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	$u$ isto vrijeme $t$
1.00	0.44	0.27	0.07	0.04	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-0.93	-0.45	-0.23	-0.09	-0.04	0.94
					$F_{SRSS}$
					1.02
Banja Luka - 5-katni a/b okvir - smjer y					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	$u$ isto vrijeme $t$
0.99	0.40	0.34	0.13	0.03	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-1.00	-0.47	-0.38	-0.10	-0.03	1.10
					$F_{SRSS}$
					1.05
Sicilia Orientale - 5-katni a/b okvir - smjer y					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	$u$ isto vrijeme $t$
0.93	0.29	0.17	0.06	0.02	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-1.00	-0.25	-0.17	-0.07	-0.02	-1.02
					$F_{SRSS}$
					1.00

Istovijetni postupak proveden je za dinamičku analizu prostornog 9-katnog linearnog armirano-betonskog okvirnog sustava iz *primjera 2*, a rezultati analize su prikazani u tablici 3.6.

U tablici 3.4 prikazani su vlastiti vektori  $\phi_i$  9-katnog armirano-betonskog okvira za smjer  $x$ , te podaci o pripadajućim periodima  $T_i$ , sudjelujućim masama  $m_{e,i}$ , kružnoj frekvenciji  $\omega_i$  i krutosti sustava  $k_i$  koji predstavljaju svojstva jednostupnjevnog sustava (JS) na kojem se promatra dinamički odgovor.



**Tablica 3.4** Svojstva vlastitih vektora (linearno elastičnih JS) za smjer  $x$ 

Vektor	$T_i$ [s]	$m_{e,i}$ [%]	$m_{e,i}$ [t]	$\omega_i$ [ $s^{-1}$ ]	$k_i$ [kN/m]
$\phi_1$	1.547	80.44	1223.49	4.062	20187.39
$\phi_2$	0.502	10.04	152.71	12.516	23922.06
$\phi_3$	0.286	3.73	56.73	21.969	27379.99
$\phi_4$	0.194	2.05	31.18	32.388	32707.28
$\phi_5$	0.143	1.27	19.32	43.938	37298.18

U tablici 3.5 prikazani su vlastiti vektori  $\phi_i$  9-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava za smjer  $y$ , te podaci o pripadajućim periodima  $T_i$ , sudjelujućim masama  $m_{e,i}$ , kružnoj frekvenciji  $\omega_i$  i krutosti sustava  $k_i$ .

**Tablica 3.5** Svojstva vlastitih vektora (linearno elastičnih JS) za smjer  $y$ 

Vektor	$T_i$ [s]	$m_{e,i}$ [%]	$m_{e,i}$ [t]	$\omega_i$ [ $s^{-1}$ ]	$k_i$ [kN/m]
$\phi_1$	1.789	79.48	1208.89	3.512	14910.62
$\phi_2$	0.573	10.34	157.27	10.965	18908.76
$\phi_3$	0.319	3.89	59.17	19.696	22953.96
$\phi_4$	0.212	2.19	33.31	29.638	29259.87
$\phi_5$	0.152	1.41	21.45	41.336	36650.86

Tablica 3.6 Usporedba linearne (L) i korijenske (SRSS) kombinacije modova za 9-katni a/b okvir

<b>Montenegro - 9-katni a/b okvir - smjer x</b>						
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	u isto vrijeme t	
1.00	0.73	0.27	0.12	0.09		
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$	-1.11
-0.94	-0.84	-0.21	-0.16	-0.10	$F_{SRSS}$	1.00
<b>Campano Lucano - 9-katni a/b okvir - smjer x</b>						
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	u isto vrijeme t	
0.89	0.47	0.16	0.14	0.05		
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$	-1.08
-1.00	-0.55	-0.15	-0.14	-0.05	$F_{SRSS}$	1.01
<b>Aigion - 9-katni a/b okvir - smjer x</b>						
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	u isto vrijeme t	
0.91	0.31	0.44	0.25	0.13		
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$	1.22
-1.00	-0.37	-0.51	-0.20	-0.16	$F_{SRSS}$	1.01
<b>Olfus - 9-katni a/b okvir - smjer x</b>						
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	u isto vrijeme t	
1.00	0.38	0.19	0.19	0.09		
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$	-1.08
-0.92	-0.41	-0.17	-0.18	-0.07	$F_{SRSS}$	1.00
<b>Calabria - 9-katni a/b okvir - smjer x</b>						
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	u isto vrijeme t	
0.35	0.96	0.34	0.14	0.14		
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$	-1.15
-0.38	-1.00	-0.37	-0.20	-0.11	$F_{SRSS}$	1.01
<b>Valnerina - 9-katni a/b okvir - smjer x</b>						
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	u isto vrijeme t	
0.91	0.73	0.40	0.21	0.15		
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$	1.47
-1.00	-0.75	-0.41	-0.20	-0.10	$F_{SRSS}$	1.20
<b>Banja Luka - 9-katni a/b okvir - smjer x</b>						
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	u isto vrijeme t	
0.78	0.56	0.15	0.12	0.11		
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$	1.31
-1.00	-0.54	-0.18	-0.11	-0.11	$F_{SRSS}$	1.04
<b>Sicilia Orientale - 9-katni a/b okvir - smjer x</b>						
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	u isto vrijeme t	
1.00	0.59	0.31	0.21	0.11		
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$	1.21
-0.70	-0.66	-0.28	-0.23	-0.10	$F_{SRSS}$	1.03
<b>Montenegro - 9-katni a/b okvir - smjer y</b>						
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	u isto vrijeme t	
0.92	1.00	0.36	0.29	0.18		
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$	-1.84
-0.85	-0.98	-0.32	-0.33	-0.21	$F_{SRSS}$	1.17
<b>Campano Lucano - 9-katni a/b okvir - smjer y</b>						
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	u isto vrijeme t	
0.98	0.44	0.16	0.12	0.06		
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$	-1.27
-1.00	-0.50	-0.22	-0.14	-0.06	$F_{SRSS}$	1.01
<b>Aigion - 9-katni a/b okvir - smjer y</b>						
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	u isto vrijeme t	
1.00	0.21	0.41	0.17	0.18		
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$	1.07
-0.99	-0.20	-0.46	-0.16	-0.19	$F_{SRSS}$	1.02
<b>Olfus - 9-katni a/b okvir - smjer y</b>						
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	u isto vrijeme t	
1.00	0.47	0.31	0.38	0.12		
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$	-1.23
-0.95	-0.53	-0.28	-0.33	-0.09	$F_{SRSS}$	1.00
<b>Calabria - 9-katni a/b okvir - smjer y</b>						
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	u isto vrijeme t	
0.40	1.00	0.73	0.23	0.21		
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$	-1.39
-0.42	-0.92	-0.67	-0.23	-0.18	$F_{SRSS}$	1.20
<b>Valnerina - 9-katni a/b okvir - smjer y</b>						
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	u isto vrijeme t	
0.74	0.57	0.46	0.22	0.24		
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$	-1.12
-1.00	-0.68	-0.46	-0.19	-0.18	$F_{SRSS}$	1.08
<b>Banja Luka - 9-katni a/b okvir - smjer y</b>						
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	u isto vrijeme t	
0.72	1.00	0.27	0.16	0.17		
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$	-1.49
-0.89	-0.95	-0.26	-0.18	-0.16	$F_{SRSS}$	1.09
<b>Sicilia Orientale - 9-katni a/b okvir - smjer y</b>						
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	u isto vrijeme t	
0.99	0.83	0.50	0.39	0.20		
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$	-1.67
-1.00	-0.79	-0.40	-0.33	-0.20	$F_{SRSS}$	1.11

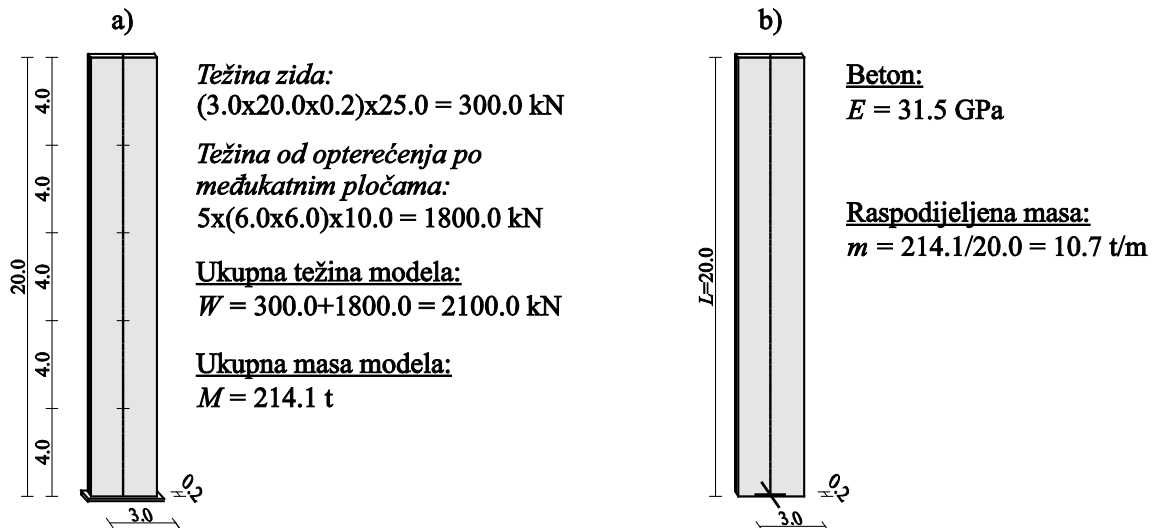
Prikazani rezultati dinamičkog odgovora za linearni jednostupnjevi sustav (JS) prema tablicama 3.3 i 3.6 pokazuju da je linearna (L) kombinacija učestalije nepovoljnija od korijenske (SRSS) kombinacije modova, s obzirom da je istovremena najnepovoljnija kombinacija linearne superpozicije modova  $F_L$  učestalije nepovoljnija od istovremene najnepovoljnije kombinacije kvadratnog korijena iz sume kvadrata modova  $F_{SRSS}$ .

### 3.2.2 Analiza L i SRSS kombinacije modova na linearnoj razini na primjeru vitkog a/b zida

Na primjeru vitkog a/b zida izvršena je usporedba pojavnosti, odnosno istovremenosti pojave modova u linearnoj (L) kombinaciji i korijenskoj (SRSS) kombinaciji modova na linearnoj razini, na skupu od osam odabranih akcelelograma stvarnih potresa. Zapisi akcelelograma potresa prikazani su na crtežu 3.1, a za potrebe analize interferencije modova na razini linearnog jednostupnjevog sustava (JS) odabrano je projektno ubrzanje u iznosu  $0.30g$ , te su stoga zapisi ubrzanja promatranih potresa skalirani na vršno ubrzanje tog iznosa.

Promatran je vitki 5-katni a/b zid dimenzija  $3.0\text{ m} \times 20.0\text{ m} \times 0.2\text{ m}$ , kako je prikazano na crtežu 3.4a. Usvojeno je da zidu pripadaju međukatne ploče dimenzija  $6.0\text{ m} \times 6.0\text{ m}$ , a ekvivalentno opterećenje od same ploče i tereta na njoj iznosi  $10.0\text{ kN/m}^2$ . Ukupna težina modela iznosi  $W = 2100.0\text{ kN}$ , a ukupna masa modela iznosi  $M = 214.1\text{ t}$ .

Proračun dinamičkih svojstava ( $\phi_i$ ,  $T_i$ ,  $m_{e,i}$ ) dobiven je na linearnom modelu zida sa raspodijeljenom masom  $m = 10.7\text{ t/m}$ , kako je prikazano na crtežu 3.4b. Korišten je beton sa ishodišnim modulom elastičnosti  $E = 31.5\text{ GPa}$ .



Crtež 3.4 Vitki a/b zid: a) geometrija i opterećenje; b) model s raspodijeljenom masom

Rješenjem linearne dinamičke zadaće dobiveni su vlastiti vektori  $\phi_i$  za uzdužni smjer zida, te podaci o pripadajućim periodima  $T_i$  i sudjelujućim masama  $m_{e,i}$ , što je prikazano u tablici 3.7. Obzirom da je zid vitak može se promatrati i kao konzolna greda istog poprečnog presjeka kao i zid, stoga se periodi osciliranja  $T_i$  dobiveni rješenjem linearne dinamičke zadaće izvrsno slažu s

vlastitim periodima slobodnih vibracija raspodijeljenog sustava konzolne grede uslijed savijanja kako je prikazano u [H2, M1], a definirano je sljedećim izrazom:

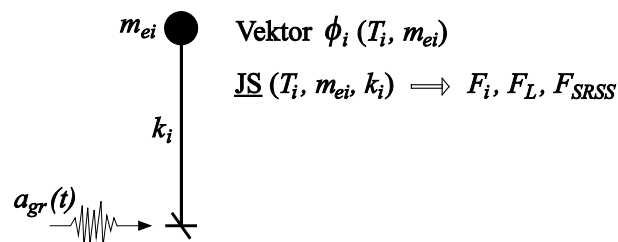
$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{2\pi L^2}{1.875^2} \sqrt{\frac{m}{EI}} \\ T_2 &= \frac{2\pi L^2}{4.694^2} \sqrt{\frac{m}{EI}} \\ T_i &= \frac{8L^2}{\pi(2i-1)^2} \sqrt{\frac{m}{EI}}, \quad i = 3, 4, \dots \end{aligned} \quad (3.5)$$

U tablici 3.7 prikazane su i ekvivalentne krutosti  $k_i$  jednostupnjevnih sustava (JS). Određivanje krutosti JS opisano je u poglavlju 3.2.1.

**Tablica 3.7** Svojstva vlastitih vektora (linearno elastičnih JS) vitkog a/b zida

Vektor	$T_i$ [s]	$m_{e,i}$ [%]	$m_{e,i}$ [t]	$k_i$ [kN/m]
$\phi_1$	0.621	62.00	132.72	13586.67
$\phi_2$	0.099	19.92	42.64	171753.87
$\phi_3$	0.035	7.02	15.03	484376.01
$\phi_4$	0.018	3.56	7.62	928473.90
$\phi_5$	0.011	2.04	4.37	1425790.78

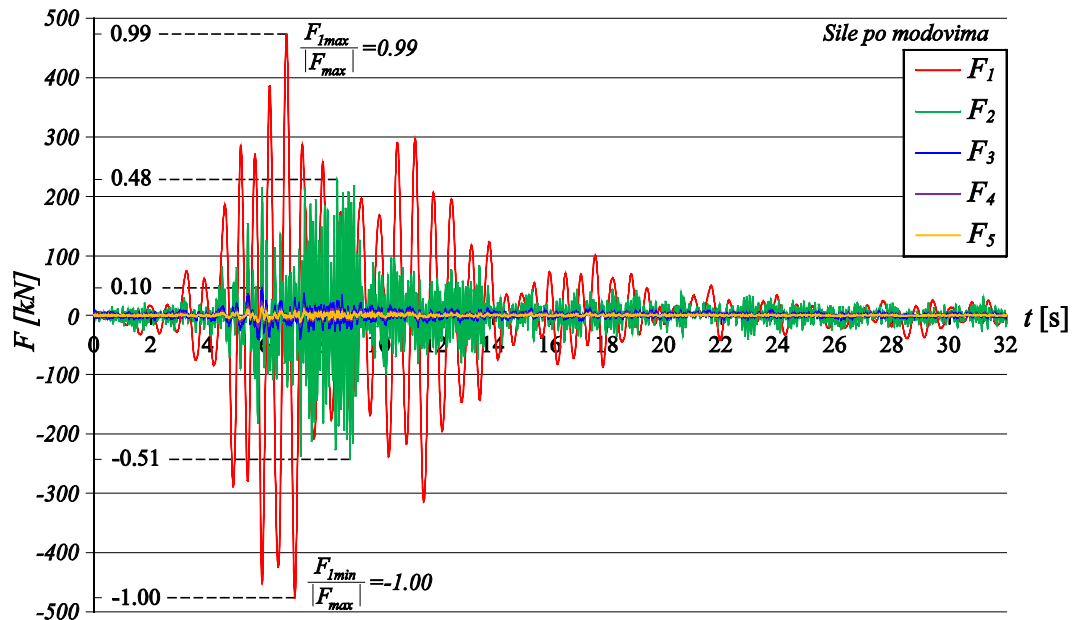
Navedene karakteristike vlastitih vektora predstavljaju svojstva JS na kojima se analizira dinamički odgovor uslijed opterećenja zapisom ubrzanja osam stvarnih potresa, što je shematski prikazano na crtežu 3.5.



**Crtež 3.5** Određivanje poprečnih sila na bazu proračunskog modela vitkog a/b zida uslijed djelovanja potresne pobude na bazu ekvivalentnog JS

Dinamičkim odgovorom ekvivalentnog jednostupnjevnog sustava (JS) dobivene su poprečne sile na bazu proračunskog modela ( $F_i$ ) kao vremenske funkcije za svaki od analiziranih pet vlastitih vektora vitkog a/b zida, a njihove maksimalne vrijednosti  $F_{i,max}$  prikazane su u tablici 3.8, i to u relativnom mjerilu sila.

Na crtežu 3.6 prikazan je dijagram poprečne sile na bazu proračunskog modela ( $F_i$ ) u ovisnosti o vremenu za svih pet vlastitih vektora za primjer 5-katnog vitkog a/b zida opterećenog u uzdužnom smjeru potresnom pobudom Montenegro. Uočava se da u relativnom mjerilu sile, najvećem iznosu sile od promatranih pet modova ( $|F_{max}|=476$  kN) odgovara vrijednost 1.00.



**Crtež 3.6** Poprečne sile na bazu proračunskog modela vitkog a/b zida svih pet modova u ovisnosti o vremenu za potresnu pobudu Montenegro

U tablici 3.8 dani su rezultati analize dinamičkog odgovora jednostupnjevnog sustava (JS) koji predstavlja 5-katni a/b zid, primjenom zapisa osam realnih potresa u formatu ubrzanje - vrijeme, koji prikazuju istovremenu najnepovoljniju kombinaciju linearne superpozicije modova  $F_L$  kao i najnepovoljniju kombinaciju kvadratnog korijena iz sume kvadrata modova  $F_{SRSS}$ .

**Tablica 3.8** Usporedba linearne (L) i korijske (SRSS) kombinacije modova na primjeru vitkog a/b zida

<b>Montenegro - vitki a/b zid</b>					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	<i>u isto vrijeme t</i>
0.99	0.48	0.10	0.05	0.03	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-1.00	-0.51	-0.08	-0.04	-0.02	1.10
					$F_{SRSS}$
					1.06
<b>Campano Lucano - vitki a/b zid</b>					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	<i>u isto vrijeme t</i>
1.00	0.31	0.06	0.03	0.02	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-0.90	-0.24	-0.07	-0.04	-0.02	1.23
					$F_{SRSS}$
					1.00
<b>Aigion - vitki a/b zid</b>					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	<i>u isto vrijeme t</i>
0.96	0.58	0.15	0.07	0.04	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-1.00	-0.75	-0.19	-0.09	-0.05	-1.24
					$F_{SRSS}$
					1.00
<b>Olfus - vitki a/b zid</b>					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	<i>u isto vrijeme t</i>
1.00	0.68	0.09	0.04	0.02	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-0.94	-0.71	-0.08	-0.04	-0.02	-1.26
					$F_{SRSS}$
					1.08
<b>Calabria - vitki a/b zid</b>					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	<i>u isto vrijeme t</i>
0.91	0.29	0.08	0.04	0.02	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-1.00	-0.28	-0.07	-0.03	-0.02	0.88
					$F_{SRSS}$
					1.02
<b>Valnerina - vitki a/b zid</b>					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	<i>u isto vrijeme t</i>
0.88	0.63	0.17	0.07	0.04	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-1.00	-0.77	-0.14	-0.05	-0.03	-1.33
					$F_{SRSS}$
					1.00
<b>Banja Luka - vitki a/b zid</b>					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	<i>u isto vrijeme t</i>
1.00	0.33	0.06	0.03	0.02	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-0.98	-0.26	-0.06	-0.03	-0.02	0.97
					$F_{SRSS}$
					1.00
<b>Sicilia Orientale - vitki a/b zid</b>					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	<i>u isto vrijeme t</i>
1.00	0.35	0.07	0.04	0.02	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-0.99	-0.40	-0.06	-0.03	-0.02	-1.02
					$F_{SRSS}$
					1.01

Prikazani rezultati dinamičkog odgovora vitkog a/b zida za linearni sustav prema tablici 3.8 pokazuju da je najveći utjecaj prvog moda, ali i da je značajan utjecaj drugog i trećeg moda, te da je linearna (L) kombinacija učestalije nepovoljnija od korijske (SRSS) kombinacije modova, s obzirom da je istovremena najnepovoljnija kombinacija linearne superpozicije modova  $F_L$  učestalije nepovoljnija od istovremene najnepovoljnije kombinacije kvadratnog korijena iz sume kvadrata modova  $F_{SRSS}$ .

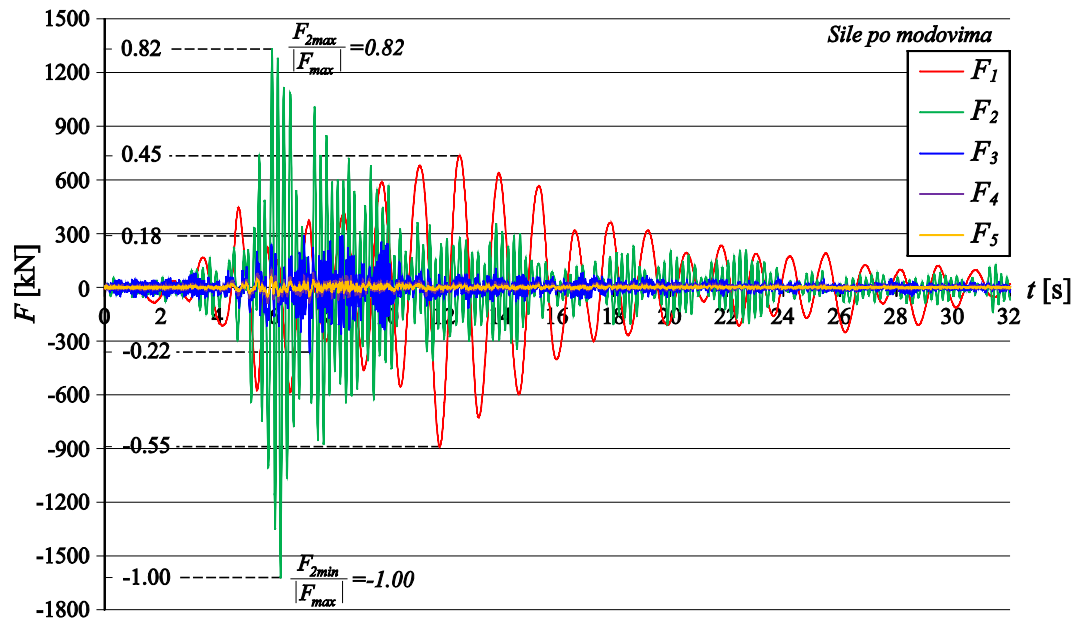
Analiziran je i primjer vitkog a/b zida istih dimenzija kao u prethodnom primjeru, koji je prikazan na crtežu 3.4, s tim da je usvojena veća masa zida. Opterećenje po međukatnim pločama uzeto je u iznosu  $50.0 \text{ kN/m}^2$ , stoga ukupna težina modela iznosi  $W = 9300.0 \text{ kN}$ , a ukupna masa modela iznosi  $M = 948.0 \text{ t}$ . Proveden je isti postupak kao u prethodnom primjeru.

U tablici 3.9 prikazana su svojstva vlastitih vektora  $\phi_i$  vitkog a/b zida s većom masom, odnosno podaci o pripadajućim periodima  $T_i$ , sudjelujućim masama  $m_{e,i}$  i ekvivalentne krutosti jednostupnjevnih sustava  $k_i$ .

**Tablica 3.9** Svojstva vlastitih vektora (linearno elastičnih JS) vitkog a/b zida s većom masom

Vektor	$T_i$ [s]	$m_{e,i}$ [%]	$m_{e,i}$ [t]	$k_i$ [kN/m]
$\phi_1$	1.307	62.00	587.77	13586.67
$\phi_2$	0.209	19.92	188.84	171753.87
$\phi_3$	0.075	7.02	66.55	484376.01
$\phi_4$	0.038	3.56	33.75	928473.90
$\phi_5$	0.023	2.04	19.34	1425790.78

Dijagram poprečne sile na bazu proračunskog modela ( $F_i$ ) u ovisnosti o vremenu za pet vlastitih vektora za primjer vitkog a/b zida s većom masom opterećenog u uzdužnom smjeru potresnom pobudom Montenegro prikazan je na crtežu 3.7. U relativnom mjerilu sila, najvećem iznosu sile od svih pet modova ( $|F_{max}|=1627$  kN) odgovara vrijednost 1.00.

**Crtež 3.7** Poprečne sile svih pet modova na bazu proračunskog modela vitkog a/b zida s većom masom u ovisnosti o vremenu za potresnu pobudu Montenegro

U tablici 3.10 prikazani su rezultati analize dinamičkog odgovora ekvivalentnog jednostupnjevnog sustava koji predstavlja vitki a/b zid s većom masom uslijed pobude osam realnih zapisa potresa u formatu ubrzanje - vrijeme. Prikazane su maksimalne vrijednosti poprečnih sila na bazu modela  $F_{imax}$ , kao i iznos poprečne sile pri istovremenoj najnepovoljnijoj kombinaciji linearne superpozicije modova  $F_L$  kao i najnepovoljnijoj kombinaciji kvadratnog korijena iz sume kvadrata modova  $F_{SRSS}$ .

**Tablica 3.10** Usporedba linearne (L) i korijenske (SRSS) kombinacije modova za vitki a/b zid s većom masom

<b>Montenegro - vitki a/b zid s većom masom</b>					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	<i>u isto vrijeme t</i>
0.45	0.82	0.18	0.06	0.04	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-0.55	-1.00	-0.22	-0.05	-0.03	1.05
					$F_{SRSS}$
					1.00
<b>Campano Lucano - vitki a/b zid s većom masom</b>					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	<i>u isto vrijeme t</i>
0.81	0.94	0.11	0.05	0.03	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-0.89	-1.00	-0.14	-0.06	-0.03	1.36
					$F_{SRSS}$
					1.10
<b>Aigion - vitki a/b zid s većom masom</b>					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	<i>u isto vrijeme t</i>
0.49	1.00	0.13	0.06	0.03	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-0.50	-0.89	-0.19	-0.08	-0.04	1.18
					$F_{SRSS}$
					1.01
<b>Olfus - vitki a/b zid s većom masom</b>					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	<i>u isto vrijeme t</i>
0.24	1.00	0.12	0.05	0.02	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-0.27	-0.87	-0.15	-0.04	-0.02	1.26
					$F_{SRSS}$
					1.02
<b>Calabria - vitki a/b zid s većom masom</b>					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	<i>u isto vrijeme t</i>
0.25	0.94	0.20	0.08	0.05	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-0.24	-1.00	-0.20	-0.07	-0.04	-1.04
					$F_{SRSS}$
					1.03
<b>Valnerina - vitki a/b zid s većom masom</b>					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	<i>u isto vrijeme t</i>
0.51	1.00	0.64	0.14	0.06	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-0.45	-0.86	-0.63	-0.12	-0.05	-1.20
					$F_{SRSS}$
					1.05
<b>Banja Luka - vitki a/b zid s većom masom</b>					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	<i>u isto vrijeme t</i>
0.56	0.92	0.26	0.10	0.06	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-0.49	-1.00	-0.26	-0.08	-0.05	1.40
					$F_{SRSS}$
					1.15
<b>Sicilia Orientale - vitki a/b zid s većom masom</b>					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	<i>u isto vrijeme t</i>
0.40	1.00	0.21	0.06	0.03	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-0.44	-0.85	-0.21	-0.06	-0.03	1.58
					$F_{SRSS}$
					1.06

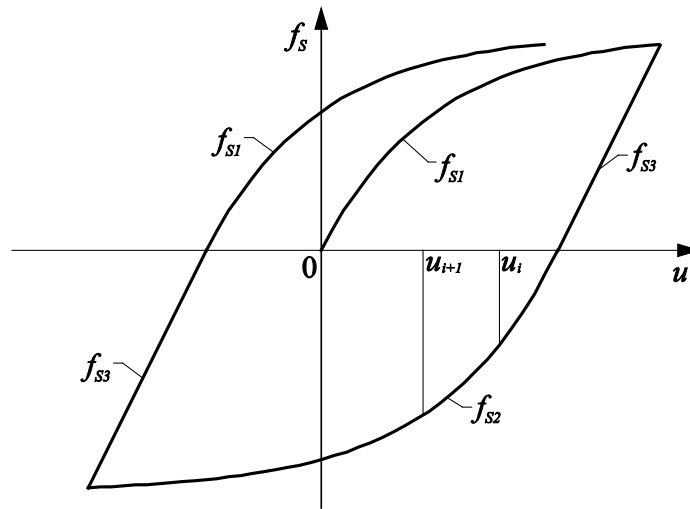
Prikazani rezultati dinamičkog odgovora vitkog a/b zida s većom masom za linearni sustav prema tablici 3.10 pokazuju značajan utjecaj prva tri moda, te da je linearna (L) kombinacija u svim primjerima nepovoljnija od korijenske (SRSS) kombinacije modova, s obzirom da je istovremena najnepovoljnija kombinacija linearne superpozicije modova  $F_L$  u svim analiziranim slučajevima nepovoljnija od istovremene najnepovoljnije kombinacije kvadratnog korijena iz sume kvadrata modova  $F_{SRSS}$ .

Iz prikazanih rezultata analize vitkih a/b zidova, kao i prethodno izloženih rezultata 5-katnog i 9-katnog prostornog armirano-betonskog okvirnog sustava, može se primjetiti da povećanjem mase, odnosno samim time povećanjem i vlastitih perioda osciliranja sustava linearna (L) kombinacija modova je izraženije nepovoljnija od korijenske kombinacije sume kvadrata modova (SRSS).

### 3.3 ANALIZA LINEARNE (L) I KORIJENSKE (SRSS) KOMBINACIJE MODOVA NA NELINEARNOJ RAZINI

Nelinearna razina sustava se ostvaruje tako da se svaki mod tretira kao jedan nelinearan jednostupnjevni sustav (JS). Nelinearna ciklička svojstva JS generiraju se iz pripadne krivulje nosivosti kako je prikazano na crtežu 3.8 i prema relaciji (3.6).





Crtež 3.8 Ciklička krivulja nosivosti za nelinearni sustav

Crtežu pripadajuće funkcije definirane su na način da imaju sljedeći analitički oblik:

$$\begin{aligned}
 f_{S1} &= A \left( 1 - e^{-\frac{u-B}{C}} \right) + D \\
 f_{S2} &= -A \left( 1 - e^{-\frac{u-B}{C}} \right) + D \\
 f_{S3} &= \frac{A}{C} (u - B) + D
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

Funkcija  $f_{S1}$  definira se na način da što bolje odgovara krivulji kapaciteta nosivosti za pojedini mod osciliranja, koje su dobivene metodom naguravanja čije određivanje je prikazano u drugom poglavlju ovoga rada.

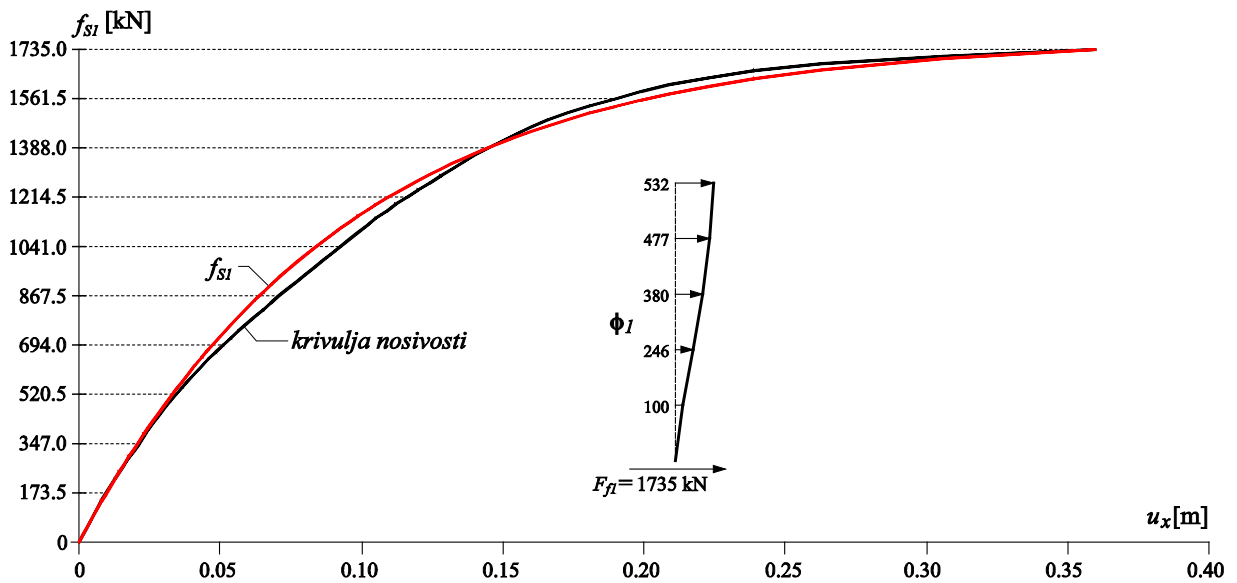
Funkcija  $f_{S3}$  je linearna, a nagib joj odgovara početnoj krutosti ekvivalentnog nelinearnog jednostupnjevskog sustava, odnosno odgovara nagibu tangente u polaznoj točki krivulje nosivosti definirane funkcijom  $f_{S1}$ .

Pomoću krivulje nosivosti svakog pojedinog moda određuju se koeficijenti  $A$  i  $C$  kojima je definirana funkcija  $f_{S1}$ . Odnosno, kako funkcija  $f_{S1}$  polazi iz ishodišta tada za  $B = 0$  i  $D = 0$ , te poznavajući još neke dvije točke na krivulji nosivosti kroz koje funkcija  $f_{S1}$  mora proći mogu se rješenjem sustava dvije jednačbe s dvije nepoznanice odrediti koeficijenti  $A$  i  $C$ .

Koeficijenti  $B$  i  $D$  računaju se u svakom vremenskom koraku i njima se definira translacija funkcija  $f_{S1}$  i  $f_{S2}$  po osi  $u$  za koeficijent  $B$ , odnosno po osi  $f_s$  za koeficijent  $D$ .

Na crtežu 3.9 prikazano je određivanje funkcije  $f_{S1}$  za prvi vektor 5-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava za smjer  $x$  tako da oblikom što bolje opisuje krivulju nosivosti vektora

$\phi_I$  za promatrani smjer. Na isti način su određene funkcije  $f_{SI}$  za promatrana ostala četiri vlastita vektora, i to za smjerove  $x$  i  $y$ .



Crtež 3.9 Određivanje funkcije  $f_{SI}$  za vektor  $\phi_I$  5-katnog a/b okvira za smjer  $x$

Izbor funkcije sila otpora - pomak pri proračunu pomaka u  $i+1$  vremenskom koraku ovisi o sili otpora te brzini u  $i$ -tom vremenskom koraku. Naime ako je sila otpora i brzina u  $i$ -tom vremenskom koraku veća od nule tada će se za funkciju sila otpora - pomak izabrati funkcija  $f_{SI}$  ako je ordinata u kojoj je zadnji put došlo do promjene brzine manja ili jednaka nuli, odnosno funkcija  $f_{S3}$  ako je ordinata u kojoj je zadnji put došlo do promjene brzine veća od nule. Ako je pak sila otpora u  $i$ -tom vremenskom koraku veća od nule a brzina manja od nule tada će se za odnos sile otpora - pomak izabrati funkcija  $f_{S3}$ .

Ako je sila otpora i brzina u  $i$ -tom vremenskom koraku manja od nule tada će se za funkciju sila otpora - pomak izabrati funkcija  $f_{S2}$  ako je ordinata u kojoj je zadnji put došlo do promjene brzine veća ili jednaka nuli, odnosno funkcija  $f_{S3}$  ako je ordinata u kojoj je zadnji put došlo do promjene brzine manja od nule. Ako je pak sila otpora u  $i$ -tom vremenskom koraku manja od nule a brzina veća od nule tada će se za odnos sile otpora-pomak izabrati funkcija  $f_{S3}$ .

U tablici 3.11 prikazani su rezultati analize dinamičkog odgovora nelinearnog jednostupnjevnog sustava (JS), koji predstavlja 5-katni armirano-betonski okvir iz *primjera 1* koji je opisan u drugom poglavlju ovog rada, uslijed pobude osam akcelelograma stvarnih potresa. Kako je već prije navedeno, u tablicama su prikazane poprečne sile u presjeku pri bazi proračunskog modela u relativnom mjerilu prema kojem je najveća sila od svih modova jednaka vrijednosti 1.00 a ostale su relativne prema njoj.

Prikazani su rezultati za istovremenu najnepovoljniju kombinaciju linearne superpozicije modova  $F_L$  kao i za istovremenu najnepovoljniju korijensku kombinaciju modova  $F_{SRSS}$ . Analiza je provedena za smjerove  $x$  i  $y$ .

**Tablica 3.11** Linearna (L) i korijenska (SRSS) kombinacija nelinearnog modela za 5-katni a/b okvir

<b>Montenegro - 5-katni a/b okvir - smjer x</b>						<b>Montenegro - 5-katni a/b okvir - smjer y</b>							
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	$u$ isto vrijeme $t$	$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	$u$ isto vrijeme $t$		
0.88	0.59	0.50	0.17	0.03		1.00	0.67	0.73	0.16	0.04			
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$	-1.54	$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$	1.32
-1.00	-0.62	-0.49	-0.21	-0.03	$F_{SRSS}$	1.10	-0.99	-0.68	-0.71	-0.18	-0.04	$F_{SRSS}$	1.03
<b>Campano Lucano - 5-katni a/b okvir - smjer x</b>						<b>Campano Lucano - 5-katni a/b okvir - smjer y</b>							
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	$u$ isto vrijeme $t$	$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	$u$ isto vrijeme $t$		
1.00	0.40	0.31	0.13	0.02		0.96	0.69	0.38	0.24	0.02			
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$	-1.20	$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$	1.85
-0.99	-0.49	-0.29	-0.12	-0.02	$F_{SRSS}$	1.00	-1.00	-0.81	-0.41	-0.25	-0.02	$F_{SRSS}$	1.12
<b>Aigion - 5-katni a/b okvir - smjer x</b>						<b>Aigion - 5-katni a/b okvir - smjer y</b>							
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	$u$ isto vrijeme $t$	$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	$u$ isto vrijeme $t$		
1.00	0.85	0.68	0.15	0.03		0.92	0.76	0.82	0.30	0.03			
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$	-1.71	$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$	1.76
-0.92	-0.87	-0.72	-0.16	-0.04	$F_{SRSS}$	1.10	-1.00	-0.71	-0.73	-0.31	-0.03	$F_{SRSS}$	1.18
<b>Olfus - 5-katni a/b okvir - smjer x</b>						<b>Olfus - 5-katni a/b okvir - smjer y</b>							
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	$u$ isto vrijeme $t$	$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	$u$ isto vrijeme $t$		
0.96	0.87	0.44	0.39	0.06		1.00	0.54	0.35	0.39	0.03			
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$	1.75	$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$	-1.57
-1.00	-0.81	-0.43	-0.31	-0.06	$F_{SRSS}$	1.18	-0.91	-0.46	-0.35	-0.35	-0.02	$F_{SRSS}$	1.03
<b>Calabria - 5-katni a/b okvir - smjer x</b>						<b>Calabria - 5-katni a/b okvir - smjer y</b>							
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	$u$ isto vrijeme $t$	$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	$u$ isto vrijeme $t$		
0.58	1.00	0.45	0.17	0.02		0.54	1.00	0.76	0.33	0.03			
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$	-1.53	$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$	1.61
-0.53	-0.95	-0.41	-0.15	-0.02	$F_{SRSS}$	1.03	-0.50	-1.00	-0.68	-0.33	-0.03	$F_{SRSS}$	1.14
<b>Valnerina - 5-katni a/b okvir - smjer x</b>						<b>Valnerina - 5-katni a/b okvir - smjer y</b>							
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	$u$ isto vrijeme $t$	$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	$u$ isto vrijeme $t$		
0.98	1.00	0.66	0.28	0.07		1.00	0.83	0.92	0.32	0.04			
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$	-1.67	$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$	1.71
-0.85	-0.96	-0.59	-0.28	-0.09	$F_{SRSS}$	1.13	-0.70	-0.83	-0.91	-0.35	-0.04	$F_{SRSS}$	1.26
<b>Banja Luka - 5-katni a/b okvir - smjer x</b>						<b>Banja Luka - 5-katni a/b okvir - smjer y</b>							
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	$u$ isto vrijeme $t$	$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	$u$ isto vrijeme $t$		
1.00	0.73	0.63	0.20	0.04		0.78	0.44	0.73	0.40	0.03			
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$	1.62	$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$	1.75
-0.76	-0.64	-0.59	-0.18	-0.05	$F_{SRSS}$	1.16	-1.00	-0.42	-0.84	-0.41	-0.05	$F_{SRSS}$	1.19
<b>Sicilia Orientale - 5-katni a/b okvir - smjer x</b>						<b>Sicilia Orientale - 5-katni a/b okvir - smjer y</b>							
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	$u$ isto vrijeme $t$	$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	$u$ isto vrijeme $t$		
0.89	0.73	0.44	0.23	0.03		1.00	1.00	0.72	0.34	0.03			
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$	-1.79	$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$	1.46
-1.00	-0.65	-0.45	-0.21	-0.03	$F_{SRSS}$	1.16	-0.68	-0.95	-0.74	-0.30	-0.03	$F_{SRSS}$	1.24

Istovijetni postupak proveden je za dinamičku analizu prostornog 9-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava iz *primjera 2*, a rezultati provedene analize uslijed pobude zapisima akcelelograma stvarnih osam potresa na zamjenjujućem nelinearnom jednostupnjevnom sustavu prikazani su u tablici 3.12.

Tablica 3.12 Linearna (L) i korijenska (SRSS) kombinacija nelinearnog modela za 9-katni a/b okvir

<b>Montenegro - 9-katni a/b okvir - smjer x</b>					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	<i>u isto vrijeme t</i>
0.65	0.93	0.62	0.39	0.30	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-0.76	-1.00	-0.59	-0.42	-0.30	-1.88
					$F_{SRSS}$
					1.27
<b>Campano Lucano - 9-katni a/b okvir - smjer x</b>					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	<i>u isto vrijeme t</i>
0.85	0.95	0.55	0.38	0.25	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-0.77	-1.00	-0.54	-0.38	-0.26	1.67
					$F_{SRSS}$
					1.19
<b>Aigion - 9-katni a/b okvir - smjer x</b>					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	<i>u isto vrijeme t</i>
0.94	0.74	0.80	0.44	0.68	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-1.00	-0.75	-0.84	-0.43	-0.70	-1.87
					$F_{SRSS}$
					1.13
<b>Olfus - 9-katni a/b okvir - smjer x</b>					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	<i>u isto vrijeme t</i>
1.00	0.80	0.89	0.60	0.24	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-0.98	-0.84	-0.79	-0.53	-0.26	1.89
					$F_{SRSS}$
					1.25
<b>Calabria - 9-katni a/b okvir - smjer x</b>					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	<i>u isto vrijeme t</i>
0.48	1.00	0.51	0.28	0.25	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-0.51	-0.95	-0.46	-0.27	-0.25	-1.13
					$F_{SRSS}$
					1.05
<b>Valnerina - 9-katni a/b okvir - smjer x</b>					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	<i>u isto vrijeme t</i>
0.83	0.90	0.72	0.36	0.42	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-1.00	-1.00	-0.70	-0.31	-0.39	-1.94
					$F_{SRSS}$
					1.21
<b>Banja Luka - 9-katni a/b okvir - smjer x</b>					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	<i>u isto vrijeme t</i>
0.71	1.00	0.66	0.31	0.30	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-0.55	-0.98	-0.65	-0.31	-0.32	-2.29
					$F_{SRSS}$
					1.19
<b>Sicilia Orientale - 9-katni a/b okvir - smjer x</b>					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	<i>u isto vrijeme t</i>
0.93	0.96	1.00	0.55	0.25	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-0.95	-0.98	-0.94	-0.55	-0.25	2.07
					$F_{SRSS}$
					1.36
<b>Montenegro - 9-katni a/b okvir - smjer y</b>					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	<i>u isto vrijeme t</i>
0.82	0.63	0.62	0.49	0.52	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-1.00	-0.58	-0.59	-0.48	-0.49	-2.18
					$F_{SRSS}$
					1.15
<b>Campano Lucano - 9-katni a/b okvir - smjer y</b>					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	<i>u isto vrijeme t</i>
0.91	0.79	0.69	0.48	0.27	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-1.00	-0.74	-0.83	-0.45	-0.26	-1.89
					$F_{SRSS}$
					1.31
<b>Aigion - 9-katni a/b okvir - smjer y</b>					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	<i>u isto vrijeme t</i>
0.68	0.52	0.90	0.38	0.47	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-0.71	-0.50	-1.00	-0.39	-0.41	2.05
					$F_{SRSS}$
					1.17
<b>Olfus - 9-katni a/b okvir - smjer y</b>					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	<i>u isto vrijeme t</i>
0.98	0.58	0.60	0.77	0.35	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-1.00	-0.59	-0.59	-0.69	-0.32	1.85
					$F_{SRSS}$
					1.20
<b>Calabria - 9-katni a/b okvir - smjer y</b>					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	<i>u isto vrijeme t</i>
0.29	0.70	1.00	0.46	0.44	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-0.22	-0.72	-0.94	-0.41	-0.39	1.70
					$F_{SRSS}$
					1.35
<b>Valnerina - 9-katni a/b okvir - smjer y</b>					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	<i>u isto vrijeme t</i>
0.90	0.62	0.71	0.44	0.46	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-1.00	-0.71	-0.77	-0.44	-0.46	-2.13
					$F_{SRSS}$
					1.35
<b>Banja Luka - 9-katni a/b okvir - smjer y</b>					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	<i>u isto vrijeme t</i>
0.47	0.99	0.49	0.49	0.49	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-0.37	-1.00	-0.52	-0.47	-0.56	1.46
					$F_{SRSS}$
					1.19
<b>Sicilia Orientale - 9-katni a/b okvir - smjer y</b>					
$F_{1max}$	$F_{2max}$	$F_{3max}$	$F_{4max}$	$F_{5max}$	<i>u isto vrijeme t</i>
0.65	0.95	0.61	0.74	0.42	
$F_{1min}$	$F_{2min}$	$F_{3min}$	$F_{4min}$	$F_{5min}$	$F_L$
-0.87	-1.00	-0.59	-0.71	-0.40	-2.50
					$F_{SRSS}$
					1.49

Prikazani rezultati dinamičkog odgovora na primjeru ekvivalentnog nelinearnog sustava prema tablicama 3.11 i 3.12 pokazuju da je linearna (L) kombinacija u svim primjerima znatno nepovoljnija od korijenske (SRSS) kombinacije modova, s obzirom da je istovremena najnepovoljnija kombinacija linearne superpozicije modova  $F_L$  u svim analiziranim slučajevima znatno nepovoljnija od istovremene najnepovoljnije kombinacije kvadratnog korijena iz sume kvadrata modova  $F_{SRSS}$ .

## 4. NOVA FORMULACIJA VISKOZNOG PRIGUŠENJA

U ovom poglavlju prikazana je nova formulacija dobivanja ekvivalentnog viskoznog prigušenja sustava pomoću izjednačavanja utrošene energije tijekom jednog ciklusa osciliranja nelinearnog sustava i ekvivalentnog linearnog sustava, uz uvjet da izvršeni rad nelinearnog sustava bude jednak izvršenom radu zamjenjujućeg linearnog sustava sa sekantnom krutošću.

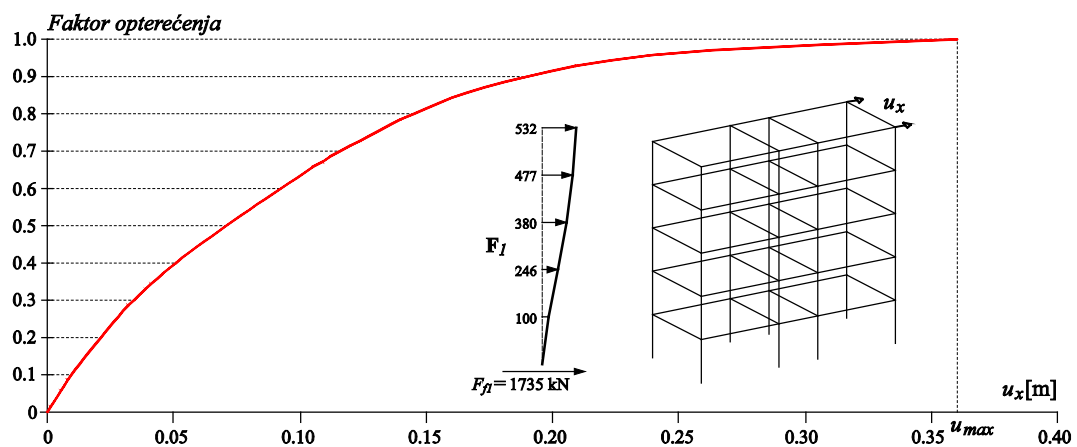
U okviru ovog poglavlja određeno je ciljano ubrzanje za linearnu (L) kombinaciju modova uz elastični spektar s realnim viskoznim prigušenjem izračunatim na prethodno opisani način. Analizirana su dva slučaja, i to kada se promatra pomak pri 2/3 i 3/3 iskoristivosti pomaka  $d_u$  na krivulji nosivosti. U prvom slučaju se traži da sjecište bilinearnog dijagrama elastoplastičnog ekvivalenta krivulje nosivosti i ciljanog pomaka  $d_t$  (koje je na 2/3 iskoristivosti pomaka  $d_u$ ) padne na ADRS krivulju za pretpostavljeno ubrzanje tla  $a_{gr}$ , a u drugom slučaju se traži da sjecište bilinearnog dijagrama elastoplastičnog ekvivalenta krivulje nosivosti i pomaka  $d_u$  (pomak  $d_u$  na krivulji nosivosti iskorišten do kraja, nije ostavljena rezerva od 50% sigurnosti) padne na ADRS krivulju za pretpostavljeno ubrzanje tla. Iznesena je i usporedba rezultata dobivenih analizom uz elastični spektar s 5% prigušenjem i elastični spektar s izračunatim ekvivalentnim viskoznim prigušenjem.

## 4.1 ODREĐIVANJE VISKOZNOG PRIGUŠENJA SUSTAVA

Prigušivanje u građevinama proizlazi iz različitih uzroka, uključujući i aerodinamičnost, otpor zraka pri gibanju modela, trenje u vezama i oblozi konstrukcije, prigušenje povezano s tlom i temeljenjem (važno kod osciliranja koje uključuju velike deformacije tla), klizanjem, te otvaranjem i zatvaranjem pukotina u betonu. Kada se materijal u konstrukciji ciklički napreže, energija se disipira unutar samog materijala unutarnjim trenjem usljed klizanja među česticama tijekom deformiranja. To se unutarnje prigušenje još naziva histereznim ili konstruktivnim prigušenjem.

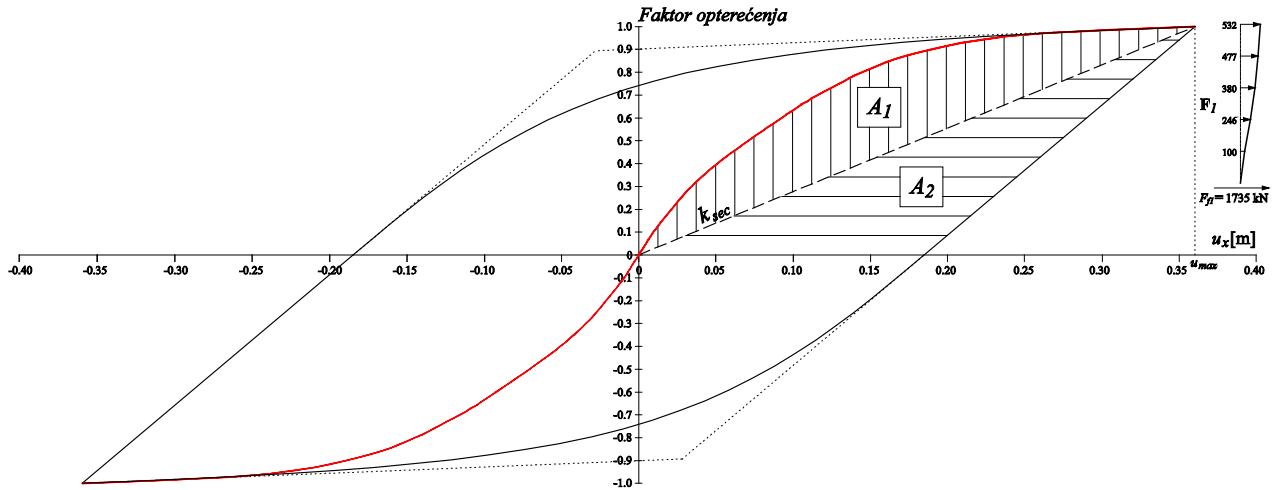
Prigušenje u konstrukcijama obično se definira preko ekvivalentnog viskoznog prigušenja. Prema literaturi [C2] i [B3] u kojima je definiran jedan način određivanja viskoznog prigušenja došlo se do ideje da se ekvivalentno viskozno prigušenje u ovom radu odredi postupkom kako je prikazano u nastavku. Novo razvijeni postupak određivanja ekvivalentnog viskoznog prigušenja prikazan je na primjeru 5-katnog i 9-katnog prostornog armirano-betonskog okvirnog sustava koji su opisani u drugom poglavlju ovoga rada. Općenitost postupka određivanja ekvivalentnog viskoznog prigušenja se ne gubi u analizi drugih tipova konstrukcija.

Na početku je potrebno definirati histereznu, odnosno cikličku krivulju nosivosti nelinearnog sustava. Za određivanje histerezne krivulje, kao polaznu relevantnu krivulju usvajamo krivulju nosivosti prvog vlastitog vektora  $\phi_I$ . Ona je definirana slomnom silom prvog vektora  $F_{fI}$  i maksimalnim horizontalnim pomakom  $u_{max}$ . Krivulja nosivosti prvog vlastitog vektora  $\phi_I$  5-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava za smjer  $x$  određena je u okviru drugog poglavlja ovog rada, a prikazana je na crtežu 4.1.



Crtež 4.1 Krivulja nosivosti za vektor  $\phi_I$  5-katnog a/b okvira (smjer  $x$ )

Povratni dio histerezne, odnosno cikličke krivulje nosivosti do nultog iznosa sile je linearna funkcija, a njen nagib se određuje iz jednakosti površina  $A_1$  i  $A_2$ . Površine  $A_1$  i  $A_2$  prikazane su na crtežu 4.2, a njihova jednakost zahtijeva se iz razloga da izvršeni rad nelinearnog sustava bude jednak izvršenom radu zamjenjujućeg linearnog sustava sa sekantnom krutošću  $k_{sec}$ . Izjednačavanjem površina  $A_1$  i  $A_2$  dobila se točka na horizontalnoj osi pomaka kroz koju prolazi povratni linearni dio cikličke krivulje nosivosti.



**Crtež 4.2** Ciklička krivulja nosivosti definirana preko krivulje nosivosti vektora  $\phi_1$  5-katnog a/b okvira (smjer x)

Povratni dio histerezne krivulje od nultog pa do negativnog iznosa sile je funkcija koja je određena točkama na krajevima i tangentama u tim točkama. Tangenta na jednom kraju je definirana linearnom funkcijom iz histerezne petlje, a tangenta na drugom kraju funkcije tangira krivulju nosivosti prvog vektora, što se vidi na crtežu 4.2.

Ekvivalentno viskozno prigušenje sustava dobije se pomoću izjednačavanja utrošene energije tijekom jednog ciklusa osciliranja nelinearnog sustava i ekvivalentnog linearnog sustava sa sekantnom krutošću  $k_{sec}$ . Izraz za ekvivalentno viskozno prigušenje definiran je prema [C2] i iznosi:

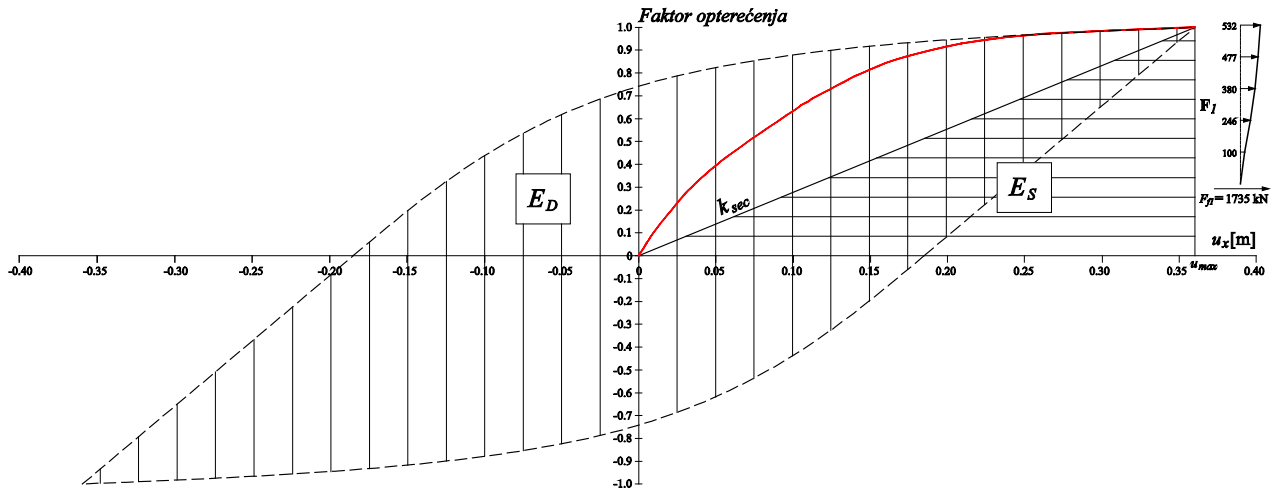
$$\xi = \frac{E_D}{4\pi E_S} \quad (4.1)$$

gdje su:

$\xi$  - ekvivalentno viskozno prigušenje,

$E_D$  - energija utrošena u jedan ciklus osciliranja nelinearnog sustava koja je jednaka površini unutar histerezne krivulje,

$E_S$  - utrošena energija u linearnom sustavu koja je jednaka površini trokuta, vidjeti crtež 4.3.



**Crtež 4.3** Određivanje utrošene energije u jednom ciklusu osciliranja nelinearnog i linearnog sustava 5-katnog a/b okvira (smjer  $x$ )

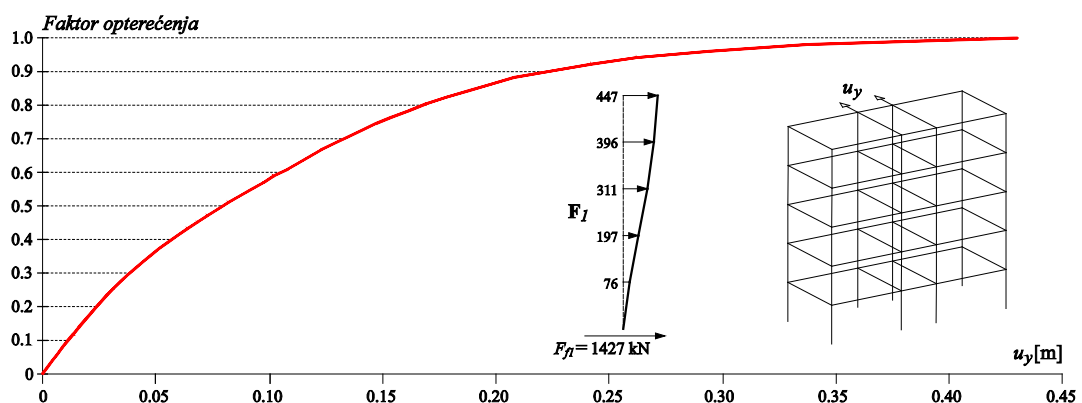
Iz cikličke krivulje nosivosti definirane preko vektora  $\phi_I$  5-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava za smjer  $x$  određeno je ekvivalentno viskozno prigušenje sustava prema izrazu (4.2) i navedenoj formulaciji.

$$\xi = \frac{E_D}{4\pi E_S} = \frac{0.644}{4 \cdot \pi \cdot 0.180} = 0.28 \quad (4.2)$$

Dobiveno je 28% ekvivalentno viskozno prigušenje 5-katnog a/b okvira za smjer  $x$ .

Istovijetni postupak proveden je pri određivanju ekvivalentnog viskoznog prigušenja 5-katnog armirano-betonskog okvira za smjer  $y$ .

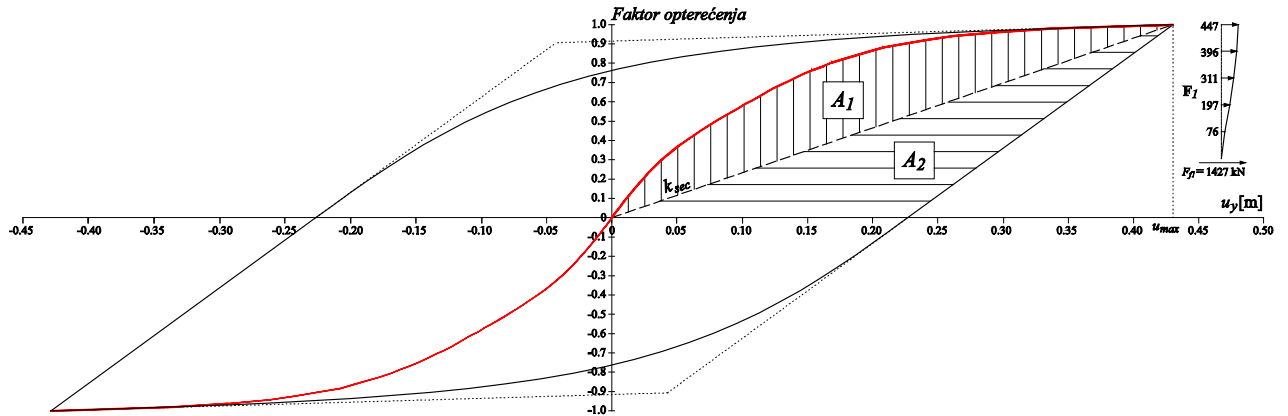
Krivulja nosivosti prvog vlastitog vektora  $\phi_I$  5-katnog armirano-betonskog okvira za smjer  $y$  prikazana je na crtežu 4.4.



**Crtež 4.4** Krivulja nosivosti za vektor  $\phi_I$  5-katnog a/b okvira (smjer  $y$ )

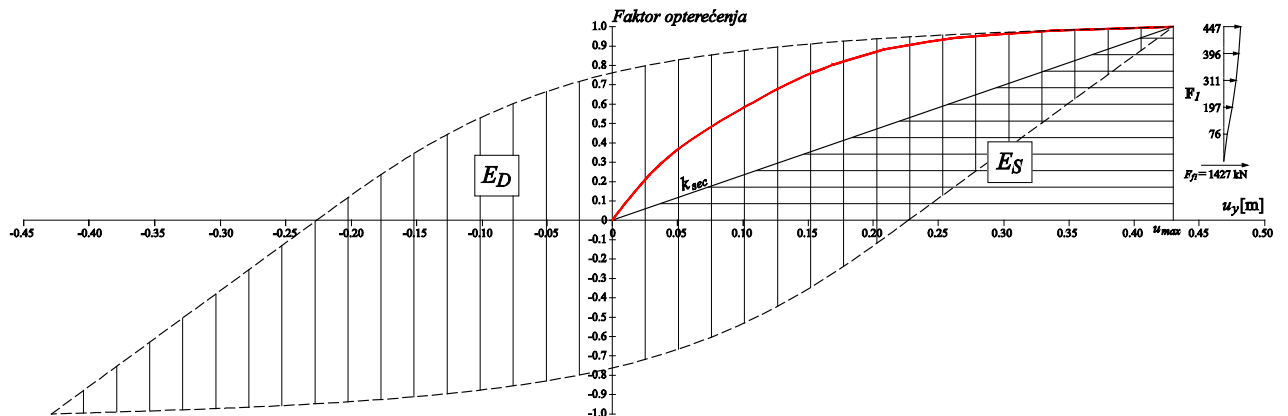


Na crtežu 4.5 prikazana je ciklička krivulja nosivosti nelinearnog sustava 5-katnog armirano-betonskog okvira za smjer  $y$  koja je određena preko krivulje nosivosti vektora  $\phi_I$  i izjednačavanjem površina  $A_1$  i  $A_2$ .



Crtež 4.5 Ciklička krivulja nosivosti definirana preko krivulje nosivosti vektora  $\phi_I$  5-katnog a/b okvira (smjer  $y$ )

Na crtežu 4.6 prikazana je utrošena energija u jednom ciklusu osciliranja nelinearnog i linearnog sustava sa sekantnom krutošću  $k_{sec}$  na primjeru 5-katnog armirano-betonskog okvira u smjeru  $y$ .



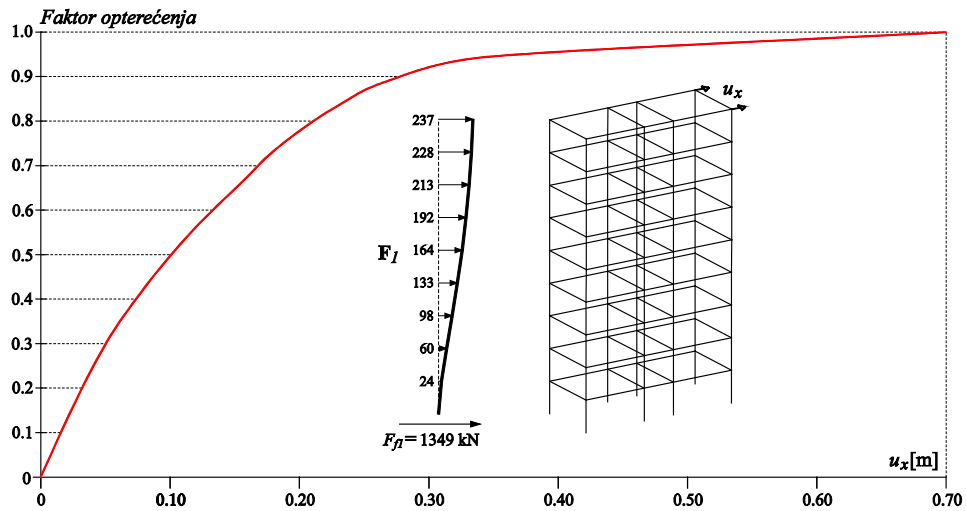
Crtež 4.6 Određivanje utrošene energije u jednom ciklusu osciliranja nelinearnog i linearnog sustava 5-katnog a/b okvira (smjer  $y$ )

Iz cikličke krivulje nosivosti definirane preko vektora  $\phi_I$  5-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava za smjer  $y$  određeno je ekvivalentno viskozno prigušenje promatranog 5-katnog okvira u smjeru  $y$  prema izrazu (4.3)

$$\xi = \frac{E_D}{4\pi E_S} = \frac{0.796}{4 \cdot \pi \cdot 0.215} = 0.29 \quad (4.3)$$

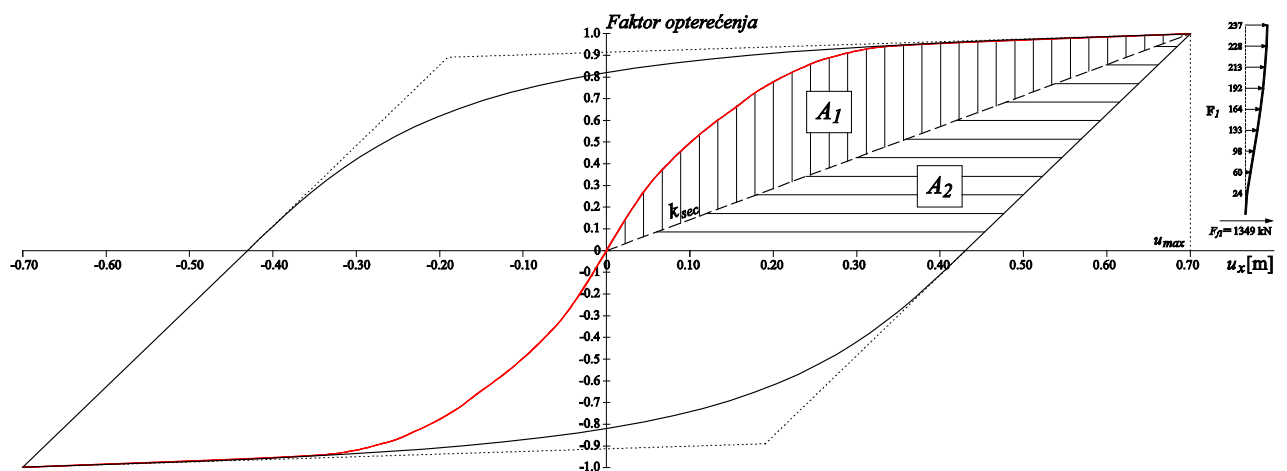
Dobiveno je 29% ekvivalentno viskozno prigušenje 5-katnog armirano-betonskog okvira za smjer  $y$ .

Krivulja nosivosti prvog vlastitog vektora  $\phi_1$  9-katnog armirano-betonskog okvira za smjer  $x$  prikazana je na crtežu 4.7.



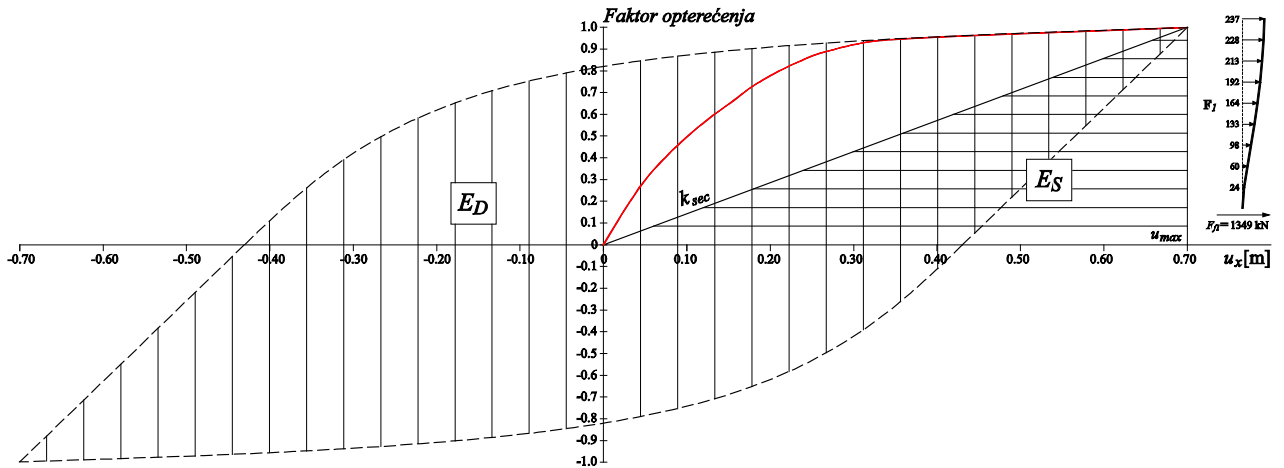
Crtež 4.7 Krivulja nosivosti za vektor  $\phi_1$  9-katnog a/b okvira (smjer  $x$ )

Na crtežu 4.8 prikazana je ciklička krivulja nosivosti nelinearnog sustava 9-katnog armirano-betonskog okvira za smjer  $x$  koja je određena preko krivulje nosivosti vektora  $\phi_1$  i izjednačavanjem površina  $A_1$  i  $A_2$ .



Crtež 4.8 Ciklička krivulja nosivosti definirana preko krivulje nosivosti vektora  $\phi_1$  9-katnog a/b okvira (smjer  $x$ )

Na crtežu 4.9 prikazana je utrošena energija u jednom ciklusu osciliranja nelinearnog i linearnog sustava sa sekantnom krutošću  $k_{sec}$  na primjeru 9-katnog armirano-betonskog okvira u smjeru  $x$ .



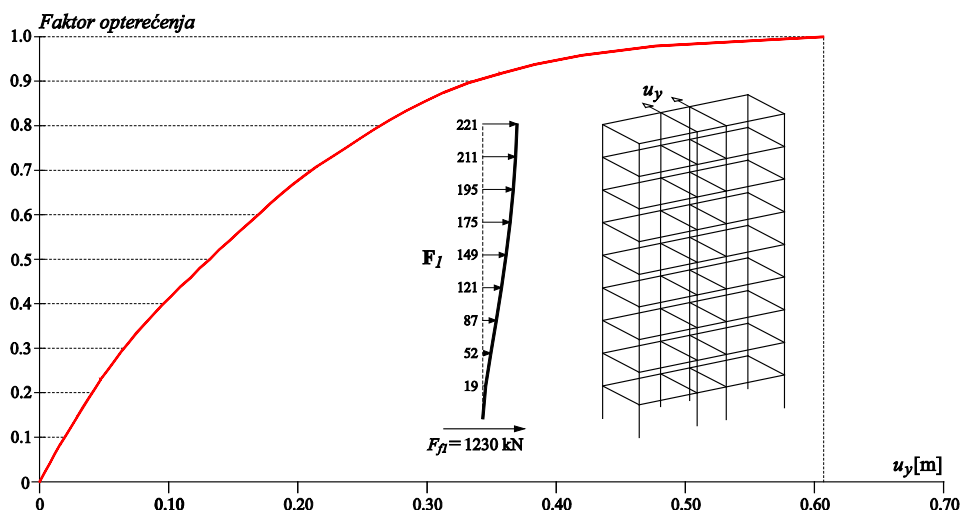
**Crtež 4.9** Određivanje utrošene energije u jednom ciklusu osciliranja nelinearnog i linearnog sustava 9-katnog a/b okvira (smjer  $x$ )

Iz cikličke krivulje nosivosti definirane preko vektora  $\phi_I$  9-katnog armirano-betonskog okvira za smjer  $x$  određeno je ekvivalentno viskozno prigušenje promatranog okvira u  $x$  smjeru prema izrazu (4.4)

$$\xi = \frac{E_D}{4\pi E_S} = \frac{1.500}{4 \cdot \pi \cdot 0.350} = 0.34 \quad (4.4)$$

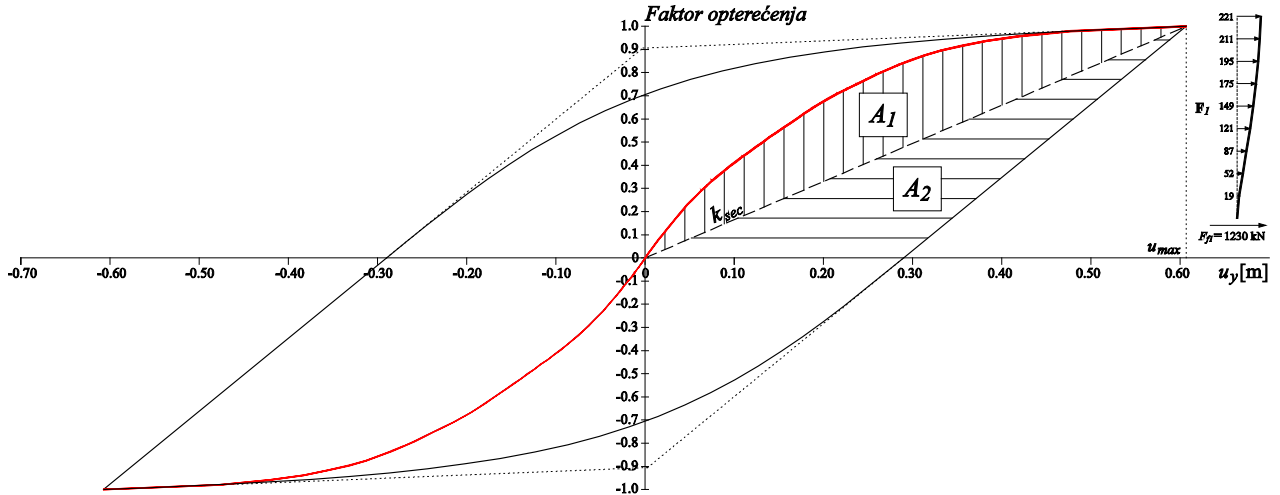
Dobiveno je 34% ekvivalentno viskozno prigušenje 9-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava za smjer  $x$ .

Krivulja nosivosti prvog vlastitog vektora  $\phi_I$  9-katnog a/b okvira za smjer  $y$  prikazana je na crtežu 4.10.



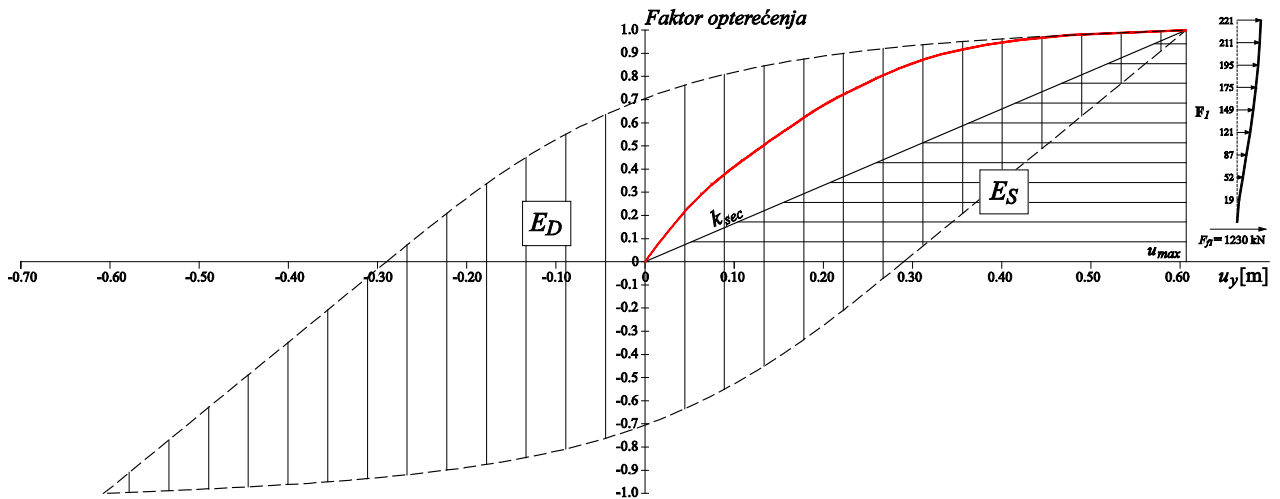
**Crtež 4.10** Krivulja nosivosti za vektor  $\phi_I$  9-katnog a/b okvira (smjer  $y$ )

Na crtežu 4.11 prikazana je ciklička krivulja nosivosti nelinearnog sustava 9-katnog armirano-betonskog okvira za smjer  $y$  koja je određena preko krivulje nosivosti vektora  $\phi_I$  i izjednačavanjem površina  $A_1$  i  $A_2$ .



Crtež 4.11 Ciklička krivulja nosivosti definirana preko krivulje nosivosti vektora  $\phi_I$  9-katnog a/b okvira (smjer  $y$ )

Na crtežu 4.12 prikazana je utrošena energija u jednom ciklusu osciliranja nelinearnog i linearnog sustava sa sekantnom krutošću  $k_{sec}$  na primjeru 9-katnog armirano-betonskog okvira u smjeru  $y$ .



Crtež 4.12 Određivanje utrošene energije u jednom ciklusu osciliranja nelinearnog i linearnog sustava 9-katnog a/b okvira (smjer  $y$ )

Iz cikličke krivulje nosivosti definirane preko vektora  $\phi_I$  9-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava za smjer  $y$  određeno je ekvivalentno viskozno prigušenje analiziranog 9-katnog okvira u smjeru  $y$  prema izrazu (4.5)

$$\xi = \frac{E_D}{4\pi E_S} = \frac{1.017}{4 \cdot \pi \cdot 0.304} = 0.27 \quad (4.5)$$

Dobiveno je 27% ekvivalentno viskozno prigušenje 9-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava za smjer y.

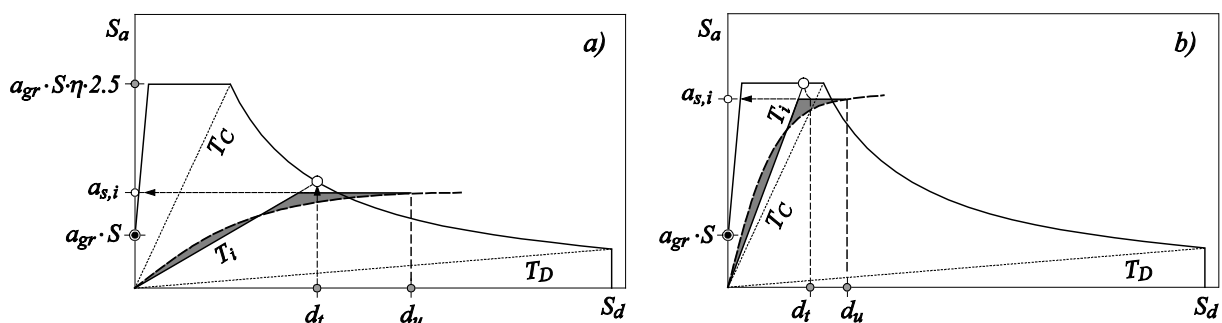
## 4.2 CILJANO UBRZANJE ZA LINEARNU KOMBINACIJU MODOVA UZ ELASTIČNI SPEKTAR S REALNIM VISKOZNIM PRIGUŠENJEM

U drugom poglavlju ovog rada predstavljena je formulacija i postupak traženja ciljanog ubrzanja tla  $a_{gr,t}$  pri čemu su vršene analize uz elastični spektar s 5% prigušenjem kako je navedeno u europskoj normi EN 1998 [E2].

U okviru ovog poglavlja višemodalnom metodom naguravanja odrediti će se ciljano ubrzanje na primjeru prostornih armirano-betonskih okvirnih sustava, pri čemu su korišteni elastični spektri s realnim viskoznim prigušenjem koje je izračunato na način koji je prethodno opisan. Općenitost postupka ne gubi se u analizi i drugih konstrukcijskih sustava s tim što je nužno uključiti sve više značajne vektore.

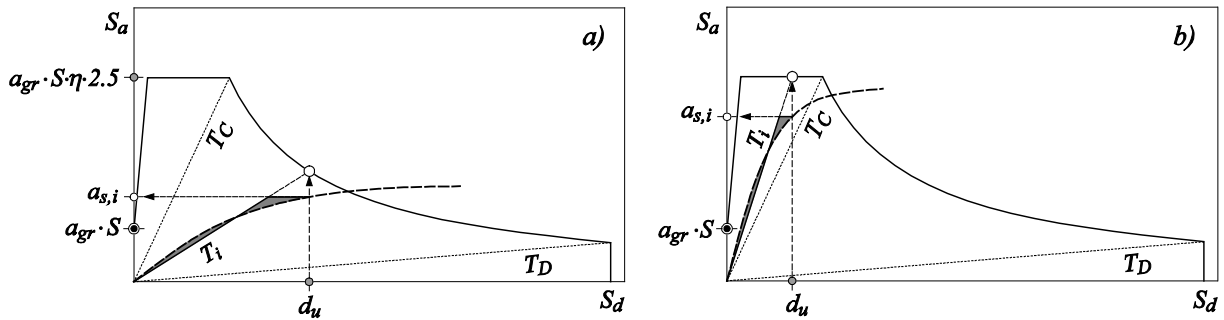
Promatrana je linearna (L) kombinacija modova za koju je u trećem poglavlju ovog rada pokazano da je nepovoljnija od korijenske kombinacije sume kvadrata modova (SRSS).

Određivanje ciljanog ubrzanja pri linearnoj (L) kombinaciji modova je promatrano za dva slučaja. Prvi slučaj je kada se za krivulju nosivosti svakog moda pojedinačno koje su prebačene u ADRS format (spektar odgovora ubrzanje - pomak) traži sjecište ekvivalentnog bilinearnog dijagrama, odnosno pripadnog perioda  $T_i$  i srodnog ciljanog pomaka  $d_i$  na ADRS krivulji za pretpostavljeno ubrzanje tla  $a_{gr}$ , kako je prikazano na crtežu 4.13. Iz navedenog jasno je da se u prvom slučaju promatra pomak pri 2/3 iskoristivosti pomaka  $d_u$ .



Crtež 4.13 Određivanje spektralnog ubrzanja  $a_{s,i}$  pri 2/3 iskoristivosti pomaka: a) za  $T_i \geq T_C$ ; b) za  $T_i < T_C$  [E2]

Drugi slučaj je kada se za krivulju nosivosti svakog moda pojedinačno koje su prebačene u ADRS format traži sjecište perioda  $T_i$  pripadnog bilinearnog dijagrama i srodnog pomaka  $d_u$  na ADRS krivulji za pretpostavljeno ubrzanje tla  $a_{gr}$ , kako je prikazano na crtežu 4.14. Vidljivo je da se u drugom slučaju promatra pomak pri 3/3 iskoristivosti pomaka  $d_u$ , odnosno ne ostavlja se sigurnosna rezerva od 50% već se pomak cijeli iskorištava.



Crtež 4.14 Određivanje spektralnog ubrzanja  $a_{s,i}$  pri 3/3 iskoristivosti pomaka: a) za  $T_i \geq T_C$ ; b) za  $T_i < T_C$

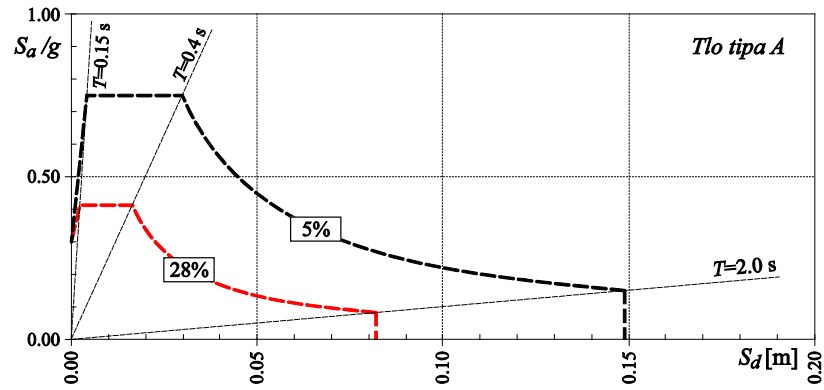
Analiza provedena za drugi slučaj pri potpunoj iskoristivosti pomaka na krivulji nosivosti poslužiti će kao osnova za usporedbu rezultata dobivenih metodom ciljanog ubrzanja s rezultatima dinamičkog odgovora analiziranog istog prostornog armirano-betonskog okvirnog sustava.

#### 4.2.1 Ciljano ubrzanje prema linearnoj (L) kombinaciji modova pri 2/3 iskoristivosti pomaka uz elastični spektar s realnim viskoznim prigušenjem

U ovom potpoglavlju odrediti će se ciljana ubrzanja 5-katnih i 9-katnih prostornih armirano-betonskih okvirnih sustava iz *primjera 1* i *primjera 2*, koji su prethodno opisani u drugom poglavlju ovog rada, prema linearnoj (L) kombinaciji višemodalne metode naguravanja.

Za određivanje spektralnog ubrzanja  $a_{s,i}$  svakog vektora zasebno korišteni su elastični spektri s izračunatim realnim viskoznim prigušenjem promatranog sustava i analiza je provedena na način kako je prethodno opisano, odnosno kako je prikazano na crtežu 4.13, tj. u obzir se uzima ciljani pomak  $d_i$  pri 2/3 iskoristivosti pomaka  $d_u$  na krivulji nosivosti.

Na crtežu 4.15 prikazana je usporedba elastičnog spektra s 5% i 28% prigušenjem za ubrzanje tla  $a_{gr}$  u iznosu 0.30g.

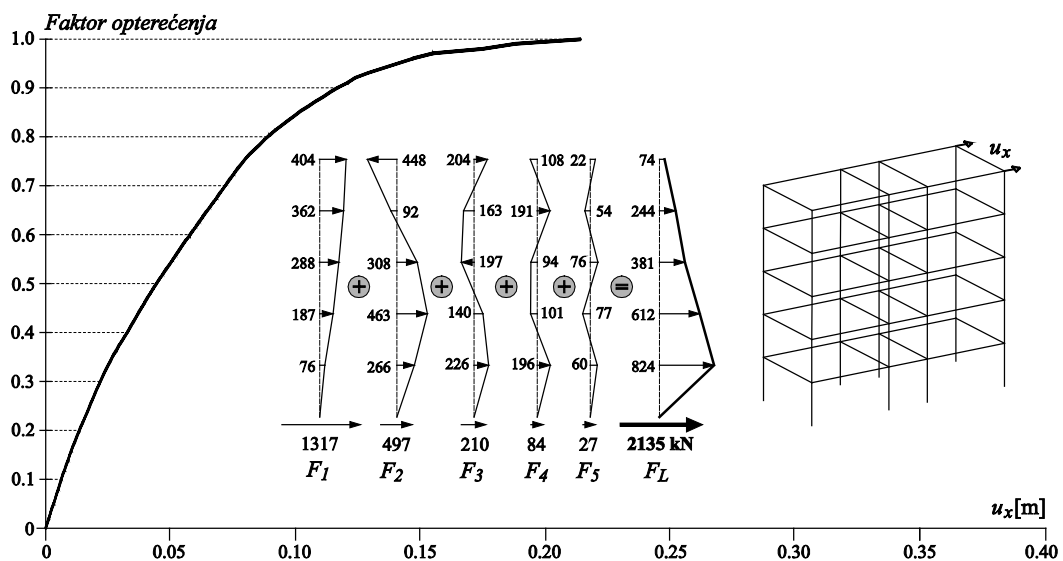


Crtež 4.15 Usporedba elastičnog spektra s 5% i 28% prigušenjem za ubrzanje tla  $a_{gr}=0.30g$

Iterativni postupak određivanja ciljanog ubrzanja za linearnu (L) kombinaciju modova na primjeru 5-katnog armirano-betonskog okvira za smjer  $x$  pri 2/3 iskoristivosti pomaka na krivulji nosivosti uz elastični spektar s izračunatim 28% prigušenjem prikazan je u tablici 4.1. U prvom koraku pretpostavljeno je ubrzanje tla  $a_{gr} = 0.30g$ , a iterativnim putem dobiveno je ciljano ubrzanje iznosa  $a_{gr,t} = 0.305g$ . Pripadna sila u presjeku pri bazi proračunskog modela iznosi  $F_L = 2135$  kN. Na crtežu 4.16 prikazani su vektori opterećenja sudjelujućih modova linearne (L) kombinacije i pripadna krivulja nosivosti.

Tablica 4.1 Ciljano ubrzanje pri linearnoj (L) kombinaciji modova 5-katnog a/b okvira za smjer  $x$  pri 2/3 iskoristivosti pomaka uz elastični spektar s 28% prigušenjem

$a_{gr}$	$a_{s,1}$	$F_1$	$a_{s,2}$	$F_2$	$a_{s,3}$	$F_3$	$a_{s,4}$	$F_4$	$a_{s,5}$	$F_5$	$F_L = \sum F_i$	$F_f$	$F_f/F_L$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$	$\delta_5$
0.30	0.192	1297	0.560	488	0.608	208	0.507	83	0.480	27	2102	2186	1.04	0.64	1.87	2.03	1.69	1.60
0.31	0.198	1337	0.580	505	0.624	213	0.518	85	0.500	28	2168	2082	0.96	0.64	1.87	2.01	1.67	1.61
<b>0.305</b>	<b>0.195</b>	<b>1317</b>	<b>0.570</b>	<b>497</b>	<b>0.615</b>	<b>210</b>	<b>0.513</b>	<b>84</b>	<b>0.492</b>	<b>27</b>	<b>2135</b>	<b>2135</b>	<b>1.00</b>	<b>0.64</b>	<b>1.87</b>	<b>2.02</b>	<b>1.68</b>	<b>1.61</b>



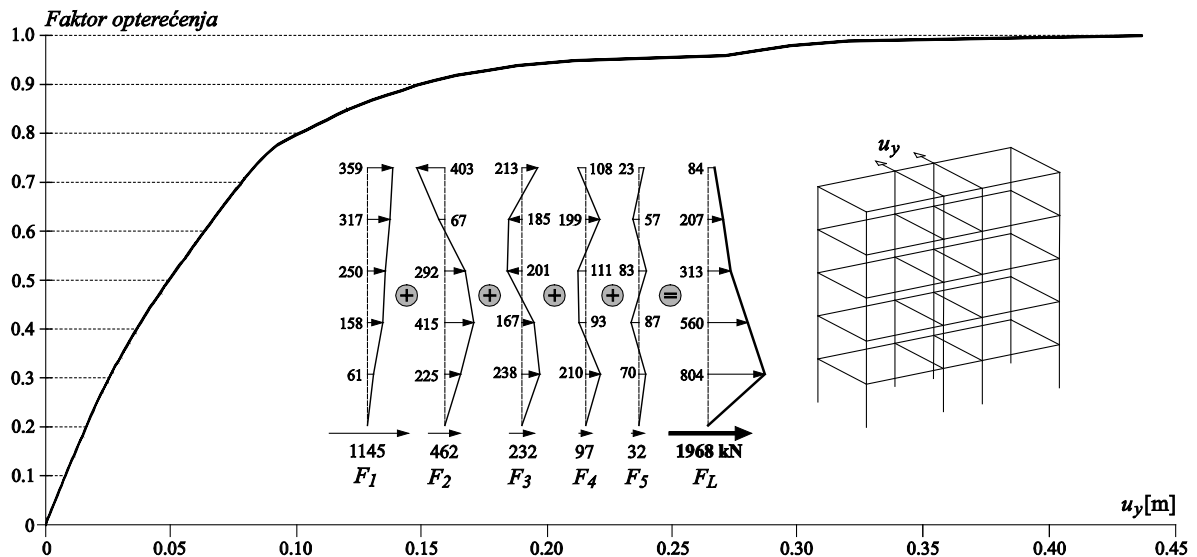
Crtež 4.16 Krivulja nosivosti za linearnu (L) kombinaciju modova 5-katnog a/b okvira za smjer  $x$  pri 2/3 iskoristivosti pomaka uz elastični spektar s 28% prigušenjem

Određivanje ciljanog ubrzanja za linearnu (L) kombinaciju modova 5-katnog armirano-betonskog okvira za smjer  $y$  pri 2/3 iskoristivosti pomaka na krivulji nosivosti i uz elastični spektar s 29% prigušenjem prikazano je u tablici 4.2. Iterativnim putem dobiveno ciljano ubrzanje iznosi  $a_{gr,t} = 0.305g$ , a pripadna sila u presjeku pri bazi proračunskog modela iznosi  $F_L = 1968$  kN.

**Tablica 4.2** Ciljano ubrzanje pri linearnoj (L) kombinaciji modova 5-katnog a/b okvira za smjer  $y$  pri 2/3 iskoristivosti pomaka uz elastični spektar s 29% prigušenjem

$a_{gr}$	$a_{s,1}$	$F_1$	$a_{s,2}$	$F_2$	$a_{s,3}$	$F_3$	$a_{s,4}$	$F_4$	$a_{s,5}$	$F_5$	$F_L = \sum F_i$	$F_f$	$F_f/F_L$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$	$\delta_5$
0.30	0.169	1125	0.499	453	0.610	228	0.507	95	0.483	31	1933	1971	1.02	0.56	1.66	2.03	1.69	1.61
<b>0.305</b>	0.172	1145	0.510	462	0.620	232	0.513	97	0.493	32	1968	1968	<b>1.00</b>	0.56	1.67	2.03	1.68	1.62

Na crtežu 4.17 prikazani su vektori opterećenja sudjelujućih modova linearne (L) kombinacije i pripadna krivulja nosivosti 5-katnog a/b okvira za smjer  $y$ .



**Crtež 4.17** Krivulja nosivosti za linearnu (L) kombinaciju modova 5-katnog a/b okvira za smjer  $y$  pri 2/3 iskoristivosti pomaka uz elastični spektar s 29% prigušenjem

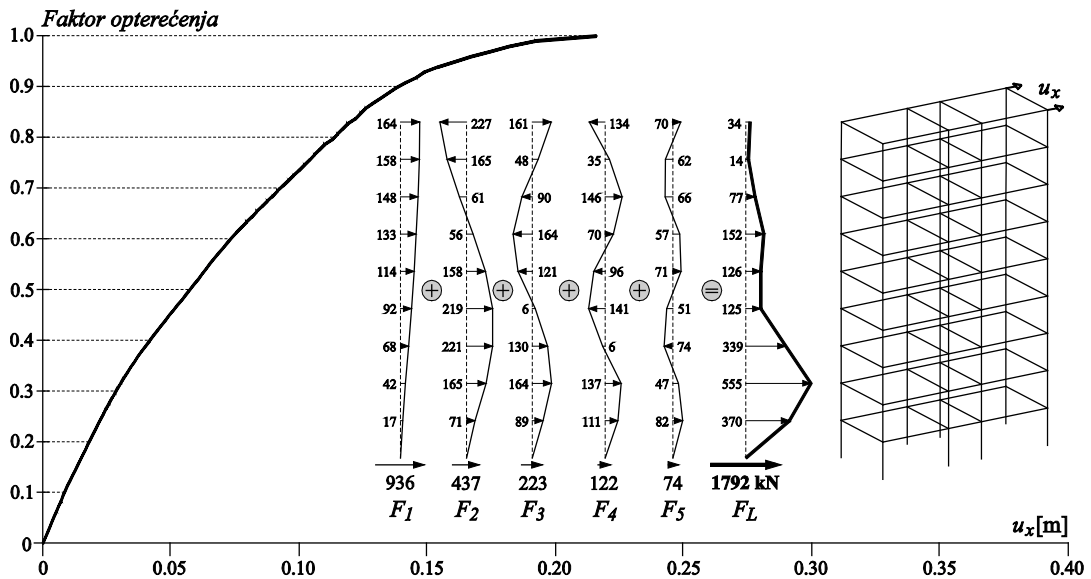
Određivanje ciljanog ubrzanja za linearnu (L) kombinaciju modova 9-katnog armirano-betonskog okvira za smjer  $x$  pri 2/3 iskoristivosti pomaka na krivulji nosivosti i uz elastični spektar s izračunatim 34% prigušenjem prikazano je u tablici 4.3. U prvom koraku pretpostavljeno je ubrzanje tla  $a_{gr} = 0.30g$ , a iterativnim putem dobiveno je ciljano ubrzanje iznosa  $a_{gr,t} = 0.21g$ . Pripadna sila u presjeku pri bazi proračunskog modela iznosi  $F_L = 1792$  kN.



**Tablica 4.3** Ciljano ubrzanje pri linearnoj (L) kombinaciji modova 9-katnog a/b okvira za smjer x pri 2/3 iskoristivosti pomaka uz elastični spektar s 34% prigušenjem

$a_{gr}$	$a_{s,1}$	$F_1$	$a_{s,2}$	$F_2$	$a_{s,3}$	$F_3$	$a_{s,4}$	$F_4$	$a_{s,5}$	$F_5$	$F_L = \sum F_i$	$F_f$	$F_f/F_L$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$	$\delta_5$
0.30	0.099	1188	0.375	562	0.570	317	0.570	174	0.555	105	2347	1807	0.77	0.33	1.25	1.90	1.90	1.85
0.22	0.081	972	0.300	449	0.418	233	0.418	128	0.405	77	1859	1803	0.97	0.37	1.36	1.90	1.90	1.84
<b>0.21</b>	<b>0.078</b>	<b>936</b>	<b>0.292</b>	<b>437</b>	<b>0.400</b>	<b>223</b>	<b>0.400</b>	<b>122</b>	<b>0.390</b>	<b>74</b>	<b>1792</b>	<b>1792</b>	<b>1.00</b>	0.37	1.39	1.90	1.90	1.86

Na crtežu 4.18 prikazani su vektori opterećenja sudjelujućih modova linearne (L) kombinacije i pripadna krivulja nosivosti 9-katnog a/b okvira za smjer x.

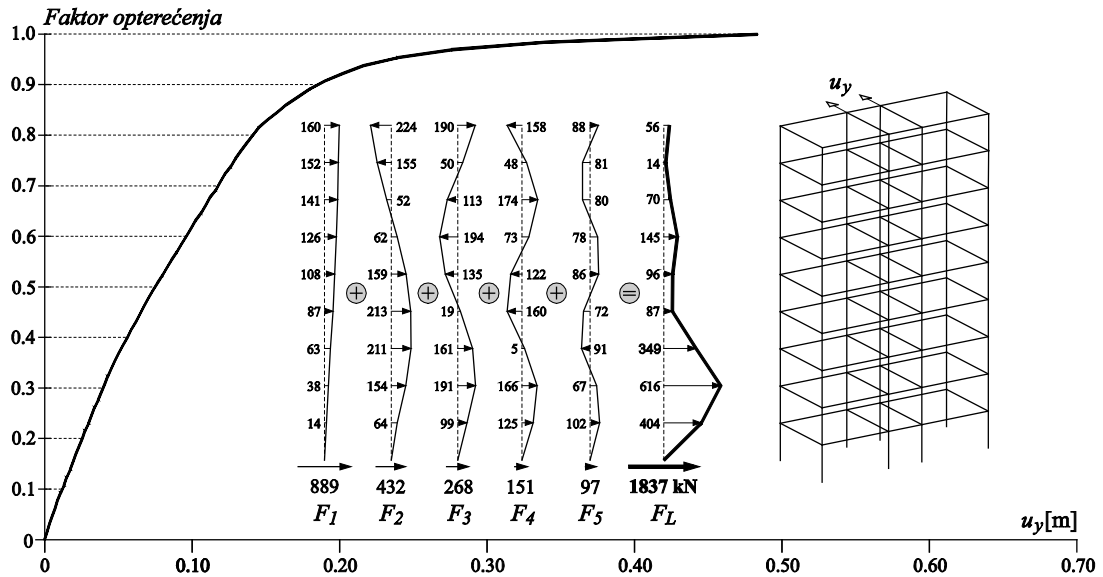
**Crtež 4.18** Krivulja nosivosti za linearnu (L) kombinaciju modova 9-katnog a/b okvira za smjer x pri 2/3 iskoristivosti pomaka uz elastični spektar s 34% prigušenjem

Određivanje ciljanog ubrzanja za linearnu (L) kombinaciju modova 9-katnog armirano-betonskog okvira za smjer y pri 2/3 iskoristivosti pomaka na krivulji nosivosti i uz elastični spektar s 27% prigušenjem prikazano je u tablici 4.4. Iterativnim putem dobiveno je ciljano ubrzanje iznosa  $a_{gr,t} = 0.21g$ , a pripadna sila u presjeku pri bazi proračunskog modela iznosi  $F_L = 1837$  kN.

**Tablica 4.4** Ciljano ubrzanje pri linearnoj (L) kombinaciji modova 9-katnog a/b okvira za smjer y pri 2/3 iskoristivosti pomaka uz elastični spektar s 27% prigušenjem

$a_{gr}$	$a_{s,1}$	$F_1$	$a_{s,2}$	$F_2$	$a_{s,3}$	$F_3$	$a_{s,4}$	$F_4$	$a_{s,5}$	$F_5$	$F_L = \sum F_i$	$F_f$	$F_f/F_L$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$	$\delta_5$
0.30	0.090	1067	0.357	551	0.610	354	0.660	216	0.660	139	2327	1815	0.76	0.30	1.19	2.03	2.20	2.20
<b>0.21</b>	<b>0.075</b>	<b>889</b>	<b>0.280</b>	<b>432</b>	<b>0.461</b>	<b>268</b>	<b>0.461</b>	<b>151</b>	<b>0.461</b>	<b>97</b>	<b>1837</b>	<b>1837</b>	<b>1.00</b>	0.36	1.33	2.20	2.20	2.20

Na crtežu 4.19 prikazani su vektori opterećenja sudjelujućih modova linearne (L) kombinacije i pripadna krivulja nosivosti 9-katnog a/b okvira za smjer y.



**Crtež 4.19** Krivulja nosivosti za linearnu (L) kombinaciju modova 9-katnog a/b okvira za smjer y pri 2/3 iskoristivosti pomaka uz elastični spektar s 27% prigušenjem

U tablici 4.5 prikazana je usporedba rezultata dobivenog ciljanog ubrzanja tla  $a_{gr,t}$  i pripadne poprečne sile  $F_L$  u presjeku pri bazi proračunskog modela za linearnu (L) kombinaciju modova 5-katnog i 9-katnog armirano-betonskog okvira iz *primjera 1* i *primjera 2*, dobivenih za 2/3 iskoristivosti pomaka na krivulji nosivosti. Prikazani su rezultati dobiveni za elastični spektar s 5% prigušenjem i elastični spektar s izračunatim realnim viskoznim prigušenjem promatranog 5-katnog i 9-katnog armirano-betonskog okvira i to za smjerove x i y.

**Tablica 4.5** Usporedba ciljanog ubrzanja pri linearnoj (L) kombinaciji modova uz 2/3 iskoristivosti pomaka na krivulji nosivosti

a/b okvir	smjer	Pomak = $d_t = 2/3 d_u$			Pomak = $d_t = 2/3 d_u$		
		prigušenje [%]	$a_{gr,t}$	$F_L$ [kN]	prigušenje [%]	$a_{gr,t}$	$F_L$ [kN]
5-katni	x	5	0.18	2197	28	0.305	2135
5-katni	y	5	0.17	1934	29	0.305	1968
9-katni	x	5	0.115	1831	34	0.21	1792
9-katni	y	5	0.11	1757	27	0.21	1837

Iz dobivenih rezultata može se zaključiti da je ciljano ubrzanje  $a_{gr,t}$  dobiveno višemodalnom metodom naguravanja linearne (L) kombinacije modova uz 2/3 iskoristivosti pomaka na krivulji nosivosti, kako je prikazano na crtežu 4.13, za sustav armirano-betonskog okvira uz elastične

spektre s realnim viskoznim prigušenjem veće u odnosu na ciljano ubrzanje  $a_{gr,t}$  dobiveno uz elastične spektre s 5% prigušenjem. U oba slučaja približno je ista razina slomne sile.

#### 4.2.2 Ciljano ubrzanje prema linearnoj (L) kombinaciji modova pri 3/3 iskoristivosti pomaka uz elastični spektar s realnim viskoznim prigušenjem

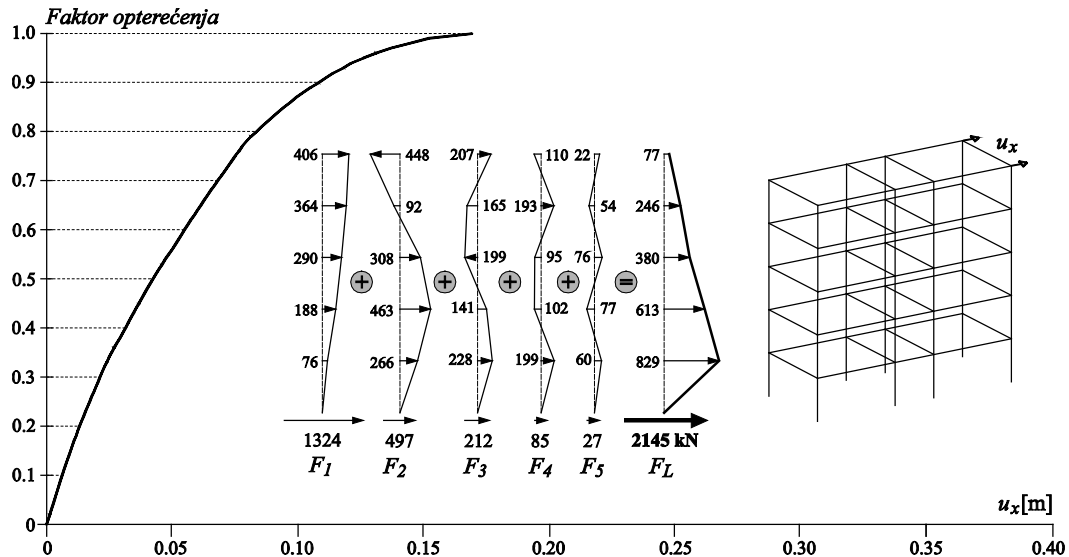
U okviru ovog potpoglavlja odrediti će se ciljana ubrzanja  $a_{gr,u}$  5-katnih i 9-katnih armirano-betonskih okvira iz *primjera 1* i *primjera 2*, prema linearnoj (L) kombinaciji višemodalne metode naguravanja, pri čemu su za određivanje spektralnog ubrzanja  $a_{s,i}$  svakog vektora korišteni elastični spektri s realnim viskoznim prigušenjem promatranog sustava i analiza je provedena na način kako je prethodno opisano, odnosno kako je prikazano na crtežu 4.14, tj. u obzir se uzima pomak pri 3/3 iskoristivosti pomaka  $d_u$ , odnosno ne ostavlja se sigurnosna rezerva na krivulji nosivosti od 50%.

Iterativni postupak određivanja ciljanog ubrzanja za linearnu (L) kombinaciju modova 5-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava za smjer  $x$  pri 3/3 iskoristivosti pomaka na krivulji nosivosti i uz elastični spektar s izračunatim 28% prigušenjem prikazan je u tablici 4.6. U prvom koraku pretpostavljeno je ubrzanje tla  $a_{gr} = 0.45g$ , a iterativnim putem dobiveno je ciljano ubrzanje iznosa  $a_{gr,u} = 0.46g$ . Pripadna sila u presjeku pri bazi proračunskog modela iznosi  $F_L = 2145$  kN.

**Tablica 4.6** Ciljano ubrzanje pri linearnoj (L) kombinaciji modova 5-katnog a/b okvira za smjer  $x$  pri 3/3 iskoristivosti pomaka uz elastični spektar s 28% prigušenjem

$a_{gr}$	$a_{s,1}$	$F_1$	$a_{s,2}$	$F_2$	$a_{s,3}$	$F_3$	$a_{s,4}$	$F_4$	$a_{s,5}$	$F_5$	$F_L = \sum F_i$	$F_f$	$F_f/F_L$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$	$\delta_5$
0.45	0.193	1303	0.568	495	0.608	208	0.509	84	0.482	27	2116	2180	1.03	0.43	1.26	1.35	1.13	1.07
<b>0.46</b>	0.196	1324	0.570	497	0.620	212	0.518	85	0.495	27	2145	2145	<b>1.00</b>	0.43	1.24	1.35	1.13	1.08

Na crtežu 4.20 prikazani su vektori opterećenja sudjelujućih modova linearne (L) kombinacije i pripadna krivulja nosivosti 5-katnog a/b okvira za smjer  $x$ .



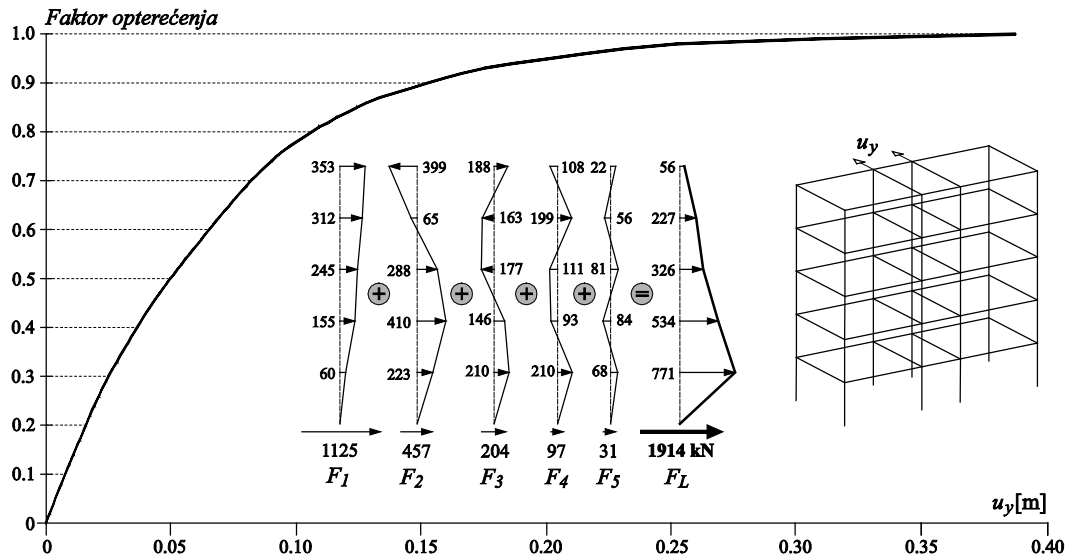
**Crtež 4.20** Krivulja nosivosti za linearnu (L) kombinaciju modova 5-katnog a/b okvira za smjer x pri 3/3 iskoristivosti pomaka uz elastični spektar s 28% prigušenjem

Određivanje ciljanog ubrzanja za linearnu (L) kombinaciju modova 5-katnog armirano-betonskog okvira za smjer y pri 3/3 iskoristivosti pomaka na krivulji nosivosti i uz elastični spektar s izračunatim 29% prigušenjem prikazano je u tablici 4.7. Iterativnim putem dobiveno je ciljano ubrzanje iznosa  $a_{gr,u} = 0.455g$ , a pripadna sila u presjeku pri bazi proračunskog modela iznosi  $F_L = 1914$  kN.

**Tablica 4.7** Ciljano ubrzanje pri linearnoj (L) kombinaciji modova 5-katnog a/b okvira za smjer y pri 3/3 iskoristivosti pomaka uz elastični spektar s 29% prigušenjem

$a_{gr}$	$a_{s,1}$	$F_1$	$a_{s,2}$	$F_2$	$a_{s,3}$	$F_3$	$a_{s,4}$	$F_4$	$a_{s,5}$	$F_5$	$F_L = \sum F_i$	$F_f$	$F_f/F_L$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$	$\delta_5$
0.45	0.168	1119	0.496	450	0.585	219	0.511	96	0.480	31	1915	1953	1.02	0.37	1.10	1.30	1.14	1.07
<b>0.455</b>	0.169	1125	0.504	457	0.545	204	0.515	97	0.486	31	1914	1914	<b>1.00</b>	0.37	1.11	1.20	1.13	1.07

Na crtežu 4.21 prikazani su vektori opterećenja sudjelujućih modova linearne (L) kombinacije i pripadna krivulja nosivosti 5-katnog a/b okvira za smjer y.



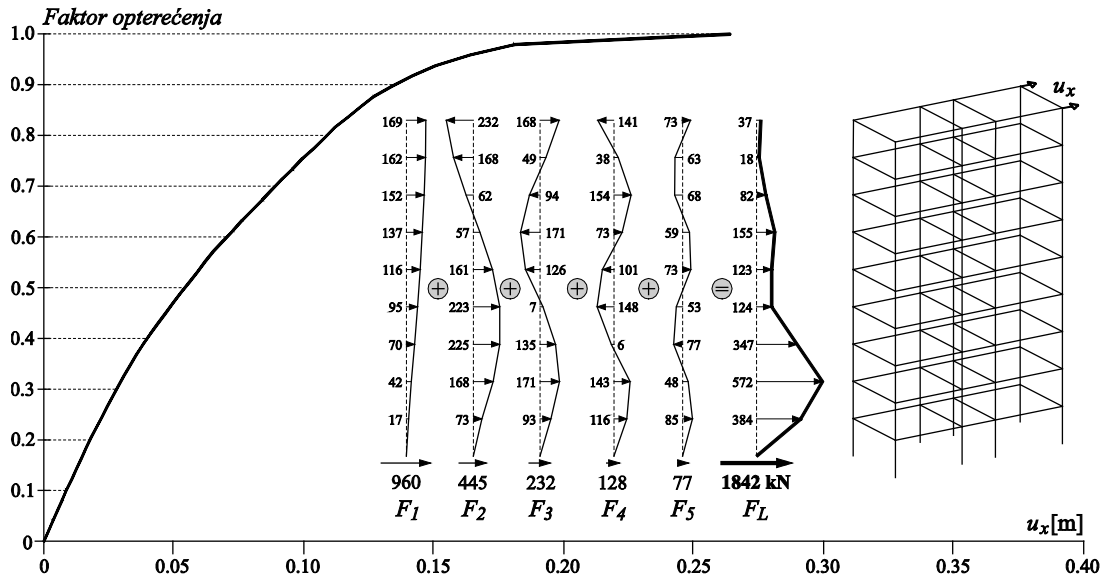
**Crtež 4.21** Krivulja nosivosti za linearnu (L) kombinaciju modova 5-katnog a/b okvira za smjer y pri 3/3 iskoristivosti pomaka uz elastični spektar s 29% prigušenjem

Određivanje ciljanog ubrzanja za linearnu (L) kombinaciju modova 9-katnog armirano-betonskog okvira za smjer x pri 3/3 iskoristivosti pomaka na krivulji nosivosti i uz elastični spektar s izračunatim 34% prigušenjem prikazano je u tablici 4.8. U prvom koraku pretpostavljeno je ubrzanje tla  $a_{gr} = 0.45g$ , a iterativnim putem dobiveno je ciljano ubrzanje iznosa  $a_{gr,u} = 0.34g$ . Pripadna sila u presjeku pri bazi proračunskog modela iznosi  $F_L = 1842$  kN.

**Tablica 4.8** Ciljano ubrzanje pri linearnoj (L) kombinaciji modova 9-katnog a/b okvira za smjer x pri 3/3 iskoristivosti pomaka uz elastični spektar s 34% prigušenjem

$a_{gr}$	$a_{s,1}$	$F_1$	$a_{s,2}$	$F_2$	$a_{s,3}$	$F_3$	$a_{s,4}$	$F_4$	$a_{s,5}$	$F_5$	$F_L = \sum F_i$	$F_f$	$F_f/F_L$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$	$\delta_5$
0.45	0.098	1176	0.373	559	0.560	312	0.570	174	0.556	105	2326	1908	0.82	0.22	0.83	1.24	1.27	1.24
0.37	0.088	1056	0.328	491	0.450	250	0.450	138	0.450	85	2021	1819	0.90	0.24	0.89	1.22	1.22	1.22
<b>0.34</b>	0.080	960	0.297	445	0.417	232	0.417	128	0.405	77	1842	1842	<b>1.00</b>	0.24	0.87	1.23	1.23	1.19

Na crtežu 4.22 prikazani su vektori opterećenja sudjelujućih modova linearne (L) kombinacije i pripadna krivulja nosivosti 9-katnog a/b okvira za smjer x.



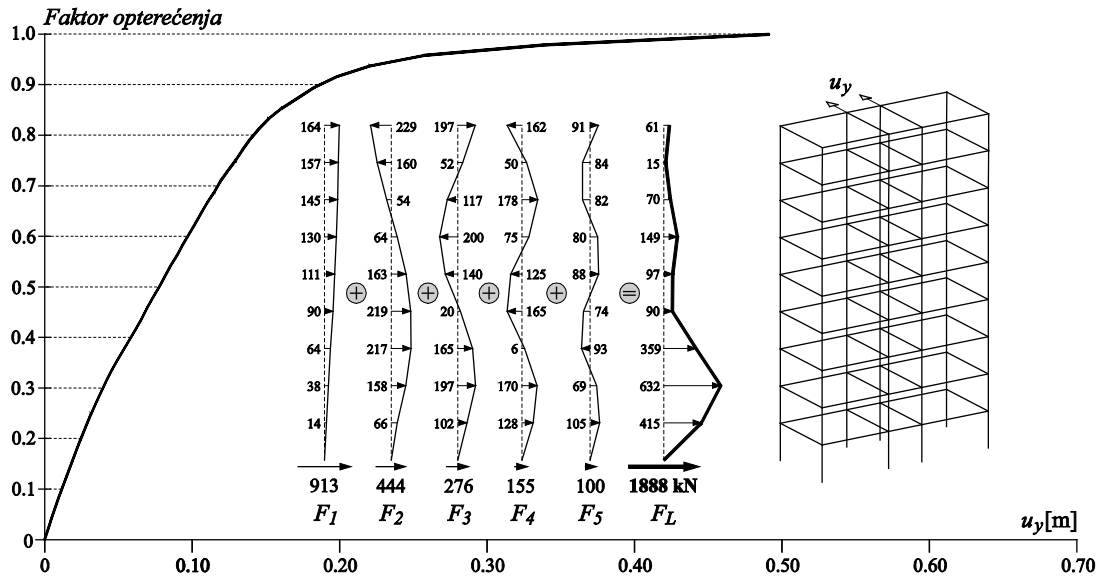
Crtež 4.22 Krivulja nosivosti za linearnu (L) kombinaciju modova 9-katnog a/b okvira za smjer x pri 3/3 iskoristivosti pomaka uz elastični spektar s 34% prigušenjem

Određivanje ciljanog ubrzanja za linearnu (L) kombinaciju modova 9-katnog armirano-betonskog okvira za smjer y pri 3/3 iskoristivosti pomaka na krivulji nosivosti i uz elastični spektar s izračunatim 27% prigušenjem prikazano je u tablici 4.9. Iterativnim putem dobiveno je ciljano ubrzanje iznosa  $a_{gr,u} = 0.34g$ , a pripadna sila u presjeku pri bazi proračunskog modela iznosi  $F_L = 1888$  kN.

Tablica 4.9 Ciljano ubrzanje pri linearnoj (L) kombinaciji modova 9-katnog a/b okvira za smjer y pri 3/3 iskoristivosti pomaka uz elastični spektar s 27% prigušenjem

$a_{gr}$	$a_{s,1}$	$F_1$	$a_{s,2}$	$F_2$	$a_{s,3}$	$F_3$	$a_{s,4}$	$F_4$	$a_{s,5}$	$F_5$	$F_L = \sum F_i$	$F_f$	$F_f/F_L$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$	$\delta_5$
0.45	0.090	1067	0.357	551	0.624	362	0.628	205	0.628	132	2318	1900	0.82	0.20	0.79	1.39	1.40	1.40
0.36	0.079	937	0.300	463	0.502	291	0.502	164	0.502	106	1961	1882	0.96	0.22	0.83	1.39	1.39	1.39
0.35	0.078	925	0.294	454	0.488	283	0.488	159	0.488	103	1924	1886	0.98	0.22	0.84	1.39	1.39	1.39
<b>0.34</b>	<b>0.077</b>	<b>913</b>	<b>0.288</b>	<b>444</b>	<b>0.475</b>	<b>276</b>	<b>0.475</b>	<b>155</b>	<b>0.475</b>	<b>100</b>	<b>1888</b>	<b>1888</b>	<b>1.00</b>	<b>0.23</b>	<b>0.85</b>	<b>1.40</b>	<b>1.40</b>	<b>1.40</b>

Na crtežu 4.23 prikazani su vektori opterećenja sudjelujućih modova linearne (L) kombinacije i pripadna krivulja nosivosti 9-katnog a/b okvira za smjer y.



**Crtež 4.23** Krivulja nosivosti za linearnu (L) kombinaciju modova 9-katnog a/b okvira za smjer y pri 3/3 iskoristivosti pomaka uz elastični spektar s 27% prigušenjem

U tablici 4.10 prikazana je usporedba ciljanog ubrzanja za linearnu (L) kombinaciju modova uz 2/3 i 3/3 iskoristivosti pomaka na krivulji nosivosti. Prikazani su rezultati dobivenog ciljanog ubrzanja  $a_{gr,u}$  i pripadne poprečne sile  $F_L$  u presjeku pri bazi proračunskog modela pri linearnoj (L) kombinaciji modova 5-katnog i 9-katnog armirano-betonskog okvira iz *primjera 1* i *primjera 2*, dobivenih za 3/3 iskoristivosti pomaka na krivulji nosivosti uz elastični spektar s realnim izračunatim viskoznim prigušenjem. U tablici su prikazani i rezultati dobiveni za elastični spektar s 5% prigušenjem promatranog 5-katnog i 9-katnog armirano-betonskog okvira za smjerove  $x$  i  $y$  te je izvršena usporedba dobivenih rezultata.

**Tablica 4.10** Usporedba ciljanog ubrzanja pri linearnoj (L) kombinaciji modova uz 2/3 i 3/3 iskoristivosti pomaka na krivulji nosivosti

a/b okvir	smjer	Pomak = $d_t = 2/3 d_u$			Pomak = $d_t = 3/3 d_u$		
		prigušenje [%]	$a_{gr,t}$	$F_L$ [kN]	prigušenje [%]	$a_{gr,u}$	$F_L$ [kN]
5-katni	x	5	0.18	2197	28	0.46	2145
5-katni	y	5	0.17	1934	29	0.455	1914
9-katni	x	5	0.115	1831	34	0.34	1842
9-katni	y	5	0.11	1757	27	0.34	1888

Iz dobivenih rezultata može se zaključiti da je ciljano ubrzanje  $a_{gr,u}$  dobiveno višemodalnom metodom naguravanja pri 3/3 iskoristivosti pomaka na krivulji nosivosti, za sustav

armirano-betonskih okvira uz elastične spektre s realnim viskoznim prigušenjem veće u odnosu na ciljano ubrzanje  $a_{gr,t}$  dobiveno uz elastične spektre s 5% prigušenjem. U oba slučaja približno je ista razina slomne sile što je i logično da se sustav slama pri istom nivou opterećenja.

Usporedbom rezultata iz tablice 4.10 i 4.5 uočava se da je ciljano ubrzanje  $a_{gr,u}$  armirano-betonskih okvirnih sustava s realnim viskoznim prigušenjem dobiveno uzimajući u obzir 3/3 iskoristivosti pomaka na krivulji nosivosti, veće od ciljanog ubrzanja  $a_{gr,t}$  dobivenog pri 2/3 iskoristivosti pomaka na krivulji nosivosti.

Ciljano ubrzanje  $a_{gr,u}$  armirano-betonskih okvira dobiveno višemodalnom metodom naguravanja uzimajući u obzir 3/3 iskoristivosti pomaka na krivulji nosivosti, poslužiti će za usporedbu rezultata dobivenih metodom ciljanog ubrzanja s dinamičkim odgovorom realnih prostornih armirano-betonskih okvirnih sustava analiziranih programskim paketom za nelinearnu analizu *SeismoStruct* što je pokazano u petom poglavlju ovog rada.



## **5. CILJANO UBRZANJE VIŠEMODALNE METODE NAGURAVANJA U USPOREDBI S DINAMIČKIM ODGOVOROM SUSTAVA**

U ovom poglavlju prikazani su rezultati dinamičkog odgovora 5-katnih i 9-katnih prostornih armirano-betonskih okvirnih sustava dobiveni programskim paketom za nelinearnu analizu *SeismoStruct*. U okviru ovog poglavlja provedena je validacija metode ciljanog ubrzanja u višemodalnoj metodi naguravanja na primjeru prostornih armirano-betonskih okvira s dinamičkim odgovorom istih sustava na osnovu slomnog vršnog ubrzanja podloge.

Za dinamičku pobudu sustava korišteni su zapisi akcelelograma realnih potresa koji su birani na način da kategorija tla na kojoj je potres zabilježen odgovara kategoriji tla projektirane građevine. Uvažavajući izračunato ekvivalentno viskozno prigušenje sustava te iskoristivost krivulje nosivosti do 3/3 pomaka, kako je opisano u prethodnom poglavlju, usporedbom ciljanog ubrzanja višemodalne metode naguravanja i slomnog vršnog ubrzanja podloge dobivenog metodom inkrementalne dinamičke analize pokazuje se vrlo dobro slaganje ciljanog ubrzanja i slomnog vršnog ubrzanja podloge. Time se i dokazuje da je ekvivalentno viskozno prigušenje izračunato na način koji je opisan u četvrtom poglavlju ovoga rada realno.

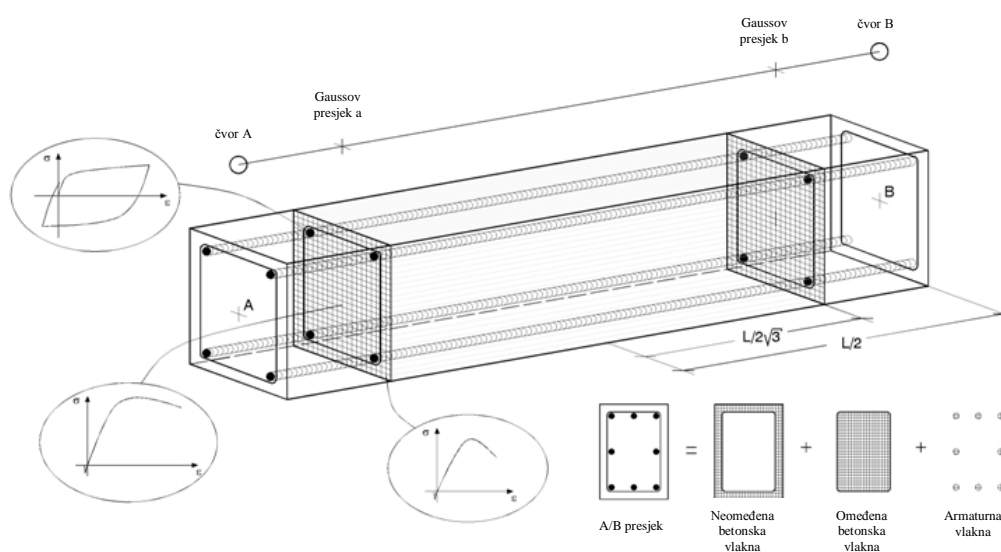
## 5.1 DINAMIČKI ODGOVOR SUSTAVA

Proračun potresne otpornosti konstrukcija moguće je odrediti pomoću djelovanja stvarnih potresa temeljem njihovih zapisa u formatu ubrzanje – vrijeme. U nelinearnoj dinamičkoj analizi konstrukcija u vremenu korišteni su realni akcelelogrami zapisani pri stvarnim potresima na lokacijama koje po svojim karakteristikama tla i seizmičnosti približno odgovaraju lokaciji predmetne konstrukcije.

Potresno opterećenje dano je kao ubrzanje temeljnog tla u funkciji vremena što je prikazano zapisima akcelelograma stvarnih potresa. Za analizu su uzeti isti oni zapisi potresa koji su izloženi u trećem poglavlju ovog rada i odgovaraju tlu tipa A, a preuzeti su iz baze podataka *European Strong-motion Database*, te su prikazani na crtežu 3.1.

Dinamička analiza na primjerima armirano-betonskih okvirnih sustava provedena je programskim paketom za nelinearnu analizu *SeismoStruct*. Osnovna namjena programa *SeismoStruct* je nelinearna statička i dinamička analiza okvirnih konstrukcija uzimajući u obzir geometrijsku i materijalnu nelinearnost. Nelinearnost materijala uzduž elementa i unutar poprečnog presjeka elementa omogućena je primjenom vlaknastog modela. Svaki poprečni presjek sastoji se od određenog broja vlakana, te je za svako vlakno definiran nelinearni odnos naprezanje – deformacija ( $\sigma - \epsilon$ ).

Diskretizacija tipičnog armirano-betonskog elementa u programu *SeismoStruct* prikazana ja na crtežu 5.1.

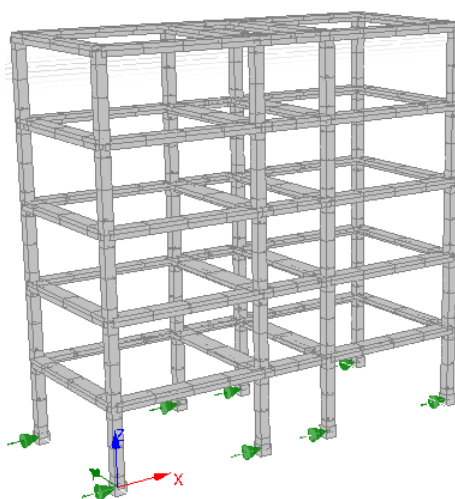


**Crtež 5.1** Diskretizacija tipičnog armirano-betonskog elementa u programu *SeismoStruct*

U programu *SeismoStruct* zadani su modeli 5-katnog i 9-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava čija svojstva su zadana na način da odgovaraju analiziranim okvirima iz *primjera 1* (5-katni prostorni a/b okvir) i *primjera 2* (9-katni prostorni a/b okvir), koji su prikazani u drugom poglavlju ovog rada.

Promatrani armirano-betonski okvirni sustavi analizirani su metodom inkrementalne dinamičke analize koja se koristi za analizu odgovora konstrukcija izloženih potresnom opterećenju [V2]. Metoda se zasniva na inkrementalnom povećavanju opterećenja, odnosno amplitude realnih potresa. Takav način opterećenja omogućuje praćenje ponašanja konstrukcija izloženih potresnom djelovanju u vremenu sve do sloma, odnosno omogućuje analizu načina nastanka sloma sustava i određivanje kapaciteta nosivosti konstrukcije.

Model 5-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava iz programa *SeismoStruct* s naznačenim mjestima unosa pobude potresom u obliku vremenskog zapisa ubrzanja potresnog djelovanja prikazan je crtežu 5.2.

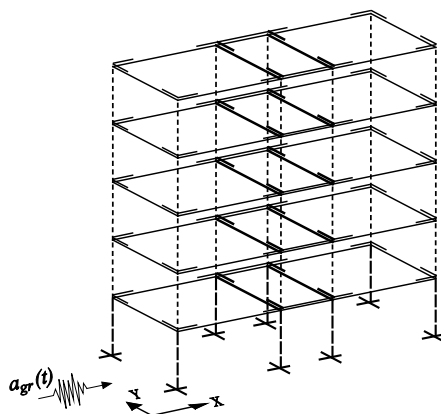


**Crtež 5.2** Model 5-katnog a/b okvira iz programa *SeismoStruct* s prikazanim mjestima unosa potresnog djelovanja u obliku zapisa akcelelograma potresa

### 5.1.1 Dinamički odgovor 5-katnog prostornog armirano-betonskog okvira – smjer $x$

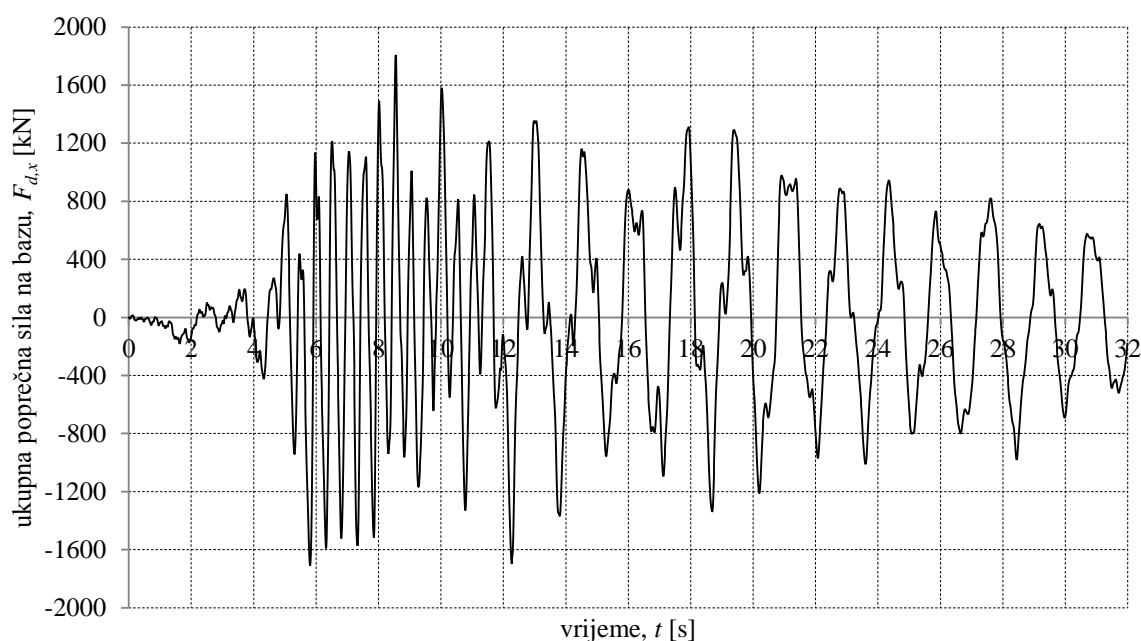
Analiziran je 5-katni prostorni armirano-betonski okvirni sustav iz *primjera 1* koji je predstavljen u okviru drugog poglavlja ovog rada. 5-katni armirano-betonski okvir je opterećen vremenskim zapisima akcelelograma osam stvarnih potresa u čvorovima baze, te se promatra potresna otpornost konstrukcije u  $x$  smjeru za svaku potresnu pobudu zasebno.

Dinamički odgovor sustava dobiven je programskim paketom *SeismoStruct* kojim je proveden postupak inkrementalne dinamičke analize, odnosno amplitude realnih potresa su inkrementalno povećavane dok se nije došlo do slomnog vršnog ubrzanja tla  $a_{gr,d}$  za pojedini zapis stvarnog potresa.



**Crtež 5.3** Prostorni 5-katni a/b okvir opterećen zapisima akcelelograma stvarnih potresa u  $x$  smjeru

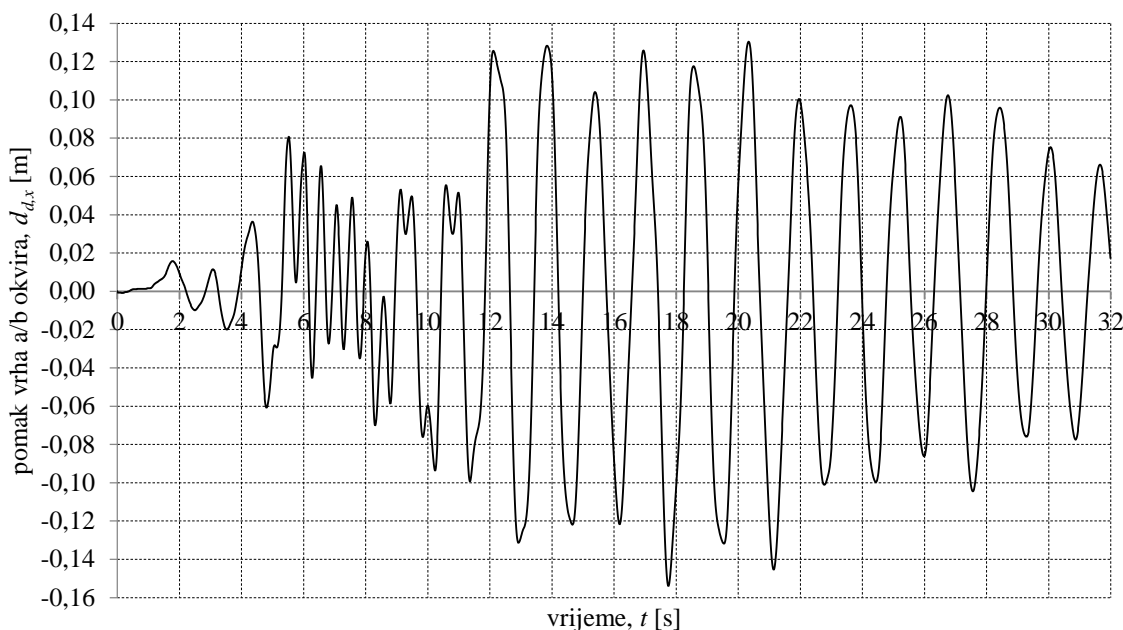
Na crtežu 5.4 prikazan je dijagram ukupne poprečne sile na bazu modela 5-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava ( $F_{d,x}$ ) u ovisnosti o vremenu za potresnu pobudu Montenegro u  $x$  smjeru. Može se primijetiti da najvećem iznosu poprečne sile odgovara vrijednost 1808 kN.



**Crtež 5.4** Ukupna poprečna sila na bazu 5-katnog a/b okvirnog sustava u ovisnosti o vremenu za potresnu pobudu Montenegro u  $x$  smjeru (rezultat iz programa *SeismoStruct*)

Na crtežu 5.5 prikazan je dijagram pomaka vrha 5-katnog armirano-betonskog okvira ( $d_{d,x}$ ) u ovisnosti o vremenu za potresnu pobudu Montenegro u  $x$  smjeru. Na dijagramu se uočava da

maksimalni pomak vrha 5-katnog armirano-betonskog okvira uslijed potresne pobude Montenegro iznosi 0.15 m.



**Crtež 5.5** Pomak vrha 5-katnog a/b okvirnog sustava u ovisnosti o vremenu za potresnu pobudu Montenegro u  $x$  smjeru (rezultat iz programa *SeismoStruct*)

Rezultati analize dinamičkog odgovora 5-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava u  $x$  smjeru opterećenog zapisima akcelelograma osam stvarnih potresa dani su u tablici 5.1. Kao rezultati dinamičkog odgovora prikazano je slomno vršno ubrzanje tla  $a_{gr,d}$ , ukupna slomna poprečna sila na bazu modela  $F_{d,x}$  i maksimalni pomak vrha 5-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava  $d_{d,x}$ , i to za svaku potresnu pobudu zasebno.

Između dobivenih rezultata odbačena je jedna najveća vrijednost slomnog vršnog ubrzanja tla koja najviše odstupa od prosjeka. U tablici 5.1 potres s dobivenom najvećom vrijednosti ubrzanja tla  $a_{gr,d}$ , označen je s (\*). Kao mjerodavan rezultat uzet je prosjek dobivenih rezultata dinamičkog odgovora za seriju od preostalih sedam zapisa realnih potresa.

**Tablica 5.1** Dinamički odgovor 5-katnog a/b okvira – smjer  $x$

	Potres	$a_{gr,d}$	$F_{d,x}$ [kN]	$d_{d,x}$ [m]
1.	Montenegro	0.41g	1808	0.15
2.	Campano Lucano	0.29g	1524	0.18
3.	Aigion	0.41g	1527	0.18
4.	Olfus	0.43g	1935	0.19
5.	Calabria	0.62g	2084	0.09
*	Valnerina	0.67g	2302	0.17
6.	Banja Luka	0.48g	1854	0.19
7.	Sicilia Orientale	0.57g	2015	0.13
	<b>PROSJEK ( 7 potresa )</b>	<b>0.46g</b>	<b>1821 kN</b>	<b>0.16 m</b>

U analizi proračuna potresne otpornosti konstrukcije pomoću nelinearne dinamičke analize odgovora u vremenu može se napraviti proračun za minimalno tri zapisa akcelelograma stvarnih potresa, te kao mjerodavan rezultat iz analize uzeti najnepovoljnije djelovanje od promatrane tri potresne pobude, odnosno potresna otpornost konstrukcije bila bi jednaka dobivenoj najmanjoj vrijednosti slomnog vršnog ubrzanja tla  $a_{gr,d}$ .

Konkretno, kod promatranog 5-katnog armirano-betonskog okvira u  $x$  smjeru, ukoliko bi jedan od tri analizirana zapisa stvarnih potresa bio zapis Campano Lucano tada bi potresna otpornost promatranog 5-katnog armirano-betonskog okvira bila jednaka dobivenoj najmanjoj vrijednosti slomnog vršnog ubrzanja tla, a ona bi iznosila 0.29g.

Uočava se da bi se dobila značajna razlika u potresnoj otpornosti analiziranog 5-katnog armirano-betonskog okvira u  $x$  smjeru ukoliko bi se izabrala druga tri zapisa potresa koja daju znatno više slomno vršno ubrzanja tla  $a_{gr,d}$ . Na primjer, ukoliko bi proveli inkrementalnu dinamičku analizu zapisima akcelelograma potresa Calabria, Valnerina i Sicilia Orientale tada bi potresna otpornost 5-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava iznosila 0.57g.

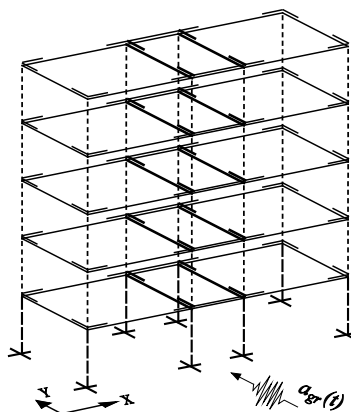
Stoga se mjerodavnije pokazuje, te je i preporučljivo uzeti sedam ili više zapisa akcelelograma realnih potresa, a kao mjerodavan rezultat dinamičkog odgovora usvojiti prosjek dobivenih rezultata za najmanje sedam analiziranih zapisa stvarnih potresa.

Konkretno, na primjeru 5-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava odbačena je najveća vrijednost slomnog vršnog ubrzanja tla za potres Valnerina u iznosu 0.67g, te uzimajući u obzir prosjek dobivenih slomnih vršnih ubrzanja preostalih sedam zapisa akcelelograma potresa, dobiva se potresna otpornost promatranog okvira u  $x$  smjeru od 0.46g.

Prosječna ukupna poprečna sila na bazu modela iznosi 1821 kN, a prosječni maksimalni pomak vrha 5-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava u  $x$  smjeru iznosi 0.16 m.

### 5.1.2 Dinamički odgovor 5-katnog prostornog armirano-betonskog okvira – smjer $y$

Istovjetni postupak koji je opisan u prethodnoj točki proveden je za vremensku dinamičku analizu 5-katnog prostornog armirano-betonskog okvirnog sustava iz *primjera 1*, ali u  $y$  smjeru.



**Crtež 5.6** Prostorni 5-katni a/b okvir opterećen zapisima akcelelograma stvarnih potresa u y smjeru

U programu *SeismoStruct* zadan je model 5-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava čija svojstva su zadana na način da odgovaraju analiziranom okviru iz *primjera 1*, koji je prikazan u drugom poglavlju ovog rada.

Analizirani 5-katni armirano-betonski okvir izložen je vremenskim zapisima akcelelograma osam stvarnih potresa, te se promatra potresna otpornost konstrukcije u y smjeru. Dinamički odgovor sustava dobiven je programskim paketom *SeismoStruct*, postupkom inkrementalne dinamičke analize.

U tablici 5.2 dani su rezultati analize dinamičkog odgovora 5-katnog armirano-betonskog okvira u y smjeru opterećenog zapisima akcelelograma osam stvarnih potresa. Kao rezultati dinamičkog odgovora prikazano je slomno vršno ubrzanje tla  $a_{gr,d}$ , ukupna slomna poprečna sila na bazu modela  $F_{d,y}$  i maksimalni pomak vrha 5-katnog armirano-betonskog okvira  $d_{d,y}$ .

**Tablica 5.2** Dinamički odgovor 5-katnog a/b okvira – smjer y

	Potres	$a_{gr,d}$	$F_{d,y}$ [kN]	$d_{d,y}$ [m]
1.	Montenegro	0.37g	1660	0.14
2.	Campano Lucano	0.33g	1892	0.23
3.	Aigion	0.48g	1750	0.19
4.	Olfus	0.27g	1308	0.15
5.	Calabria	0.55g	1703	0.15
*	Valnerina	0.69g	1534	0.17
6.	Banja Luka	0.43g	1820	0.16
7.	Sicilia Orientale	0.55g	1733	0.17
	<b>PROSJEK ( 7 potresa )</b>	<b>0.43g</b>	<b>1695 kN</b>	<b>0.17 m</b>

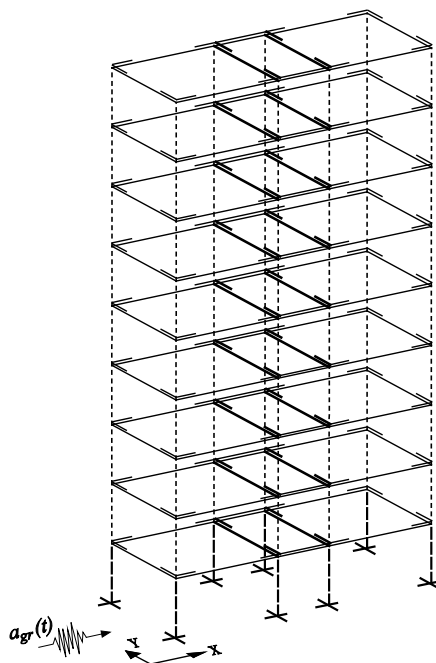
Na primjeru 5-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava u y smjeru odbačena je najveća vrijednost slomnog vršnog ubrzanja tla za potres Valnerina (\*), u iznosu 0.69g te uzimajući u obzir prosjek dobivenih slomnih vršnih ubrzanja  $a_{gr,d}$  od preostalih sedam zapisa potresa, dobiva se potresna otpornost promatranog okvira za y smjer u iznosu 0.43g.

Prosječna ukupna poprečna sila na bazu modela iznosi 1695 kN, a prosječni maksimalni pomak vrha 5-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava u y smjeru iznosi 0.17 m.

### 5.1.3 Dinamički odgovor 9-katnog prostornog armirano-betonskog okvira – smjer x

Proračun potresne otpornosti konstrukcije metodom inkrementalne dinamičke analize proveden je na primjeru 9-katnog prostornog armirano-betonskog okvirnog sustava iz *primjera 2* koji je predstavljen u okviru drugog poglavlja ovog rada.

Analizirani 9-katni armirano-betonski okvirni sustav opterećen je vremenskim zapisima akcelelograma osam stvarnih potresa, te se promatra potresna otpornost konstrukcije u x smjeru za svaku potresnu pobudu zasebno. Dinamički odgovor sustava dobiven je programskim paketom *SeismoStruct* u kojem je zadan model 9-katnog armirano-betonskog okvira sa identičnim svojstvima kao u *primjeru 2*.



**Crtež 5.7** Prostorni 9-katni a/b okvir opterećen zapisima akcelelograma stvarnih potresa u x smjeru

U tablici 5.3 prikazani su rezultati analize dinamičkog odgovora 9-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava u x smjeru opterećenog zapisima akcelelograma osam stvarnih potresa. Kao rezultati dinamičkog odgovora prikazano je slomno vršno ubrzanje tla  $a_{gr,d}$ , ukupna slomna poprečna sila na bazu  $F_{d,x}$  i maksimalni pomak vrha 5-katnog armirano-betonskog okvira  $d_{d,x}$ .



**Tablica 5.3** Dinamički odgovor 9-katnog a/b okvira – smjer  $x$ 

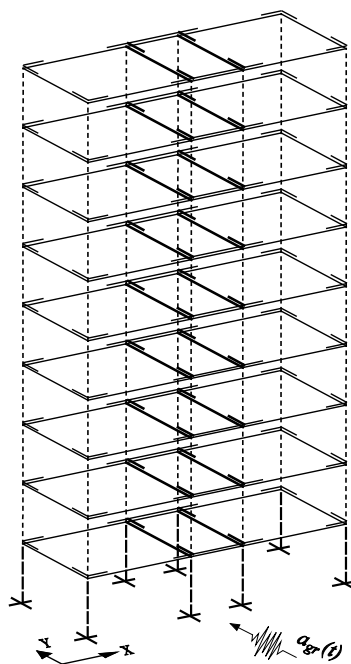
	Potres	$a_{gr,d}$	$F_{d,x}$ [kN]	$d_{d,x}$ [m]
1.	Montenegro	0.28g	1290	0.19
2.	Campano Lucano	0.30g	1595	0.23
3.	Aigion	0.45g	1790	0.21
4.	Olfus	0.32g	1200	0.18
*	<i>Calabria</i>	<i>0.60g</i>	<i>1780</i>	<i>0.11</i>
5.	Valnerina	0.28g	1600	0.17
6.	Banja Luka	0.35g	1570	0.14
7.	Sicilia Orientale	0.36g	1830	0.20
	<b>PROSJEK ( 7 potresa )</b>	<b>0.33g</b>	<b>1554 kN</b>	<b>0.19 m</b>

Na primjeru 9-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava u  $x$  smjeru odbačena je najveća vrijednost slomnog vršnog ubrzanja tla za potres Calabria (\*) u iznosu 0.60g, te uzimajući u obzir prosjek dobivenih slomnih vršnih ubrzanja  $a_{gr,d}$  od preostalih sedam zapisa potresa, dobiva se potresna otpornost 9-katnog armirano-betonskog okvira u iznosu 0.33g.

Prosječna ukupna poprečna sila na bazu modela iznosi 1554 kN, a prosječni maksimalni pomak vrha 9-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava u  $x$  smjeru iznosi 0.19 m.

#### 5.1.4 Dinamički odgovor 9-katnog prostornog armirano-betonskog okvira – smjer $y$

Postupak proračuna potresne otpornosti metodom inkrementalne dinamičke analize proveden je i za 9-katni prostorni armirano-betonski okvirni sustav iz *primjera 2* u  $y$  smjeru.

**Crtež 5.8** Prostorni 9-katni a/b okvir opterećen zapisima akcelelograma stvarnih potresa u  $y$  smjeru

Dinamički odgovor sustava dobiven je programskim paketom *SeismoStruct* u kojem je zadan model 9-katnog armirano-betonskog okvira s identičnim svojstvima kao u *primjeru 2*.

Rezultati analize dinamičkog odgovora 9-katnog armirano-betonskog okvira u *y* smjeru opterećenog zapisima akcelelograma osam stvarnih potresa dani su u tablici 5.4. Kao rezultati dinamičkog odgovora prikazano je slomno vršno ubrzanje tla  $a_{gr,d}$ , ukupna slomna poprečna sila na bazu modela  $F_{d,y}$  i maksimalni pomak vrha 9-katnog armirano-betonskog okvira  $d_{d,y}$ .

**Tablica 5.4** Dinamički odgovor 9-katnog a/b okvira – smjer *y*

	Potres	$a_{gr,d}$	$F_{d,y}$ [kN]	$d_{d,y}$ [m]
1.	Montenegro	0.30g	1270	0.21
2.	Campano Lucano	0.25g	1645	0.33
3.	Aigion	0.42g	1745	0.27
4.	Olfus	0.27g	1190	0.19
*	Calabria	0.58g	1764	0.16
5.	Valnerina	0.33g	1695	0.27
6.	Banja Luka	0.36g	1605	0.10
7.	Sicilia Orientale	0.33g	1540	0.20
	<b>PROSJEK ( 7 potresa )</b>	<b>0.32g</b>	<b>1527 kN</b>	<b>0.22 m</b>

Odbačena je najveća vrijednost slomnog vršnog ubrzanja tla koja je dobivena za potresnu pobudu Calabria (\*), koja iznosi 0.58g. Kao mjerodavan rezultat potresne otpornosti uzet je prosjek dobivenih rezultata dinamičkog odgovora za seriju od preostalih sedam zapisa realnih potresa. Izračunata potresna otpornost promatranog 9-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava u *y* smjeru iznosu 0.32g.

Prosječna ukupna poprečna sila na bazu modela iznosi 1527 kN, a prosječni maksimalni pomak vrha 9-katnog armirano-betonskog okvira u *y* smjeru iznosi 0.22 m.

## 5.2 VALIDACIJA METODE CILJANOG UBRZANJA

U okviru ovog poglavlja provedena je validacija metode ciljanog ubrzanja s dinamičkim odgovorom sustava na osnovu slomnog vršnog ubrzanja podloge  $a_{gr,d}$  koje je dobiveno inkrementalnom dinamičkom analizom povećavajući amplitude stvarnih potresa dok se ne dođe do sloma promatranog sustava.

U tablici 5.5 na primjerima 5-katnog i 9-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava prikazana je usporedba rezultata višemodalne metode naguravanja pri linearnoj (L) kombinaciji modova uz 3/3 iskoristivosti pomaka na krivulji nosivosti i uz elastični spektar s izračunatim

ekvivalentnim viskoznom prigušenjem s rezultatima dinamičkog odgovora istih analiziranih sustava dobivenih programskim paketom za nelinearnu analizu *SeismoStruct*.

U tablici 5.5 kao mjerodavni rezultati dinamičkog odgovora sustava prikazane su prosječne vrijednosti slomnog vršnog ubrzanja podloge  $a_{gr,d}$  i prosječna slomna poprečna sila na bazu  $F_d$ , koje su prethodno izračunate i prikazane u tablicama 5.1 do 5.4.

Iz višemodalne metode naguravanja pri linearnoj (L) kombinaciji modova, za validaciju metode ciljanog ubrzanja, korišteno je ciljano ubrzanje podloge  $a_{gr,u}$  dobiveno uz 3/3 iskoristivosti pomaka na krivulji nosivosti i uz elastični spektar s izračunatim ekvivalentnim viskoznom prigušenjem čije izračunavanje je opisano u četvrtom poglavlju ovog rada.

**Tablica 5.5** Usporedba rezultata metode ciljanog ubrzanja pri linearnoj (L) kombinaciji modova uz 3/3 iskoristivosti pomaka na krivulji nosivosti s rezultatima dobivenim dinamičkim odgovorom sustava

a/b okvir	smjer	Pomak = $d_t = 3/3 d_u$			Dinamički odgovor	
		prigušenje [%]	$a_{gr,u}$	$F_L$ [kN]	$a_{gr,d}$	$F_d$ [kN]
5-katni	x	28	0.46	2145	0.46	1821
5-katni	y	29	0.455	1914	0.43	1695
9-katni	x	34	0.34	1842	0.33	1554
9-katni	y	27	0.34	1888	0.32	1527

Prikazani rezultati dinamičkog odgovora 5-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava za smjer  $x$  prema tablici 5.1 kao prosjek od sedam promatranih zapisa akcelelograma stvarnih potresa daju slomno vršno ubrzanje tla  $a_{gr,d} = 0.46g$ , što pokazuje izvrsno slaganje slomnog vršnog ubrzanja tla iz dinamičkog odgovora s ciljanim ubrzanjem tla  $a_{gr,u} = 0.46g$ , dobivenim višemodalnom metodom naguravanja za linearnu (L) kombinaciju modova za smjer  $x$  pri 3/3 iskoristivosti maksimalnog pomaka na krivulji nosivosti uz elastični spektar s izračunatim realnim 28% prigušenjem.

Prosječna ukupna slomna poprečna sila u presjecima pri bazi proračunskog modela 5-katnog armirano-betonskog okvira za smjer  $x$  iz dinamičkog odgovora za sedam promatranih stvarnih potresa iznosi  $F_{d,x} = 1821$  kN, što je 85% od iznosa sile dobivene višemodalnom metodom naguravanja pri linearnoj (L) kombinaciji modova ( $F_L = 2145$  kN).

Rezultati dinamičkog odgovora 5-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava za smjer  $y$  prema tablici 5.2 kao prosjek od sedam promatranih zapisa akcelelograma stvarnih potresa daju slomno vršno ubrzanje tla  $a_{gr,d} = 0.43g$ , što isto tako pokazuje vrlo dobro slaganje slomnog vršnog ubrzanja tla iz dinamičkog odgovora s ciljanim ubrzanjem tla  $a_{gr,u} = 0.455g$ , dobivenim višemodalnom metodom naguravanja za linearnu (L) kombinaciju modova za smjer  $y$  pri 3/3 iskoristivosti maksimalnog pomaka na krivulji nosivosti uz elastični spektar s izračunatim 29% prigušenjem.

Prosječna ukupna slomna poprečna sila u presjecima pri bazi proračunskog modela 5-katnog armirano-betonskog okvira za smjer  $y$  iz dinamičkog odgovora za sedam promatranih stvarnih potresa iznosi  $F_{d,y} = 1695$  kN, što je 89% od iznosa sile dobivene višemodalnom metodom naguravanja pri linearnoj (L) kombinaciji modova ( $F_L = 1914$  kN).

Prikazani rezultati dinamičkog odgovora 9-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava za smjer  $x$  prema tablici 5.3 kao prosjek od sedam promatranih zapisa akcelelograma stvarnih potresa daju slomno vršno ubrzanje podloge  $a_{gr,d} = 0.33g$  što pokazuje vrlo dobro slaganje slomnog vršnog ubrzanja podloge iz dinamičkog odgovora s ciljanim ubrzanjem podloge  $a_{gr,u} = 0.34g$ , dobivenim višemodalnom metodom naguravanja za linearnu (L) kombinaciju modova za smjer  $x$  pri 3/3 iskoristivosti maksimalnog pomaka na krivulji nosivosti uz elastični spektar s izračunatim realnim 34% prigušenjem.

Prosječna ukupna slomna poprečna sila u presjecima pri bazi proračunskog modela 9-katnog armirano-betonskog okvira za smjer  $x$  iz dinamičkog odgovora za sedam promatranih realnih potresa iznosi  $F_{d,x} = 1554$  kN, što je 84% od iznosa sile dobivene višemodalnom metodom naguravanja pri linearnoj (L) kombinaciji modova ( $F_L = 1842$  kN).

Rezultati dinamičkog odgovora 9-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava za smjer  $y$  prema tablici 5.4 kao prosjek od sedam promatranih zapisa akcelelograma stvarnih potresa daju slomno vršno ubrzanje podloge  $a_{gr,d} = 0.32g$  što pokazuje vrlo dobro slaganje slomnog vršnog ubrzanja podloge iz dinamičkog odgovora s ciljanim ubrzanjem podloge  $a_{gr,u} = 0.34g$ , dobivenim višemodalnom metodom naguravanja za linearnu (L) kombinaciju modova za smjer  $y$  pri 3/3 iskoristivosti maksimalnog pomaka na krivulji nosivosti uz elastični spektar s izračunatim realnim 27% prigušenjem.

Prosječna ukupna slomna poprečna sila u presjecima pri bazi proračunskog modela 9-katnog armirano-betonskog okvira za smjer  $y$  iz dinamičkog odgovora za sedam promatranih realnih

potresa iznosi  $F_{d,y} = 1527$  kN, što je 81% od iznosa sile dobivene višemodalnom metodom naguravanja pri linearnoj (L) kombinaciji modova ( $F_L = 1888$  kN).

Iz prikazane usporedbe rezultata, uvažavajući izračunato ekvivalentno viskozno prigušenje sustava te iskoristivost krivulje nosivosti do 3/3 maksimalog pomaka, usporedbom ciljanog ubrzanja  $a_{gr,u}$  višemodalne metode naguravanja uz linearnu (L) kombinaciju modova i slomnog vršnog ubrzanja podloge  $a_{gr,d}$  dobivenog dinamičkim odgovorom sustava metodom inkrementalne dinamičke analize pokazuje se vrlo dobro slaganje ciljanog ubrzanja  $a_{gr,u}$  i slomnog vršnog ubrzanja podloge  $a_{gr,d}$ .

Time se i dokazuje da je ekvivalentno viskozno prigušenje izračunato na način koji je opisan u četvrtom poglavlju ovoga rada realno.

## 6. PRAKTIČNA PRIMJENA CILJANOG UBRZANJA U VIŠEMODALNOJ METODI NAGURAVANJA

U ovom poglavlju izvršena je sinteza metode ciljanog ubrzanja, te je na primjerima 5-katnog i 9-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava prikazana praktična primjena određivanja ciljanog ubrzanja u višemodalnoj metodi naguravanja za ocjenu potresne otpornosti sustava. U proračun su uzeti elastični spektri s izračunatim realnim ekvivalentnim viskoznom prigušenjem kako je opisano u četvrtom poglavlju ovog rada, te je u određivanju spektralnog ubrzanja  $a_{s,i}$  pojedinog moda računato s 3/3 iskoristivosti pomaka na krivulji nosivosti.

Analiza je provedena uz linearnu (L) kombinaciju modova koja se pokazala nepovoljnijom od kombinacije kvadratnog korijena iz sume kvadrata modova (SRSS).

Pojednostavljeni postupak u praktičnoj primjeni metode ciljanog ubrzanja sastoji se u tome što je u ADRS format (spektar odgovora ubrzanje - pomak) uvučena samo krivulja nosivosti prvog vektora  $\phi_1$ , a analizirani viši vektori ( $\phi_2$  do  $\phi_5$ ) uvučeni su u ADRS format na način da su prezentirani s radijalnim pravcima koji odgovaraju periodu osciliranja  $T_i$  pojedinog višeg vektora.

## 6.1 SINTEZA METODE CILJANOG UBRZANJA ZA PRAKTIČNU PRIMJENU

U nastavku će se kroz niz koraka izložiti sinteza metode ciljanog ubrzanja za praktičnu primjenu pri ocjeni potresne otpornosti armirano-betonskih konstrukcija. Izložena je višemodalna metoda naguravanja, na način da je korištena linearna (L) kombinacija modova s obzirom da se pokazala nepovoljnijom od korijenske (SRSS) kombinacije modova.

Pojednostavljena metoda ciljanog ubrzanja za praktičnu primjenu se može opisati kroz sljedeći niz koraka:

- Prvo se rješenjem linearne dinamičke zadaće dobiju vlastiti vektori  $\phi_i$ , te podaci o pripadajućim periodima  $T_i$  i sudjelujućim masama  $m_{e,i}$ .

- Potom se izvrši zasebno naguravanje svih pet analiziranih vektora i dobiju se krivulje nosivosti vektora  $\phi_i$ , te ukupne slomne sile pojedinog vektora  $F_{fi}$ . Oblik vektora opterećenja odgovara obliku odgovarajućeg moda.

- Nakon toga, prema novoj formulaciji koja je prikazana u četvrtom poglavlju ovog rada izračuna se ekvivalentno viskozno prigušenje analiziranog sustava koje se određuje na osnovu krivulje nosivosti prvog vektora  $\phi_1$ . Pri tom se zahtijeva da izvršeni rad nelinearnog sustava bude jednak izvršenom radu zamjenjujućeg linearnog sustava sa sekantnom krutošću  $k_{sec}$ . Ekvivalentno viskozno prigušenje  $\xi$  dobije se izjednačavanjem utrošene energije tijekom jednog ciklusa osciliranja nelinearnog sustava i ekvivalentnog linearnog sustava, prema izrazu

$$\xi = \frac{E_D}{4 \pi E_S} \quad (6.1)$$

gdje  $E_D$  predstavlja energiju utrošenu u jednom ciklusu osciliranja nelinearnog sustava koja je jednaka površini unutar histerezne krivulje, a  $E_S$  utrošenu energiju u linearnom sustavu koja je jednaka površini trokuta, kao što je opisano u četvrtom poglavlju ovog rada.

- Odabere se konkretan tip elastičnog spektra (tip 1 ili tip 2) i tip tla (parametar tla  $S$ ), te se izračuna korekcijski faktor prigušenja  $\eta$  prema izrazu izloženom u [E2],

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5 + \xi}} \quad (6.2)$$

gdje  $\xi$  predstavlja ekvivalentno viskozno prigušenje izraženo u postotcima, a faktor  $\eta$  je potreban za definiranje spektra odgovora prema [E2].

- Potom se u ADRS format uvuče krivulja nosivosti samo prvog vektora  $\phi_1$ , a svi analizirani viši vektori ( $\phi_2$  do  $\phi_5$ ) prezentirani su radijalnim pravcima koji odgovaraju periodu osciliranja  $T_i$  pojedinog višeg vektora.

- Iterativni postupak određivanja ciljanog ubrzanja tla započinje izborom polaznog ubrzanja tla  $a_{gr}$ . Kako polazno ubrzanje tla može se odabrati bilo koja vrijednost, ili se da iterativni postupak ne bi eventualno dugo trajao, za prvi korak kao polazno ubrzanje tla može izabrati ubrzanje koje se dobije na temelju krivulje nosivosti prvog vektora  $\phi_1$  uvažavajući 2/3 iskoristivosti maksimalnog pomaka na krivulji nosivosti.

- Na takav način definiran je elastični spektar za izračunato polazno ubrzanje tla  $a_{gr}$ , na kojem se sada za prvi vektor  $\phi_1$  na temelju njegove krivulje nosivosti određuje odgovarajuća razina spektralnog ubrzanja  $a_{s,1}$  i spektralnog opterećenja  $F_1$  uzimajući u obzir 3/3 iskoristivosti pomaka na krivulji nosivosti. Spektralno ubrzanje promatranih viših vektora ( $a_{s,2}$  do  $a_{s,5}$ ) dobije se iz sjecišta radijalnih pravaca koji odgovaraju periodu osciliranja  $T_i$  pojedinog promatranog višeg vektora s konkretnim elastičnim spektrom. Time su određena i spektralna opterećenja  $F_i$  analiziranih viših vektora.

- Opći slomni vektor opterećenja formira se prema linearnoj (L) kombinaciji modova. Polazno granično opterećenje  $F_L = \sum F_i$ , za linearnu kombinaciju modova ovisi o odabranom polaznom ubrzanju tla  $a_{gr}$ , a može se prikazati u sljedećem obliku

$$F_L = \sum F_i = \sum \pm m_{e,i} a_{s,i} (a_{gr}) F_{fi} / |F_{fi}| \quad (6.3)$$

gdje izraz  $F_{fi}$  predstavlja slomnu silu za pojedini vlastiti vektor.

- Za ovako formirano opterećenje, odnosno opći slomni vektor, pomoću nelinearne analize konstrukcije metodom naguravanja određen je kapacitet nosivosti, odnosno računsko granično opterećenje  $F_f$ . Postavljeni zadatak se smatra riješenim kada je u granicama zadane točnosti postignuta jednakost opterećenja iz općeg slomnog vektora  $F_L$  i računskog graničnog opterećenja  $F_f$  za pretpostavljeno ubrzanje tla  $a_{gr}$ .

- Iterativnim putem u nekoliko koraka, za odabrano različito pretpostavljeno ubrzanje tla  $a_{gr}$  i pripadne vektore, dobije se ciljano ubrzanje tla  $a_{gr,u}$  koje predstavlja najmanje ubrzanje tla koje dovodi do graničnog stanja nosivosti konstrukcije, što definira najnižu potresnu otpornost sustava.



## 6.2 PRIMJENA METODE - PRIMJERI

Postupak primjene pojednostavljene metode ciljanog ubrzanja u višemodalnoj metodi naguravanja pokazan je na primjerima 5-katnog i 9-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava. Promatrani primjeri su isti kao i oni koji su prikazani u drugom poglavlju ovog rada.

Općenitost postupka ne gubi se u analizi okvira veće katnosti niti drugih konstrukcijskih sustava s tim što je u analizu nužno uključiti sve više značajne vektore.

### 6.2.1 Primjer 1: 5-katni prostorni armirano-betonski okvir

U prvom primjeru analiziran je 5-katni prostorni armirano-betonski okvirni sustav koji je prikazan na crtežu 2.7 i opisan u drugom poglavlju ovog rada.

#### 6.2.1.1 Određivanje ciljanog ubrzanja za smjer $x$

Rješenjem linearne dinamičke zadaće 5-katnog prostornog armirano-betonskog okvirnog sustava za smjer  $x$  dobiveni su vlastiti vektori  $\phi_i$ , te podaci o pripadajućim periodima  $T_i$  i sudjelujućim masama  $m_{e,i}$ , što je prikazano u tablici 6.1.

Potom su nelinearnom analizom konstrukcije, zasebnim naguravanjem svih pet promatranih vektora dobivene krivulje nosivosti, te ukupne slomne sile pojedinog vektora  $F_{fi}$ , čije vrijednosti su prikazane u tablici 6.1.

**Tablica 6.1** Svojstva vektora horizontalnog opterećenja 5-katnog a/b okvira za smjer  $x$

Vektor	$T_i$ [s]	$m_{e,i}$ [%]	$m_{e,i}$ [t]	$F_{fi}$ [kN]
$\phi_1$	0.839	81.47	688.42	1735
$\phi_2$	0.265	10.51	88.81	1823
$\phi_3$	0.146	4.12	34.81	2786
$\phi_4$	0.097	1.98	16.73	1954
$\phi_5$	0.076	0.67	5.66	1838

Oblik prvog vektora opterećenja u graničnom stanju i njemu pripadna krivulja nosivosti za smjer  $x$  prikazani su na crtežu 4.1.

Zatim je potrebno odrediti ekvivalentno viskozno prigušenje analiziranog sustava za što nam je potrebna histerezna, odnosno ciklička krivulja nosivosti nelinearnog sustava koja je prikazana

na crtežu 4.2, a određena je preko krivulje nosivosti prvog vlastitog vektora  $\phi_1$  5-katnog armirano-betonskog okvira za smjer  $x$ .

Povratni dio cikličke krivulje nosivosti do nultog iznosa sile je linearna funkcija, a nagib joj je definiran jednakošću površina  $A_1$  i  $A_2$ . Jednakost površina  $A_1$  i  $A_2$  zahtijeva se iz razloga da izvršeni rad nelinearnog sustava bude jednak izvršenom radu zamjenjujućeg linearnog sustava sa sekantnom krutošću  $k_{sec}$ .

Na crtežu 4.3 na primjeru 5-katnog armirano-betonskog okvira za smjer  $x$  prikazana je utrošena energija u jednom ciklusu osciliranja nelinearnog i ekvivalentnog linearnog sustava sa sekantnom krutošću  $k_{sec}$ .

Iz cikličke krivulje nosivosti definirane preko vektora  $\phi_1$  5-katnog armirano-betonskog okvira za smjer  $x$  određeno je ekvivalentno viskozno prigušenje sustava prema izrazu (6.4),

$$\xi = \frac{E_D}{4\pi E_S} = \frac{0.644}{4 \cdot \pi \cdot 0.180} = 0.28 \quad (6.4)$$

gdje  $E_D$  predstavlja energiju utrošenu u jednom ciklusu osciliranja nelinearnog sustava koja je jednaka površini unutar histerezne krivulje, a  $E_S$  utrošenu energiju u linearnom sustavu koja je jednaka površini trokuta, vidjeti crtež 4.3.

Dobiveno je 28% ekvivalentno viskozno prigušenje 5-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava za smjer  $x$ .

Promatran je elastični spektar tipa 1 i tlo tipa A (parametar tla  $S = 1.0$ ), a korekcijski faktor prigušenja  $\eta$  izračunat je prema izrazu

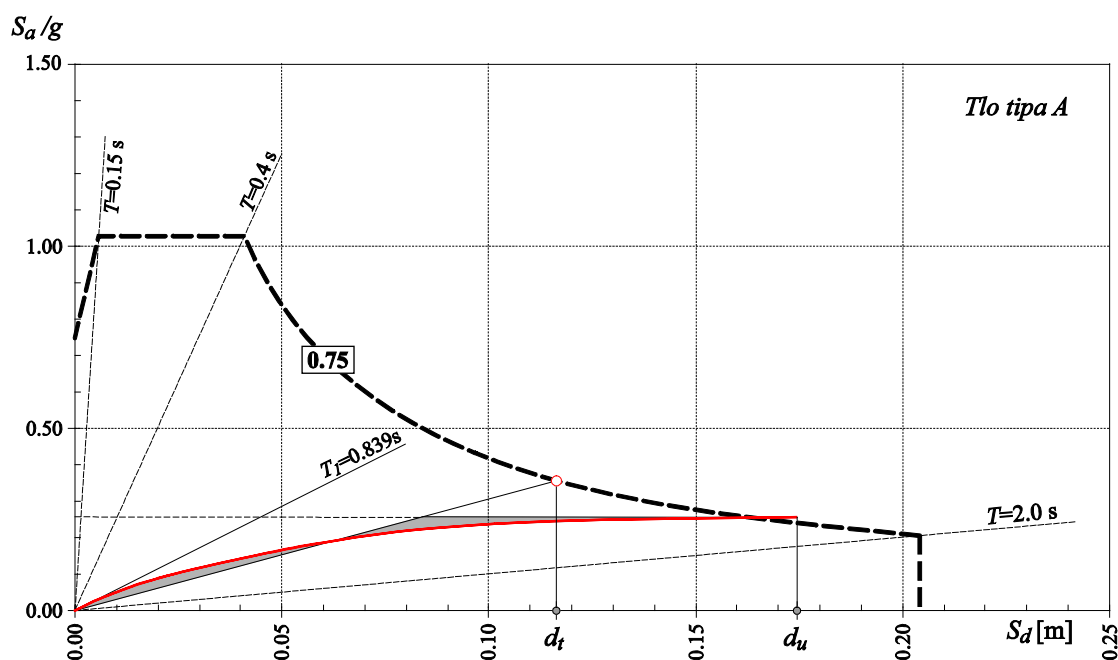
$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5 + \xi}} = \sqrt{\frac{10}{5 + 28}} = 0.5505 \quad (6.5)$$

gdje  $\xi$  predstavlja ekvivalentno viskozno prigušenje izraženo u postotcima [E2].

Nakon određivanja ekvivalentnog viskoznog prigušenja  $\xi$  ide se u iterativni postupak za određivanje ciljanog ubrzanja tla  $a_{gr,u}$ . Kao prvi korak potrebno je odrediti polazno ubrzanje tla  $a_{gr}$ , a kao polazno ubrzanje možemo izabrati ubrzanje koje dobijemo na temelju krivulje nosivosti prvog vektora  $\phi_1$  uvažavajući 2/3 iskoristivosti maksimalnog pomaka  $d_u$ .

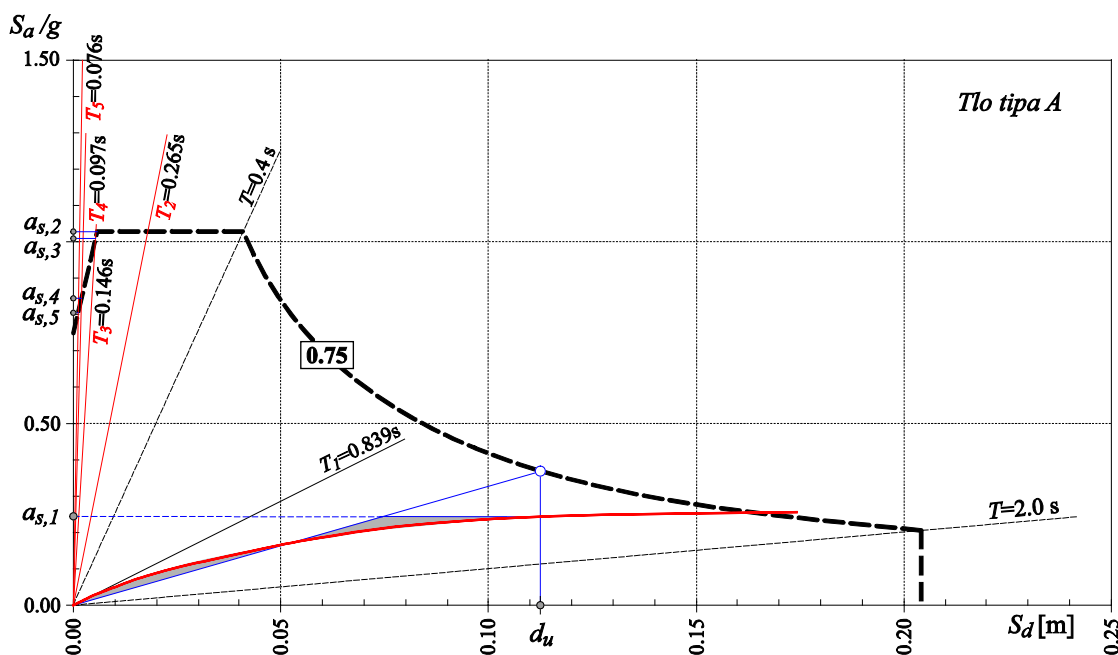
Na crtežu 6.1 prikazano je određivanje polaznog ubrzanja tla  $a_{gr}$ , odnosno elastičnog spektra za to polazno ubrzanje. U ADRS format uvučena je krivulja nosivosti samo prvog vektora  $\phi_1$ . Elastični spektar je definiran za izračunato 28% ekvivalentno viskozno prigušenje 5-katnog

armirano-betonskog okvira u  $x$  smjeru. Dobiven je spektar za polazno ubrzanje tla  $a_{gr}$  u iznosu 0.75g.



Crtež 6.1 Prvi korak – određivanje polaznog ubrzanja tla  $a_{gr}$  5-katnog a/b okvira za smjer  $x$

Na crtežu 6.2 prikazano je određivanje spektralnog ubrzanja tla  $a_{s,i}$  promatranih pet modova, 5-katnog armirano-betonskog okvira u  $x$  smjeru, za pretpostavljeno polazno ubrzanje tla  $a_{gr} = 0.75g$ , odnosno pokazan je prvi korak u iterativnom postupku određivanja ciljanog ubrzanja kod linearne (L) kombinacije modova. U ADRS format uvučena je krivulja nosivosti samo prvog vektora  $\phi_1$ , a svi analizirani viši vektori prezentirani su radijalnim pravcima koji odgovaraju periodu osciliranja  $T_i$  pojedinog višeg vektora, vidjeti crtež 6.2.



**Crtež 6.2** Određivanje spektralnog ubrzanja tla  $a_{s,i}$  promatranih vektora pri 3/3 iskoristivosti pomaka  $d_u$  uz elastični spektar s izračunatim 28% prigušenjem na primjeru 5-katnog a/b okvira za smjer  $x$

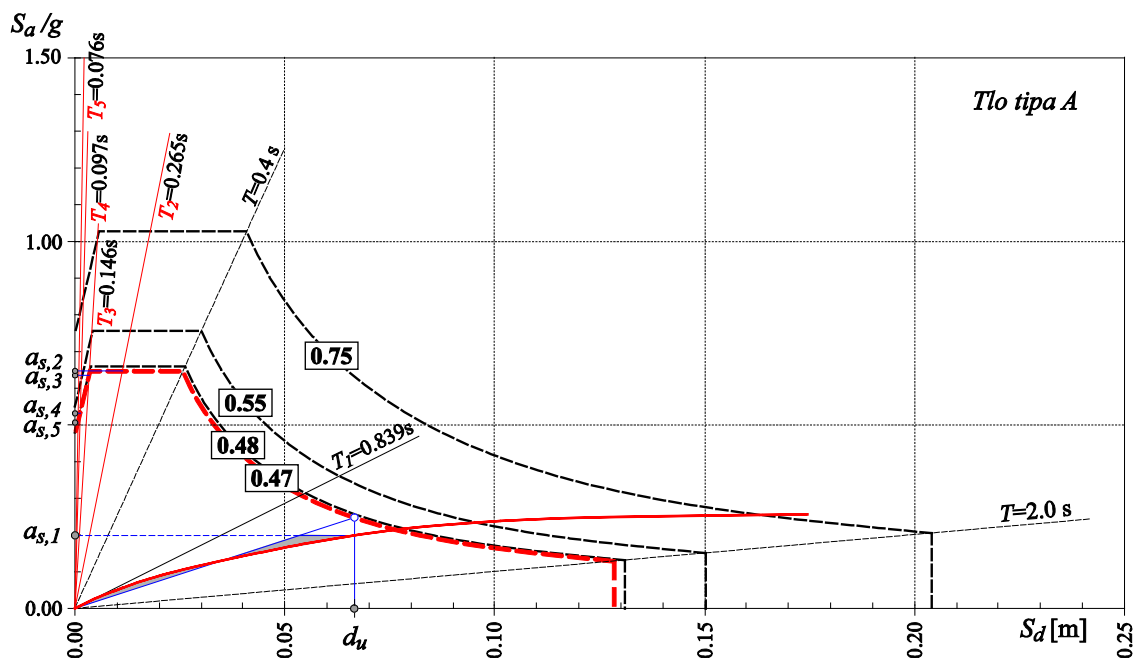
Za prvi vektor na temelju krivulje nosivosti, sa spektra za polazno ubrzanje tla od 0.75g, određeno je spektralno ubrzanje  $a_{s,1}$  i spektralno opterećenje  $F_1$  uzimajući u obzir 3/3 iskoristivosti pomaka  $d_u$  na krivulji nosivosti. Spektralno ubrzanje promatranih viših vektora  $a_{s,i}$  dobije se iz sjecišta radijalnih pravaca perioda osciliranja  $T_i$  pojedinog višeg vektora s konkretnim elastičnim spektrom za polazno ubrzanje tla od 0.75g.

U tablici 6.2 pokazan je iterativni tok metode s rezultatom za minimalno ubrzanje tla  $a_{gr}$ , za slučaj ciljanog ubrzanja linearne (L) kombinacije modova 5-katnog armirano-betonskog okvira za smjer  $x$ . Dobiveno ciljano ubrzanje tla iznosi  $a_{gr,u} = 0.47g$ , a njemu pripadna sila u presjeku pri bazi proračunskog modela iznosi  $F_L = 2233$  kN.

**Tablica 6.2** Ciljano ubrzanje pri linearnoj (L) kombinaciji modova 5-katnog a/b okvira za smjer  $x$  pri 3/3 iskoristivosti pomaka za elastični spektar s 28% prigušenjem, dobiven postupkom praktične primjene metode ciljanog ubrzanja

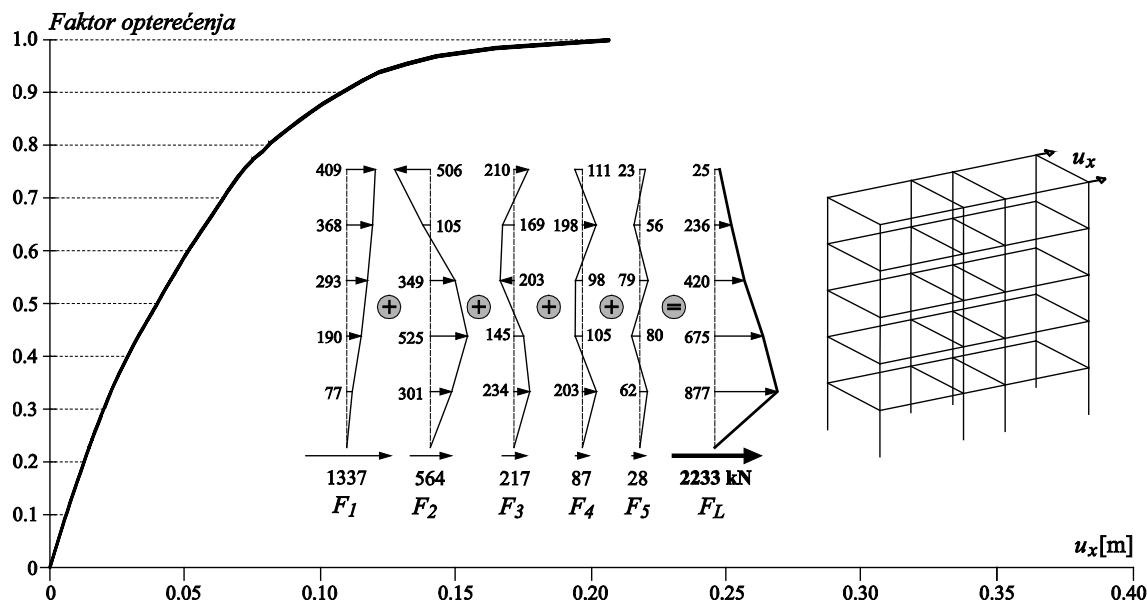
$a_{gr}$	$a_{s,1}$	$F_1$	$a_{s,2}$	$F_2$	$a_{s,3}$	$F_3$	$a_{s,4}$	$F_4$	$a_{s,5}$	$F_5$	$F_L = \sum F_i$	$F_f$	$F_f/F_L$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$	$\delta_5$
0.75	0.244	1648	1.032	899	1.009	345	0.845	139	0.804	45	3075	2275	0.74	0.33	1.38	1.35	1.13	1.08
0.55	0.219	1479	0.757	660	0.742	253	0.621	102	0.592	33	2527	2223	0.88	0.40	1.38	1.35	1.13	1.08
0.48	0.201	1357	0.660	575	0.647	221	0.541	89	0.516	29	2271	2225	0.98	0.42	1.38	1.35	1.13	1.08
<b>0.47</b>	0.198	1337	0.647	564	0.635	217	0.531	87	0.506	28	2233	2233	<b>1.00</b>	0.42	1.38	1.35	1.13	1.08

Na crtežu 6.3 prikazan je iterativni postupak u određivanju ciljanog ubrzanja tla, te su prikazana spektralna ubrzanja  $a_{s,i}$  promatranih pet vektora za posljednji iterativni korak koja odgovaraju dobivenom ciljanom ubrzanju tla  $a_{gr,u} = 0.47g$ .



Crtež 6.3 Iterativni postupak u određivanju ciljanog ubrzanja tla  $a_{gr,u}$  5-katnog a/b okvira za smjer  $x$

Na crtežu 6.4 prikazani su vektori opterećenja svih sudjelujućih modova  $F_i$ , opći slomni vektor  $F_L$ , kao i krivulja nosivosti za linearnu (L) kombinaciju modova 5-katnog armirano-betonskog okvira za smjer  $x$  pri 3/3 iskoristivosti pomaka uz elastični spektar s 28% prigušenjem.



Crtež 6.4 Krivulja nosivosti za linearnu (L) kombinaciju modova 5-katnog a/b okvira, za smjer  $x$  pri 3/3 iskoristivosti pomaka uz elastični spektar s 28% prigušenjem, dobivena postupkom praktične primjene metode ciljanog ubrzanja

### 6.2.1.2 Određivanje ciljanog ubrzanja za smjer y

U nastavku je analiziran 5-katni prostorni armirano-betonski okvirni sustav za smjer y, a promatrani okvir je prikazan na crtežu 2.7 i opisan u drugom poglavlju ovog rada.

Rješenjem linearne dinamičke zadaće dobiveni su vlastiti vektori  $\phi_i$ , te podaci o pripadajućim periodima  $T_i$  i sudjelujućim masama  $m_{e,i}$ , što je prikazano u tablici 6.3.

Nelinearnom analizom konstrukcije, odnosno zasebnim naguravanjem svih pet promatranih vektora dobivene su krivulje nosivosti, te ukupne slomne sile pojedinog vektora  $F_{fi}$  za y smjer.

**Tablica 6.3** Svojstva vektora horizontalnog opterećenja 5-katnog a/b okvira za smjer y

Vektor	$T_i$ [s]	$m_{e,i}$ [%]	$m_{e,i}$ [t]	$F_{fi}$ [kN]
$\phi_1$	0.953	80.34	678.87	1427
$\phi_2$	0.293	10.94	92.44	1572
$\phi_3$	0.156	4.51	38.11	2593
$\phi_4$	0.101	2.27	19.18	2146
$\phi_5$	0.077	0.78	6.59	1576

Oblik prvog vektora opterećenja u graničnom stanju i njemu pripadna krivulja nosivosti za smjer y prikazani su na crtežu 4.4.

Zatim je potrebno odrediti ekvivalentno viskozno prigušenje analiziranog sustava za što nam je potrebna histerezna, odnosno ciklička krivulja nosivosti nelinearnog sustava koja je prikazana na crtežu 4.5, a određena je preko krivulje nosivosti prvog vlastitog vektora  $\phi_1$  5-katnog armirano-betonskog okvira za smjer y.

Na crtežu 4.6 na primjeru 5-katnog armirano-betonskog okvira za smjer y prikazana je utrošena energija u jednom ciklusu osciliranja nelinearnog i ekvivalentnog linearnog sustava sa sekantnom krutošću  $k_{sec}$ .

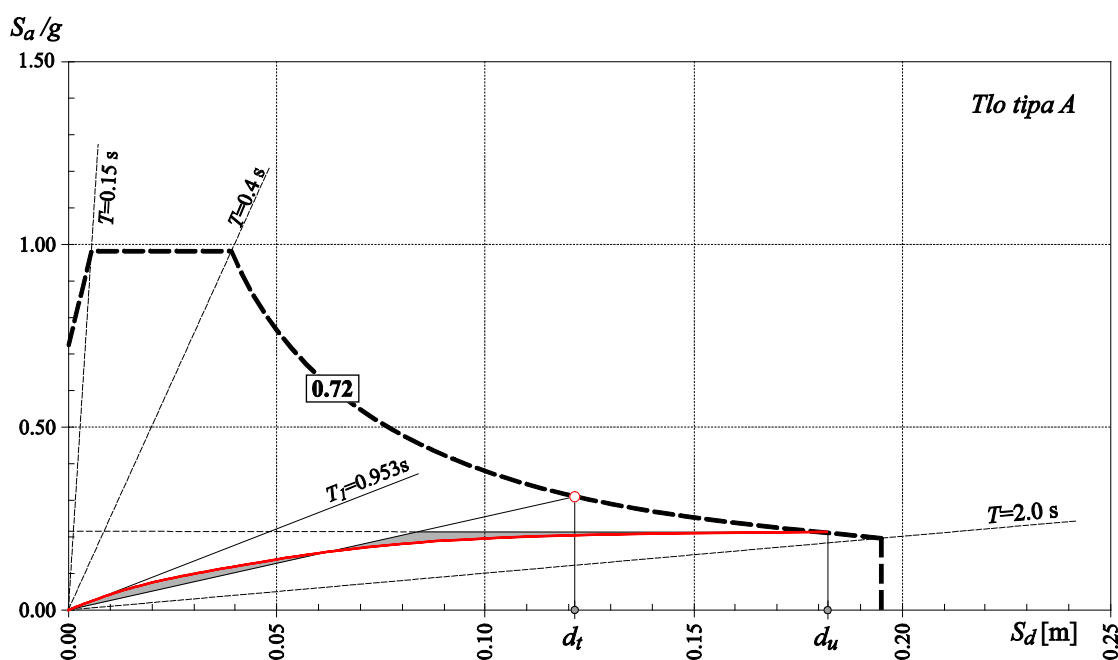
Iz cikličke krivulje nosivosti definirane preko vektora  $\phi_1$  5-katnog armirano-betonskog okvira za smjer y određeno je ekvivalentno viskozno prigušenje sustava prema izrazu (6.6) i navedenoj formulaciji.

$$\xi = \frac{E_D}{4\pi E_S} = \frac{0.796}{4 \cdot \pi \cdot 0.215} = 0.29 \quad (6.6)$$

Dobiveno je 29% ekvivalentno viskozno prigušenje promatranog 5-katnog armirano-betonskog okvira za smjer y.

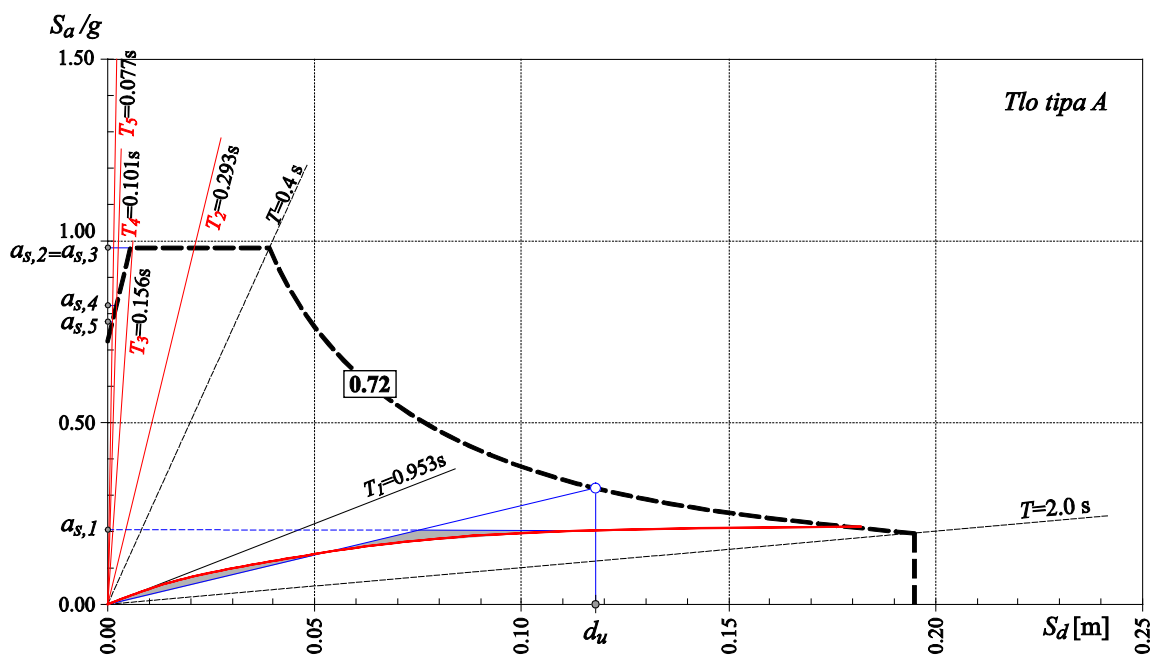
Nakon određivanja ekvivalentnog viskozno prigušenja  $\zeta$  ide se u iterativni postupak za određivanje ciljanog ubrzanja tla  $a_{gr,u}$ . Kao prvi korak potrebno je odrediti polazno ubrzanje tla  $a_{gr}$ , a kao polazno ubrzanje uzeto je ubrzanje dobiveno na temelju krivulje nosivosti prvog vektora  $\phi_I$  uvažavajući 2/3 iskoristivosti maksimalnog pomaka  $d_u$ .

Na crtežu 6.5 prikazano je određivanje polaznog ubrzanja tla  $a_{gr}$ , odnosno elastičnog spektra za to polazno ubrzanje. U ADRS format uvučena je krivulja nosivosti samo prvog vektora  $\phi_I$ . Elastični spektar je definiran za izračunato 29% ekvivalentno viskozno prigušenje 5-katnog armirano-betonskog okvira u y smjeru. Dobiven je spektar za polazno ubrzanje tla  $a_{gr}$  u iznosu 0.72g.



Crtež 6.5 Prvi korak – određivanje polaznog ubrzanja tla  $a_{gr}$  5-katnog a/b okvira za smjer y

Na crtežu 6.6 prikazano je određivanje spektralnog ubrzanja tla  $a_{s,i}$  promatranih pet modova, 5-katnog armirano-betonskog okvira u y smjeru, za pretpostavljeno polazno ubrzanje tla  $a_{gr} = 0.72g$ , odnosno pokazan je prvi korak u iterativnom postupku određivanja ciljanog ubrzanja kod linearne (L) kombinacije modova. U ADRS format uvučena je krivulja nosivosti samo prvog vektora  $\phi_I$ , a svi analizirani viši vektori prezentirani su radijalnim pravcima koji odgovaraju periodu osciliranja  $T_i$  pojedinog višeg vektora, vidjeti crtež 6.6.



**Crtež 6.6** Određivanje spektralnog ubrzanja tla  $a_{s,i}$  promatranih vektora pri 3/3 iskoristivosti pomaka  $d_u$  uz elastični spektar s izračunatim 29% prigušenjem na primjeru 5-katnog a/b okvira za smjer y

Za prvi vektor na temelju krivulje nosivosti, sa spektra za polazno ubrzanje tla od 0.72g, određeno je spektralno ubrzanje  $a_{s,1}$  i spektralno opterećenje  $F_1$  uzimajući u obzir 3/3 iskoristivosti pomaka  $d_u$  na krivulji nosivosti. Spektralno ubrzanje promatranih viših vektora  $a_{s,i}$  dobije se iz sjecišta radijalnih pravaca perioda osciliranja  $T_i$  pojedinog višeg vektora s konkretnim elastičnim spektrom za polazno ubrzanje tla od 0.72g.

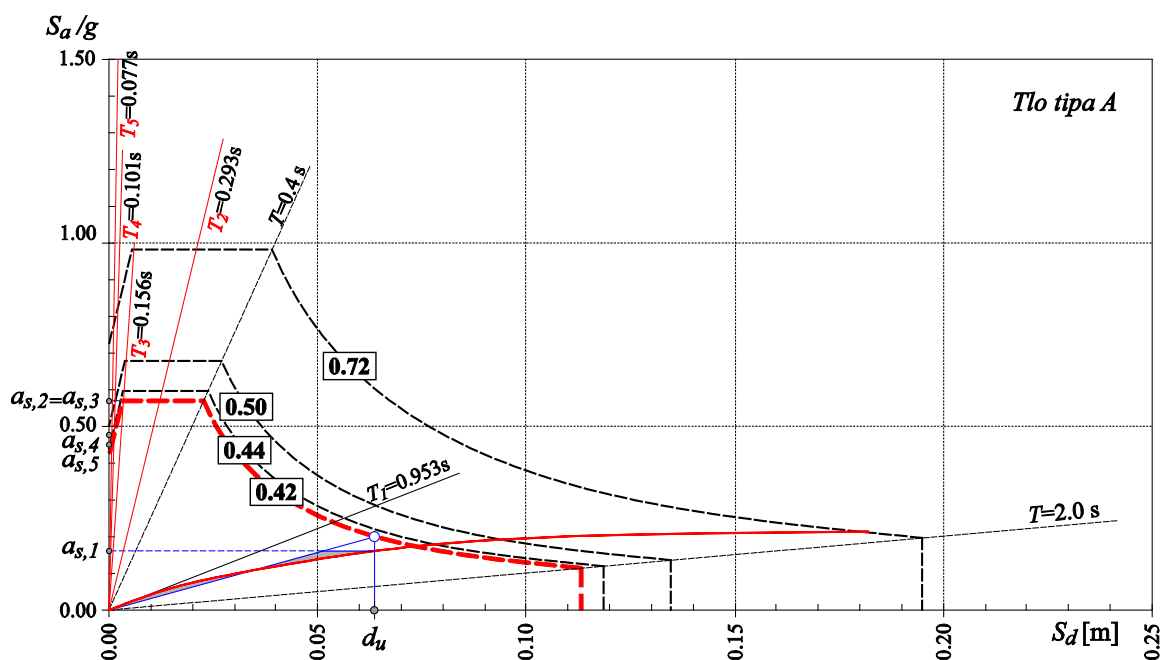
U tablici 6.4 pokazan je iterativni tok metode s rezultatom za minimalno ubrzanje tla  $a_{gr}$ , za slučaj ciljanog ubrzanja linearne (L) kombinacije modova 5-katnog armirano-betonskog okvira za smjer y. Dobiveno ciljano ubrzanje tla iznosi  $a_{gr,u} = 0.42g$ , a njemu pripadna sila u presjeku pri bazi proračunskog modela iznosi  $F_L = 1920$  kN.

**Tablica 6.4** Ciljano ubrzanje pri linearnoj (L) kombinaciji modova 5-katnog a/b okvira za smjer y pri 3/3 iskoristivosti pomaka za elastični spektar s 29% prigušenjem, dobiven postupkom praktične primjene metode ciljanog ubrzanja

$a_{gr}$	$a_{s,1}$	$F_1$	$a_{s,2}$	$F_2$	$a_{s,3}$	$F_3$	$a_{s,4}$	$F_4$	$a_{s,5}$	$F_5$	$F_L = \sum F_i$	$F_f$	$F_f/F_L$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$	$\delta_5$
0.72	0.205	1365	0.981	890	0.981	367	0.822	155	0.778	50	2827	2007	0.71	0.28	1.36	1.36	1.14	1.08
0.50	0.179	1192	0.678	615	0.678	253	0.568	107	0.537	35	2202	1938	0.88	0.36	1.36	1.36	1.14	1.07
0.44	0.166	1106	0.596	540	0.596	223	0.500	94	0.472	31	1993	1894	0.95	0.38	1.35	1.35	1.14	1.07
<b>0.42</b>	0.161	1072	0.569	516	0.569	213	0.477	90	0.451	29	1920	1920	<b>1.00</b>	0.38	1.35	1.35	1.14	1.07

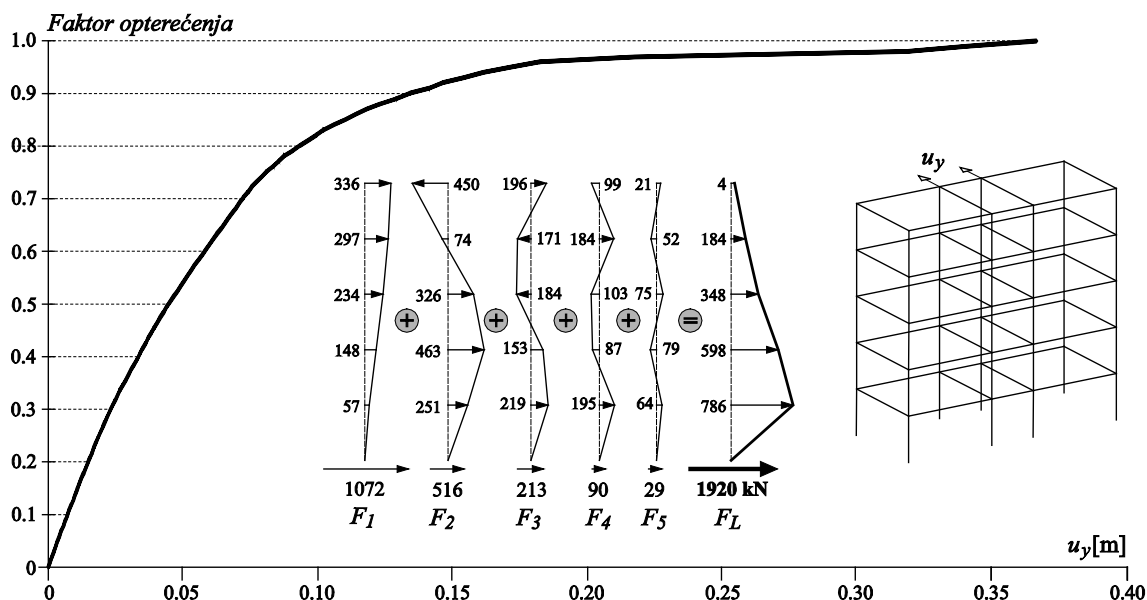
Na crtežu 6.7 prikazan je iterativni postupak u određivanju ciljanog ubrzanja tla, te su prikazana spektralna ubrzanja  $a_{s,i}$  promatranih pet vektora za posljednji iterativni korak koja odgovaraju dobivenom ciljanom ubrzanju tla  $a_{gr,u} = 0.42g$ .





Crtež 6.7 Iterativni postupak u određivanju ciljanog ubrzanja tla  $a_{gr,u}$  5-katnog a/b okvira za smjer y

Na crtežu 6.8 prikazani su vektori opterećenja svih sudjelujućih modova  $F_i$ , opći slomni vektor  $F_L$ , kao i krivulja nosivosti za linearnu (L) kombinaciju modova 5-katnog armirano-betonskog okvira za smjer y pri 3/3 iskoristivosti pomaka uz elastični spektar s 28% prigušenjem.



Crtež 6.8 Krivulja nosivosti za linearnu (L) kombinaciju modova 5-katnog a/b okvira, za smjer y pri 3/3 iskoristivosti pomaka uz elastični spektar s 29% prigušenjem, dobivena postupkom praktične primjene metode ciljanog ubrzanja

Izvršena je usporedba rezultata dobivenih praktičnom primjenom višemodalne metode ciljanog ubrzanja, prema kojoj je u ADRS format (spektar odgovora ubrzanje – pomak) uvučena samo krivulja nosivosti prvog vektora  $\phi_1$ , a svi viši vektori ( $\phi_2$  do  $\phi_5$ ) su prezentirani radijalnim

pravcima koji odgovaraju periodu osciliranja pojedinog vektora  $T_i$ , s rezultatima dobivenim višemodalnom metodom naguravanja prema linearnoj (L) kombinaciji modova pri 3/3 iskoristivosti pomaka na krivulji nosivosti uz elastični spektar s izračunatim realnim ekvivalentnim viskoznim prigušenjem ali uz uvlačenje svih pet promatranih krivulja nosivosti u ADRS format.

Za ocjenu točnosti praktične primjene metode ciljanog ubrzanja prikazani su i rezultati dinamičkog odgovora 5-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava koji su dobiveni inkrementalnom dinamičkom analizom provedenom u okviru petog poglavlja ovog rada. Usporedba rezultata izložena je u tablici 6.5.

**Tablica 6.5** Usporedba rezultata metode ciljanog ubrzanja 5-katnog a/b okvira dobivenih korištenjem svih krivulja nosivosti u ADRS formatu, te rezultata dobivenih praktičnom primjenom metode pri linearnoj (L) kombinaciji modova uz 3/3 iskoristivosti pomaka i dinamičkog odgovora sustava

a/b okvir	smjer	prigušenje [%]	Pomak = $d_t = 3/3 d_u$ SVE KRIVULJE NOSIVOSTI		Pomak = $d_t = 3/3 d_u$ PRIMJENA		Dinamički odgovor	
			$a_{gr,u}$	$F_L$ [kN]	$a_{gr,u}$	$F_L$ [kN]	$a_{gr,d}$	$F_d$ [kN]
5-katni	x	28	0.46	2145	0.47	2233	0.46	1821
5-katni	y	29	0.455	1914	0.42	1920	0.43	1695

Na osnovu rezultata prikazanih u tablici 6.5 uočava se da se ciljano ubrzanje  $a_{gr,u}$  dobiveno praktičnom primjenom višemodalne metode ciljanog ubrzanja (u ADRS format uvučena samo krivulja nosivosti prvog vektora  $\phi_1$ ) ne razlikuje značajno od rezultata ubrzanja podloge dobivenog uvlačenjem svih pet krivulja nosivosti u ADRS format. Isto tako vidi se da je u oba slučaja približno ista razina slomne sile  $F_L$ .

Ciljano ubrzanje  $a_{gr,u}$  dobiveno praktičnom primjenom metode ciljanog ubrzanje jako malo odstupa od slomnog vršnog ubrzanja podloge  $a_{gr,d}$  što je samo potvrda za korištenje praktične primjene metode ciljanog ubrzanja u višemodalnoj metodi naguravanja.

U tablici 6.6 prikazana je usporedba sljedećih rezultata proračuna. Izneseni su rezultati dobivenog ciljanog ubrzanja i pripadne sile na bazu proračunskog modela, i to za prvi vektor promatran samostalno, te za linearnu (L) kombinaciju modova 5-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava za smjerove  $x$  i  $y$  za 2/3 iskoristivosti pomaka na krivulji nosivosti uz elastični spektar s 5% prigušenjem. Također su prikazani i rezultati praktične primjene višemodalne metode naguravanja pri linearnoj (L) kombinaciji modova uz 3/3 iskoristivosti pomaka i uz

elastični spektar s izračunatim ekvivalentnim viskoznim prigušenjem, kao i rezultati slomnog vršnog ubrzanja podloge  $a_{gr,d}$  i ukupne slomne poprečne sile na bazi  $F_d$  dobivenih dinamičkim odgovorom 5-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava za smjerove  $x$  i  $y$ .

**Tablica 6.6** Usporedba ciljanog ubrzanja 5-katnog a/b okvirnog sustava pri linearnoj (L) kombinaciji modova uz 2/3 i 3/3 iskoristivosti pomaka uz elastični spektar s izračunatim ekvivalentnim viskoznim prigušenjem s rezultatima dinamičkog odgovora sustava

a/b okvir	smjer	Pomak = $d_t = 2/3 d_u$			Pomak = $d_t = 3/3 d_u$ PRIMJENA			Dinamički odgovor			
		prigušenje [%]	$a_{gr,l}$	$F_l$ [kN]	$a_{gr,t}$	$F_L$ [kN]	prigušenje [%]	$a_{gr,u}$	$F_L$ [kN]	$a_{gr,d}$	$F_d$ [kN]
5-katni	x	5	0.405	1735	0.18	2197	28	0.47	2233	0.46	1821
5-katni	y	5	0.39	1427	0.17	1934	29	0.42	1920	0.43	1695

Iz dobivenih rezultata može se zaključiti da je ciljano ubrzanje tla  $a_{gr,u}$  za sustav 5-katnog armirano-betonskog okvira, dobiveno praktičnom primjenom metode ciljanog ubrzanja u višemodalnoj metodi naguravanja uz elastične spektre s izračunatim realnim viskoznim prigušenjem znatno veće u odnosu na ciljano ubrzanje  $a_{gr,t}$  dobiveno višemodalnim naguravanjem uz elastične spektre s 5% prigušenjem. U oba slučaja približno je ista razina slomne sile što je i logično da se sustav slama pri istom nivou opterećenja.

Iz dobivenih rezultata uočava se da je ciljano ubrzanje  $a_{gr,u}$  dobiveno praktičnom primjenom višemodalne metode naguravanja 5-katnog armirano-betonskog okvira za smjerove  $x$  i  $y$ , veće od ubrzanja podloge  $a_{gr,l}$  dobivenog prema kriteriju ciljanog pomaka za prvi vektor promatran samostalno prema europskoj normi EN 1998 (Dodatak B) [E2].

Primijećuje se izvrsno slaganje slomnog vršnog ubrzanja podloge  $a_{gr,d}$  iz dinamičkog odgovora sustava s ciljanim ubrzanjem podloge  $a_{gr,u}$  dobivenim praktičnom primjenom višemodalne metode naguravanja za linearnu (L) kombinaciju modova za smjerove  $x$  i  $y$  pri 3/3 iskoristivosti pomaka uz elastični spektar s izračunatim realnim viskoznim prigušenjem.

## 6.2.2 Primjer 2: 9-katni prostorni armirano-betonski okvir

U prvom primjeru analiziran je 9-katni prostorni armirano-betonski okvirni sustav koji je prikazan na crtežu 2.16 i opisan u drugom poglavlju ovog rada.

### 6.2.2.1 Određivanje ciljanog ubrzanja za smjer $x$

Rješenjem linearne dinamičke zadaće 9-katnog prostornog armirano-betonskog okvirnog sustava za smjer  $x$  dobiveni su vlastiti vektori  $\phi_i$ , te podaci o pripadajućim periodima  $T_i$  i sudjelujućim masama  $m_{e,i}$ , što je prikazano u tablici 6.7.

Potom su nelinearnom analizom konstrukcije, zasebnim naguravanjem svih pet promatranih vektora dobivene krivulje nosivosti, te ukupne slomne sile pojedinog vektora  $F_{fi}$ , čije vrijednosti su prikazane u tablici 6.7.

**Tablica 6.7** Svojstva vektora horizontalnog opterećenja 9-katnog a/b okvira za smjer  $x$

Vektor	$T_i$ [s]	$m_{e,i}$ [%]	$m_{e,i}$ [t]	$F_{fi}$ [kN]
$\phi_1$	1.547	80.44	1223.49	1349
$\phi_2$	0.502	10.04	152.71	1585
$\phi_3$	0.286	3.73	56.73	2021
$\phi_4$	0.194	2.05	31.18	1570
$\phi_5$	0.143	1.27	19.32	2494

Oblik prvog vektora opterećenja u graničnom stanju i njemu pripadna krivulja nosivosti za smjer  $x$  prikazani su na crtežu 4.7.

Zatim je potrebno odrediti ekvivalentno viskozno prigušenje analiziranog sustava za što nam je potrebna histerezna, odnosno ciklička krivulja nosivosti nelinearnog sustava koja je prikazana na crtežu 4.8, a određena je preko krivulje nosivosti prvog vlastitog vektora  $\phi_1$  9-katnog armirano-betonskog okvira za smjer  $x$ .

Na crtežu 4.9 na primjeru 9-katnog armirano-betonskog okvira za smjer  $x$  prikazana je utrošena energija u jednom ciklusu osciliranja nelinearnog i ekvivalentnog linearnog sustava sa sekantnom krutošću  $k_{sec}$ .

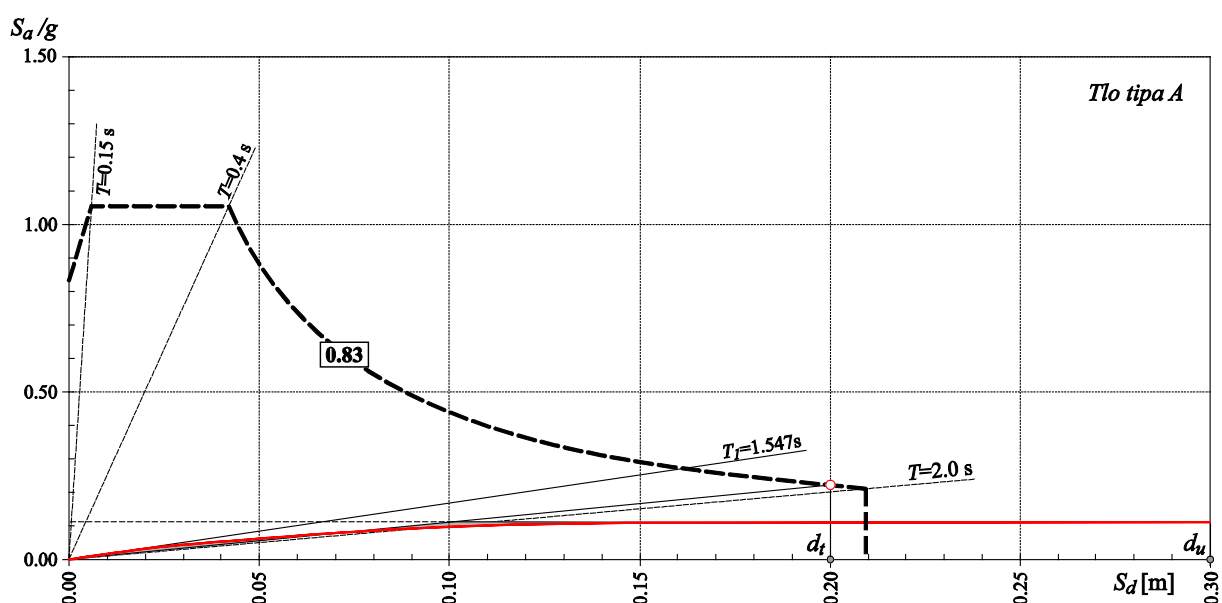
Iz cikličke krivulje nosivosti definirane preko vektora  $\phi_1$  9-katnog armirano-betonskog okvira za smjer  $x$  određeno je ekvivalentno viskozno prigušenje sustava prema izrazu (6.7) i navedenoj formulaciji.

$$\xi = \frac{E_D}{4\pi E_S} = \frac{1.500}{4 \cdot \pi \cdot 0.350} = 0.34 \quad (6.7)$$

Dobiveno je 34% ekvivalentno viskozno prigušenje promatranog 9-katnog armirano-betonskog okvira za smjer  $x$ .

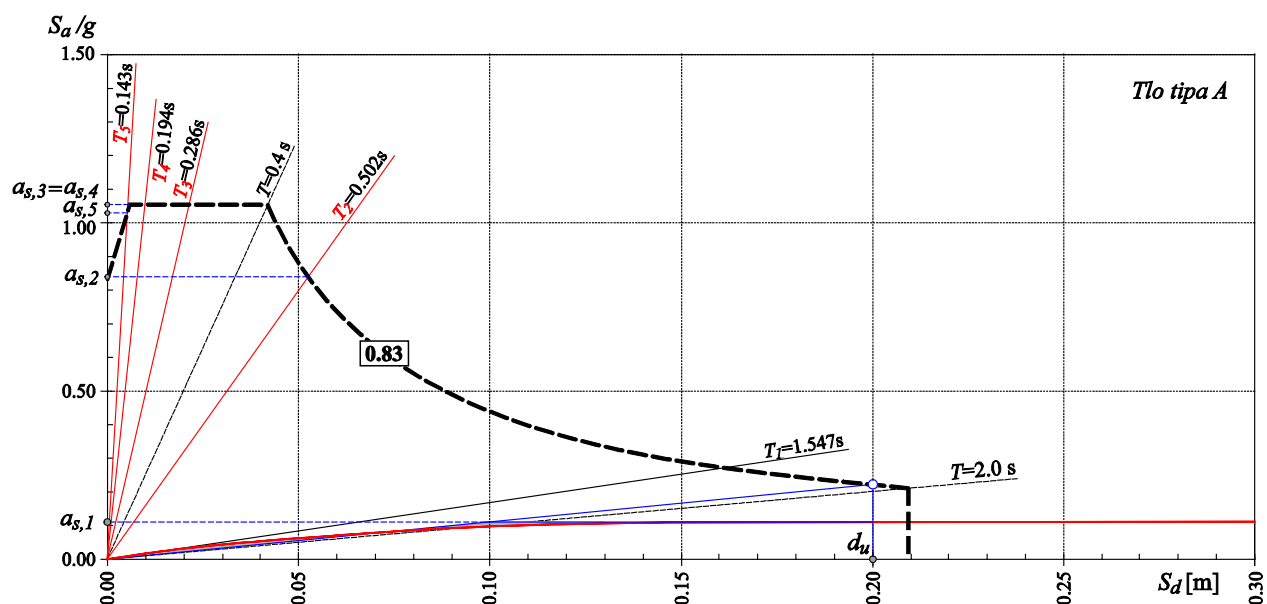
Nakon određivanja ekvivalentnog viskoznog prigušenja  $\zeta$  ide se u iterativni postupak za određivanje ciljanog ubrzanja tla  $a_{gr,u}$ . Kao prvi korak potrebno je odrediti polazno ubrzanje tla  $a_{gr}$ , a kao polazno ubrzanje uzeto je ubrzanje dobiveno na temelju krivulje nosivosti prvog vektora  $\phi_I$  uvažavajući 2/3 iskoristivosti maksimalnog pomaka  $d_u$ .

Na crtežu 6.9 prikazano je određivanje polaznog ubrzanja tla  $a_{gr}$ , odnosno elastičnog spektra za to polazno ubrzanje. U ADRS format uvučena je krivulja nosivosti samo prvog vektora  $\phi_I$ . Elastični spektar je definiran za izračunato 34% ekvivalentno viskozno prigušenje 9-katnog armirano-betonskog okvira u  $x$  smjeru. Dobiven je spektar za polazno ubrzanje tla  $a_{gr}$  u iznosu 0.83g.



Crtež 6.9 Prvi korak – određivanje polaznog ubrzanja tla  $a_{gr}$  9-katnog a/b okvira za smjer  $x$

Na crtežu 6.10 prikazano je određivanje spektralnog ubrzanja tla  $a_{s,i}$  promatranih pet modova, 9-katnog armirano-betonskog okvira u  $x$  smjeru, za pretpostavljeno polazno ubrzanje tla  $a_{gr} = 0.83g$ , odnosno pokazan je prvi korak u iterativnom postupku određivanja ciljanog ubrzanja kod linearne (L) kombinacije modova. U ADRS format uvučena je krivulja nosivosti samo prvog vektora  $\phi_I$ , a svi analizirani viši vektori prezentirani su radijalnim pravcima koji odgovaraju periodu osciliranja  $T_i$  pojedinog višeg vektora, vidjeti crtež 6.10.



**Crtež 6.10** Određivanje spektralnog ubrzanja tla  $a_{s,i}$  promatranih vektora pri 3/3 iskoristivosti pomaka  $d_u$  uz elastični spektar s izračunatim 34% prigušenjem na primjeru 9-katnog a/b okvira za smjer  $x$

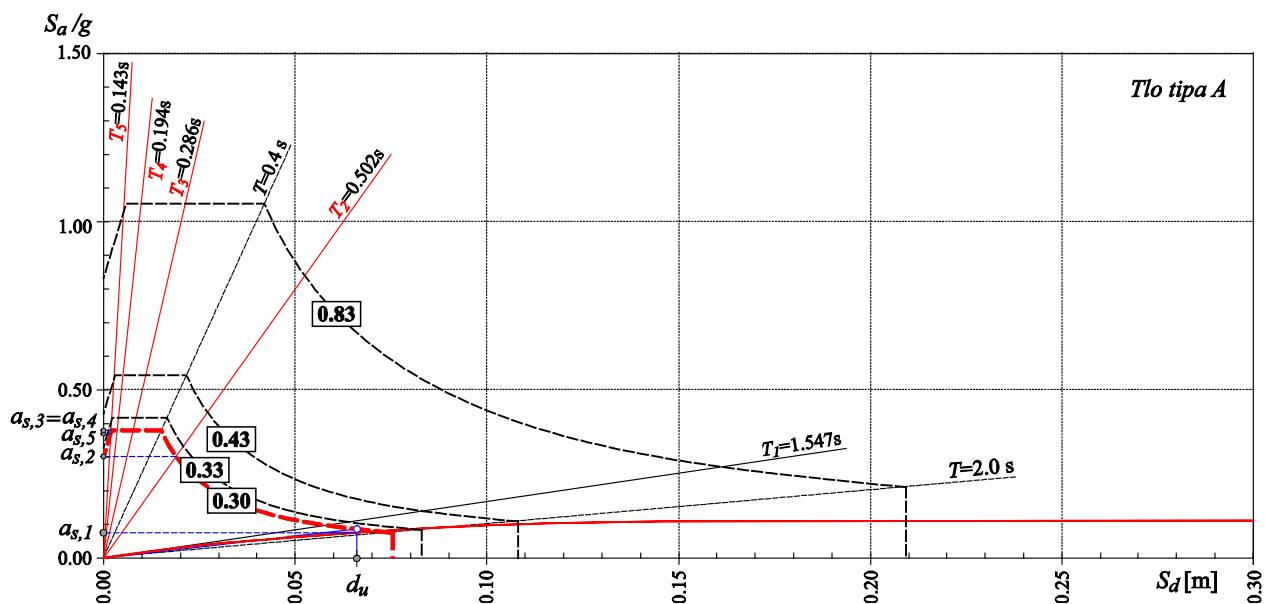
Za prvi vektor na temelju krivulje nosivosti, sa spektra za polazno ubrzanje tla od 0.83g, određeno je spektralno ubrzanje  $a_{s,1}$  i spektralno opterećenje  $F_1$  uzimajući u obzir 3/3 iskoristivosti pomaka  $d_u$  na krivulji nosivosti. Spektralno ubrzanje promatranih viših vektora  $a_{s,i}$  dobije se iz sjecišta radijalnih pravaca perioda osciliranja  $T_i$  pojedinog višeg vektora s konkretnim elastičnim spektrom za polazno ubrzanje tla od 0.83g.

U tablici 6.8 pokazan je iterativni tok metode s rezultatom za minimalno ubrzanje tla  $a_{gr}$ , za slučaj ciljanog ubrzanja linearne (L) kombinacije modova 9-katnog armirano-betonskog okvira za smjer  $x$ . Dobiveno ciljano ubrzanje tla iznosi  $a_{gr,u} = 0.30g$ , a njemu pripadna sila u presjeku pri bazi proračunskog modela iznosi  $F_L = 1762$  kN.

**Tablica 6.8** Ciljano ubrzanje pri linearnoj (L) kombinaciji modova 9-katnog a/b okvira za smjer  $x$  pri 3/3 iskoristivosti pomaka za elastični spektar s 34% prigušenjem, dobiven postupkom praktične primjene metode ciljanog ubrzanja

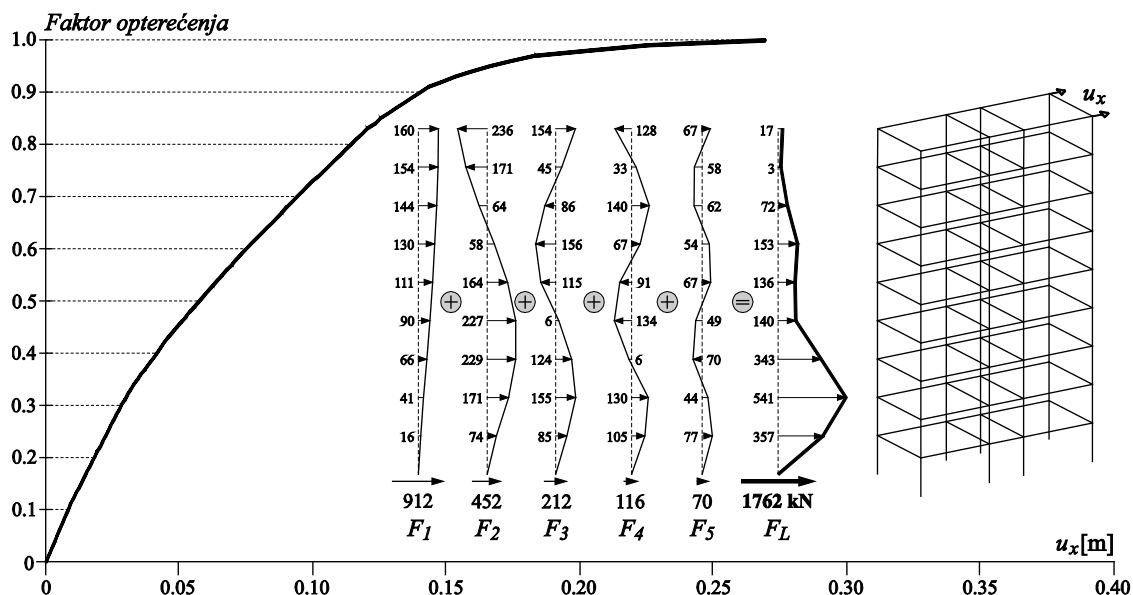
$a_{gr}$	$a_{s,1}$	$F_1$	$a_{s,2}$	$F_2$	$a_{s,3}$	$F_3$	$a_{s,4}$	$F_4$	$a_{s,5}$	$F_5$	$F_L = \sum F_i$	$F_f$	$F_f/F_L$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$	$\delta_5$
0.83	0.110	1320	0.839	1257	1.054	587	1.054	322	1.029	195	3681	1914	0.52	0.13	1.01	1.27	1.27	1.24
0.43	0.096	1152	0.434	650	0.544	303	0.544	166	0.531	101	2372	1827	0.77	0.22	1.01	1.27	1.27	1.23
0.33	0.081	972	0.330	494	0.418	233	0.418	128	0.405	77	1904	1732	0.91	0.25	1.01	1.27	1.27	1.23
<b>0.30</b>	0.076	912	0.302	452	0.380	212	0.380	116	0.371	70	1762	1762	<b>1.00</b>	0.25	1.01	1.27	1.27	1.24

Na crtežu 6.11 prikazan je iterativni postupak u određivanju ciljanog ubrzanja tla, te su prikazana spektralna ubrzanja  $a_{s,i}$  promatranih pet vektora za posljednji iterativni korak koja odgovaraju dobivenom ciljanom ubrzanju tla  $a_{gr,u} = 0.30g$ .



Crtež 6.11 Iterativni postupak u određivanju ciljanog ubrzanja tla  $a_{gr,u}$  9-katnog a/b okvira za smjer  $x$

Vektori opterećenja svih sudjelujućih modova  $F_i$ , opći slomni vektor  $F_L$ , kao i krivulja nosivosti za linearnu (L) kombinaciju modova 9-katnog armirano-betonskog okvira za smjer  $x$  pri 3/3 iskoristivosti pomaka uz elastični spektar s izračunatim 34% prigušenjem prikazani su na crtežu 6.12.



Crtež 6.12 Krivulja nosivosti za linearnu (L) kombinaciju modova 9-katnog a/b okvira, za smjer  $x$  pri 3/3 iskoristivosti pomaka za elastični spektar s 34% prigušenjem, dobivena postupkom praktične primjene metode ciljanog ubrzanja

### 6.2.2.2 Određivanje ciljanog ubrzanja za smjer y

U nastavku je provedena analiza 9-katnog prostornog armirano-betonskog okvirnog sustava za smjer y, a promatrani okvir je prikazan na crtežu 2.16 i opisan u drugom poglavlju ovog rada.

Rješenjem linearne dinamičke zadaće dobiveni su vlastiti vektori  $\phi_i$ , te podaci o pripadajućim periodima  $T_i$  i sudjelujućim masama  $m_{e,i}$ , što je prikazano u tablici 6.9.

Nelinearnom analizom konstrukcije, odnosno zasebnim naguravanjem svih pet promatranih vektora dobivene su krivulje nosivosti, te ukupne slomne sile pojedinog vektora  $F_{fi}$  za y smjer.

**Tablica 6.9** Svojstva vektora horizontalnog opterećenja 9-katnog a/b okvira za smjer y

Vektor	$T_i$ [s]	$m_{e,i}$ [%]	$m_{e,i}$ [t]	$F_{fi}$ [kN]
$\phi_1$	1.789	79.48	1208.89	1230
$\phi_2$	0.573	10.34	157.27	1454
$\phi_3$	0.319	3.89	59.17	1883
$\phi_4$	0.212	2.19	33.31	1659
$\phi_5$	0.152	1.41	21.45	2460

Oblik prvog vektora opterećenja u graničnom stanju i njemu pripadna krivulja nosivosti za smjer y prikazani su na crtežu 4.10.

Zatim je potrebno odrediti ekvivalentno viskozno prigušenje analiziranog sustava za što nam je potrebna histerezna, odnosno ciklička krivulja nosivosti nelinearnog sustava koja je prikazana na crtežu 4.11, a određena je preko krivulje nosivosti prvog vlastitog vektora  $\phi_1$  9-katnog armirano-betonskog okvira za smjer y.

Na crtežu 4.12 na primjeru 9-katnog armirano-betonskog okvira za smjer y prikazana je utrošena energija u jednom ciklusu osciliranja nelinearnog i ekvivalentnog linearnog sustava sa sekantnom krutošću  $k_{sec}$ .

Iz cikličke krivulje nosivosti definirane preko vektora  $\phi_1$  9-katnog armirano-betonskog okvira za smjer y određeno je ekvivalentno viskozno prigušenje sustava prema izrazu (6.8) i navedenoj formulaciji.

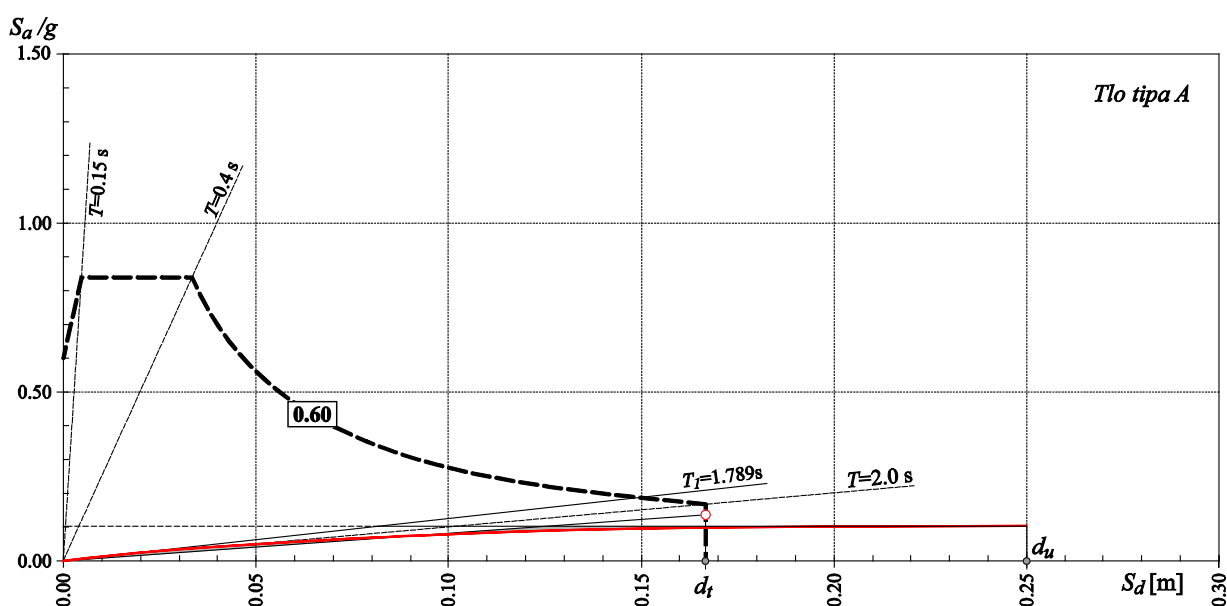
$$\xi = \frac{E_D}{4\pi E_S} = \frac{1.017}{4 \cdot \pi \cdot 0.304} = 0.27 \quad (6.8)$$

Dobiveno je 27% ekvivalentno viskozno prigušenje promatranog 9-katnog armirano-betonskog okvira za smjer y.



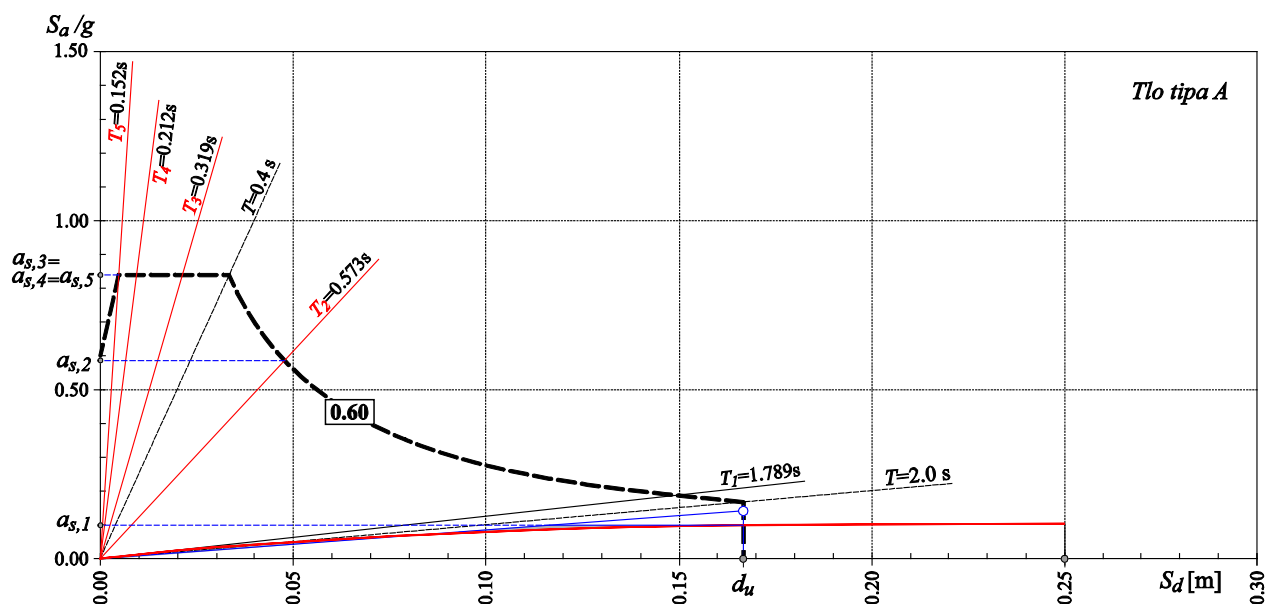
Nakon određivanja ekvivalentnog viskoznog prigušenja  $\zeta$  ide se u iterativni postupak za određivanje ciljanog ubrzanja tla  $a_{gr,u}$ . Kao prvi korak potrebno je odrediti polazno ubrzanje tla  $a_{gr}$ , a kao polazno ubrzanje uzeto je ubrzanje dobiveno na temelju krivulje nosivosti prvog vektora  $\phi_I$  uvažavajući 2/3 iskoristivosti maksimalnog pomaka  $d_u$ .

Na crtežu 6.13 prikazano je određivanje polaznog ubrzanja tla  $a_{gr}$ , odnosno elastičnog spektra za to polazno ubrzanje. U ADRS format uvučena je krivulja nosivosti samo prvog vektora  $\phi_I$ . Elastični spektar je definiran za izračunato 27% ekvivalentno viskozno prigušenje 9-katnog armirano-betonskog okvira u y smjeru. Dobiven je spektar za polazno ubrzanje tla  $a_{gr}$  u iznosu 0.60g.



Crtež 6.13 Prvi korak – određivanje polaznog ubrzanja tla  $a_{gr}$  9-katnog a/b okvira za smjer y

Na crtežu 6.14 prikazano je određivanje spektralnog ubrzanja tla  $a_{s,i}$  promatranih pet modova, 9-katnog armirano-betonskog okvira u y smjeru, za pretpostavljeno polazno ubrzanje tla  $a_{gr} = 0.60\text{g}$ , odnosno pokazan je prvi korak u iterativnom postupku određivanja ciljanog ubrzanja kod linearne (L) kombinacije modova. U ADRS format uvučena je krivulja nosivosti samo prvog vektora  $\phi_I$ , a svi analizirani viši vektori prezentirani su radijalnim pravcima koji odgovaraju periodu osciliranja  $T_i$  pojedinog višeg vektora, vidjeti crtež 6.14.



**Crtež 6.14** Određivanje spektralnog ubrzanja tla  $a_{s,i}$  promatranih vektora pri 3/3 iskoristivosti pomaka  $d_u$  uz elastični spektralni s izračunatim 27% prigušenjem na primjeru 9-katnog a/b okvira za smjer y

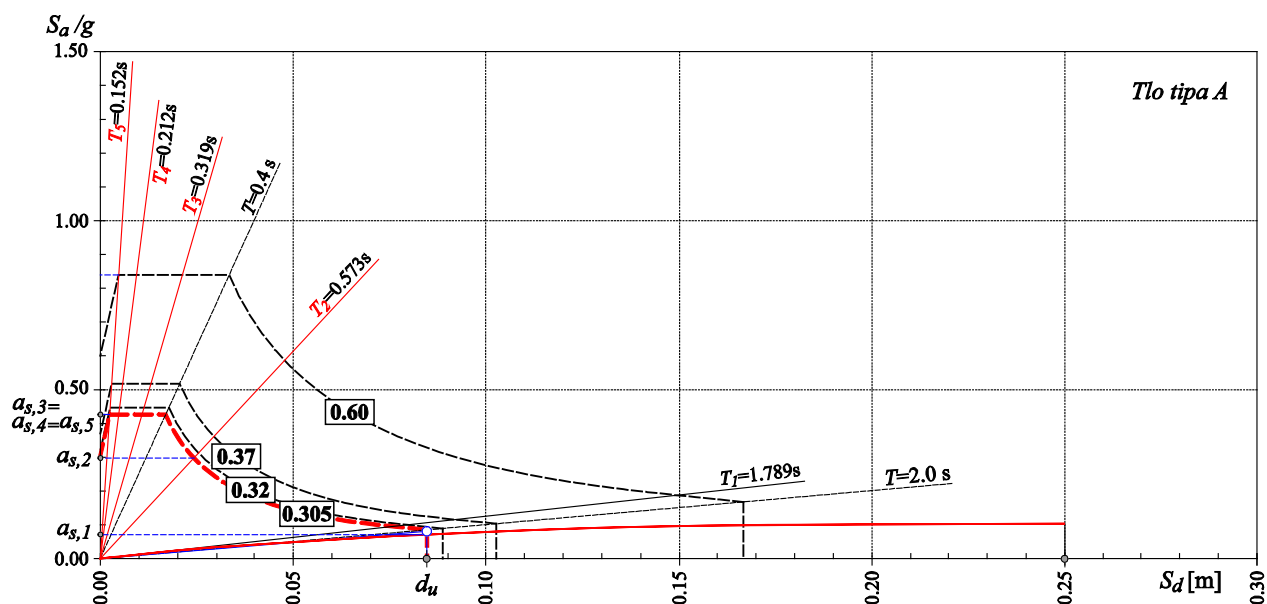
Za prvi vektor na temelju krivulje nosivosti, sa spektra za polazno ubrzanje tla od 0.60g, određeno je spektralno ubrzanje  $a_{s,1}$  i spektralno opterećenje  $F_1$  uzimajući u obzir 3/3 iskoristivosti pomaka  $d_u$  na krivulji nosivosti. Spektralno ubrzanje promatranih viših vektora  $a_{s,i}$  dobije se iz sjecišta radijalnih pravaca perioda osciliranja  $T_i$  pojedinog višeg vektora s konkretnim elastičnim spektrom za polazno ubrzanje tla od 0.60g.

U tablici 6.10 pokazan je iterativni tok metode s rezultatom za minimalno ubrzanje tla  $a_{gr}$ , za slučaj ciljanog ubrzanja linearne (L) kombinacije modova 9-katnog armirano-betonskog okvira za smjer y. Dobiveno ciljano ubrzanje tla iznosi  $a_{gr,u} = 0.305g$ , a njemu pripadna sila u presjeku pri bazi proračunskog modela iznosi  $F_L = 1778$  kN.

**Tablica 6.10** Ciljano ubrzanje pri linearnoj (L) kombinaciji modova 9-katnog a/b okvira za smjer y pri 3/3 iskoristivosti pomaka za elastični spektralni s 27% prigušenjem, dobiven postupkom praktične primjene metode ciljanog ubrzanja

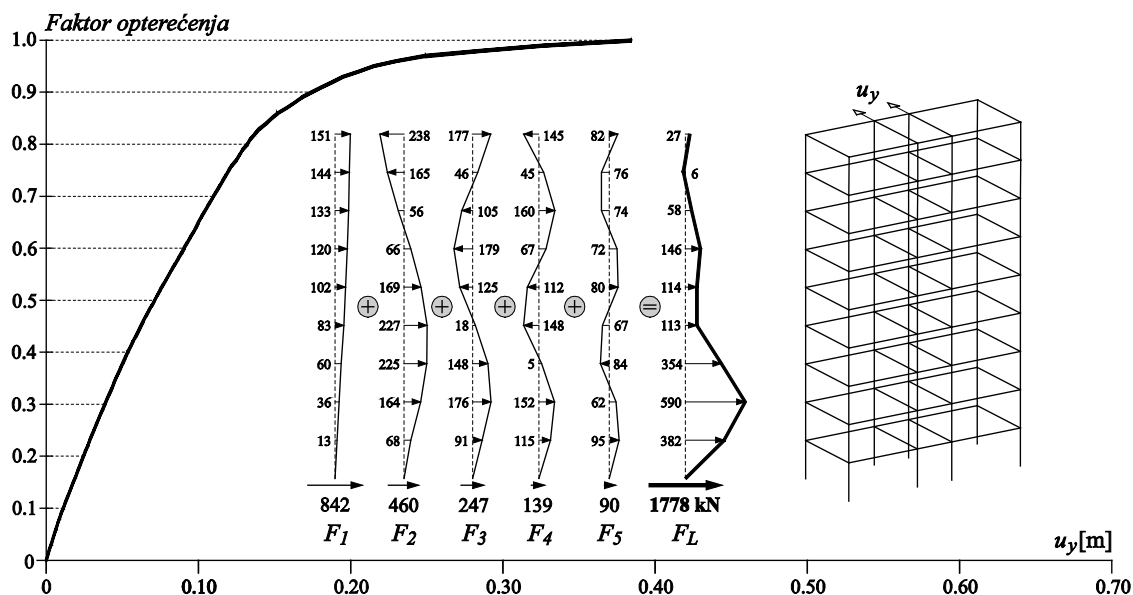
$a_{gr}$	$a_{s,1}$	$F_1$	$a_{s,2}$	$F_2$	$a_{s,3}$	$F_3$	$a_{s,4}$	$F_4$	$a_{s,5}$	$F_5$	$F_L = \sum F_i$	$F_f$	$F_f/F_L$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$	$\delta_5$
0.60	0.099	1174	0.586	904	0.839	487	0.839	274	0.839	177	3016	1870	0.62	0.17	0.98	1.40	1.40	1.40
0.37	0.080	949	0.361	557	0.517	300	0.517	169	0.517	109	2084	1813	0.87	0.22	0.98	1.40	1.40	1.40
0.32	0.074	878	0.312	481	0.447	259	0.447	146	0.447	94	1859	1766	0.95	0.23	0.98	1.40	1.40	1.40
<b>0.305</b>	0.071	842	0.298	460	0.426	247	0.426	139	0.426	90	1778	1778	<b>1.00</b>	0.23	0.98	1.40	1.40	1.40

Na crtežu 6.15 prikazan je iterativni postupak u određivanju ciljanog ubrzanja tla, te su prikazana spektralna ubrzanja  $a_{s,i}$  promatranih pet vektora za posljednji iterativni korak koja odgovaraju dobivenom ciljanom ubrzanju tla  $a_{gr,u} = 0.305g$ .



Crtež 6.15 Iterativni postupak u određivanju ciljanog ubrzanja tla  $a_{gr,u}$  9-katnog a/b okvira za smjer y

Vektori opterećenja svih sudjelujućih modova  $F_i$ , opći slomni vektor  $F_L$ , kao i krivulja nosivosti za linearnu (L) kombinaciju modova 9-katnog armirano-betonskog okvira za smjer y pri 3/3 iskoristivosti pomaka uz elastični spektar s izračunatim 27% prigušenjem prikazani su na crtežu 6.16.



Crtež 6.16 Krivulja nosivosti za linearnu (L) kombinaciju modova 9-katnog a/b okvira, za smjer y pri 3/3 iskoristivosti pomaka za elastični spektar s 27% prigušenjem, dobivena postupkom praktične primjene metode ciljanog ubrzanja

Na primjeru analiziranog 9-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava izvršena je usporedba rezultata dobivenih praktičnom primjenom višemodalne metode ciljanog ubrzanja, prema kojoj je u ADRS format (spektar odgovora ubrzanje – pomak) uvučena samo krivulja

nosivosti prvog vektora  $\phi_1$ , a svi viši vektori ( $\phi_2$  do  $\phi_5$ ) su prezentirani radijalnim pravcima koji odgovaraju periodu osciliranja pojedinog vektora  $T_i$ , s rezultatima dobivenim višemodalnom metodom naguravanja prema linearnoj (L) kombinaciji modova pri 3/3 iskoristivosti pomaka na krivulji nosivosti uz elastični spektar s izračunatim realnim ekvivalentnim viskoznom prigušenjem ali uz uvlačenje svih pet promatranih krivulja nosivosti u ADRS format.

Za ocjenu točnosti praktične primjene metode ciljanog ubrzanja prikazani su i rezultati dinamičkog odgovora 9-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava koji su dobiveni inkrementalnom dinamičkom analizom provedenom u okviru petog poglavlja ovog rada. Usporedba rezultata izložena je u tablici 6.11.

**Tablica 6.11** Usporedba rezultata metode ciljanog ubrzanja 9-katnog a/b okvira dobivenih korištenjem svih krivulja nosivosti u ADRS formatu, te rezultata dobivenih praktičnom primjenom metode pri linearnoj (L) kombinaciji modova uz 3/3 iskoristivosti pomaka i dinamičkog odgovora sustava

a/b okvir	smjer	prigušenje [%]	Pomak = $d_t = 3/3 d_u$ SVE KRIVULJE NOSIVOSTI		Pomak = $d_t = 3/3 d_u$ PRIMJENA		Dinamički odgovor	
			$a_{gr,u}$	$F_L$ [kN]	$a_{gr,u}$	$F_L$ [kN]	$a_{gr,d}$	$F_d$ [kN]
9-katni	x	34	0.34	1842	0.30	1762	0.33	1554
9-katni	y	27	0.34	1888	0.305	1778	0.32	1527

Na osnovu rezultata prikazanih u tablici 6.11 uočava se da se ciljano ubrzanje  $a_{gr,u}$  dobiveno praktičnom primjenom višemodalne metode ciljanog ubrzanja (u ADRS format uvučena samo krivulja nosivosti prvog vektora  $\phi_1$ ) ne razlikuje značajno od rezultata ubrzanja podloge dobivenog uvlačenjem svih pet krivulja nosivosti u ADRS format, a još je manje odstupanje od slomnog vršnog ubrzanja podloge  $a_{gr,d}$  što je kao i kod primjera 5-katnog armirano-betonskog okvira potvrda za korištenje praktične primjene metode ciljanog ubrzanja u višemodalnoj metodi naguravanja. Isto tako vidi se da je približno ista razina slomne sile  $F_L$ .

U tablici 6.12 prikazana je usporedba sljedećih rezultata proračuna. Izneseni su rezultati dobivenog ciljanog ubrzanja i pripadne sile na bazu proračunskog modela, i to za prvi vektor promatran samostalno, te za linearnu (L) kombinaciju modova 9-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava za smjerove x i y za 2/3 iskoristivosti pomaka na krivulji nosivosti uz elastični spektar s 5% prigušenjem. Također su prikazani i rezultati praktične primjene višemodalne metode naguravanja pri linearnoj (L) kombinaciji modova uz 3/3 iskoristivosti pomaka i uz elastični spektar s izračunatim ekvivalentnim viskoznom prigušenjem, kao i rezultati slomnog

vršnog ubrzanja podloge  $a_{gr,d}$  i ukupne slomne poprečne sile na bazi  $F_d$  dobivenih dinamičkim odgovorom 9-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava za smjerove  $x$  i  $y$ .

**Tablica 6.12** Usporedba ciljanog ubrzanja 9-katnog a/b okvirnog sustava pri linearnoj (L) kombinaciji modova uz 2/3 i 3/3 iskoristivosti pomaka uz elastični spektar s izračunatim ekvivalentnim viskozim prigušenjem s rezultatima dinamičkog odgovora sustava

a/b okvir	smjer	Pomak = $d_t = 2/3 d_u$				Pomak = $d_t = 3/3 d_u$ PRIMJENA			Dinamički odgovor		
		prigušenje [%]	$a_{gr,l}$	$F_l$ [kN]	$a_{gr,t}$	$F_L$ [kN]	prigušenje [%]	$a_{gr,u}$	$F_L$ [kN]	$a_{gr,d}$	$F_d$ [kN]
9-katni	x	5	0.45	1349	0.115	1831	34	0.30	1762	0.33	1554
9-katni	y	5	0.335	1230	0.11	1757	27	0.305	1778	0.32	1527

Iz dobivenih rezultata može se zaključiti da je ciljano ubrzanje  $a_{gr,u}$  za sustav 9-katnog armirano-betonskog okvira, dobiveno praktičnom primjenom metode ciljanog ubrzanja u višemodalnoj metodi naguravanja uz elastične spektre s izračunatim realnim viskozim prigušenjem znatno veće u odnosu na ciljano ubrzanje  $a_{gr,t}$  dobiveno višemodalnim naguravanjem uz elastične spektre s 5% prigušenjem. U oba slučaja približno je ista razina slomne sile što je i logično da se sustav slama pri istom nivou opterećenja.

Iz dobivenih rezultata uočava se da je ciljano ubrzanje  $a_{gr,u}$  dobiveno praktičnom primjenom višemodalne metode naguravanja 9-katnog armirano-betonskog okvira za smjerove  $x$  i  $y$  niže od ubrzanja podloge  $a_{gr,l}$  dobivenog prema kriteriju ciljanog pomaka za prvi vektor promatran samostalno prema europskoj normi EN 1998 (Dodatak B) [E2].

Primijećuje se vrlo dobro slaganje slomnog vršnog ubrzanja podloge  $a_{gr,d}$  iz dinamičkog odgovora sustava s ciljanim ubrzanjem podloge  $a_{gr,u}$  dobivenim praktičnom primjenom višemodalne metode naguravanja za linearnu (L) kombinaciju modova za smjerove  $x$  i  $y$  pri 3/3 iskoristivosti pomaka uz elastični spektar s izračunatim realnim viskozim prigušenjem.

Iz izvršenih analiza na primjerima 5-katnog i 9-katnog armirano-betonskog okvirnog sustava može se zaključiti da je postupak praktične primjene metode ciljanog ubrzanja u višemodalnoj metodi naguravanja jako dobar u određivanju potresne otpornosti armirano-betonskih okvirnih sustava s obzirom da se dobiveni rezultati ciljanog ubrzanja  $a_{gr,u}$  iz višemodalne metode naguravanja i slomnog vršnog ubrzanja podloge  $a_{gr,d}$  iz dinamičkog odgovora sustava jako dobro slažu.

Općenitost postupka praktične primjene metode ciljanog ubrzanja ne gubi se u analizi i drugih konstrukcijskih sustava s tim što je u analizu nužno uključiti sve više značajne vektore osciliranja.

U ovom poglavlju prezentirani praktični pojednostavnjeni postupak određivanja ciljanog ubrzanja tla u višemodalnoj metodi naguravanja može postati relativno jednostavan alat za praktičnu nelinearnu statičku analizu za ocjenu otpornosti armirano-betonskih konstrukcija izloženih potresnom djelovanju.

## 7. ZAKLJUČCI I PRAVCI DALJNJIH ISTRAŽIVANJA

U prvom dijelu ovog poglavlja iznijet će se osnovni zaključci koji proizlaze iz istraživanja i analiza provedenih u ovom radu kao i prednosti i nedostaci izložene metode ciljanog ubrzanja u višemodalnoj metodi naguravanja. U drugom dijelu navest će se neki mogući pravci daljnjih istraživanja.

### 7.1 ZAKLJUČCI

U ovom radu uveden je pojam *ciljanog ubrzanja*, a potom i formulacija postupka za određivanje ciljanog ubrzanja, definiranog kao najmanje ubrzanje baze koje dovodi do graničnog stanja nosivosti konstrukcije do kojega se dolazi višemodalnim naguravanjem sustava. Ciljano ubrzanje predstavlja najnižu potresnu otpornost sustava, a sam postupak njegovog određivanja temelji se na uzastopnoj primjeni nelinearne analize konstrukcije višemodalnom metodom naguravanja i uzastopnim traženjem ciljanog ubrzanja iterativnim putem.

U radu je prikazana i nova formulacija za određivanje ekvivalentnog viskoznog prigušenja sustava koje se dobiva pomoću izjednačavanja utrošene energije tijekom jednog ciklusa osciliranja nelinearnog sustava i ekvivalentnog linearnog sustava, uz uvjet da izvršeni rad nelinearnog sustava bude jednak izvršenom radu zamjenjujućeg linearnog sustava sa sekantnom krutošću.

Provedena je i validacija metode ciljanog ubrzanja u višemodalnoj metodi naguravanja s dinamičkim odgovorom sustava na osnovu slomnog vršnog ubrzanja podloge. Slomno vršno ubrzanje podloge dobiveno je metodom inkrementalne dinamičke analize. Za dinamičku pobudu sustava korišteni su zapisi akcelelograma stvarnih potresa koji su birani na način da kategorija tla na kojoj je potres zabilježen odgovara kategoriji tla projektirane građevine.

Originalni znanstveni doprinos ovog rada sastoji se u:

- Formulaciji pojma ciljanog ubrzanja, a potom formulaciji postupka za određivanje ciljanog ubrzanja.
- Dokazu da je kod okvirnih i mješovitih okvirnih i zidnih sustava linearna (L) kombinacija modova kritičnija od korijenske kombinacije sume kvadrata modova (SRSS) zbog dobivenog nižeg ciljanog ubrzanja.
- Dokazu da je kod realnih potresnih pobuda linearna (L) kombinacija modova učestalije nepovoljnija od korijenske (SRSS) kombinacije modova što se dokazuje interferencijom modova na linearnoj i nelinearnoj razini, a testirano je dinamičkim odgovorom jednostupnjevnih sustava uzetih kao vektori dobiveni na osnovu linearno elastičnog modela.
- Novoj formulaciji viskoznog prigušenja uz njenu numeričku primjenu.
- Dokazu da je ekvivalentno viskozno prigušenje realno i da je znatno veće od onog sugeriranog u literaturi što se potvrđuje usporedbom ciljanog ubrzanja višemodalne metode naguravanja i slomnog vršnog ubrzanja podloge dobivenog inkrementalnom dinamičkom analizom sustava na pobudu seta zapisa akcelelograma stvarnih potresa.
- Prijedlogu kako razvijeni postupak određivanja ciljanog ubrzanja u višemodalnoj metodi naguravanja može postati relativno jednostavan alat za praktičnu nelinearnu statičku analizu armirano-betonskih konstrukcija izloženih potresnom djelovanju.

Na osnovu rezultata dobivenih na analiziranim konkretnim primjerima armirano-betonskih okvirnih sustava, mješovitih sustava okvira i zidova, te samostalnih zidova može se zaključiti:

- Utjecaj viših modova osciliranja, posebno drugog i trećeg moda, je vrlo značajan.
- Ciljano, odnosno najmanje, ubrzanje baze nužno ne prouzrokuje najmanje horizontalne slomne sile u presjeku pri bazi proračunskog modela. Pri tome ciljano ubrzanje uvijek je niže od graničnog ubrzanja svakog moda pojedinačno.



- Pokazuje se da je kod okvirnih i mješovitih okvirnih i zidnih armirano-betonskih sustava, višemodalna metoda naguravanja za linearnu (L) kombinaciju modova kritičnija od kombinacije kvadratnog korijena iz sume kvadrata modova (SRSS) zbog dobivene niže razine ciljanog ubrzanja tla.
- Ciljanom ubrzanju pripadni opći slomni vektor oblikom se značajno razlikuje od oblika opterećenja prvog vektora, ali i od oblika opterećenja s jednolikim ubrzanjem po visini konstrukcije sadržanom u europskoj normi EN 1998.
- Pojavnost linearne (L) i korijenske (SRSS) kombinacije modova testirana dinamičkim odgovorom jednostupnjevnih sustava, uzetih kao vektori dobiveni na osnovu linearno elastičnog modela, na djelovanje serije zapisa akcelelograma realnih potresa na linearnoj i nelinearnoj razini potvrđuje da je linearna (L) kombinacija učestalije nepovoljnija od korijenske kombinacije sume kvadrata modova (SRSS).
- Višemodalna metoda naguravanja apriori polazi od pretpostavke da su u stvarnom potresnom djelovanju svi relevantni modovi i aktivirani.
- Uključivanje viših modova u analiziranim primjerima, uz elastični spektar s 5% prigušenjem, redovito značajno smanjuje granično ubrzanje tla, a u nekim slučajevima i za više od dva puta, što je znatno nepovoljnije od zahtjeva za rezervom na krivulji kapaciteta nosivosti od 150% u odnosu na karakteristični ciljani pomak vrha konstrukcije.
- Uvažavajući izračunato ekvivalentno viskozno prigušenje sustava te iskoristivost krivulje nosivosti do 3/3 pomaka, usporedbom ciljanog ubrzanja višemodalne metode naguravanja i slomnog vršnog ubrzanja podloge dobivenog dinamičkim odgovorom sustava pokazuje se njihovo vrlo dobro slaganje. Time se i dokazuje da ekvivalentno viskozno prigušenje izračunato prema novoj formulaciji viskoznog prigušenja prikazanoj u radu opisuje realan stupanj prigušenja konstrukcije, te da je ono znatno veće od onog sugeriranog u literaturi.
- Rezultati inkrementalne dinamičke analize armirano-betonskih okvirnih sustava dobiveni programskim paketom za nelinearnu analizu *SeismoStruct* pokazuju vrlo dobro slaganje slomnog vršnog ubrzanja podloge s rezultatima dobivenog ciljanog ubrzanja iz višemodalne metode naguravanja za linearnu (L) kombinaciju modova pri 3/3 iskoristivosti pomaka na krivulji nosivosti uz elastični spektar s izračunatim realnim ekvivalentnim viskoznim prigušenjem sustava.

- Zaključno, dan je prijedlog kako originalno razvijena metoda ciljanog ubrzanja može predstavljati relativno jednostavan postupak za nelinearnu statičku analizu armirano-betonskih konstrukcija izloženih potresnom djelovanju.

Pored toga, numerički model stabilnosti i nosivosti prostornih armirano-betonskih konstrukcija s uvažavanjem materijalne i geometrijske nelinearnosti korišten u ovom radu daje realnu sliku pojave plastifikacijskih zglobova u sustavu i njihov redoslijed nastajanja prije potpunog sloma koji nastupa prekoračenjem nosivosti i/ili gubitkom stabilnosti elemenata ili konstrukcije kao cjeline.

Osim do sada navedenih prednosti novo razvijene metode ciljanog ubrzanja, a glavna vrijednost je određivanje potresne otpornosti promatrane konstrukcije, navest će se i određeni nedostaci i pretpostavke unutar metode.

Pri izračunavanju ekvivalentnog viskoznog prigušenja potrebno je definirati cikličku, odnosno histereznu krivulju nosivosti nelinearnog sustava, a kao polazna krivulja u njenom definiranju usvojena je krivulja nosivosti prvog vlastitog vektora.

U korišteni numerički model stabilnosti i nosivosti prostornih armirano-betonskih linijskih konstrukcija kojim je proveden postupak naguravanja nije uključena analiza poprečnog presjeka s vilicama.

## 7.2 MOGUĆI PRAVCI DALJNJIH ISTRAŽIVANJA

Numerički model korišten u ovom radu uz originalno razvijen postupak za određivanje ciljanog ubrzanja u višemodalnoj metodi naguravanja kako je prethodno prikazano moguće je primijeniti za istraživanja koja se navode u nastavku:

- Parametarska analiza armirano-betonskih konstrukcija izloženih potresnom opterećenju, odnosno ocjena točnosti rezultata dobivenih višemodalnom metodom naguravanja i rezultata dobivenih dinamičkim vremenskim odgovorom sustava s nekim od programskih paketa za nelinearnu analizu.
- Određivanje ekvivalentnog viskoznog prigušenja realnih konstrukcijskih sustava.
- Analiziranjem različitih sustava mogu se dobiti vrijedne spoznaje o konstruktivnoj naravi sustava koji se analizira.

- Zaključno, može se dati prijedlog normativnog postupka za praktičnu primjenu u određivanju nosivosti armirano-betonskih konstrukcija metodom ciljanog ubrzanja, za konstrukcijske sustave kod kojih uključivanje viših vektora ima utjecaj.

Također, moguće je govoriti o daljnjem razvoju numeričkog modela stabilnosti i nosivosti prostornih armirano-betonskih linijskih konstrukcija korištenog u ovom radu što otvara nove pravce i mogućnosti daljnjih istraživanja. U nastavku se navode neke od njih:

- Ugradnja odgovora konstrukcije u vremenu u numerički model stabilnosti i nosivosti prostornih armirano-betonskih linijskih konstrukcija.
- Implementacija utjecaja vilica, te klizanja između armaturnih šipki i betona u numerički model.

---

## 8. LITERATURA

---

- [A1] ATC 40: *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings*, Applied Technology Council, Redwood City, California, USA, Vol. 1, 346p, 1996.
- [A2] Athanassiadou, C.J., *Seismic performance of R/C plane frames irregular in elevation*, Engineering Structures, Vol. 30, No. 5, pp. 1250-1261, 2008.
- [B1] Balić, I., Mihanović, A., Trogrlić, B., *Ciljano ubrzanje u višemodalnoj metodi naguravanja A/B okvira*, Građevinar: časopis Hrvatskog saveza građevinskih inženjera, Vol. 65, No. 4, str. 305-318, 2013.
- [B2] Balić, I., Mihanović, A., Trogrlić, B., *Postupak za određivanje ciljanog ubrzanja u višemodalnoj metodi naguravanja*, Zbornik radova Petog susreta Hrvatskog društva za mehaniku, Karšaj, I., Jarak, T. (ur.), Zagreb: Hrvatsko društvo za mehaniku, str. 17-24, 2013.
- [B3] Booth, E., Key, D., *Earthquake design practice for buildings*, Second edition, Thomas Telford Publishing, 2006.

- [C1] Cassaroti, C., Pinho, R., *An adaptive capacity spectrum method for assessment of bridges subjected to earthquake action*, Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 5, No. 4, pp. 377–390, 2007.
- [C2] Chopra, A.K., *Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering*, University of California at Berkeley, Third Edition, Prentice Hall, New Jersey, 2007.
- [C3] Chopra, A.K., Goel, R.K., *A modal pushover analysis procedures for estimating seismic demands for buildings*, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 31, No. 3, pp. 561–582, 2002.
- [C4] Chopra, A.K., Goel, R.K., *Direct displacement-based design: use of inelastic vs. elastic design spectrum*, Earthquake Spectra, Vol. 17, No. 1, pp. 47-64, 2001.
- [C5] Chopra, A.K., Goel, R.K., Chintanapakdee, C., *Evaluation of a modified MPA procedure assuming higher modes as elastic to estimate seismic demands*, Earthquake Spectra, Vol. 20, No. 3, pp. 757-778, 2004.
- [Č1] Čaušević, M., Mitrović, S., *Comparison between non-linear dynamic and static seismic analysis of structures according to European and US provisions*, Bulletin of earthquake Engineering, Vol. 9, No. 2, pp. 467-489, 2011.
- [Č2] Čaušević, M., Zehentner, E., *Nelinearna seizmička analiza konstrukcija prema europskoj normi EN 1998-1:2004*, Građevinar: časopis Hrvatskog saveza građevinskih inženjera, Vol. 59, No. 9, str. 767-778, 2007.
- [D1] Diotallevi, P.P., Landi, L., Pollio, B., *Evaluation of conventional and advanced pushover procedures for regular and irregular RC frames*, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 2008.
- [E1] El-Metwally, S.E., *Nonlinear analysis of reinforced concrete frames*, Ph.D. Thesis, Purdue University, SAD, 1986.
- [E2] European Committee for Standardization (CEN): EN 1998-1. *Eurocode 8: Design of Structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*, Brussels, Belgium, 2004.

- [F1] Fajfar, P., *A Nonlinear analysis method for performance based seismic design*, Earthquake Spectra, Vol. 16, No.3, pp. 573-592, 2000.
- [F2] Fajfar, P., *Capacity spectrum method based on inelastic demand spectra*, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 28, pp. 979-993, 1999.
- [F3] Fajfar, P., *Structural analysis in earthquake engineering – A breakthrough of simplified non-linear methods*, 12th European Conference on Earthquake Engineering, London, UK, Paper No. 843, pp. 1-20, 2002.
- [F4] Fajfar, P., Fischinger, M., *Non-linear seismic analysis of RC buildings: Implications of a case study*, European Earthquake Engineering, Vol. 1, pp. 31-43, 1987.
- [F5] Fajfar, P., Fischinger, M., *N2 – a method for non-linear seismic analysis of regular buildings*, Proceedings of 9th World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo, Kyoto, Vol. 5, pp. 111-116, 1988.
- [F6] Fajfar, P., Gašperšič, P., *The N2 method for the seismic damage analysis for RC buildings*, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 25, pp. 23–67, 1996.
- [F7] Fajfar, P., Krawinkler, H., *Seismic design methodologies for the next generation of codes*, A. A. Balkema, Rotterdam, 1997.
- [F8] FEMA 273: *NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings*, Applied Technology Council, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., USA, 435p, 1997.
- [F9] FEMA 356: *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings*, American Society of Civil Engineers, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., USA, 519p, 2000.
- [F10] FEMA 368: *The NEHRP recommended provisions for new buildings and other structures*, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., USA, 2001.
- [F11] FEMA 440: *Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures, Applied technology council (ATC-55 project)*, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., USA, 392p, 2005.

- [F12] Freeman, S.A., *Development and use of capacity spectrum method*, Proceedings of the 6th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Seattle, USA, Paper No. 269, pp. 1-12, 1998.
- [F13] Freeman, S.A., *Review of the development of the capacity spectrum method*, ISET Journal of Earthquake Technology, Paper No. 438, Vol. 41, No. 1, pp. 1-13, 2004.
- [F14] Freeman, S.A., Nicoletti, J.P., Tyrell, J.V., *Evaluations of existing buildings for seismic risk – A case study of Puget Sound Naval Shipyard, Bremerton, Washington*, Proceedings of the 1st U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Berkeley: EERI, pp. 113-122, 1975.
- [G1] Gencturk, B., Elnashai, A., *Development and application of an advanced capacity spectrum method*, Engineering Structures, Elsevier, Vol. 30, pp. 3345-3354, 2008.
- [G2] Goel, R.K., Chopra, A.K., *Evaluation of modal and FEMA pushover analyses – SAC buildings*, Earthquake Spectra, Vol. 20, No. 1, pp. 225-254, 2004.
- [G3] Goel, R.K., Chopra, A.K., *Role of higher-“mode” pushover analyses in seismic analysis of buildings*, Earthquake Spectra, Vol. 21, No. 4, pp. 1027-1041, 2005.
- [G4] Guyader, A., *A statistical approach to equivalent linearization with application to performance-based engineering*, PhD Dissertation, California Institute of Technology, Pasadena, USA, 158p, 2003.
- [G5] Guyader, A., Iwan, W., *User guide for AutoCSM: Automated Capacity Spectrum Method of analysis*, California Institute of Technology, Report No. EERL 2004-05, Pasadena, USA, 28p, 2004.
- [H1] Hsu, C.-T.T., Mirza, M.S., Sea, S.C.S., *Nonlinear analysis of reinforced concrete frames*, Computers and Structures, Vol. 13, Issues 1-3, pp. 223-227, 1981.
- [H2] Humar, J.L., *Dynamics of structures*, Carleton University, Ottawa, Canada, Second Edition, A.A. Balkema Publishers, 2002.
- [I1] Iervolino, I., Maddaloni, G., Cosenza, E., *Eurocode 8 compliant real record sets for seismic analysis of structures*, Journal of Earthquake Engineering, Vol. 12, pp. 54-90, 2008.

- [I2] Izzuddin, B.A., *Conceptual issues in geometrically nonlinear analysis of 3D framed structures*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 191, Issue 8-10, pp. 1029-1053, 2001.
- [I3] Izzuddin, B.A., Lloyd Smith, D., *Efficient nonlinear analysis of elasto-plastic 3D r/c frames using adaptive techniques*, Computers and Structures, Vol. 78, Issue 4, pp. 549-573, 2000.
- [J1] Jiang, Y., Li, G., Yang, D., *A modified approach of energy balance concept based multimode pushover analysis to estimate seismic demands for buildings*, Engineering Structures, Vol. 32, No. 5, pp. 1272–1283, 2010.
- [K1] Kalkan, E., Kunnath, S.K., *Method of modal combinations for pushover analysis of buildings*, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, Paper No. 2713, pp. 1–15, 2004.
- [K2] Kalkan, E., Kunnath, S.K., *Adaptive modal combination procedure for nonlinear static analysis of building structures*, Journal of Structural Engineering, Vol. 132, No. 11, pp. 1721–1731, 2006.
- [K3] Kalkan, E., Kunnath, S.K., *Assessment of current nonlinear static procedures for seismic evaluation of buildings*, Engineering Structures, Vol. 29, pp. 305–316, 2007.
- [K4] Kowalsky, M.J., Priestley, M.J.N., *Direct displacement-based seismic design of concrete buildings*, Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering 33(4), pp. 421-444, 2000.
- [L1] Lagaros, N.D., Fragiadakis, M., *Evaluation of ASCE-41, ATC-40 and N2 static pushover methods based on optimally designed buildings*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 31, pp. 77–90, 2011.
- [L2] Lin, Y.-Y., Chang, K., *An improved capacity spectrum method for ATC 40*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 32, No. 13, pp. 2013–2025, 2003.
- [L3] Loeding, S., Kowalsky, M.J., Priestley, M.J.N., *Displacement-based design methodology applied to R.C. building frames*, Report SSRP 98/06 Structures Department, UCSD, 1998.



- [M1] Mihanović, A., *Dinamika konstrukcija*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, Split, 1995.
- [M2] Mihanović, A., Balić, I., Trogrlić, B., *Envelope principle in multi-mode pushover procedure for R/C buildings*, Proceedings of the 4th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPDYN 2013) & the 3rd South-East European Conference on Computational Mechanics (III SEECCM), Papadrakakis, M., Papadopoulos, V., Plevris, V. (eds.), (in press), Kos Island, Greece, 2013.
- [M3] Mihanović, A., Balić, I., Trogrlić, B., *Multimodal pushover target acceleration method versus dynamic response of R/C frames*, Abstract book - 7th International Conference on Advanced Computational Engineering and Experimenting – ACEX2013, Öchsner, A. (ed.), Madrid, Spain: IRONIX, pp. 76-76, 2013.
- [M4] Mihanović, A., Schonauer, M., *Numerički model stabilnosti okvirnih konstrukcija s materijalnom i geometrijskom nelinearnošću*, Inženjersko modeliranje, Vol. 4, No. 1-4, str. 27-33, 1991.
- [M5] Mihanović, A., Trogrlić, B., Balić, I., *Extreme modal combinations for pushover analysis of RC buildings*, Key Engineering Materials, Vol. 553, pp. 117-124, 2013.
- [M6] Mingkui, X., Yinfeng, D., Gang, L., Guangjun, C., *An improved capacity spectrum method based on inelastic demand spectra*, 4th International Conference on Earthquake Engineering, Taipei, Taiwan, Paper No. 230, pp. 1-8, 2006.
- [M7] Mitrović, S., Čaušević, M., *Nelinearni statički seizmički proračun konstrukcija*, Građevinar: časopis Hrvatskog saveza građevinskih inženjera, Vol. 61, No. 6, str. 521-531, 2009.
- [M8] Moghim, F., Saadatpour, M.M., *The applicability of direct displacement-based design in designing concrete buildings located in near-fault regions*, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 2008.
- [M9] Mwafy, A.M., Elnashai, A.S., *Static pushover versus dynamic collapse analysis of RC buildings*, Engineering Structures, Vol. 23, Issue 5, pp. 407-424, 2001.

- [O1] Otani, S., Hiraishi, H., Midorikawa, M., Teshigawara, M., *New seismic design provisions in Japan*, Proceedings 2000 Fall ACI Convention, Toronto, 2000.
- [O2] Ožbolt, J., *NELIN3 – Computer program for nonlinear analysis of space frame and cable structure*, Pergamon Press, pp. 177-184, 1986.
- [O3] Ožbolt, J., Dvornik, J., *Computer program for nonlinear analysis of combined space frame and cable structures on a microcomputer*, International Conference on Computer Applications in Concrete, Singapore, 1986.
- [P1] Panagiotakos, T.B., Fardis, M.N., *A displacement – based seismic design procedure for RC buildings and comparison with EC8*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 30, pp. 1439-1462, 2001.
- [P2] Priestley, M.J.N., *Performance based seismic design*, Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, Paper No. 2831, 2000.
- [P3] Priestley, M.J.N., Calvi, G.M., Kowalsky, M.J., *Displacement-based seismic design of structures*, IUSS Press, Pavia, Italy, 2007.
- [P4] Priestley, M.J.N., Kowalsky, M.J., *Direct displacement – based seismic design of concrete buildings*, Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, Vol. 33, No. 4, pp. 421-444, 2000.
- [S1] Saiidi, M., Sozen, M.A., *Simple nonlinear seismic analysis of R/C structures*, Journal of the Structural Division, Vol. 107, No. 5, pp. 937-953, 1981.
- [S2] Sasaki, K.K., Freeman, S.A., Paret, T.F., *Multi-mode pushover procedure (MMP) - a method to identify the effects of higher modes in a pushover analysis*, Proceedings of 6th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Seattle, USA, pp. 1-12, 1998.
- [S3] Scordelis, A.C., *Computer models for nonlinear analysis of reinforced and prestressed concrete structures*, University of California, Berkeley, USA, Journal of the Prestressed Concrete Institute, Vol. 29, No. 6, pp. 116-135, 1984.
- [S4] Shakeri, K., Mohebbi, M., *Single-run modal pushover procedure based on the modal shear and moment in the stories*, Proceedings of 14th European Conference on Earthquake Engineering, Ohrid, Republic of Macedonia, pp. 6199-6207, 2010.

- [S5] Shakeri, K., Shayanfar, M.A., Mohebbi, M., *A spectra-based multi modal adaptive pushover procedure for seismic assessment of buildings*, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 2008.
- [S6] Sucuoglu, H., Gunay, S., *Generalized force vectors for multimode pushover analysis*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 40, No. 1, pp. 55-74, 2011.
- [T1] Trogrlić, B., *Nelinearni numerički model stabilnosti i nosivosti prostornih armirano betonskih linijskih konstrukcija*, disertacija, Sveučilište u Splitu, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Split, 2003.
- [T2] Trogrlić, B., Mihanović, A., *The comparative body model in material and geometric nonlinear analysis of space R/C frames*, Engineering Computations, Vol. 25, No. 2, pp. 155-171, 2008.
- [T3] Trogrlić, B., Mihanović, A., *Nelinearni model prostornih konstrukcija s primjenom na potresnu otpornost*, Građevinar: časopis Hrvatskog saveza građevinskih inženjera, Vol. 63, No. 2, str. 111-124, 2011.
- [T4] Trogrlić, B., Mihanović, A., Balić, I., *Nelinearni model za analizu duktilnosti a/b konstrukcija*, Zbornik radova Drugog susreta Hrvatskog društva za mehaniku, Marović, P., Galić, M., Krstulović-Opara, L. (ur.), Split: Hrvatsko društvo za mehaniku, str. 85-96, 2008.
- [T5] Trogrlić, B., Mihanović, A., Balić, I., *Plastification of R/C frames under monotonic loading*, Proceedings of the 8th World Congress on Computational Mechanics (WCCM8) & the 5th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2008), Schrefler, B., Perego, U. (eds.), Barcelona, Spain: International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), 2008.
- [T6] Trogrlić, B., Mihanović, A., Nikolić, Ž., *Modified modal pushover analysis of RC frames*, fib Symposium Prague 2011, Concrete engineering for excellence and efficiency, Proceedings, Publisher: Czech Concrete Society (CBS) / Czech fib National Member Group, Vol. 2, pp. 95-98, 2011.
- [V1] Valipour, H.R., Foster, S.J., *Nonlinear reinforced concrete frame element with torsion*, Engineering Structures, Vol. 32, Issue 4, pp. 988-1002, 2010.

[V2] Vamvatsikos, D., Cornell, C.A., *Incremental dynamic analysis*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 31, No. 3, pp. 491-514, 2002.

[Internet baze podataka:]

<http://www.sciencedirect.com>

ScienceDirect, Elsevier Science, Amsterdam,  
The Netherlands.

<http://www.isesd.hi.is>

The European Strong-motion database

<http://www.seismosoft.com>

SeismoStruct and SeismoSignal software packages,  
(author Pinho, R., Italy)

[Računalni programi:]

SCIA Engineer 2011.0

SCIA Engineer, (Nemetschek SCIA, Belgium),  
2011.

SEISMOSTRUCT

SeismoStruct – A Computer Program for Static and  
Dynamic Nonlinear Analysis of Framed Structures,  
Version 5.0.7.1, (author Pinho, R., Italy), 2010.

## *Životopis*

Ivan Balić, dipl. ing. građ. rođen je 8. siječnja 1983. godine u Splitu gdje je završio osnovnu školu i III. gimnaziju. Akademske godine 2001./2002. upisao je sveučilišni dodiplomski studij na Građevinskom fakultetu u Splitu, na kojem je diplomirao 30. ožujka 2006. godine s temom: „*Proračun nosive konstrukcije stambeno-poslovne zgrade*“ pod mentorstvom prof. dr. sc. Ante Mihanovića, te stekao stručni naziv diplomirani inženjer građevinarstva. Tijekom dodiplomskog studija tri puta je nagrađen Rektorovom nagradom Sveučilišta u Splitu, kao i nagradom dekana Građevinskog fakulteta u Splitu.

Od 12. prosinca 2006. do 30. studenog 2007. radi kao stručni suradnik na Katedri za teoriju konstrukcija Građevinsko-arhitektonskog fakultetu u Splitu.

Akademske godine 2006./2007. upisao je poslijediplomski doktorski studij na Građevinsko-arhitektonskom fakultetu u Splitu iz znanstvenog područja Tehničkih znanosti, znanstveno polje Građevinarstvo, znanstvena grana Nosive konstrukcije.

1. prosinca 2007. godine na istom fakultetu zasniva radni odnos u svojstvu znanstvenog novaka u suradničkom zvanju asistent, pri Katedri za teoriju konstrukcija, za rad na znanstvenom projektu Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta Republike Hrvatske pod naslovom: „*Modeliranje granične nosivosti i stabilnosti konstrukcija pri velikim pomacima*“, broj 083-0831541-1545, kod voditelja prof. dr. sc. Ante Mihanovića.

U nastavi sudjeluje održavajući vježbe iz predmeta *Mehanika I*, *Građevna statika I* te *Građevna statika II* na Prediplomskom sveučilišnom studiju građevinarstva, *Dinamički modeli potresnog inženjerstva* na Diplomskom sveučilišnom studiju građevinarstva te *Projektiranje i proračun građevina pomoću računala* na Stručnom studiju građevinarstva.

U proteklom periodu objavio je u koautorstvu 9 znanstvenih radova u časopisima i zbornicima međunarodnih i domaćih znanstvenih skupova.