

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

*Janova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si*



Univerzitetni program Gradbeništvo,
Konstrukcijska smer

Kandidat:

Anton Levičar

Določevanje potresnih vplivov na nekonstrukcijske elemente stavb

Diplomska naloga št.: 3041

Mentor:

izr. prof. dr. Matjaž Dolšek

Ljubljana, 24. 11. 2008

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani ANTON LEVIČAR izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom
»DOLOČEVANJE POTRESNIH VPLIVOV NA NEKONSTRUKCIJSKE ELEMENTE
STAVB«

Izjavljam, da se odpovedujem vsem materialnim pravicam iz dela za potrebe elektronske
separatoteke FGG.

Ljubljana, 12.11.08

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM

UDK:	624.042.7(043.2)
Avtor:	Anton Levičar
Mentor:	doc. dr. Matjaž Dolšek
Naslov:	Določevanje potresnih vplivov na nekonstrukcijske elemente stavb
Obseg in oprema:	56 str., 13 pregl., 49 slik, 12 en.
Ključne besede:	potresni vpliv, etažni spekter, potresna izolacija, nekonstrukcijski elementi

Izvleček

Diplomska naloga obravnava določevanje obremenitve na nekonstrukcijske elemente zaradi potresnega vpliva s pomočjo etažnih spektrov odziva. Pri objektih večje pomembnosti kot so jedrske elektrarne ali obrati kemične industrije lahko poškodbe napeljave in opreme privedejo do nesreč večjih dimenzij. Pri bolnišnicah je pomembno, da ohranijo obratovnost tudi po potresu, medtem ko je pri nekaterih objektih zgolj draga oprema razlog za analizo potencialnega potresnega vpliva. V prvem delu diplomske naloge obravnavamo etažne spektre na modelu idealizirane konstrukcije v programu SAP2000. Etažni spektri so dobljeni s časovno odvisno analizo iz akcelerogramov treh potresov v bližnji okolici. Primerjane so srednje vrednosti dejanskih in generiranih akcelerogramov. Nato je analizirana trietažna nesimetrična armiranobetonska konstrukcija SPEAR. Opazovano je spreminjanje etažnih spektrov po višini konstrukcije ter sprememba po določeni etaži, kjer se pokaže vpliv ekcentričnosti mase. V nadaljevanju obravnavamo potresni izolacijski sistem, ki predstavlja alternativo protipotresni gradnji. V programu SAP2000 so modelirani elastomerni izolatorji s svinčenim jedrom različnih karakteristik, ki so nameščeni pod konstrukcijo SPEAR. Histerezno obnašanje izolatorjev je opisano z nelinearnim veznim elementom. Nelinearna analiza časovnega odziva je izračunana z direktno integracijo ter z hitrejšo FNA (Fast Nonlinear Analysis) analizo. Dobljeni etažni spektri so primerjani za različne karakteristike izolatorjev ter z neizolirano konstrukcijo SPEAR. Vsi rezultati so primerjani z etažnim spektrom po Evrokodu 8, ki podaja poenostavljeno formulo.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 624.042.7(043.2)
Author: Anton Levičar
Supervisor: Assist. Prof. Matjaž Dolšek
Title: The effects of the seismic action on the non-structural elements of buildings
Notes: 56 p., 13 tab., 49 fig. 12 eq.
Key words: seismic action, floor response spectra, seismic isolation, non-structural elements

Abstract

The present work focuses on estimation of seismic influences on non-structural elements of buildings. For example, larger scale accidents could happen because of damaged installation or equipment in buildings of higher importance like nuclear power plants or chemical factories. In addition it is important that hospitals keep functionality after an earthquake and that the potential losses of expensive equipment are as small as possible. In the first part of the study the floor response spectra for the model of idealized structure is investigated with SAP2000 software. Time-history analysis from accelerograms of three nearby earthquakes is provided to get floor response spectra. The mean values of three recorded and three generated accelerograms are compared. Three-storey asymmetric reinforced concrete building SPEAR is analyzed afterwards. Observation of changing floor response spectrum with height and over one storey is made, where eccentricity of masses is major influence. In the last part of the thesis the seismic isolation system, which currently represents the alternative to seismic resistant construction is studied. Lead rubber bearings of different characteristics are modeled under SPEAR building in SAP2000. Nonlinear link element is used to describe the hysteretic behaviour. Two types of nonlinear time-history analysis are computed, the direct integration and Fast nonlinear analysis (FNA). Floor response spectra for different isolation characteristics are compared. Those results are compared also with unisolated building SPEAR and with Eurocode 8 floor response spectra, which is calculated with simple formula.

ZAHVALA

Za pomoč in potrpežljivost pri izdelavi diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorju doc. dr. Matjažu Dolšku.

Prav tako se zahvaljujem sošolcem, zaradi katerih je bil študij bolj pester.

Nazadnje bi se rad zahvalil družini, ki me je vseskozi podpirala ter vzodbujala.

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE	I
IZJAVA O AVTORSTVU	II
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION	IV
ZAHVALA	V
KAZALO VSEBINE	VI
KAZALO PREGLEDNIC	VIII
KAZALO SLIK	IX
1 OSNOVNI PRINCIPI DOLOČEVANJA POTRESNIH VPLIVOV NA NEKONSTRUKCIJSKE ELEMENTE	1
1.1 Uvod	1
1.2 Analize določevanja pospeškov nekonstrukcijskih komponent	1
1.3 Račun pospeškov nekonstrukcijskih komponent po Evrokodu 8	3
1.4 Račun etažnih spektrov s programom SAP2000	4
2 DOLOČITEV POTRESNIH VPLIVOV NA NEKONSTRUKCIJSKE ELEMENTE ZA IDEALIZIRANO KONSTRUKCIJO	6
2.1 Nihala z ekcentrično maso	6
2.2 Nihalo z masami na različnih kotah	8
2.3 Akcelerogrami	9
2.3.1 Dejanski akcelerogrami	9
2.3.2 Generirani akcelerogrami	10
2.4 Rezultati	15
2.5 Rezultati nihala N4	19

3 DOLOČITEV POTRESNIH VPLIVOV NA NEKONSTRUKCIJE ELEMENTE ZA KONSTRUKCIJO SPEAR	20
3.1 Modeliranje konstrukcije (Rozman, 2005)	20
3.2 Analiza in rezultati	24
4 DOLOČITEV VPLIVA POTRESNE OBTEŽBE NA NEKONSTRUKCIJSKE ELEMENTE POTRESNO IZOLIRANE STAVBE	29
4.1 Osnove potresne izolacije	29
4.2 Elastomerni izolator s svinčnim jedrom (LRB)	31
4.3 Dimenzioniranje izolatorjev v programu SAP2000	33
4.4 Določitev karakteristik izolatorjev	38
4.5 Analiza in rezultati	43
5 PRIMERJAVA REZULTATOV IZOLIRANE IN NEIZOLIRANE KONSTRUKCIJE	50
6 ZAKLJUČEK	52
VIRI	55

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Karakteristike nihala N1, N2 ter N3	6
Preglednica 2: Nihajni časi nihala N1, N2 in N3	7
Preglednica 3: Karakteristike nihala N4.	8
Preglednica 4: Grede s sodelujočimi širinami pasnic	22
Preglednica 5: Mase podane po etažah	23
Preglednica 6: Torzijske karakteristike konstrukcije SPEAR	24
Preglednica 7: Efektivne mase konstrukcije SPEAR	27
Preglednica 8: Osne sile v izolatorjih	39
Preglednica 9: Karakteristike izolatorja po prospektu DIS	40
Preglednica 10: Karakteristike analiziranih izolatorjev	41
Preglednica 11: Vrednosti koeficientov proporcionalnega dušenja	41
Preglednica 12: Nihajni časi izolirane konstrukcije SPEAR pri različnih izolatorjih	42
Preglednica 13: Maksimalni pomik na mestu izolatorja	43

KAZALO SLIK

Slika 1: Okno za določitev etažnega spektra odziva ter okno prikaza krivulje etažnega spektra v SAP2000	4
Slika 2: Modeli nihala z masami N1, N2, N3 v programu SAP2000.	7
Slika 3: Model nihala N4 z masami ter nihajne oblike v SAP2000	8
Slika 4: Srednje vrednosti odzivnih spektrov ter projektni spekter	9
Slika 5: Spektri odziva za akc. Tolmezzo [55y]	10
Slika 6: Spektri odziva za akc. Petrovac [196y]	10
Slika 7: Spektri odziva za akc. Ulcinj [197y]	10
Slika 8: Dejanski in generirani akceleroگرامi Tolmezzo v smeri X in Y	11
Slika 9: Dejanski in generirani akceleroگرامi Petrovac v smeri X in Y	12
Slika 10: Dejanski in generirani akceleroگرامi Ulcinj v smeri X in Y	13
Slika 11: Primerjava ES iz SAP2000 ter Matlab-a	14
Slika 12: Kvocient ES iz Matlab-a in SAP2000	14
Slika 13: Srednje vrednosti etažnih spektrov ter etažni spekter po EC8 za nihalo N1	15
Slika 14: Srednje vrednosti ES a)dejanskih in b)generiranih akc. ter ES po EC8 za nihalo N2	16
Slika 15: Srednje vrednosti ES a)dejanskih in b)generiranih akc. ter ES po EC8 za nihalo N3	17
Slika 16: Srednje vrednosti generiranih ES nihala N1, N2 ter N3 v točki 2	18
Slika 17: Srednje vrednosti generiranih ES nihala N1, N2 ter N3 v točki 10	18
Slika 18: Primerjava srednje vrednosti ES dejanskih akc. za nihalo N4 ter EC8	19
Slika 19: Primerjava srednje vrednosti ES generiranih akc. za nihalo N4 ter EC8	19
Slika 20: Model konstrukcije SPEAR v SAP2000	20
Slika 21: Oštevilčenje vozlišč	21
Slika 22: Tlorisne dimenzije in poimenovanje elementov konstrukcije SPEAR	21
Slika 23: Prečni prerez konstrukcije SPEAR	22
Slika 24: Modalne oblike in nihajni časi konstrukcije SPEAR v SAP2000	24
Slika 25: Časovni potek pospeškov za akceleroگرام g196 v smeri osi X	25
Slika 26: Primerjava etažnih spektrov po višini konstrukcije SPEAR v smeri osi X	26
Slika 27: Primerjava etažnih spektrov po višini konstrukcije SPEAR v smeri osi Y	26
Slika 28: Primerjava etažnih spektrov po 3. etaži v smeri X in Y za konstrukcijo SPEAR	28
Slika 29: Posledica povečanja periode konstrukcije in dušenja na spekter pospeškov in spekter pomikov (Kelly, 2001)	29
Slika 30: Shematski prikaz gibanja (a) neizolirane in (b) izolirane konstrukcije (Kelly, 2001)	30

Slika 31: Prerez izolatorja iz gume s svinčnim jedrom (DIS, 2007)	32
Slika 32: Histerezna krivulja izolatorja LRB (Kelly, 2001)	32
Slika 33: Podajanje linearnih in nelinearnih strižnih lastnosti izolatorja v SAP2000	34
Slika 34: Karakteristike histereze nelinearnega (Rubber) elementa (DIS, 2007)	35
Slika 35: Definiranje FNA analize v SAP2000	37
Slika 36: Oštevilčenje izolatorjev	40
Slika 37: Nihajne oblike in nihajni časi izoliranega sistema PI 4 (SAP2000)	42
Slika 38: Pomik izolatorja I-9 v smeri osi X in Y.	43
Slika 39: Etažni spektri pospeškov točke 25 pri PI 4 za različne akcelerograme ter srednja vrednost 44	
Slika 40: Etažni spekter točke 25 pri PI 4 po FNA in DI	44
Slika 41: Kvocient ES po FNA in DI analizi	44
Slika 42: Etažni spektri (ES) izoliranih konstrukcijskih sistemov PI1, PI2, PI3 in PI4 v smereh glavnih osi X in Y v prvi (točka j10), drugi (točka j25) ter tretji (točka j40) etaži	45
Slika 43: Primerjava etažnih spektrov po etažah pri PI4 v smeri X	46
Slika 44: Primerjava etažnih spektrov po etažah pri PI 4 v smeri Y	46
Slika 45: Spreminjanje etažnih spektrov (ES) po 3. etaži v smeri X in Y za konstrukcijski sistem PI 4	48
Slika 46: Histereze izolatorja I-9 v smereh glavnih osi X in Y za a) PI 1, b) PI 2, c) PI 3 ter d)PI 4 (na vertikalni osi je sila [kN], na horizontalni osi je pomik [m])	49
Slika 47: Primerjava maksimalnih vrednosti v etažnem spektru v smeri X in Y po etažah	50
Slika 48: Primerjava pospeškov pri $T = 0,1$ s v smeri X in Y po etažah	51
Slika 49: Primerjava maksimalnih vrednosti momenta M_z in prečne sile V_y v krajnem stebru 9 v prvi etaži	51

1 OSNOVNI PRINCIPI DOLOČEVANJA POTRESNIH VPLIVOV NA NEKONSTRUKCIJSKE ELEMENTE

1.1 Uvod

Osnovni namen potresno odporne gradnje je čim manj oziroma nič človeških žrtev. Konstrukcije so projektirane tako, da se pri projektnem potresu ne porušijo. Ker bi bila pri običajnih stavbah zahteva, da konstrukcija ostane v elastičnem stanju neekonomična, dovolimo, da se lahko poškoduje. V tem primeru so potencialno nevarni ostali nekonstrukcijski elementi kot so npr. fasadni paneli, ki se lahko odtrgajo in ogrozijo ljudi zunaj stavbe. Prav tako je lahko nevarna notranja oprema ter razne inštalacije, ki so nameščene na stropu. Objekti večje pomembnosti kot so jedrske elektrarne ali objekti namenjeni kemični industriji so dimenzionirani, da tudi močnejše potrese prenesejo brez poškodb. Posledica poškodovane opreme je lahko uhajanje radioaktivnih snovi ali drugih strupenih snovi v okolje. Zato je nujno opremo dimenzionirati na predvidene pospeške in pomike. Drug vidik pri tem je ekonomičnost. V določenih primerih poškodbe opreme pomenijo velik strošek, saj oprema predstavlja tudi do 70% vrednosti objekta. Poleg tega predstavlja izgubo morebiten izpad dejavnosti v času popravila. Sama oprema mora biti projektirana tako, da prenese potresne sile, poleg tega mora pritrditev opreme prav tako zdržati potresne vplive. V diplomskem delu so obravnavani pospeški na nekonstrukcijske elemente pri elastičnem obnašanju konstrukcije.

1.2 Analize določevanja pospeškov nekonstrukcijskih komponent

Obstaja več vrst analiz, ki se razlikujejo po natančnosti ter potrebnem času. Najbolj točna je analiza, ko upoštevamo element in konstrukcijo hkrati. Tako zajamemo medsebojen vpliv; takšen sistem se imenuje povezan. Pri tej analizi je potrebno upoštevati več nihajnih oblik kot sicer. Toliko, da bi na višje nihajne oblike vplival tudi element s svojo maso. Običajno imajo nekonstrukcijski elementi relativno majhno maso v primerjavi s konstrukcijo. Izkaže se, da je ta način zamuden, posledično pa neekonomičen. Predlagana meja (Novak, Fajfar, 1994), pri kateri je element in konstrukcijo smiselno upoštevati kot povezan sistem, je ko masa elementa

predstavlja 1% ali več mase konstrukcije. Največja odstopanja med načinoma obravnave sistema se pojavijo v območju resonance elementa in konstrukcije, sicer pa je rezultat pri nepovezanem sistemu konzervativen.

Pri nepovezanem sistemu za določeno konstrukcijo izračunamo etažne spektre odziva. Ti spektri predstavljajo maksimalne absolutne pospeške v odvisnosti od nihajnega časa in dušenja elementa na določenih mestih v konstrukciji. Za projektiranje opreme nas ponavadi zanimajo na nivojih etaž. Etažni spekter odziva izračunamo na enak način kot spekter odziva tal. To je klasična metoda, ki jo izvedemo s časovno odvisno analizo (Time-History Analysis). Vhodni podatek je akcelerogram, ki je lahko posnetek dejanskega potresa ali pa je generiran. Po konstrukciji se vrednosti pospeškov spreminjajo. Za izračun etažnega spektra potrebujemo zapis časovno odvisnih absolutnih pospeškov na mestu namestitve komponente. S temi pospeški je vzbujeno nihalo z eno prostostno stopnjo, ki ima določeno dušenje. Maksimalna vrednost pospeška nihala predstavlja eno točko v etažnem spektru. Da se dobi krivuljo etažnega spektra za določeno dušenje, se v algoritmu spreminja nihajni čas nihala. V diplomski nalogi so obravnavani etažni spektri odziva za konstrukcijo, ki se pri potresu obnaša elastično.

Če se upošteva, da se konstrukcija obnaša duktilno, se etažni pospeški spremenijo [Medina in soavtorji, 2006, 2007]. Avtor tako podaja faktor spremembe pospeška R_{acc} , s katerim se lahko etažni pospeški za elastično konstrukcijo spremenijo tako, da se upošteva neelastičnost konstrukcije. Ta sprememba ni univerzalna in je odvisna od lokacije nekonstrukcijske komponente v primarni konstrukciji, period konstrukcije in komponente, dušenja komponente ter stopnje neelastičnosti konstrukcije. Glavna ugotovitev je, da se pospeški pri lastnih periodah konstrukcije zmanjšajo, medtem ko se v območju med glavnimi periodami celo nekoliko povečajo. Tako ima etažni spekter duktilnih konstrukcij ima manj izrazite špice. Pri bolj neelastičnem obnašanju so te spremembe sorazmerno izrazitejše, to velja predvsem za zmanjšanje pospeškov. Pri tem se izkaže, da so spremembe v spodnji polovici konstrukcije praktično zanemarljivih vrednosti, v zgornji polovici pa je razlika večja. Pokazano je, da je faktor neodvisen od višine konstrukcije. Če je komponenta v spodnji polovici konstrukcije in ni v resonanci s prvimi periodami konstrukcije, je faktor $R_{acc} < 1$, kar pomeni, da se pri neelastični konstrukciji pospeški povečajo. Če je komponenta nameščena v zgornji polovici to

velja le, če je v območju kratkih period. Nasprotno je R_{acc} največji v območju prve in druge periode konstrukcije. Spremembe so izrazitejše pri manjšem dušenju komponente.

1.3 Račun pospeškov nekonstruksijskih elementov po Evrokodu 8

Evropski standard, ki obravnava potresne vplive na konstrukcije, Evrokod 8 podaja enostavno formulo za določitev potresne sile na nekonstruksijske elemente v konstrukciji v členu 4.3.5:

$$F_a = (S_a \cdot W_a \cdot \gamma_a) / q_a \quad (1)$$

F_a horizontalna potresna sila, ki deluje v težišču nekonstruksijskega elementa v najbolj neugodni smeri

W_a teža elementa

S_a seizmični koeficient za element

γ_a faktor pomembnosti za element

q_a faktor obnašanja za element

$$S_a = \alpha \cdot S \cdot \left[3 \left(1 + \frac{z}{H} \right) / \left(1 + \left(1 - \frac{T_a}{T_1} \right)^2 \right) - 0,5 \right] \quad (2)$$

α razmerje med projektnim pospeškom tal na tipu zemljine A in gravitacijskim pospeškom

S faktor zemljine

T_a glavna perioda nekonstruksijskega elementa

T_1 glavna perioda konstrukcije v ustrezni smeri

z višina nekonstruksijskega elementa nad nivojem, kjer deluje potres

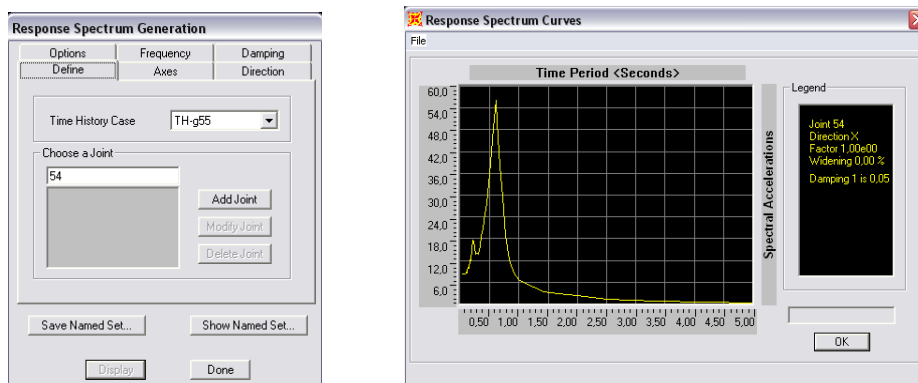
H višina konstrukcije merjena od temeljev ali od vrha toge kleti

Da lahko rezultate po EC8 primerjamo z rezultati iz SAP2000, je potrebno seizmični koeficient S_a pomnožiti z normiranim pospeškom. Iz enačbe je razvidno, da je rezultat pri določeni konstrukciji odvisen od relativne višine pritrditve komponente ter glavnih period konstrukcije in komponente. Pri togi komponenti ($T_a = 0$) je $S_a = \alpha \cdot S$, če je pritrjena na tleh ($z = 0$) in lahko naraste do $S_a = 2,5 \cdot \alpha \cdot S$, če je na vrhu konstrukcije ($z = H$). Največje

vrednosti potresnega vpliva dobimo, če je komponenta v resonanci s konstrukcijo ($T_a = T_I$). Takrat ima S_a vrednosti od $2,5 \cdot \alpha \cdot S$ na tleh do $5,5 \cdot \alpha \cdot S$ na vrhu konstrukcije. Potresni vpliv nato modificiramo s faktorjema pomembnosti in obnašanja. Faktor pomembnosti γ_a ne sme biti manjši od 1,5 pri bolj občutljivih komponentah (rezervarji za strupene snovi, sidrni elementi sistemov za varovanje življenja), za vse ostale pa je 1,0. Faktor obnašanja q_a ima vrednost 1,0 ali 2,0. Pri najbolj neugodni kombinaciji lahko vrednost potresnega vpliva tako povečamo za polovico, nasprotno pa ga na polovico lahko tudi zmanjšamo. Za primerjavo rezultatov bom vrednosti seizmičnega koeficienta upošteval za najbolj splošne komponente ($\gamma_a = q_a = 1,0$), kar predstavlja povprečno vrednost, pri čemer je potrebno imeti v mislih, da se lahko S_a v določenih primerih poveča oziroma zmanjša. Po tej metodi lahko brez bolj poglobljene analize določimo ES, zato se lahko metoda uporabi le za komponente, ki v primeru nesreče neposredno ali posredno ne vplivajo na človeška življenja.

1.4 Račun etažnih spektrov s programom SAP2000

Sprva se v programu modelira konstrukcija. Definira se elemente s prerezi in materialnimi karakteristikami. Za prikaz etažnega spektra je potrebno zagnati časovno odvisno analizo (Time History Analysis). Zato je potrebno določiti parametre za modalno analizo ter časovno odvisno analizo. Pri slednji se pod obtežbo določi akceleroگرام, ki je bil definiran pred tem. Definira se tudi smer v kateri deluje. Skalira se ga lahko s faktorjem, tako se določi željen maksimalen pospešek.



Slika 1: Okno za določitev etažnega spektra odziva ter okno prikaza krivulje etažnega spektra v SAP2000

Dušenje je možno podati kot konstantno za vse nihajne oblike, kot interpolirano dušenje po periodah ali kot proporcionalno masno in togostno dušenje. Določi se še velikost časovnega koraka ter število korakov, s čimer se poda časovni interval analize. V okencu, katerega se odpre z Display/Show Response Spectrum Curves, se določi točko izpisa za etažni spekter odziva ter primer časovno odvisne analize, za katero želimo izpis. Pri abscisi (Define) se lahko izbere med frekvenčno ali periodno skalo. Na položaju ordinate je možen prikaz spektralnih pospeškov, pomikov ali hitrosti (Axes). Osi sta lahko v aritmetičnem ali logaritemskem merilu (Options). Nato se določi še smer prikaza etažnega spektra v eni izmed globalnih osi (Direction) ter dušenje nekonstrukcijskega elementa (Damping). Dobljen etažni spekter odziva se lahko shrani kot sliko ali kot niz podatkov v obliki tekstovne datoteke, kar je primerno za nadaljnje urejanje.

2 DOLOČITEV POTRESNIH VPLIVOV NA NEKONSTRUKCIJSKE ELEMENTE ZA IDEALIZIRANO KONSTRUKCIJO

Nihalo predstavlja najbolj poenostavljen model konstrukcije. Togost palice nihala je določena s togostjo sten in stebrov dejanske konstrukcije. Pri običajni konstrukciji večino mase predstavljajo etažne plošče s koristno obtežbo, zato je predpostavka o koncentrirani masi na nivoju etaže upravičena. Model nihala je primeren za preučevanje obnašanja konstrukcije, ker lahko posamezne vplive izoliramo od ostalih. Preučevan je vpliv ekscentričnosti mase, tako da center mase odmikamo od središča togosti ter opazujemo spremembe. Nihalo s tremi masami na različnih višinah pa je uporabljeno za preučitev spremembe etažnega spektra po višini konstrukcije.

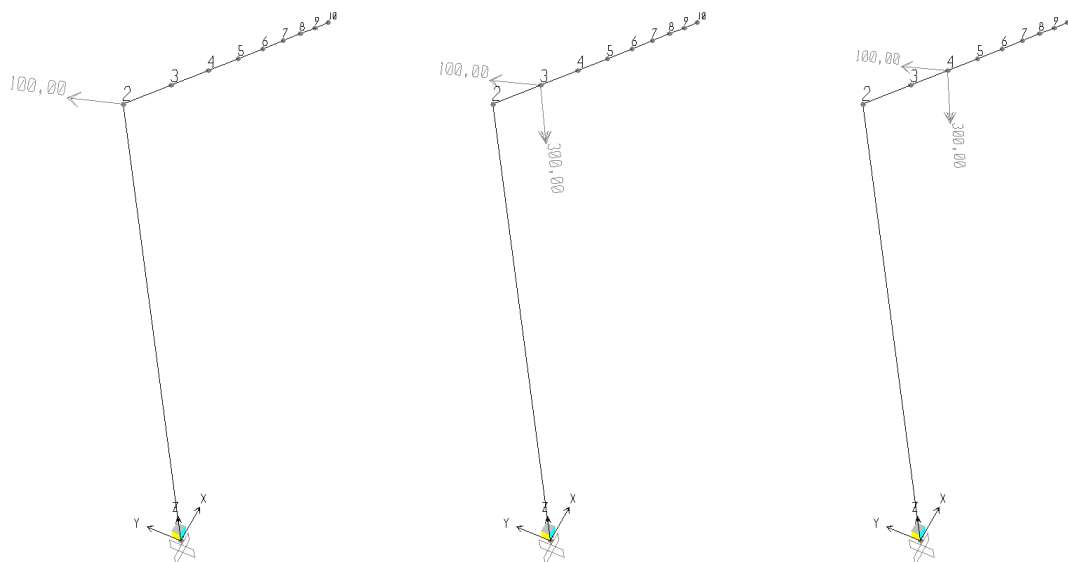
2.1 Nihala z ekcentrično maso

Raziskovan je odziv treh nihala enakih karakteristik, ki se razlikujejo v položaju mase (Preglednica 1). Palica ima okrogel prerez, masa palice ni upoštevana. Upoštevana je le koncentrirana masa na vrhu nihala oz. na višini etaže. Nihalo N1 nima ekscentrične mase, zato ima le eno prostostno stopnjo v smeri vzbujanja. Nihali N2 in N3 imata masi izmaknjeni v smeri X in imata dve prostostni stopnji. Vsa nihala so vzbujena pravokotno na smer ekscentričnosti, t.j. v smeri Y.

Preglednica 1: Karakteristike nihala N1, N2 ter N3

	NIHALO N1	NIHALO N2	NIHALO N3
višina h	20 m		
premer prereza d	1,8 m		
vztrajnostni moment prereza I	0,515 m ⁴		
elastični modul E	3·10 ⁷ kN/m ²		
ekscentričnost mase v smeri X	0 m	2,5 m	5 m
masa v smeri Y	100 t		
masni vztrajnostni moment v smeri Z	0 t·m ²	300 t·m ²	300 t·m ²

Točke od 2 do 10 na nihalu predstavljajo različne oddaljenosti od središča togosti na isti etaži (Slika 2). Razdalja med sosednjimi točkami je 2,5 m, skrajna točka 10 je tako od središča oddaljena 20 m. Te točke so povezane v diafragmo, s čimer je definirano tego obnašanje etažne plošče v svoji ravnini.



Slika 2: Modeli nihala z masami N1, N2, N3 v programu SAP2000.

Glavna perioda nihala se povečuje sorazmerno z večanjem ekscentričnosti mase (Preglednica 2). Medtem ko se nihalo pri prvi nihajni obliki giblje translacijsko, je druga nihajna oblika izrazito torzijska.

Preglednica 2: Nihajni časi nihala N1, N2 in N3

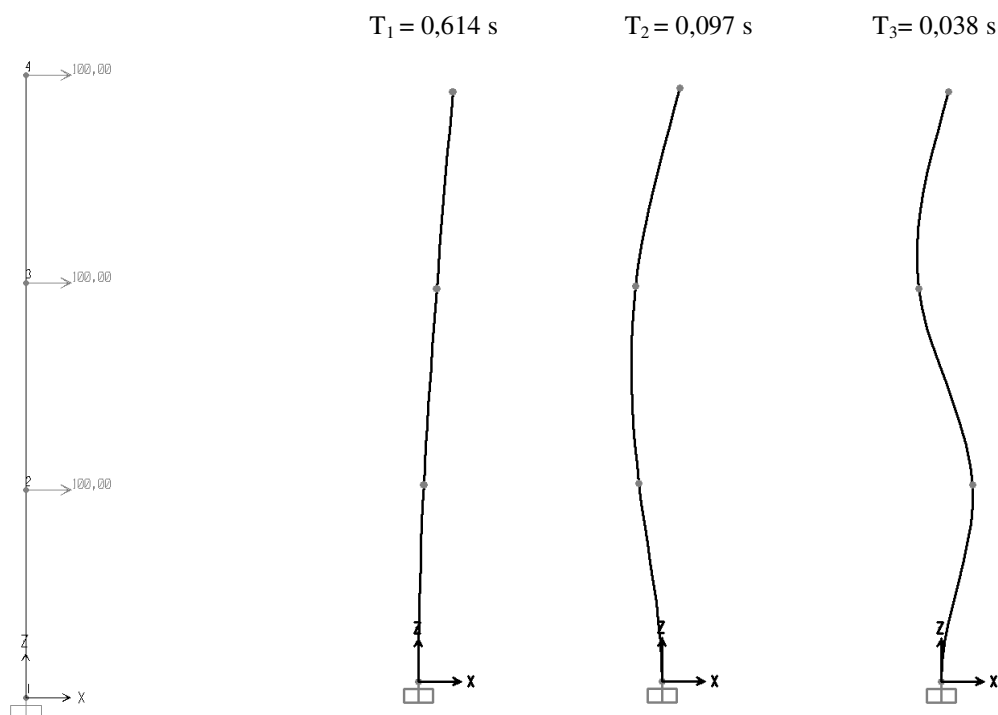
	T_1	T_2
Nihalo N1	0,827 s	/
Nihalo N2	0,852 s	0,137 s
Nihalo N3	0,924 s	0,126 s

2.2 Nihalo z masami na različnih kotah

Pri večnadstropnih konstrukcijah nas zanima, kako se etažni spekter (v nadaljevanju ES) spreminja po etažah. Palica ima okrogel prerez, ki se po višini ne spreminja. Na enakomerni razdalji 5 metrov so definirane tri enake koncentrirane mase, mase palice ne upoštevamo. Model ima tri prostostne stopnje. Nihalo vzbujamo v smeri osi X, v tej smeri so definirane tudi mase.

Preglednica 3: Karakteristike nihala N4.

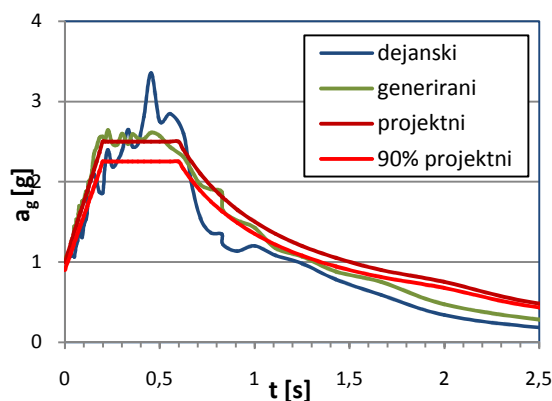
NIHALO N4	
višina h	15 m
premer prereza d	1,8 m
vztrajnostni moment prereza I	0,515 m ⁴
elastični modul E	3·10 ⁷ kN/m ²
masa v smeri X	100 t
višine etaž oz. mas	5 m 10 m 15 m



Slika 3: Model nihala N4 z masami ter nihajne oblike v SAP2000

2.3 Akcelerogrami

Nihala so vzbujena s šestimi akcelerogrami, od tega so trije dejanski potresni zapisi, trije pa so generirani na osnovi dejanskih. Da so rezultati dinamične analize med seboj primerljivi, je maksimalni pospešek pri vseh akcelerogramih omejen na gravitacijski pospešek $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Evrokod 8, poglavje 3.2.3.1.2(4) zahteva pri dinamični analizi uporabo vsaj treh akcelerogramov. Srednja vrednost elastičnega odzivnega spektra pa mora doseči vsaj 90% vrednosti projektnega spektra odziva v območju od $0,2 \cdot T_1$ do $2,0 \cdot T_1$, kjer je T_1 osnovni nihajni čas konstrukcije v smeri, v kateri bo akcelerogram uporabljen. Akcelerogrami so razdeljeni v dve skupini, v eni so združeni dejanski, v drugi pa generirani. Primerjani sta srednji vrednosti teh dveh skupin. Izkaže se, da srednja vrednost spektra odziva obeh zapisov ne ustrežata EC8 pogoju. Kljub temu uporabimo prej omenjene akcelerograme, saj srednja vrednost generiranih akcelerogramov pri osnovni periodi T_1 ustreza kriteriju (Slika 4). Srednja vrednost dejanskih akcelerogramov pa je podana za primerjavo. Trije akcelerogrami so po zahtevah standarda dovolj, vendar bi lahko izbira drugih treh akcelerogramov izkazala nekoliko odstopanja v rezultatih.



Slika 4: Srednje vrednosti odzivnih spektrov ter projektni spekter

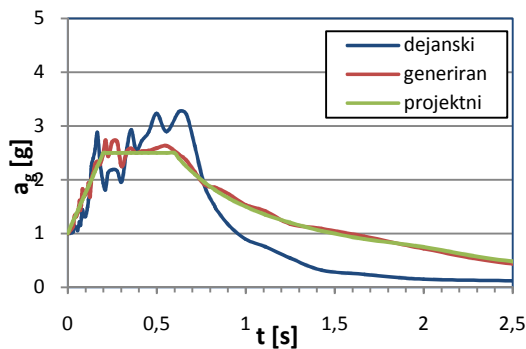
2.3.1 Dejanski akcelerogrami

Za potrebe diplomske naloge smo iz evropske baze potresov (Ambraseys in soavtorji, 2000) uporabili zapise potresov iz italijanskega Tolmezza iz leta 1976 [številka akcelerograma iz evropske baze akcelerogramov: 55] ter črnogorskega Petrovca [196] in Ulcinja [197] iz leta 1979. Spekter odziva pospeškov za akcelerogram iz Petrovca ima špico pri približno 0,55 s, ki

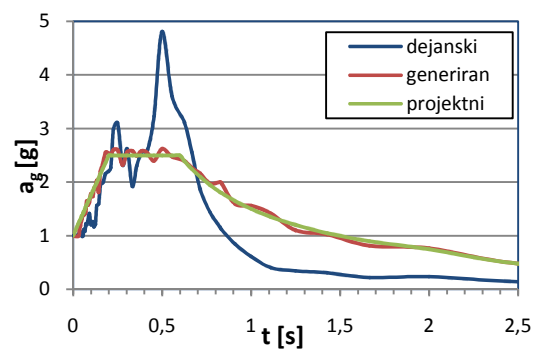
je dvakrat večja od vrednosti pri projektne spektru. Akceleroگرام iz Ulcinja je specifičen, saj zaradi prevladujočih dolgih period zelo odstopa od projektne spektra pospeška.

2.3.2 Generirani akceleroگرامi

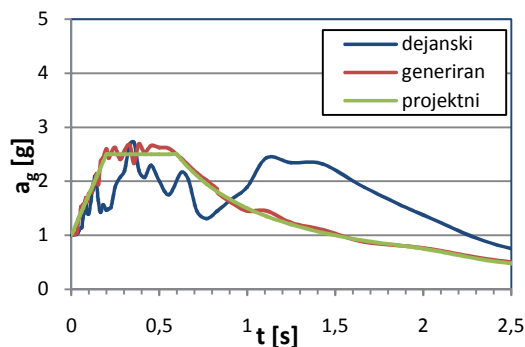
Zaradi pomanjkanja ustreznih dejanskih zapisov se v analizah pogosto uporabljajo generirani akceleroگرامi kot opisujeta Paskalov in Reese (2003). Te lahko dobimo s superpozicijo sinusoid z različnimi faznimi koti, pri tem pa kot vhodna podatka potrebujemo amplitude sinusoid ter fazne kote. Ker v času trajanja potresa ta ponavadi ne nastopa z neko konstantno amplitudo, maksimalne vrednosti generiranega zapisa omejimo z časovno odvisno funkcijo intenzitete. Nato z iterativno metodo spreminjamo zapis, dokler se spekter odziva zadovoljivo ne ujema s ciljnim spektrom odziva. Tako se spektri odziva generiranih v primerjavi z dejanskimi akceleroگرامi precej bolje ujemajo s projektne spektrom odziva. Obravnavani generirani akceleroگرامi so generirani upoštevajoč starejšo verzijo standarda EC8, saj ima spekter odziva faktor zemljine $S = 1,0$, kar ustreza tlem tipa A po EC8, vrednost T_B v spektru pa je 0,6 s, kar ustreza tlem tipa C po EC8. Za generacijo akceleroگرامov je bil uporabljen program SYNTH (Naumoski, 1998).



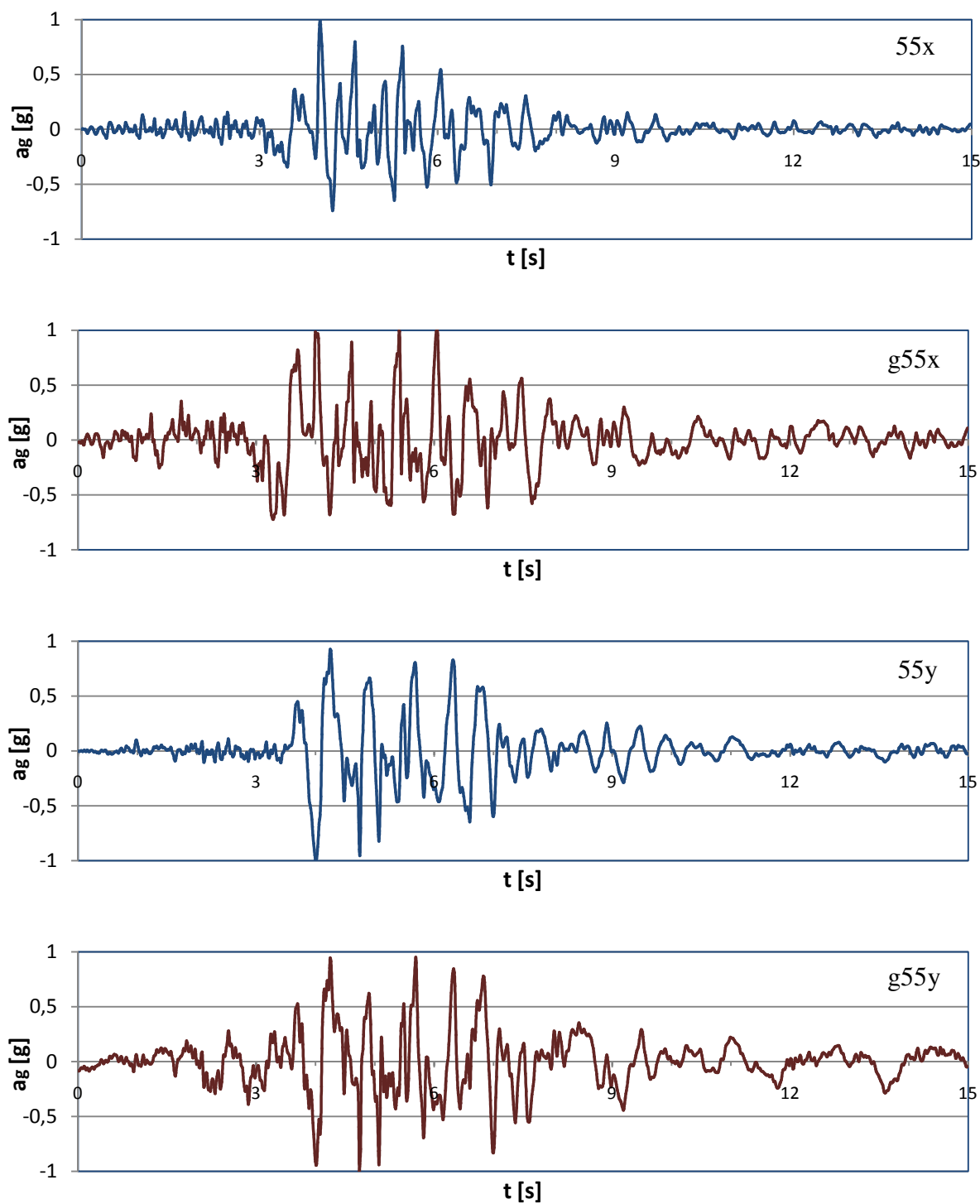
Slika 5: Spektri odziva za akc. Tolmezzo [55y]



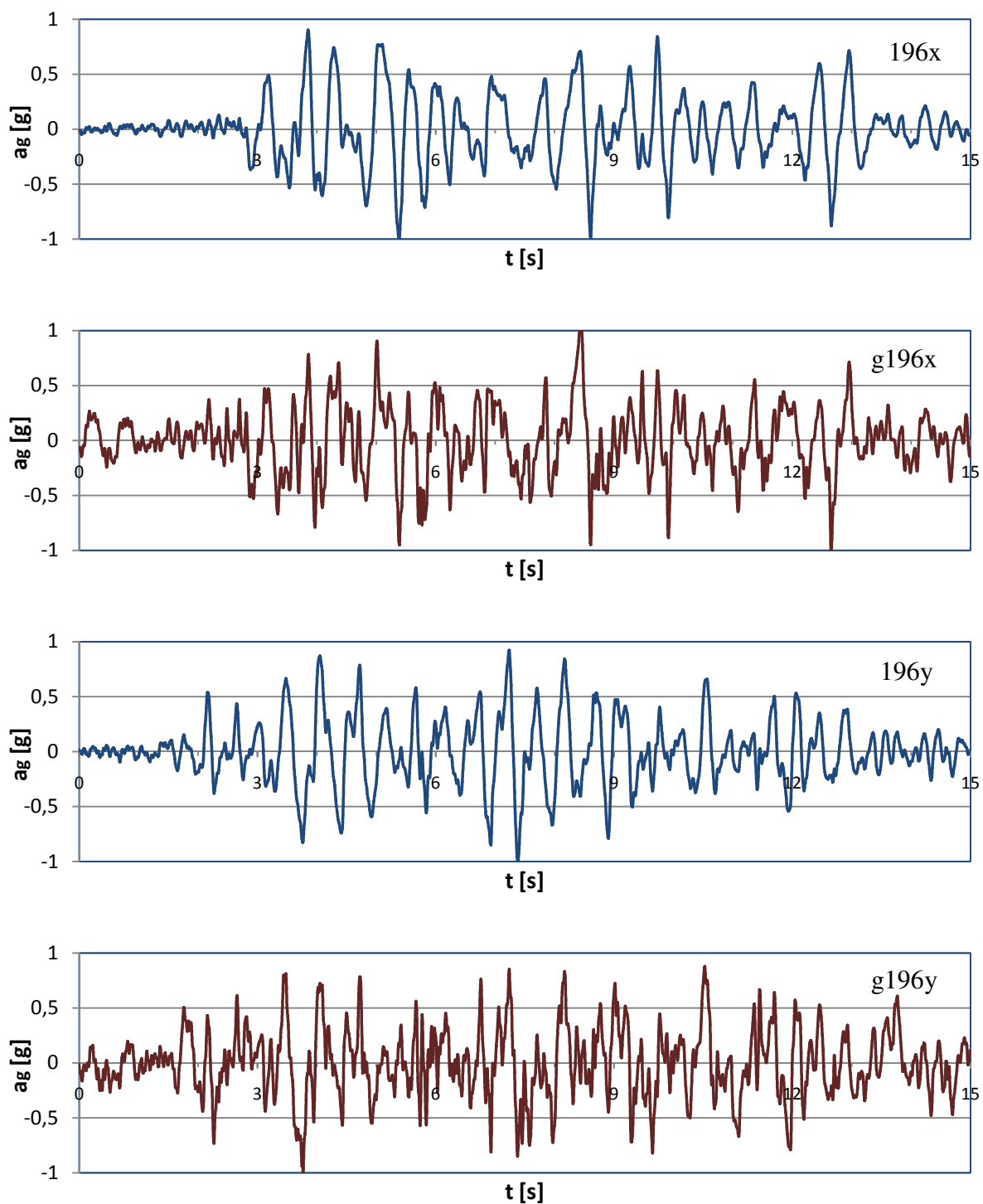
Slika 6: Spektri odziva za akc. Petrovac [196y]



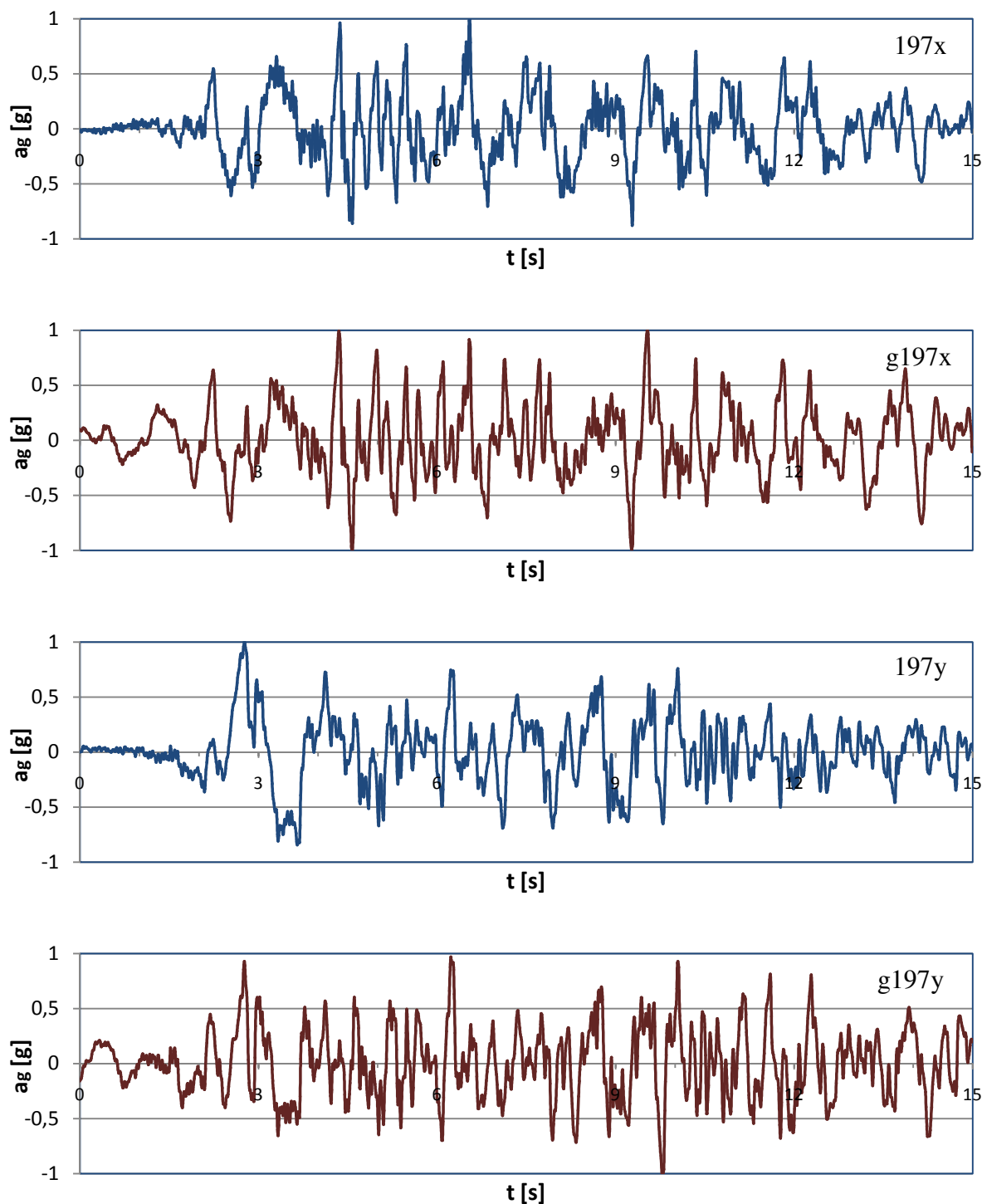
Slika 7: Spektri odziva za akc. Ulcinj [197y]



Slika 8: Dejanski in generirani akceleroگرامi Tolmezzo v smeri X in Y



Slika 9: Dejanski in generirani akceleroگرامi Petrovac v smeri X in Y

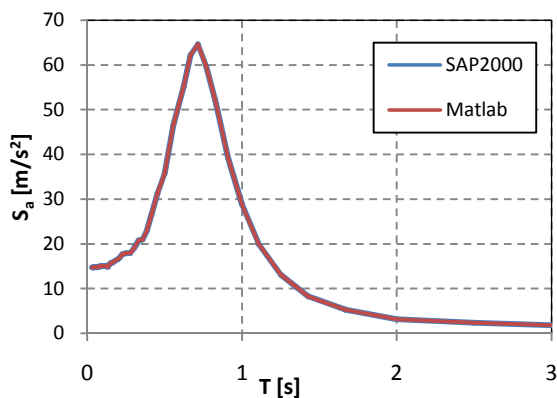


Slika 10: Dejanski in generirani akceleroگرامi Ulcinj v smeri X in Y

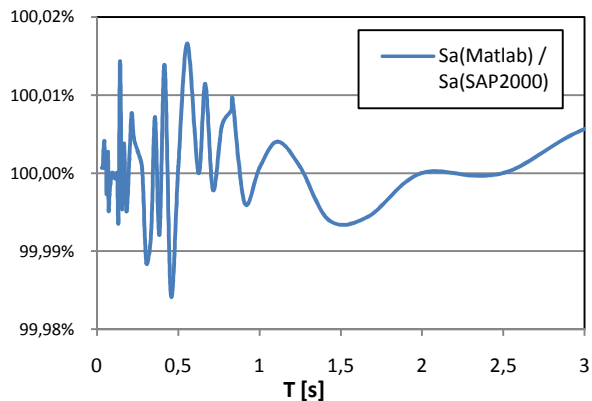
2.3 Analiza

Analiza je narejena s komercialnim programom SAP2000, ki ima vgrajeno funkcijo za izračun etažnih spektrov. Začnemo z definiranjem modela, kjer določimo mrežo ter podamo materialne karakteristike. Ker je nihalo idealiziran primer konstrukcije, materialu pripišemo nično specifično maso. Po določitvi prereza lahko narišemo elemente in model togo podpremo. Nato dodamo točkovno maso na vrhu v smeri vzbujanja, v primeru ekscentričnosti pa še masni vztrajnostni moment v smeri osi rotacije. Sledi definicija časovno odvisne funkcije obtežbe, kjer uvozimo akcelerogram. Nato definiramo linearno dinamično analizo (Define/Analysis Case), kjer pripišemo obtežbi smer delovanja. Izbran način analize je superpozicija modalnih oblik (Analysis Case Type: Time-History), kjer upoštevam 5% modalnega dušenja pri vseh nihajnih oblikah. Za izbrano točko nam program prikaže spekter odziva (Display/Response Spectrum Curves) v željeni smeri in pri izbranem dušenju komponente. V diplomski nalogi so etažni spektri izračunani za komponente s 5% kritičnim dušenjem. To ustreza povprečni vrednosti dušenja komponent, sicer pa se vrednosti etažnega spektra manjšajo proporcionalno z večanjem dušenja.

Rezultate sem nato preveril s programom Matlab. Uporabil sem pospeške na mestu nekonstrukcijske komponente iz SAP2000, iz katerih sem nato izračunal ES. Na Slika 11 je predstavljen reprezentativen primer, in sicer za nihalo N1, ki je vzbujeno z akcelerogramom g55. Kvocient etažnih spektrov (Slika 11) pokaže, da se krivulji razlikujeta za manj kot 0,2 promila. Etažna spektra se praktično povsem ujemata.



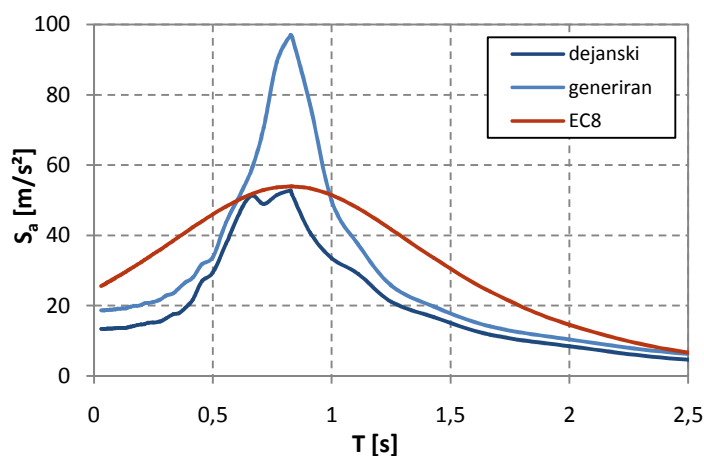
Slika 11: Primerjava ES iz SAP2000 ter Matlab-a



Slika 12: Kvocient ES iz Matlab-a in SAP2000

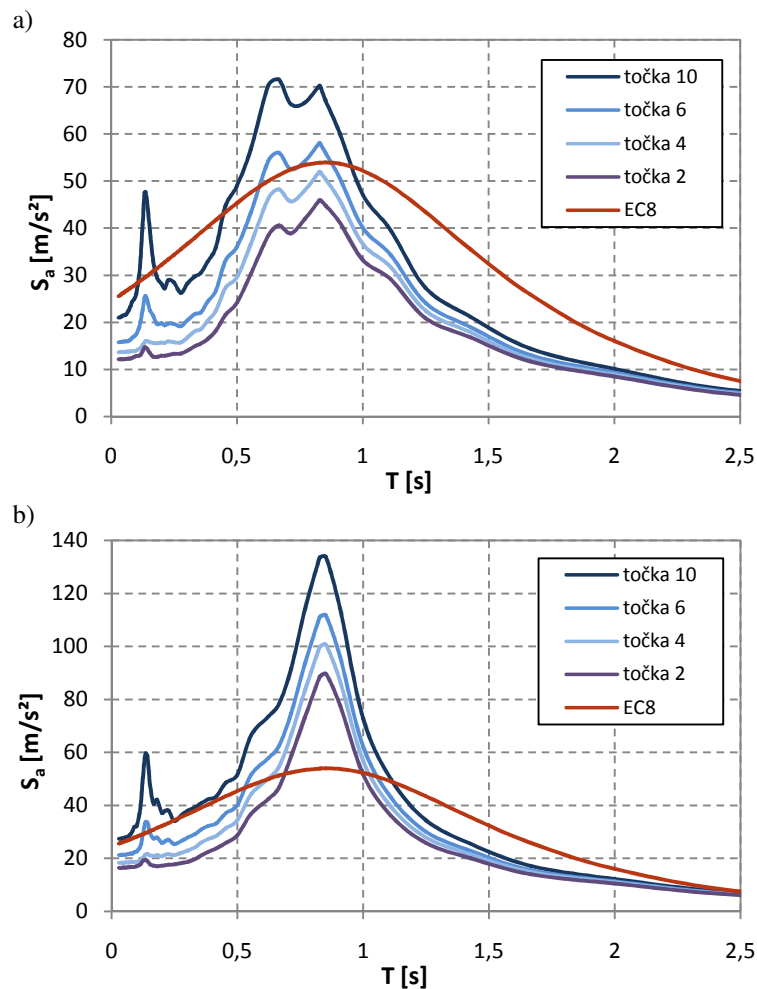
2.4 Rezultati

Vsak akcelerogram nam da graf etažnih spektrov v različnih točkah, kar pomeni 6 grafov v eni točki. Opazovani so etažni spektri v točkah 2, 4, 6 ter 10, ki so na isti višini, a so različno oddaljene od središča togosti. Vsi prikazani etažni spektri so srednje vrednosti treh dejanskih oz. treh generiranih etažnih spektrov. Grafe primerjam s krivuljo etažnega spektra po EC8.



Slika 13: Srednje vrednosti etažnih spektrov ter etažni spekter po EC8 za nihalo N1

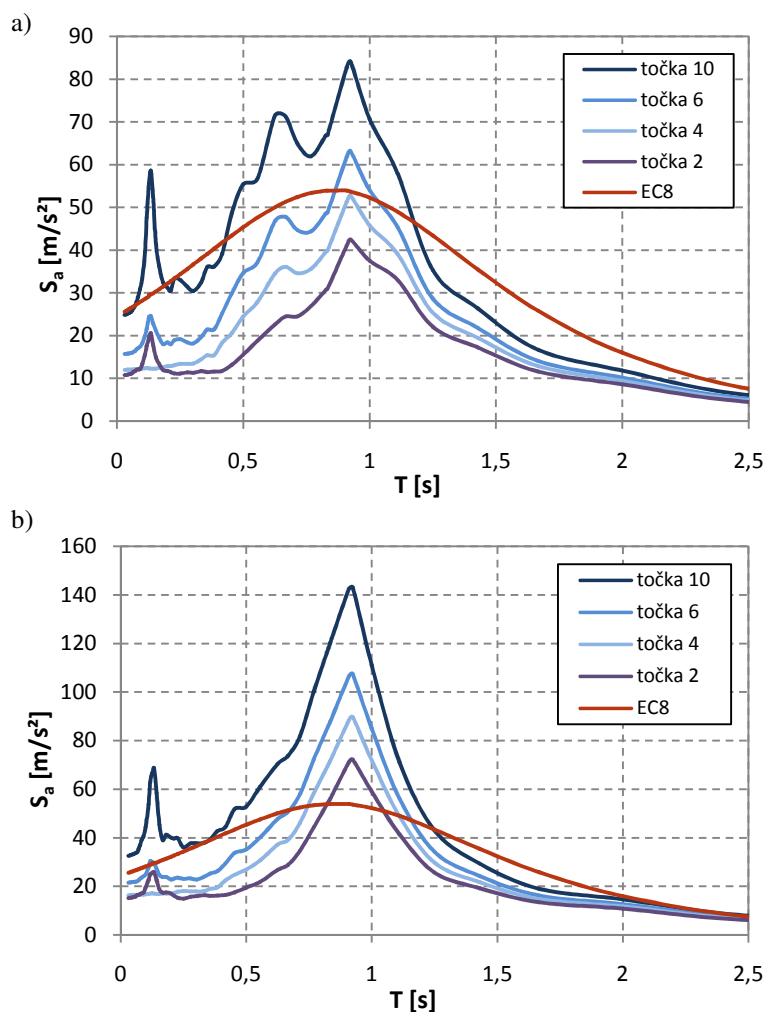
Maksimalna vrednost etažnega spektra se pojavi pri glavni periodi konstrukcije, ko je nekonstrukcijski element v resonanci s konstrukcijo. Pri nihalih N2 ter N3 se manjši ekstrem pojavi tudi pri drugi periodi konstrukcije (Slika 14 in 15). Pri nihalu N1 je ES enak za vse točke na etaži, kar ne velja za ekscentrični nihali N2 in N3. Zaradi ekscentrične mase se vrednosti ES proporcionalno povečujejo z večanjem oddaljenosti od središča togosti. Bolj kot so točke oddaljene, večji je vpliv torzije. Proporcionalnost je posledica predpostavke, da je plošča toga v svoji ravnini.



Slika 14: Srednje vrednosti ES a) dejanskih in b) generiranih akc. ter ES po EC8 za nihalo N2

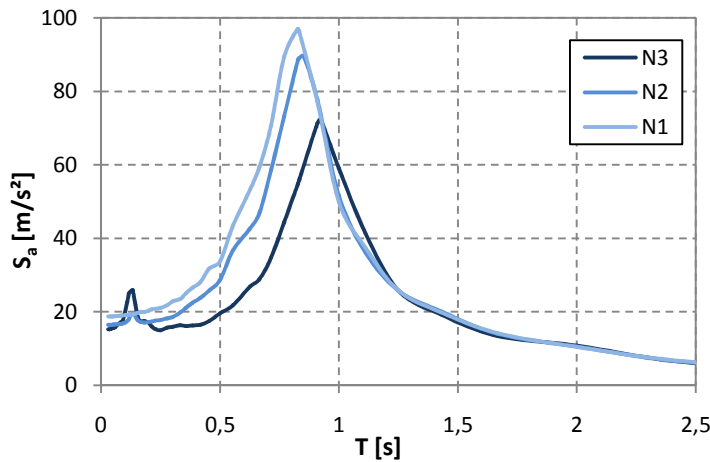
Vrednosti ES generiranih akceleroگرامov so večje od vrednosti ES dejanskih akceleroگرامov. Razlog za to je razlika v spektralnem pospešku pri glavni periodi konstrukcije, kar je razvidno iz spektra odziva (Slika 4). Spektri odziva generiranih akceleroگرامov se dobro ujemajo s projektnim odzivnim spektrom, saj so bili ti akceleroگرامi generirani glede na elastični projektni spekter. Spektri odziva registriranih potresov pa so bolj nepravilne oblike. Tako je vrednost v spektru v območju osnovnih period nihalo manjša od vrednosti generiranih akceleroگرامov. Zato so rezultati, dobljeni iz generiranih akceleroگرامov bolj relevantni, saj so v skladu s standardom. Rezultati dejanskih akceleroگرامov pokažejo možen raztros vrednosti, oziroma nehomogenost potresnega delovanja in odziv konstrukcije na to. Prav tako je oblika ES manj izrazito koničasta pri glavni periodi.

Evrokod 8 določa etažni spekter, ki je enak za vse točke v določeni etaži. Tako ne upošteva spreminjanje pospeška zaradi vpliva torzije pri konstrukcijah z ekscentrično maso. Prav tako po EC8 ni možno upoštevati dušenja komponente, medtem ko je v SAP2000 upoštevano 5% dušenje komponente. Primerjava izračunanih ES generiranih potresnih zapisov z EC8 v obravnavanem primeru pokaže, da slednji poda neko srednjo vrednost, ki pa v območju osnovne periode deluje nekonzervativno pri vseh točkah na etaži. Primerjava etažnih spektrov pri duktilnem in elastičnem obnašanju konstrukcije pokaže, da imajo spektri neelastičnih konstrukcij manjše ekstreme pri lastnih periodah konstrukcije, v območju med lastnimi periodami pa so vrednosti pospeškov večje [Medina in soavtorji, 2006, 2007]. Značilnosti krivulje ES po EC8 se bolj ujemajo s ES konstrukcij z duktilnim obnašanjem, vendar v sami formuli vpliva duktilnosti ne moremo podajati.

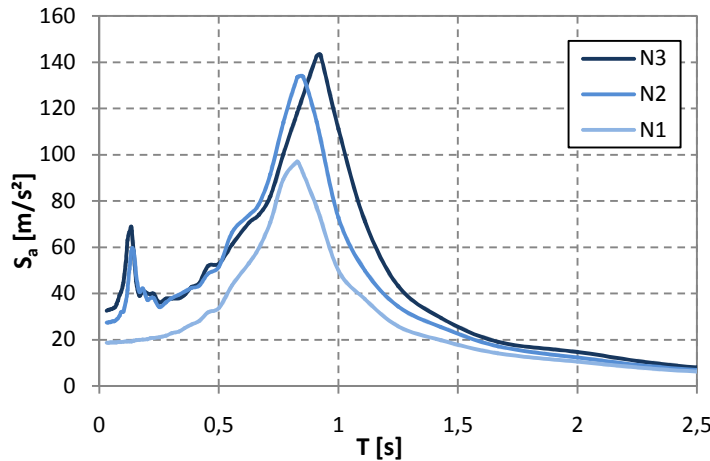


Slika 15: Srednje vrednosti ES a)dejanskih in b)generiranih akc. ter ES po EC8 za nihalo N3

Primerjava ES nihala enake togosti z različno ekscentričnostjo mase v istih točkah je prikazana na slikah 16 in 17. V krajni točki 10 je ES največji pri nihalu z najbolj ekscentrično maso, medtem ko N1 doseže večje vrednosti pospeška v središču togosti, v točki 2. Nihalo N1 ima konstantni ES po etaži, ekscentričnima nihalom pa se ES po etaži spreminja. Nihalo N2 ima v točki 10 za 50% večje vrednosti ES glede na točko 2, N3 pa za 100%. To pomeni, da se z večanjem ekscentričnosti mase poveča razlika v vrednosti ES med različnimi točkami iste etaže.



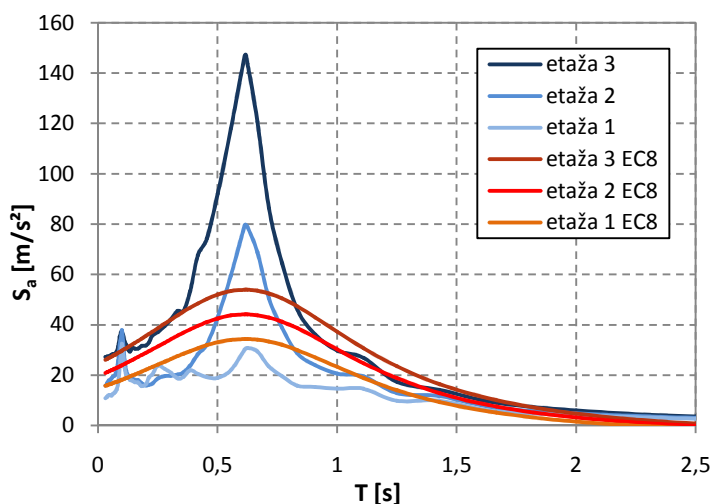
Slika 16: Srednje vrednosti generiranih ES nihal N1, N2 ter N3 v točki 2



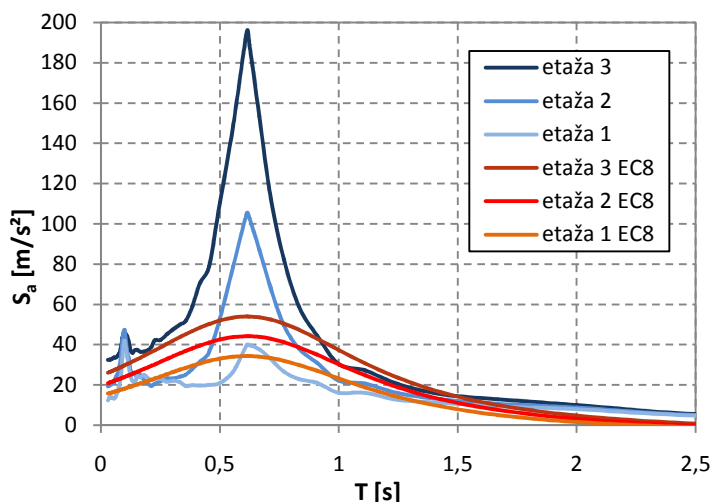
Slika 17: Srednje vrednosti generiranih ES nihal N1, N2 ter N3 v točki 10

2.5 Rezultati nihala N4

Z višino se ES pričakovano povečuje, kar predvideva tudi Evrokod 8. Za podani primer se izkaže, da večanje ES z višino po EC8 vse bolj zaostaja za rezultati iz SAP2000. Če v prvi etaži EC8 konzervativno določi ES, je v drugi nekonzervativen v območju glavne periode konstrukcije. V tretji etaži pa ES po standardu ne ustreza več v večjem območju periode komponente. Zanimivo je, da v prvi etaži maksimum ES nastopi pri drugi periodi konstrukcije. Iz tega je razvidno, da v spodnji etaži prevladuje vpliv druge nihajne oblike.



Slika 18: Primerjava srednje vrednosti ES dejanskih akc. za nihalo N4 ter EC8



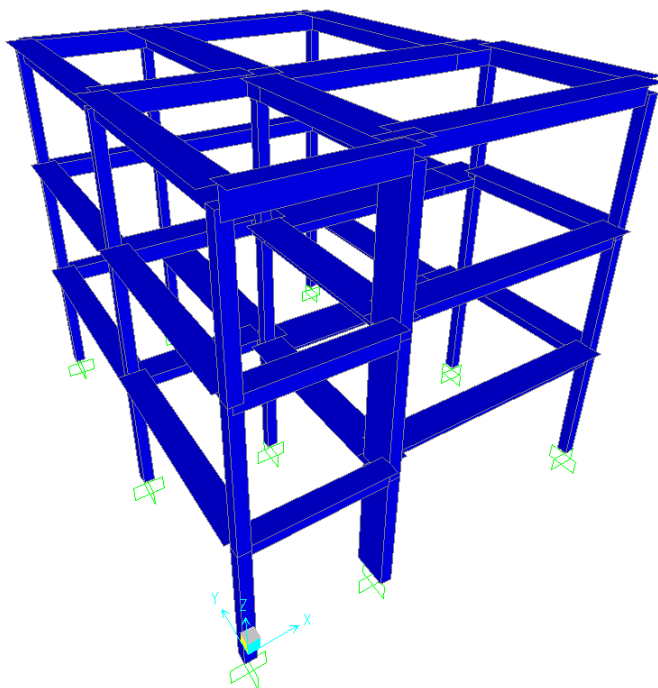
Slika 19: Primerjava srednje vrednosti ES generiranih akc. za nihalo N4 ter EC8

3 DOLOČITEV POTRESNIH VPLIVOV NA NEKONSTRUKCIJE ELEMENTE ZA KONSTRUKCIJO SPEAR

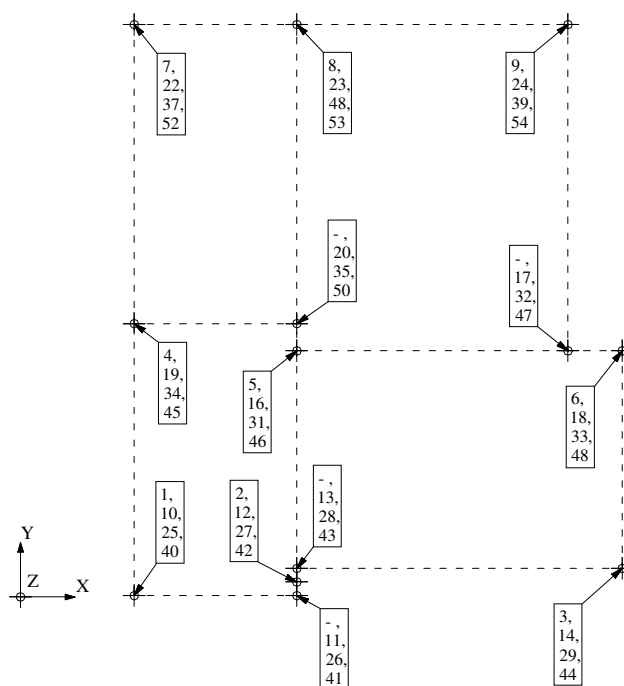
V tem delu diplomske naloge sem proučeval etažne spektre na tridimenzionalnem modelu konstrukcije SPEAR. Konstrukcija predstavlja starejšo zgradbo, ki je tipična za sredozemsko gradnjo in ne ustreza sedanjemu standardu Eurokod za potresnoodporno gradnjo, kar pa glede na cilj preučevanja ni bistveno. Naj omenim, da je bila ta konstrukcija preizkušena v merilu 1:1 na pseudodinamično potresno obtežbo v laboratoriju ELSA v Ispri. Pred in po preiskavi je bila predmet številnih analiz (Fajfar in soavtorji, 2006), ki so se na ta način verificirale. Rezultati testa so bili primerjani z računskim modelom v programu SAP2000 tudi v diplomskem delu Rozman (2005), od katerega sem povzel model in obtežbo konstrukcije.

3.1 Modeliranje konstrukcije (Rozman, 2005)

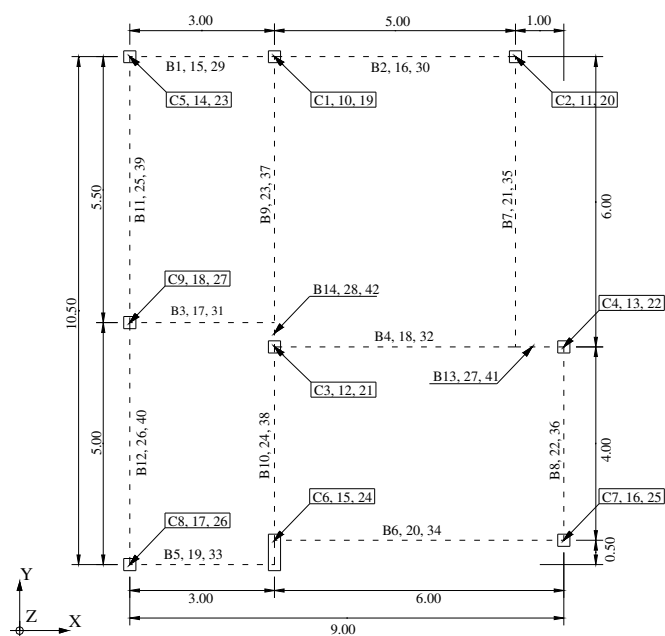
Armiranobetonska konstrukcija ima tri etaže. Po tlorisu je izrazito nesimetrična zaradi česar je za proučevanje etažnih spektrov še posebej zanimiva, ker predstavlja bolj splošno zasnovano. Po višini je regularna z etažno višino 3 m.



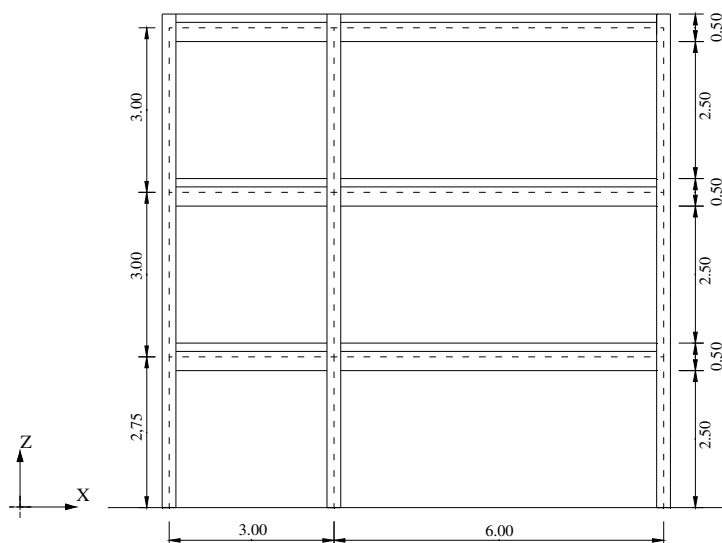
Slika 20: Model konstrukcije SPEAR v SAP2000



Slika 21: Oštevilčenje vozlišč



Slika 22: Tlorisne dimenzije in poimenovanje elementov konstrukcije SPEAR



Slika 23: Prečni prerez konstrukcije SPEAR

Obtežbo predstavlja lastna teža konstrukcije z lastno težo zaključnega sloja $g_r = 0,5 \text{ kN/m}^2$ ter spremenljivo obtežbo $q = 2,0 \text{ kN/m}^2$. Endoskeletna zasnova prenaša obtežbo preko plošč z gredami in s stebri, ki so vsi razen enega dvojnosiometričnega prereza. Stebri imajo prerez $b/h = 25/25 \text{ cm}$, razen stebra C6,15,24, ki ima prerez dimenzij $b/h = 25/75 \text{ cm}$. Plošča, debeline 15 cm, ni modelirana, ampak je pri gredah upoštevana še sodelujoča širina plošče. Vpliv plošče je nadomeščen z diafragmami po etažah. Na ta način je celoten model iz linijskih elementov, pri čemer imajo zunanje grede L - prerez, notranje pa T – prerez (Preglednica 4).

Preglednica 4: Grede s sodelujočimi širinami pasnic

Greda	Sodelujoča širina pasnic [cm]	Razpon [cm]	Vrsta prereza
B 1	44,25	275	L
B 2	58,25	475	L
B 3	63,50	275	T
B 4	105,50	575	T
B 5	44,25	275	L
B 6	65,25	575	L
B 7	105,50	575	T
B 8	77,50	375	T

B 9	105,50	575	T
B 10	77,50	375	T
B 11	61,75	525	L
B 12	58,25	475	L
B 13	105,50	575	T
B 14	105,50	575	T

Modul elastičnosti betona vseh elementov je $E_{cm} = 2800 \text{ kN/cm}^2$, specifična teža materiala ni podana, ker je masa upoštevana točkovno v vsaki etaži. Masa je določena po EC8 z izrazom $G + \varphi \cdot \psi_{2i} \cdot Q$, kjer je $\psi_{2i} = 0,3$ za pisarne in $\varphi = 1,0$ za vsa tri nadstropja. Mase in masni vztrajnostni momenti so podani v masnem središču posamezne etaže (Preglednica 5). Ta predpostavka se pogosto uporablja, saj s tem zelo zmanjšamo število prostostnih stopenj, s čimer skrajšamo računski čas analize.

Preglednica 5: Mase podane po etažah

Etaža	Center mas		Masa	Masni vztr. moment
E1 in E2	X = 4,58 m	Y = 4,65 m	67,264 t	1500,7 t·m ²
E3	X = 5,35 m	Y = 5,44 m	62,804 t	1363,4 t·m ²

Za določitev ekscentričnosti moramo poznati center togosti posamezne etaže. Po EC8 je določen kot center togosti vztrajnostnih momentov stebrov. EC8 določa pogoj, ko lahko konstrukcijo obravnavamo kot pravilno po tlorisu:

$$e_{0i} \leq 0,3 \cdot r_i, \quad (3)$$

$$r_i \geq l_s, \quad (4)$$

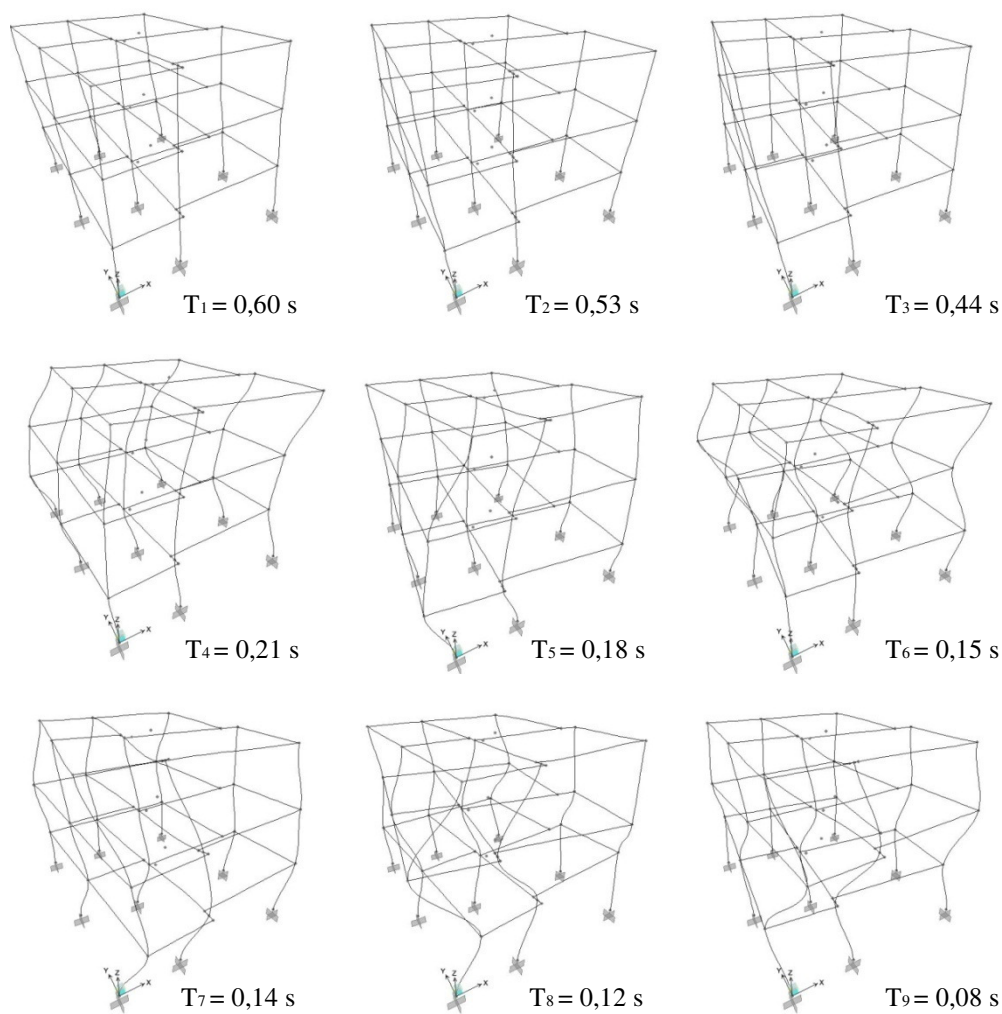
kjer je e_{0i} ekscentričnost v smeri osi i ($i = X, Y$), r_i torzijski radij ter l_s torzijski radij etaže. Po EC8 je konstrukcija nesimetrična, še posebej v smeri osi Y .

Preglednica 6: Torzijske karakteristike konstrukcije SPEAR

Etaža	e_{0x} [m]	e_{0y} [m]	r_x [m]	r_y [m]	l_s [m]	$0,3 \cdot r_x$ [m]	$0,3 \cdot r_y$ [m]
E1 in E2	1,34	1,07	1,47	2,59	4,43	0,44	0,78
E3	1,37	1,14	1,47	2,59	4,43	0,44	0,78

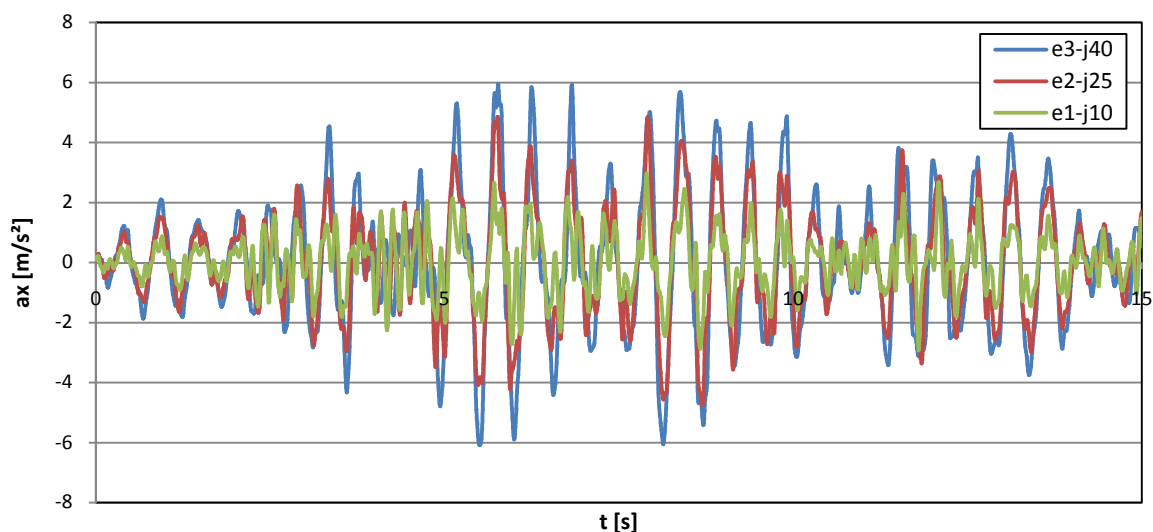
3.2 Analiza in rezultati

Pri analizi je bila konstrukcija SPEAR hkrati izpostavljena akceleroogramu v smereh X in Y. Vzbujena je s tremi pari generiranih akceleroogramov g55, g196 ter g197, ki so normirani na maksimalen pospešek $a_g = 0,2 \cdot g = 1,96 \text{ m/s}^2$.



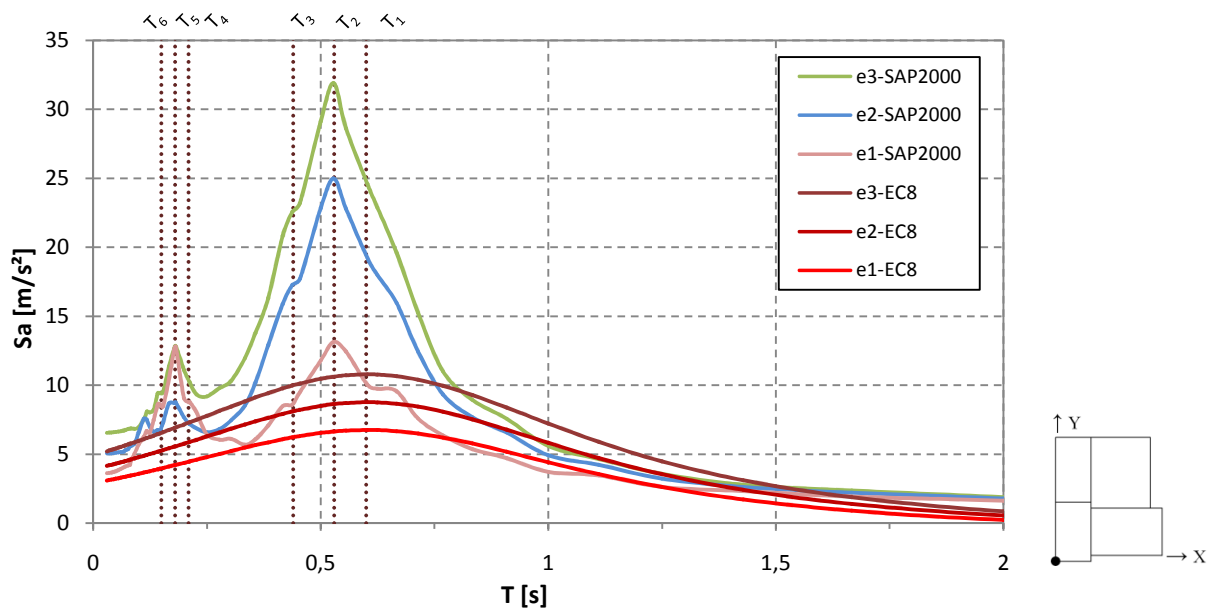
Slika 24: Modalne oblike in nihajni časi konstrukcije SPEAR v SAP2000

Časovni potek pospeškov zaradi vzbujanja z akceleroگرامom se z višino konstrukcije povečuje. Na sliki je prikazan časovni potek pospeškov za akceleroagram g196 v smeri X. Maksimalna vrednost posameznega niza predstavlja sidrno točko etažnega spektra odziva. Ta točka je pospešek togega nekonstrukcijskega elementa, ki je enak pospešku konstrukcije. Srednja vrednost pospeškov je $2,64 \text{ m/s}^2$ v prvi (j10), $4,62 \text{ m/s}^2$ v drugi (j25) ter $5,72 \text{ m/s}^2$ v tretji etaži (j40).

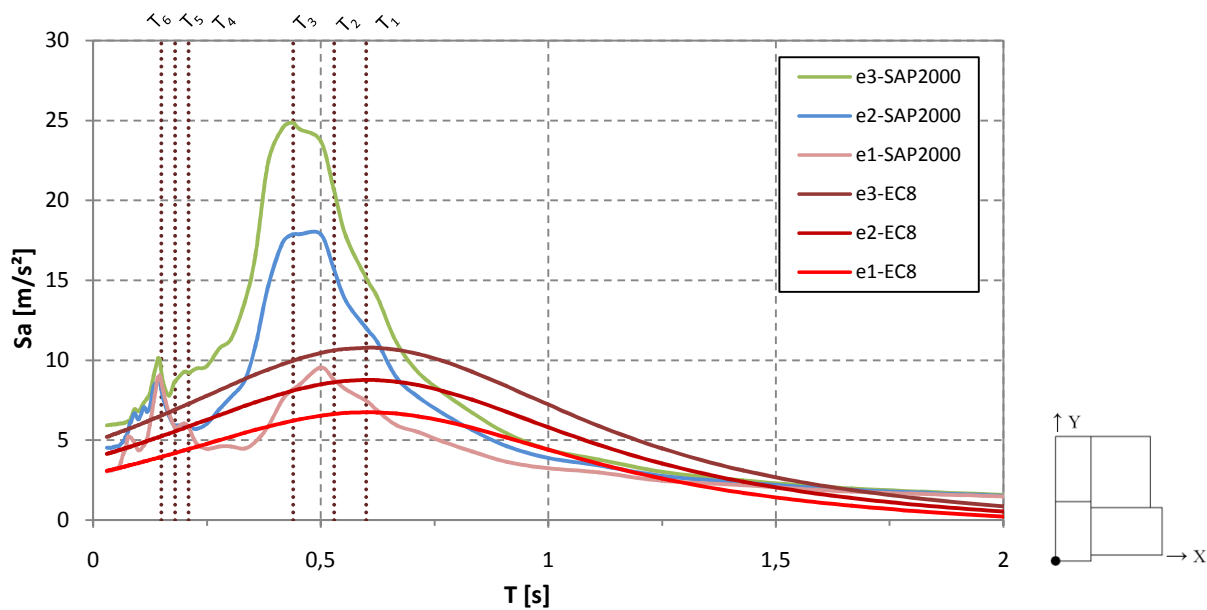


Slika 25: Časovni potek pospeškov za akceleroagram g196 v smeri osi X

Vsi predstavljeni rezultati etažnih spektrov so srednje vrednosti treh generiranih akceleroagramov. Predstavljeni so rezultati v točkah 10, 25 in 40. Primerjane točke so ena nad drugo. Pri večetažni konstrukciji so pospeški večji v višjih etažah pri praktično vseh periodah nekonstrukcijskih komponent (Sliki 26 in 27). Neregularnost se pojavi v območju manjših period (T_5 in T_6), kjer so pospeški prve etaže večji v primerjavi s pospeški v drugi etaži. V tem območju so pospeški prve in tretje etaže podobnih vrednosti. Pri periodah, ki so večje od 1 s, se pospeški z višino praktično ne povečujejo.



Slika 26: Primerjava etažnih spektrov po višini konstrukcije SPEAR v smeri osi X



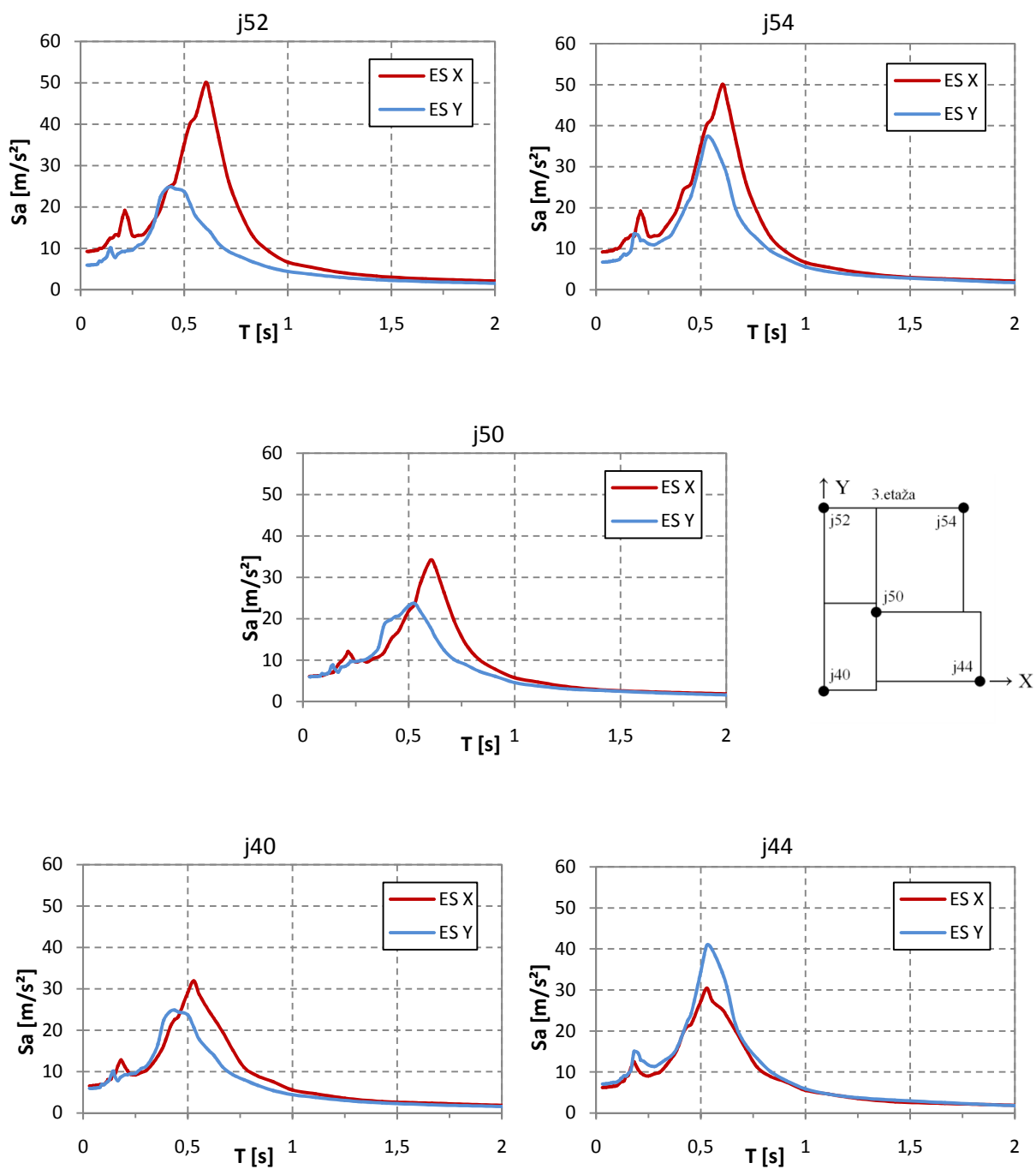
Slika 27: Primerjava etažnih spektrov po višini konstrukcije SPEAR v smeri osi Y

Maksimum krivulje etažnega spektra v smeri osi X je v vseh etažah pri drugi periodi konstrukcije. V smeri osi Y je maksimum v najvišji etaži pri tretji periodi, v nižjih etažah pa se premika proti drugi periodi. Resonanca nekonstrukcijskega elementa s prvo periodo konstrukcije SPEAR tako ni najbolj neugoden primer glede pospeškov. Ekstrem se pojavi tudi

pri peti (smer X) in šesti (smer Y) periodi. Pri teh dveh periodah je vrednost enaka v vseh etažah. V prvi etaži sta ekstrema enakih vrednosti, območje med njima pa ima polovico manjše vrednosti. Etažni spektri po EC8 pri periodah konstrukcije nekonzervativno določajo pospeške. Pri periodah nekonstrukcijskih elementov nad 0,7 – 0,8 s so vrednosti večje od izračunanih na 3D modelu. V tretji etaži so dejanske špice pospeškov 2,5 do 3 krat večje od pospeškov po EC8. Po etaži se maksimalni pospeški močno spreminjajo. Na sliki 28 so posamezni spektri prikazani tako, da se ujemajo s tlorisnim položajem točk za katere predstavljajo vrednosti. Pokaže se izrazit vpliv torzije. Točke, ki imajo enako ročičo od centra rotacije, imajo identičen etažni spekter. K togosti veliko prinese steber pravokotnega prereza v spodnjem delu tlorisa (Slika 22, steber C6,15,24), ki pomakne center rotacije v spodnjo polovico tlorisa. Zato so vrednosti pospeškov v smeri X v točkah 52 in 54 največje. V točki 40 je pri komponenti, ki je v resonanci s konstrukcijo pospešek enak 32 m/s^2 , medtem ko se pri točki 52 poveča na 50 m/s^2 , kar predstavlja povečanje pospeška za 55 %. V smeri Y je maksimalen pospešek v etažnem spektru v točki 40 enak 25 m/s^2 , v točki 44 pa 40 m/s^2 . Tukaj je razlika med pospeškoma kar 60%. Sklep je, da se pospeški na nekonstrukcijske komponente močno spreminjajo tudi po sami etaži in so neposredno povezani s položajem centra rotacije. Točka 50 je najbližje masnemu središču. Maksimum v X smeri je pri 0,6 s, kar je prva perioda konstrukcije, v smeri osi Y pa maksimum sovpada z drugo periodo konstrukcije. Pri prvi periodi je efektivna masa največja v smeri osi X, pri drugi pa v Y. Tako se potrdi ugotovitev dobljena pri nihalu, da je resonančno območje z osnovno periodo za nekonstrukcijske elemente najbolj neugodno. Vendar se hkrati pokaže, da v robnih točkah 40 ter 44 dobimo največje vrednosti pri drugi periodi v smeri osi X ter tretji periodi v smeri Y. Izkaže se, da maksimum ni pri isti periodi po vsej etaži, kar pomeni, da ekstrem ne sovpada nujno s prvo (smer X), oz. drugo (smer Y) nihajno obliko.

Preglednica 7: Efektivne mase konstrukcije SPEAR

nihajna oblika	nihajni čas T[s]	UX	UY	RZ
1	0,60	0,663	0,069	0,746
2	0,53	0,184	0,464	0,120
3	0,44	0,021	0,294	0,000
4	0,21	0,079	0,007	0,086
5	0,18	0,024	0,046	0,016
6	0,15	0,015	0,001	0,016

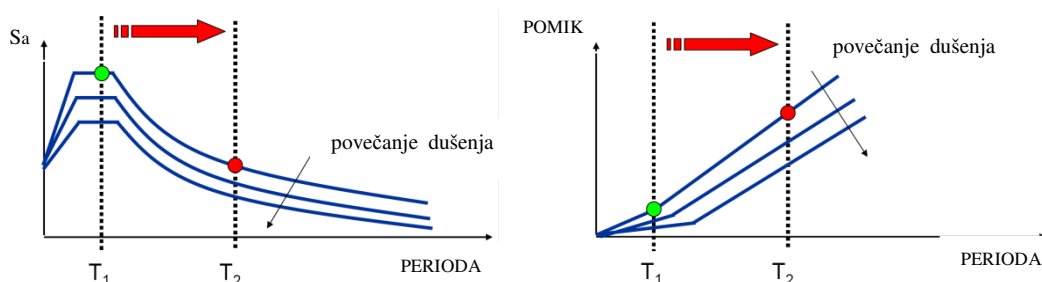


Slika 28: Primerjava etažnih spektrov po 3. etaži v smeri X in Y za konstrukcijo SPEAR

4 DOLOČITEV VPLIVA POTRESNE OBTEŽBE NA NEKONSTRUKCIJSKE ELEMENTE POTRESNO IZOLIRANE STAVBE

4.1 Osnove potresne izolacije

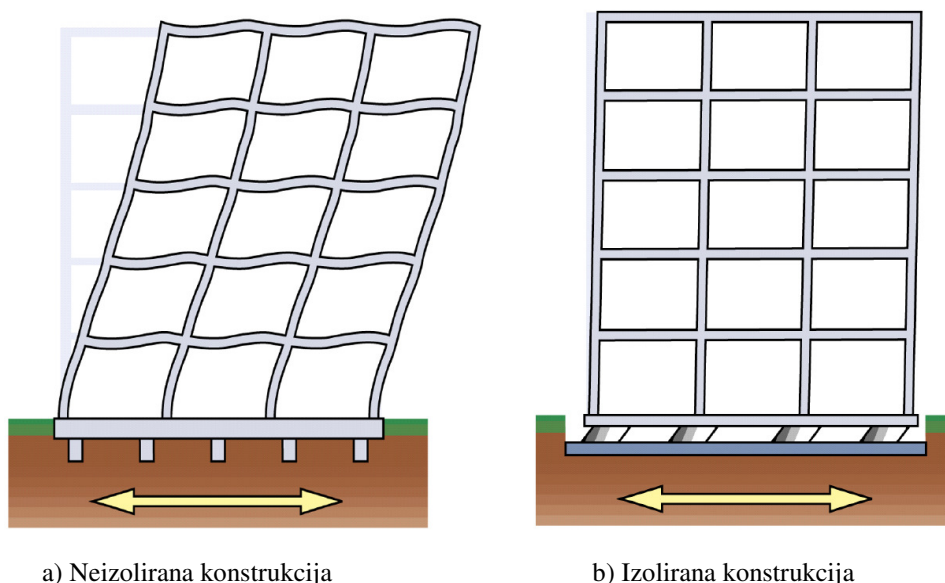
Namestitvev izolatorjev v konstrukcijo je eden izmed načinov potresnoodporne gradnje. Osnovna ideja izolatorjev je izničiti vpliv potresa na konstrukcijo, realno gledano pa ta vpliv zmanjšati. Odziv konstrukcije na tipičen potres, ki ima največje vrednosti pospeška v visokofrekvenčnem območju, je ponazorjen s spektrom odziva (Slika 29).



Slika 29: Posledica povečanja periode konstrukcije in dušenja na spekter pospeškov in spekter pomikov (Kelly, 2001)

Značilnost spektra je, da se z naraščajočo periodo vrednost pospeška manjša. To nam sugerira, da osnovno periodo konstrukcije povečamo ($T_1 \rightarrow T_2$), kar pomeni manjše spektralne pospeške in posledično manjšo potrebno odpornost na potresno gibanje. Sočasno se s periodo povečujejo tudi pomiki, ki so pri izolirani konstrukciji skoncentrirani na mestu izolacije. Potresna izolacija je tako najbolj učinkovita pri konstrukcijah z večjo togostjo, oziroma pri tistih, ki imajo osnovno periodo na platoju spektra odziva. Na sliki 30 je prikazana primerjava odziva izolirane in neizolirane konstrukcije pri potresu.

Ker izolacija prevzame večino pomikov in reducira potresne sile oz. pospeške, zgornja konstrukcija ne potrebuje duktilnih detajlov. Med potresom se obnaša elastično. Izolatorji so nameščeni v t.i. izolacijski ploskvi, ki ločuje zgornjo izolirano konstrukcijo od spodnje konstrukcije. Ker so izolatorji montirani na temeljno ploščo, potrebujemo nad izolatorji dodatno togo ploščo, ki enakomerno porazdeli reduciran potresni vpliv na konstrukcijo.



Slika 30: Shematski prikaz gibanja (a) neizolirane in (b) izolirane konstrukcije (Kelly, 2001)

Med ploščama je ponavadi 1,2 do 1,5 m visok prostor, ki je namenjen pregledovanju, vzdrževanju ter zamenjavi izolatorjev. Zagotoviti moramo prostor okoli konstrukcije, kjer se pomik lahko izvrši. Inštalacije, s katerimi je izolirana konstrukcija povezana z okolico, morajo biti dimenzionirane tako, da v mejnem stanju lahko varno prevzamejo relativne pomike. Izolatorji so nameščeni pod nosilnimi konstrukcijskimi elementi, tako so pri endoskeletni konstrukciji pod nosilnimi stebri. Po definiciji v EC8 (poglavje 10.2) imajo izolatorji eno ali več naslednji funkcij:

- Sposobnost prenašanja navpične obtežbe, združeno s povečano podajnostjo v vodoravni smeri in veliko togostjo v navpični smeri;
- Sposobnost sipanja energije, bodisi histerezne ali viskozne;
- Sposobnost povrnitve v začetno lego;
- Zadostno elastično togost pri vodoravnih obtežbah, ki niso potresnega izvora.

Tem zahtevam ustreza več izolatorjev, ki jih je mogoče dobiti na trgu:

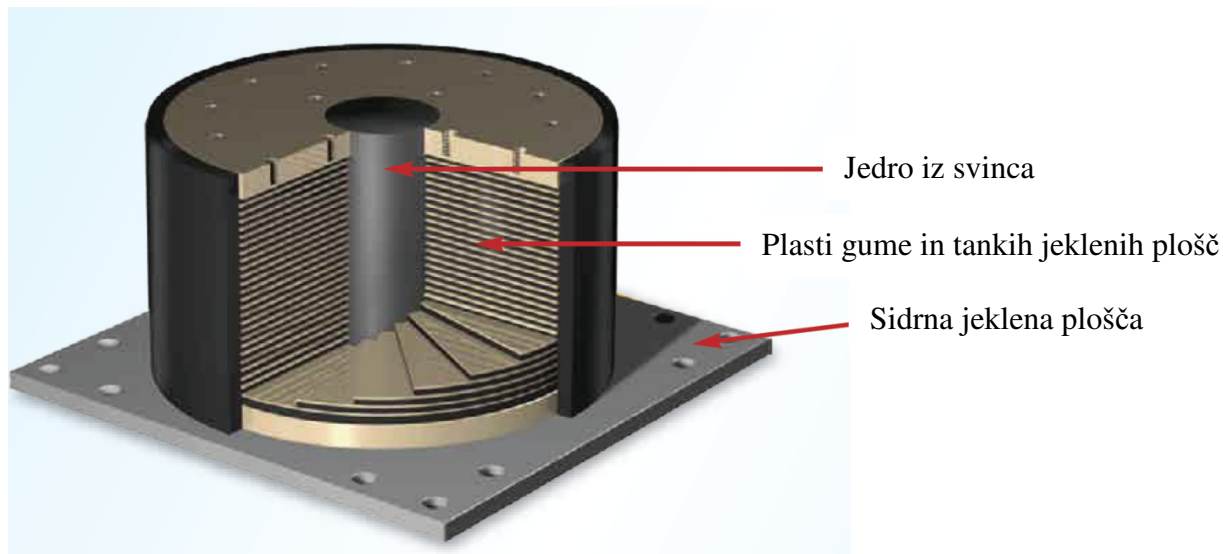
- Elastomerni izolatorji so sestavljeni iz plasti gume in jeklenih plošč, ki preprečujejo gubanje in lahko prenašajo velike vetikalne obremenitve. So fleksibilni tudi pri uporabni obtežbi in imajo neznatno dušenje, zato potrebujejo dodatne dušilce. Uporablja se jih predvsem pri mostovih zaradi vplivov krčenja in lezenja;

- Izolatorji iz gume z visokim dušenjem: za razliko od elastomernih izolatorjev imajo dušenje, ki ga pridobimo s spreminjanjem sestave gume in posegom v kemično sestavo. Dodatni dušilci načeloma niso potrebni.
- Izolatorji iz gume s svinčnim jedrom: to je v bistvu elastomerni izolator s svinčnim jedrom, ki z deformiranjem pri potresu zagotovi dušenje;
- Drsalni sistemi po ravni podlagi se premaknejo, ko je premagana sila lepenja, nato se upirajo s silo trenja. Vendar se lahko konstrukcija še vedno premika, ko potres preneha ter ostane premaknjena. Sistem se uporablja v kombinaciji z elastomernimi izolatorji, ki vrnejo konstrukcijo v osnoven položaj;
- Drsalni sistemi po ukrivljeni podlagi: manjši horizontalni obtežbi, npr. vetru se izolator upira s silo lepenja, podobno kot pri ravni podlagi. Ko pa se sistem premakne horizontalno, se zaradi sferične oblike podlage premakne tudi navzgor, po koncu delovanja potresne obtežbe pa se vrne v prvotno stanje.

Vsak sistem izolacije ima svoje prednosti in slabosti, ker pa v našem primeru težimo k zmanjšanju etažnih pospeškov, se je za teoretično najboljšo možnost izkazal izolator iz gume s svinčnim jedrom (lead rubber bearing, LRB). Ta je tudi sicer največkrat uporabljen v praksi, s čimer so se potrdile teoretične predpostavke in izračuni.

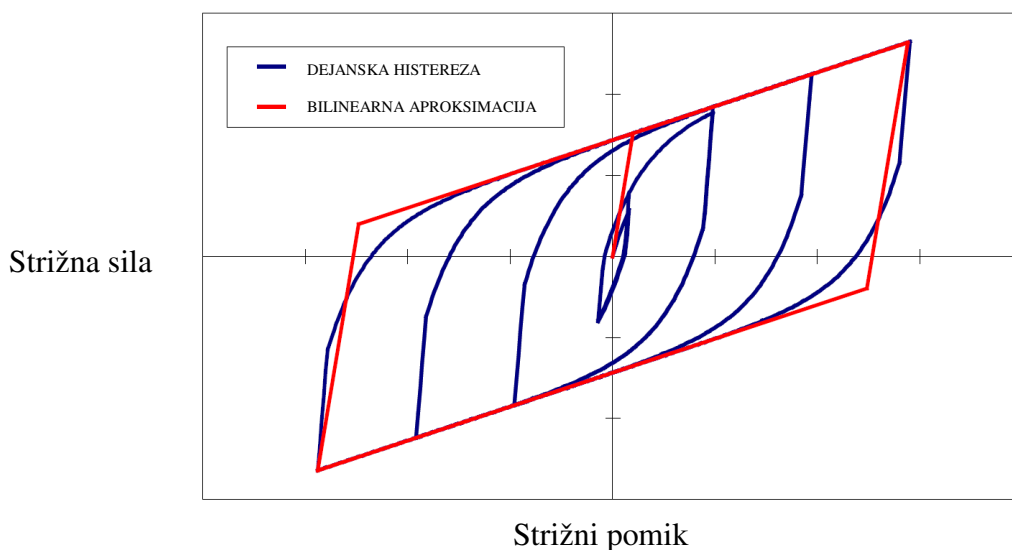
4.2 Elastomerni izolator s svinčnim jedrom (LRB)

Izolator LRB je sestavljen iz več plasti gume, debeline od 8 do 20 mm, ki so ločene z 2 do 3 mm debelimi jeklene plošče (Slika 31). Guma v izolatorju deluje kot elastična vzmet, v kombinaciji z jeklenimi ploščami se obnaša zelo togo v vertikalni smeri ter relativno podajno v horizontalni smeri. V sredini je svinčeno jedro, ki prispeva potrebno povečano elastično togost pri manjših horizontalnih obtežbah (npr. veter) ter dušenje. Spodaj in zgoraj sta debelejši jekleni plošči, ki sta namenjeni pritrditvi na konstrukcijo. Pritrditev se izvede s sidrnimi vijaki. Izolatorji so lahko kvadratnega ali okroglega prereza. Zaradi osne simetrije in posledično enakih karakteristik v vseh horizontalnih smereh, pri tem da ne poznamo glavnih smeri delovanja potresa, se uporablja predvsem okrogel prerez. Sloj gume po površini varuje izolator pred zunanjimi vplivi kot je npr. korozija.



Slika 31: Prerez izolatorja iz gume s svinčnim jedrom (DIS, 2007)

Pri horizontalnih pomikih je odnos sila-pomik opisan s histerezo krivuljo (Slika 32). Ta je kombinacija linearno-elastičnega obnašanja gume ter linearno-idealno plastičnega obnašanja svinca pri cikličnem obremenjevanju. Dejanska situacija s parametri kot so jakost potresa, vertikalna obremenitev, maksimalen horizontalen pomik izolatorja nam določa dimenzije LRB. Spreminjamo lahko premer celotnega izolatorja in svinčnega jedra posebej ter višino izolatorja, oziroma število plasti gume.



Slika 32: Histerezna krivulja izolatorja LRB (Kelly, 2001)

4.3 Dimenzioniranje izolatorjev v programu SAP2000

Konstrukcija SPEAR z dodatnimi izolatorji je prav tako dimenzionirana v programu SAP2000, ki omogoča podajanje nelinearnih elementov z histereznim obnašanjem. Ker je pri izolirani konstrukciji toga plošča nad izolacijsko ploskvijo, so tudi v pritličju modelirani nadomestni T-prerezi, ki predstavljajo grede s sodelujočo širino plošče. Prerezi so enaki kot v višjih etažah. Točke v tej ravnini so povezane v diafragma, s čimer so zajeti vplivi toge plošče v svoji ravnini. Poleg tega sem prav tako podal mase v masnem središču plošče. Masne karakteristike so enake kot v tretji etaži. Med vpete podpore in stebre so nato vstavljeni izolatorji. Te je potrebno prej definirati v Link/Support Properties. Izolatorju iz gume s svinčenim jedrom ustreza tip Rubber Isolator (Link/Support Type: Rubber Isolator). Zasnova modela izolatorja omogoča nelinearno strižno obnašanje v obeh medseboj pravokotnih oseh, pri čemer sta strižni deformaciji med seboj odvisni (Dolšek, 2007). Prečni sili f_2 in f_3 se tako izračunata:

$$\begin{aligned} f_2 &= \alpha_2 k_2 d_2 + (1 - \alpha_2) f_{y2} z_2 \\ f_3 &= \alpha_3 k_3 d_3 + (1 - \alpha_3) f_{y3} z_3 \end{aligned} \quad (5)$$

pri čemer sta k_2 in k_3 elastični togosti, d_2 in d_3 pomika v 2 in 3 smeri lokalnega koordinatnega sistema, f_{y2} in f_{y3} sili na mestu tečenja, α_2 in α_3 predstavljata utrditev po tečenju materiala glede na začetno togost, z_2 in z_3 pa sta spremenljivki histereznega obnašanja za kateri velja $\sqrt{z_2^2 + z_3^2} \leq 1$. Za mejo tečenja velja $\sqrt{z_2^2 + z_3^2} = 1$. Začetna vrednost parametrov z_2 in z_3 je enaka 0. Določena sta z diferencialnima enačbama:

$$\begin{Bmatrix} \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \alpha_2 z_2^2 & -\alpha_3 z_2 z_3 \\ -\alpha_2 z_2 z_3 & 1 - \alpha_3 z_3^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{k_2}{f_{y2}} \dot{d}_2 \\ \frac{k_3}{f_{y3}} \dot{d}_3 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

kjer sta α_2 in α_3 določena:

$$\begin{aligned} \alpha_2 &= \begin{cases} 1 & \dots & \dot{d}_2 z_2 > 0 \\ 0 & \dots & \dot{d}_2 z_2 \leq 0 \end{cases} \\ \alpha_3 &= \begin{cases} 1 & \dots & \dot{d}_3 z_3 > 0 \\ 0 & \dots & \dot{d}_3 z_3 \leq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

Iz diferencialnih enačb je razvidno, da je spremenljivka histereznega obnašanja v smeri 2 odvisna tako od parametrov v smeri 2 kot tudi od parametrov v smeri 3. Podobno velja v drugi smeri.

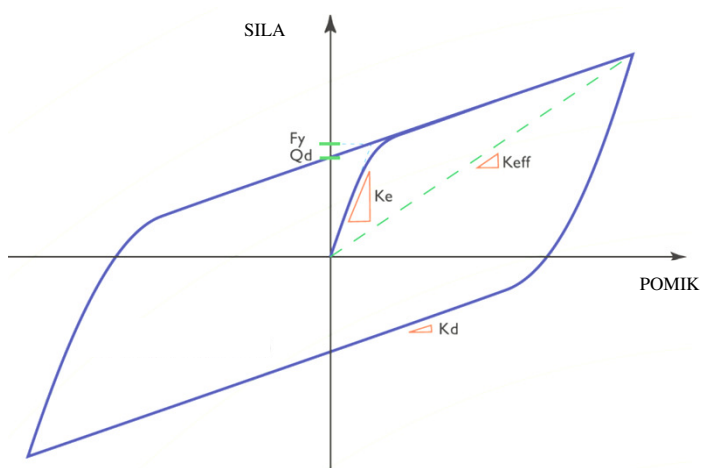
Ker je masa izolatorja relativno majhna, je zanemarjena. Lastnosti so podane v smeri vertikalne osi U1 in horizontalnih osi U2 ter U3. Te smeri so določene z lokalnim koordinatnim sistemom izolatorja. U1 je vedno usmerjena v smeri elementa, v tem primeru v smeri višine, ki znaša 0,2 m. Ostali osi se nanašata na strižne deformacije; U2 je definirana tako, da ustreza osi globalnega koordinatnega sistema X, U3 pa osi globalnega koordinatnega sistema Y. V smeri U1 je podana efektivna togost, medtem ko je upoštevano nično efektivno dušenje zaradi zelo togega vertikalnega elastičnega obnašanja pri minimalnem vertikalnem pomiku. V smeri U1 se lahko podaja le linearne karakteristike, medtem ko je v smereh U2 in U3 upoštevano nelinearno obnašanje. Tu je potrebno podati lastnosti elementa za linearno in nelinearno analizo (Slika 33).

Link/Support Directional Properties	
Identification	
Property Name	RUB1
Direction	U2
Type	Rubber Isolator
NonLinear	Yes
Properties Used For Linear Analysis Cases	
Effective Stiffness	3950,
Effective Damping	0,
Shear Deformation Location	
Distance from End-J	0,1
Properties Used For Nonlinear Analysis Cases	
Stiffness	9000,
Yield Strength	33,3
Post Yield Stiffness Ratio	0,1
OK Cancel	

Slika 33: Podajanje linearnih in nelinearnih strižnih lastnosti izolatorja v SAP2000

Nelinearna analiza ne upošteva lastnosti, ki so podane za linearno analizo, vendar pa modalna analiza računa nihajne oblike na podlagi efektivne togosti, torej je potrebno podati tudi to. Efektivna togost je definirana kot količnik med maksimalno silo in maksimalnim pomikom

histerezne zanke $K_{eff} = F_m / d_m$ (Slika 34). Ti dve karakteristiki dejanske histereze sta dobljeni kot rezultat nelinearne analize. Efektivno dušenje nima vpliva na analizo, zato ga ni potrebno podati. Za lokacijo strižne deformacije je izbrana sredina elementa, t.j. oddaljenost 0,1 m od vozlišč. Lastnosti, ki opišejo histerezo, so začetna elastična togost K_e (Stiffness), meja tečenja F_y (Yield Strength) ter razmerje med sekundarno in začetno togostjo K_d / K_e (Post Yield Stiffness Ratio). Sekundarna togost K_d je zaradi idealno plastičnega obnašanja svinca strižna togost samega elastomera. Sila pri ničnem pomiku je karakteristična nosilnost Q_d in je včasih podana namesto F_y .

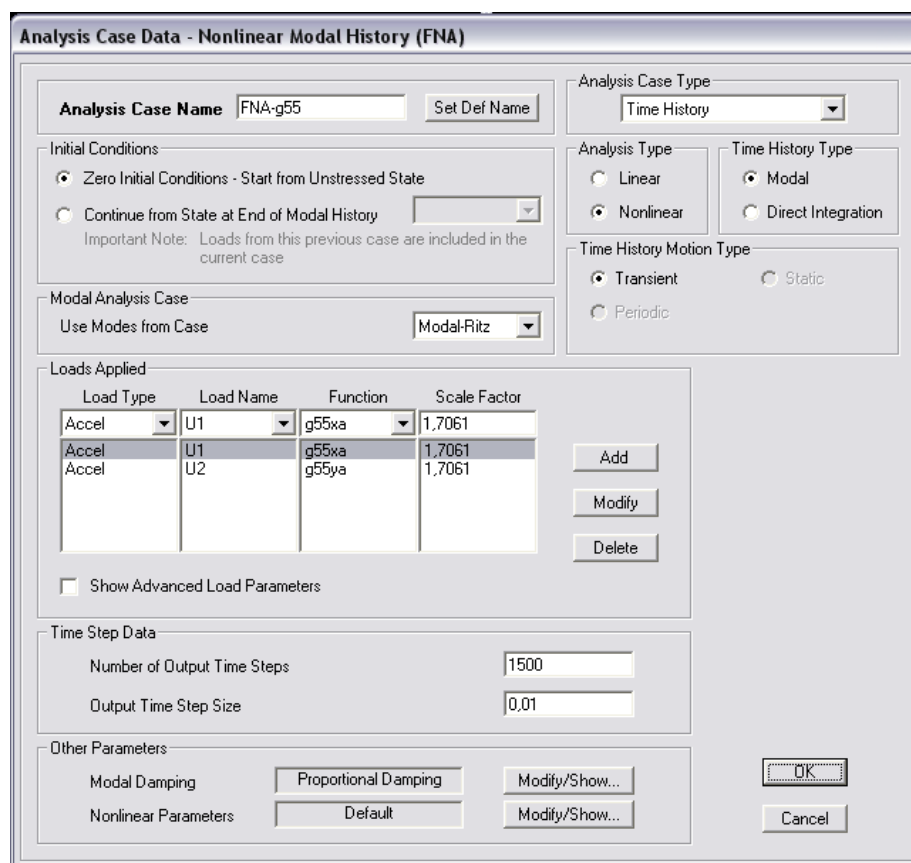


Slika 34: Karakteristike histereze nelinearnega (Rubber) elementa (DIS, 2007)

Izolatorji so elementi z nelinearnim obnašanjem, zato je potrebno konstrukcijo analizirati z nelinearno analizo časovnega odziva. EC8 navaja kot možni tudi poenostavljeno linearno analizo ter modalno poenostavljeno linearno analizo. Vendar pri teh metodah določa pogoje pod katerimi se lahko uporabljajo. Za ekvivalentno linearno analizo morajo biti izpolnjeni pogoji, ki omogočajo linearizacijo obnašanja izolacijskega sistema (Evrokod 8, 10.9.2(5)). Tedaj se lahko izvede modalna poenostavljena linearna analiza, medtem ko je poenostavljena linearna analiza omejena z dodatnimi pogoji. Poenostavljena linearna analiza (Evrokod 8, poglavje 10.9.3) upošteva dve vodoravni dinamični translaciji, katerim se doda statične torzijske vplive v posamezne izolacijske naprave s faktorjem. Izpolnjen mora biti pogoj, da lahko zanemarimo torzijsko gibanje okoli vertikalne osi. V dveh glavnih vodoravnih smereh skupna ekscentričnost med središčem togosti izolacijskega sistema in projekcije središča mas zgornje konstrukcije ne sme presegati 7,5% dolžine zgornje konstrukcije. Efektivni nihajni

čas izolirane konstrukcije za translacijo mora biti vsaj trikrat večji od nihajnega časa neizolirane konstrukcije, ampak največ 3 s. Analiza se lahko uporabi za izolacijske sisteme pri katerih se obnašanje opiše z ekvivalentnim dušenjem v linearnem modelu. Pri tem je zahtevana pravilna in simetrična zasnova konstrukcijskega sistema v smereh glavnih osi konstrukcije v tlorisu. Vertikalna togost izolacijskega sistema mora biti vsaj 150 krat večja od horizontalne.

Pri nelinearni časovno odvisni analizi ni nobenih omejitev. Ker so poenostavljene metode hitrejše, so primerne predvsem za preliminarno analizo pod pogojem da konstrukcija ustreza zahtevam po EC8 za poenostavljene analize. V programu SAP2000 konstrukcijo nelinearno analiziramo z analizo FNA ter nelinearno direktno numerično integracijo. FNA (Fast Nonlinear Analysis) je nelinearna modalna analiza časovnega odziva, njena prednost je kratek čas izračuna v primerjavi z direktno integracijo. Metoda se lahko uporabi za analizo konstrukcij, ki so primarno linearno elastične, vendar imajo omejeno število nelinearnih elementov. To so lahko le elementi, ki jih definiramo kot Link/Support Elements in jim nelinearnost pripišemo pred začetkom izračuna. Pri FNA je zaželeno, da se uporabi modalna analiza z Ritz vektorji, ki so odvisni od obtežbe. V tej modalni analizi pri obtežbi poleg pospeškov upoštevamo tudi Link elemente. Pri Analysis Case tako definiram nelinearno (Analysis Type: Nonlinear) modalno analizo časovnega odziva (Time History Type: Modal), ki uporabi nihajne oblike Ritz-ove modalne analize. Obtežba je akceleroگرام, normiran na maksimalni pospešek 0,2·g, ki deluje sočasno v globalnih smereh X in Y.



Slika 35: Definiranje FNA analize v SAP2000

Modalno dušenje je določeno s koeficientoma masnega in togostnega proporcionalnega dušenja, ki sta izračunana po formulah (Fajfar, 1984):

$$a_0 = \frac{4\pi(T_1 \cdot E_1 - T_2 \cdot E_2)}{T_1^2 - T_2^2} \quad (8)$$

$$a_1 = \frac{T_1 \cdot T_2 \cdot (T_1 \cdot E_1 - T_2 \cdot E_2)}{\pi(T_1^2 - T_2^2)}, \quad (9)$$

kjer je a_0 masno proporcionalno dušenje, a_1 togostno proporcionalno dušenje, T_1 in T_2 sta prvi ter drugi nihajni čas konstrukcije, E_1 in E_2 pa sta dušenja teh dveh period. Za dušenja E_1 in E_2 je izbrano 5 % kritično dušenje, za izračun koeficientov pa sta potrebna še nihajna časa iz modalne analize. Prej je bilo omenjeno, da je za modalno analizo potrebna učinkovita togost nelinearnega elementa, katero dobimo iz histereze, ki je rezultat nelinearne dinamične analize. Tukaj se postopa iterativno. Realna vrednost učinkovite togosti K_{eff} je med 0 in vrednostjo elastične togosti K_e , zato se izbere neko vmesno vrednost. Vrednost ne sme biti nič, saj to

pomeni, da je konstrukcija popolnoma podajna in ne dobimo približka realnim vrednostim. Zato je bolje, da se vzame začetni K_{eff} enak kar K_e ali pa $K_e / 2$. Nato se zažene modalno ter FNA analizo. Iz dobljene histereze nelinearnega elementa se odčita maksimalen pomik ter silo in se nato izračunana nov K_{eff} . V izogib morebitnemu odstopanju je bolje, če se vzame histereze različnih izolatorjev ter se izračuna povprečen K_{eff} . Ponovno se zažene modalno analizo z novim K_{eff} in dobi se prvo in drugo periodo konstrukcije, ki sta potrebni za izračun koeficientov dušenja. Izkaže se, da se že v drugi iteraciji dobi zadovoljivo vrednost K_{eff} , ki se nato bistveno ne spreminja. Vseeno pa je bolje, da se opravi še tretjo iteracijo, s katero se rezultati potrdijo, sicer pa ponovno iteriramo. Za primerjavo je zagnana tudi nelinearna direktna integracija (Time History Type: Direct Integration) z Newmarkovo metodo integracije. Vrednosti vhodnih parametrov so enake kot pri FNA analizi.

4.4 Določitev karakteristik izolatorjev

Izolatorje se projektira za vsako stavbo posebej. Lastnosti so odvisne od stavbe, potresnega območja in željenega obnašanja pri potresu. Dimenzionirani so na vertikalno obtežbo, nato pa so karakteristike omejene ali z maksimalnim pomikom ali pa z maksimalno strižno silo izolatorja. Ker izolator reducira potresno energijo s histereznimi zankami, kjer površina histereze predstavlja količino dušenja, želimo da pri projektnem potresu opravi čim več večjih histerez. Ko potresna sila preseže mejo tečenja F_y , se začne plastifikacija in s tem dušenje. Zato želimo, da je vrednost F_y tako majhna, da je neelastičnega obnašanja izolatorja čim več. Spodnjo mejo F_y predstavlja zahteva po zadostni elastični togosti pri vodoravnih obtežbah, ki niso potresnega izvora. Vrednost F_y mora biti vsaj 50 % večja od maksimalne obtežbe vetra. Sila vetra je izračunana po EC 1991-2-4 za cono A, kjer je referenčna hitrost $v_{ref} = 25$ m/s. Rezultantna sila vetra F_w se izračuna kot:

$$F_w = q_{ref} \cdot c_e(z) \cdot c_d \cdot c_f \cdot A_{ref}, \quad (10)$$

kjer je q_{ref} referenčni pritisk vetra, c_e koeficient izpostavljenosti, odvisen od višine objekta z , c_d je dinamični koeficient, c_f koeficient sile ter A_{ref} referenčna površina, ki je pravokotna na smer vetra. Pri gostoti zraka $\rho = 1,25$ kg/m³, je $q_{ref} = 0,39$ kN/m². Koeficient izpostavljenosti

za III. kategorijo terena pri višini objekta $z = 8,75$ m znaša $c_e(z) = 1,63$. Dinamični koeficient c_d znaša 1,0. Koeficient sile se izračuna po enačbi:

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_r \cdot \psi_\lambda, \quad (11)$$

$c_{f,0}$ je pri razmerju dolžine in širine objekta 0,92 enak 2,15. Faktor redukcije zaradi zaokroženih vogalov $\psi_r = 1,0$. Faktor redukcije zaradi vitkosti ψ_λ je pri efektivni vitkosti $\lambda = 1,2$ enak 0,63. Tako je koeficient sile $c_f = 1,35$. Sila vetra na objekt, ki ima referenčno površino $A_{ref} = b \cdot h = 10,5 \cdot 8,75 = 91,9$ m², znaša

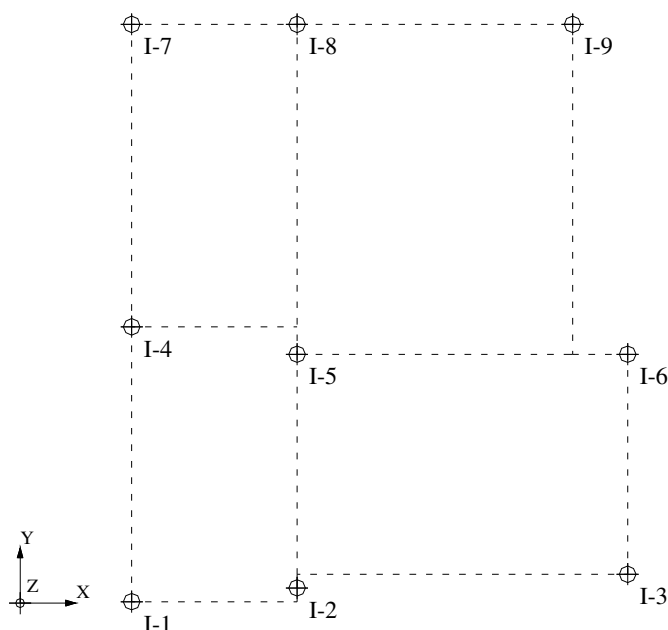
$$F_w = 0,39 \cdot 1,63 \cdot 1,0 \cdot 1,35 \cdot 91,9 = 78,9 \text{ kN.}$$

Predpostavi se, da se vpliv enakomerno porazdeli med izolatorje, kar predstavlja silo vetra na izolator $F_w' = 8,8$ kN. Minimalna meja tečenja $F_{y,min} = 1,5 \cdot F_w' = 13,2$ kN.

Karakteristike izolatorjev so izbrane na podlagi prospekta proizvajalca izolatorjev Dynamic Isolation Systems (DIS, 2007). Vertikalna, oz. osna obremenitev na izolator določa njegove dimenzije in karakteristike (Preglednica 8). Pri tem je običajno, da se izbere le en tip izolatorja, ne glede na različno vertikalno obremenitev. To je zato, ker so pomiki izolatorja odvisni od njegove višine, vsi izolatorji pa so izpostavljeni podobnim pomikom. Drugi razlog je ekonomičnost, saj je vsak tip izolatorja testiran. Ko kombiniramo dva tipa, je potrebno dva tipa tudi testirati. Izkazalo se je, da se to izplača šele pri 20 izolatorjih istega tipa, sicer pa je bolje, da se jih poveča na naslednjo velikost. Zato je v vsakem obravnavanem izoliranem konstrukcijskem sistemu 9 enakih izolatorjev (Slika 36).

Preglednica 8: Osne sile v izolatorjih

Izolator	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Osna sila P [kN]	209,3	304,9	244,2	302,9	372,7	324,1	223,2	295,0	273,8



Slika 36: Oštevilčenje izolatorjev

Izkaže se, da osna sila v nobenem izolatorju ne presega $P = 450$ kN. Karakteristike izbranega ustreznega izolatorja so podane v preglednici (Preglednica 9).

Preglednica 9: Karakteristike izolatorja po prospektu DIS

Premer izolatorja	Sekundarna togost	Karakteristična trdnost	Vertikalna tlačna togost	Maksimalen pomik	Kapaciteta osne sile
D_I [mm]	K_d [kN/mm]	Q_d [kN]	K_v [kN/mm]	d_{max} [mm]	P_{max} [kN]
305	0,2 – 0,9	0 – 65	> 50	150	450

Za analitično modeliranje proizvajalec priporoča, da se za elastično togost uporabi vrednost $K_e = 10 \cdot K_d$. Iz te zveze se lahko izračuna $F_y = 10/9 \cdot Q_d$. Karakteristična trdnost je izbrana tako, da je izpolnjen pogoj $F_y \geq F_{y,min}$. Obravnavani so bili štiri različni izolatorji (Preglednica 9), kar pomeni štiri izolirani konstrukcijski sistemi, pri čemer ima vseh 9 izolatorjev v določenem sistemu enake karakteristike. Efektivna togost ni podana kot karakteristika v prospektu in je izračunana iterativno, ker je odvisna od dejanske situacije.

Preglednica 10: Karakteristike analiziranih izolatorjev

	K_d [kN/mm]	K_e [kN/mm]	Q_d [kN]	F_y [kN]	K_v [kN/mm]	K_{eff} [kN/mm]
PI 1	0,9	9,0	30,0	33,3	50,0	4,0
PI 2	0,9	9,0	15,0	16,7	50,0	1,5
PI 3	0,5	5,0	15,0	16,7	50,0	1,0
PI 4	0,2	2,0	15,0	16,7	50,0	0,7

Primerjava potresnih izolatorjev PI1 in PI2 pokaže, kako vpliva meja tečenja izolatorja na obnašanje konstrukcije, medtem ko se izolatorji PI2, PI3 in PI4 razlikujejo v togosti.

Pri iteraciji se poleg K_{eff} izračuna koeficienta proporcionalnega masnega in togostnega dušenja modalnih oblik a_0 ter a_1 (Preglednica 11), ki se uporabita v obeh analizah, pri FNA in pri analizi z direktno integracijo.

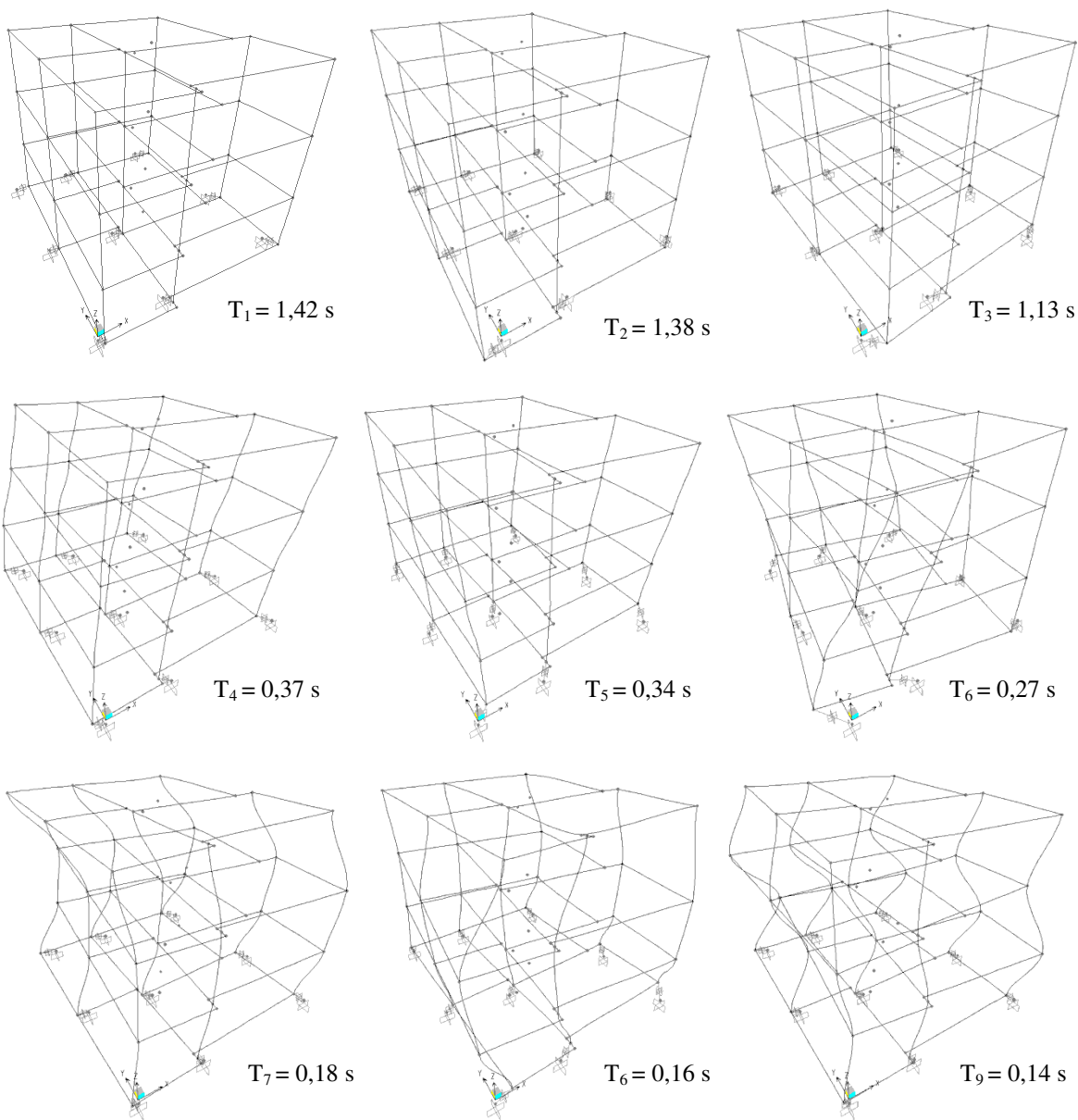
Preglednica 11: Vrednosti koeficientov proporcionalnega dušenja

	a_0	a_1
PI 1	0,393	0,0064
PI 2	0,301	0,0083
PI 3	0,259	0,0097
PI 4	0,224	0,0112

Namen izolatorjev je povečanje nihajnega časa konstrukcije. Primerjava nihajnih časov PI1 ter PI2 (Preglednica 12) pokaže, da nižja meja tečenja izolatorja poveča nihajni čas. Zniževanje elastične in plastične togosti prav tako kaže na trend povečevanja nihajnega časa. Iz nihajnih oblik (Slika 37) se vidi, da se večji del pomika zgodi v izolacijski ravnini, kar je namen izolatorjev.

Preglednica 12: Nihajni časi izolirane konstrukcije SPEAR pri različnih izolatorjih

	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	T ₉
PI 1	0,82	0,78	0,63	0,29	0,27	0,22	0,17	0,15	0,14
PI 2	1,06	1,03	0,84	0,34	0,32	0,26	0,18	0,16	0,14
PI 3	1,23	1,20	0,97	0,36	0,33	0,27	0,18	0,16	0,14
PI 4	1,42	1,38	1,13	0,37	0,34	0,27	0,18	0,16	0,14



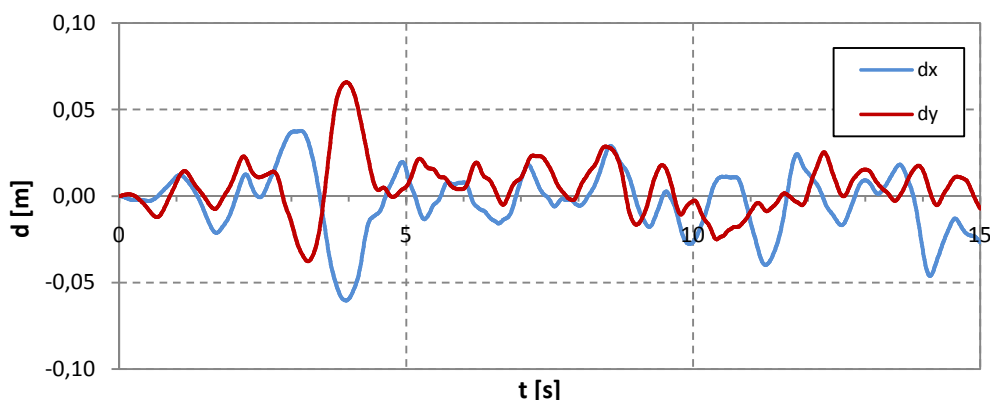
Slika 37: Nihajne oblike in nihajni časi izoliranega sistema PI 4 (SAP2000)

4.5 Analiza in rezultati

Pomik na mestu izolacije predstavlja strižno deformacijo izolatorja, večji pomik je posledica manjše togosti izolatorja, kar poveča periode celotnega konstrukcijskega sistema. Pomik, ki je večji od maksimalnega dovoljenega pomika, pomeni porušitev izolacijskega sistema, kar lahko povzroči izgubo stabilnosti konstrukcije. Izbrani izolatorji imajo maksimalen dovoljen pomik 150 mm. Maksimalni pomiki izolatorjev PI 1-4 je kombinacija časovno odvisnih pomikov v X in Y smeri:

$$d(t) = \sqrt{d_x(t)^2 + d_y(t)^2} . \quad (12)$$

Na sliki (Slika 38) je prikazan pomik izolatorja I-9 v smereh globalnih koordinatnih osi X in Y pri akceleroogramu g197, kar predstavlja maksimalen pomik izoliranega sistema PI4. Iz slike je razvidno, da se ta zgodi pri 4 s.

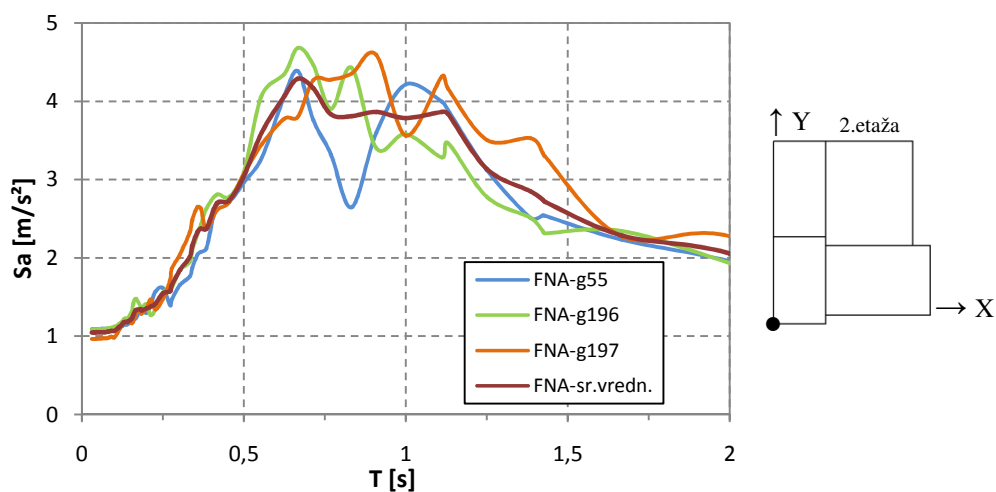


Slika 38: Pomik izolatorja I-9 v smeri osi X in Y.

Preglednica 13: Maksimalni pomik na mestu izolatorja

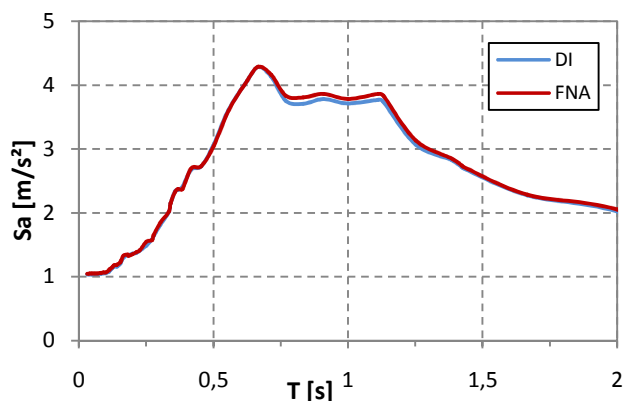
	PI 1	PI 2	PI 3	PI 4
pomik d [mm]	44	58	80	89

Vsi predstavljeni rezultati so srednje vrednosti analiz treh generiranih akceleroogramov g55, g196 in g197. Medsebojna odstopanja so največja v območju lastnih period konstrukcije (Slika 39).

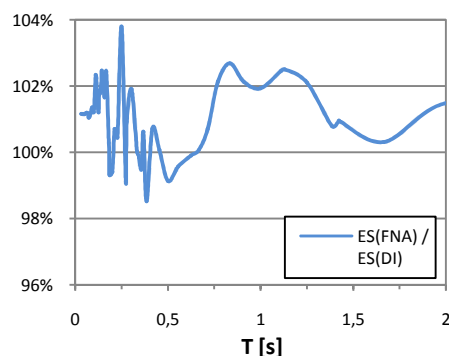


Slika 39: Etazni spektri pospeškov točke 25 pri PI 4 za različne akcelerograme ter srednja vrednost

Rezultati analize po FNA in nelinearni direktni integraciji (DI) se medsebojno minimalno razlikujejo. Na sliki (Slika 40) je prikazan reprezentativen primer etažnega spektra, ki je izračunan po obeh analizah.



Slika 40: Etazni spekter točke 25 pri PI 4 po FNA in DI

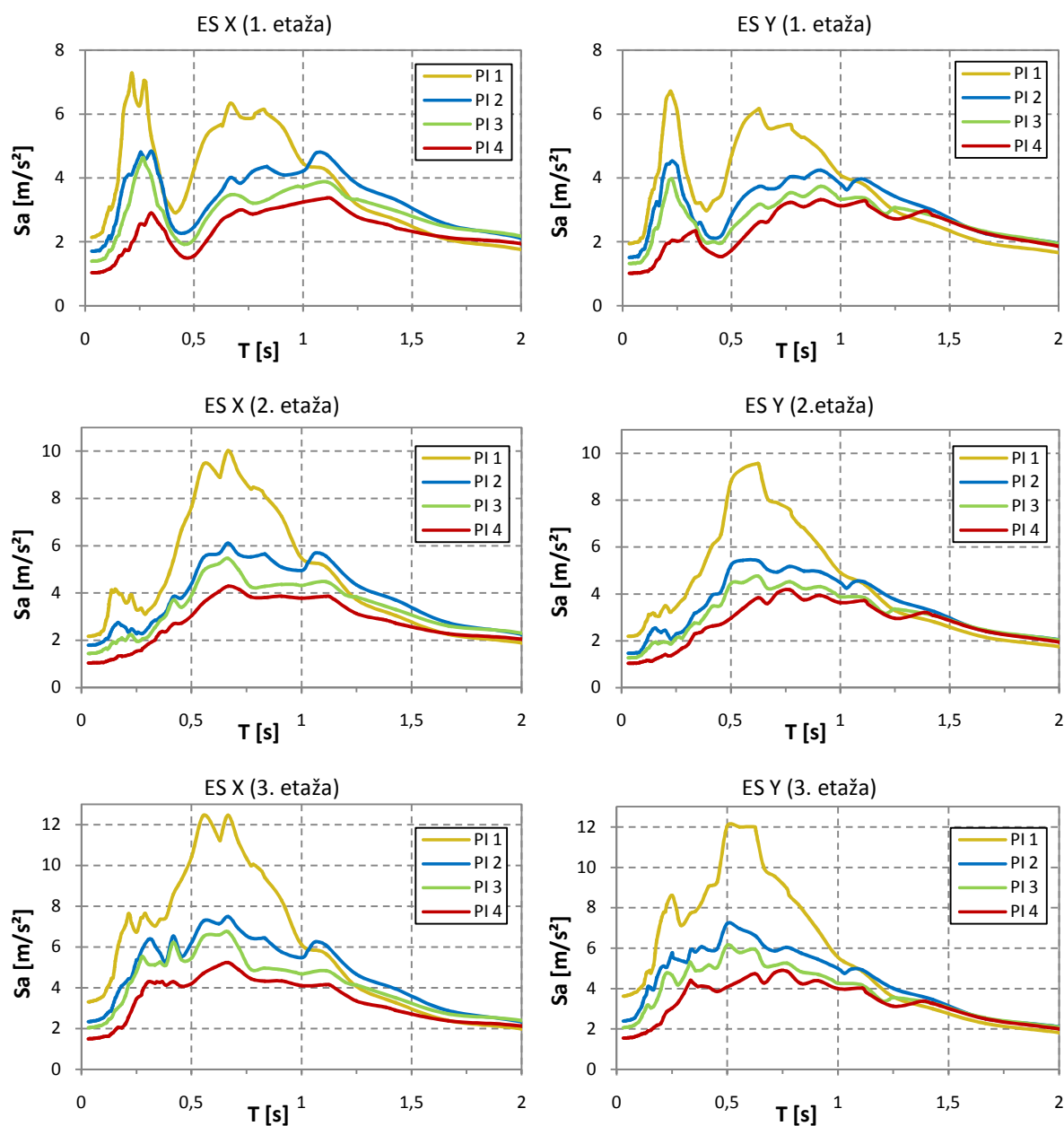


Slika 41: Kvocient ES po FNA in DI analizi

Največja razlika med analizama je porabljen računski čas. FNA potrebuje za analizo obravnavane konstrukcije v povprečju 30 s, medtem ko DI na enako zmogljivem računalniku kar 25 min. Zaradi tega je analiza FNA bolj racionalna. V nadaljevanju diplomskega dela so podani rezultati, ki so izračunani po FNA analizi.

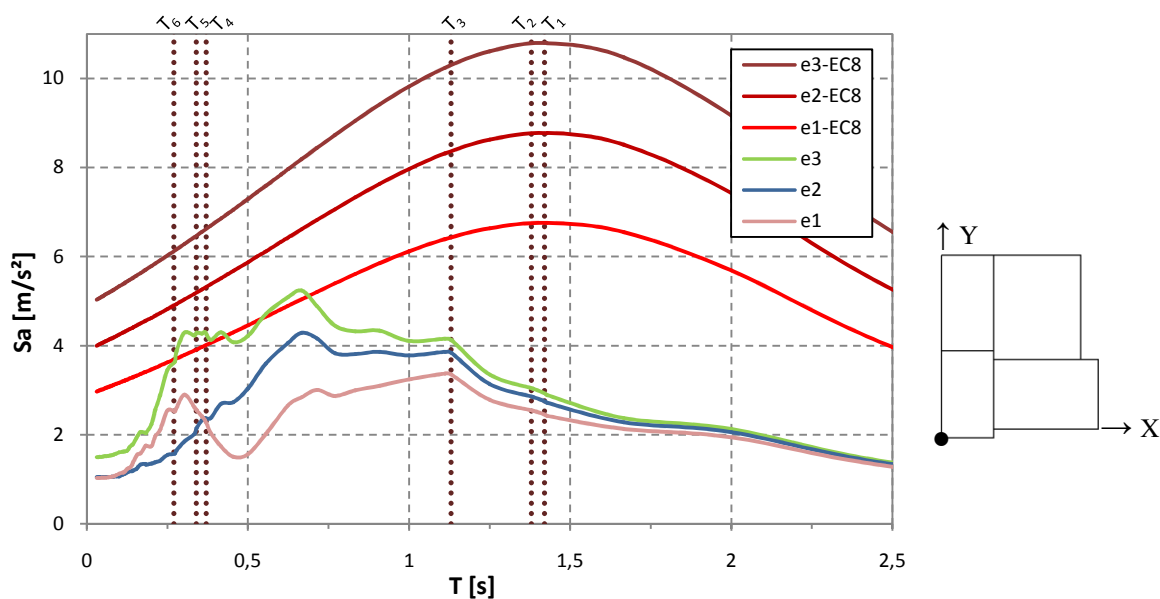
Primerjava srednjih vrednosti etažnih spektrov različno izoliranih sistemov (Slika 42) pokaže, da ima sistem z najvišjo periodo (PI 4) najmanjše etažne pospeške v celotnem frekvenčnem območju. Cilj so najmanjši etažni pospeški, zato je ta tip izolatorja najbolj ugoden. Oblika

krivulj etažnih spektrov je podobna pri vseh obravnavanih primerih z enako mejo tečenja (P2 - P4). Zmanjšanje meje tečenja za polovico se pokaže v znatnem zmanjšanju etažnih pospeškov, pri glavni špici približno 40 %. Zmanjševanje togosti izolatorja prav tako zmanjša pospeške, vendar je sprememba manjša. V prvi etaži imajo nižje nihajne oblike v primerjavi z višjimi podoben ali celo večji vpliv na velikost pospeškov. V višjih etažah ni izrazite špice, ampak so pospeški dokaj enakomerni v večjem območju period konstrukcije.

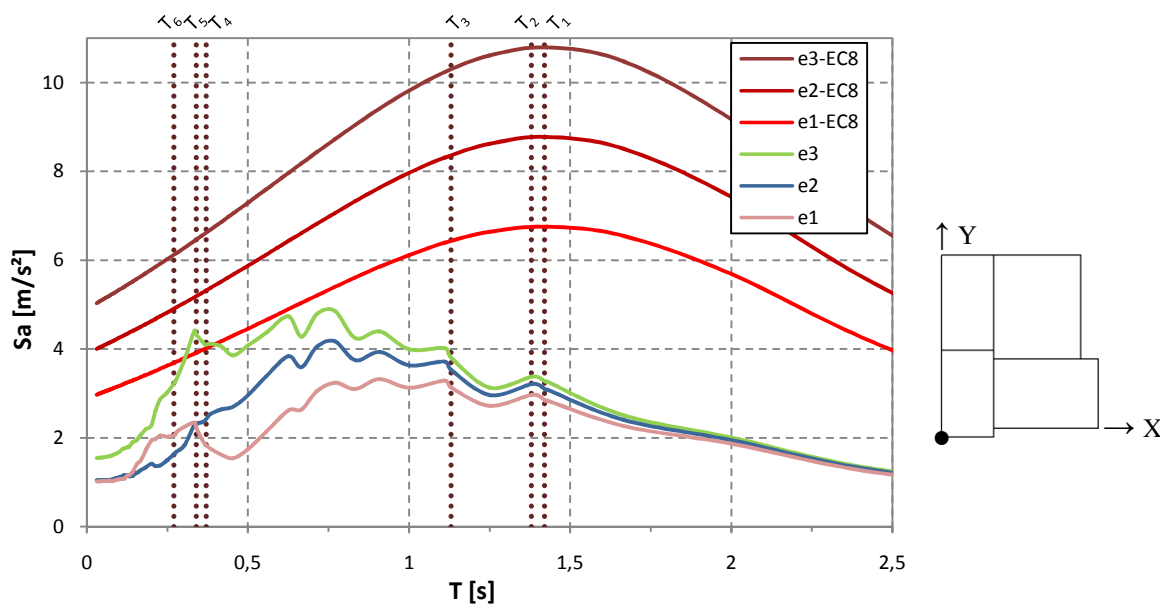


Slika 42: Etažni spektri (ES) izoliranih konstrukcijskih sistemov PI1, PI2, PI3 in PI4 v smereh glavnih osi X in Y v prvi (točka j10), drugi (točka j25) ter tretji (točka j40) etaži

Pospeški so večji v višjih etažah (sliki 43 in 44), vendar se pojavi neregularnost v območju period od T_4 do T_6 pri nihajnem času okoli 0,3 s, kjer so pospeški prve etaže večji od pospeškov druge etaže. Podoben rezultat je dobljen pri neizolirani konstrukciji. Zanimivo je, da maksimum ne nastopa pri kateri izmed period konstrukcije. V drugi in tretji etaži je maksimum pri 0,65 s. Krivulje ES nimajo izrazite špice.



Slika 43: Primerjava etažnih spektrov po etažah pri PI4 v smeri X

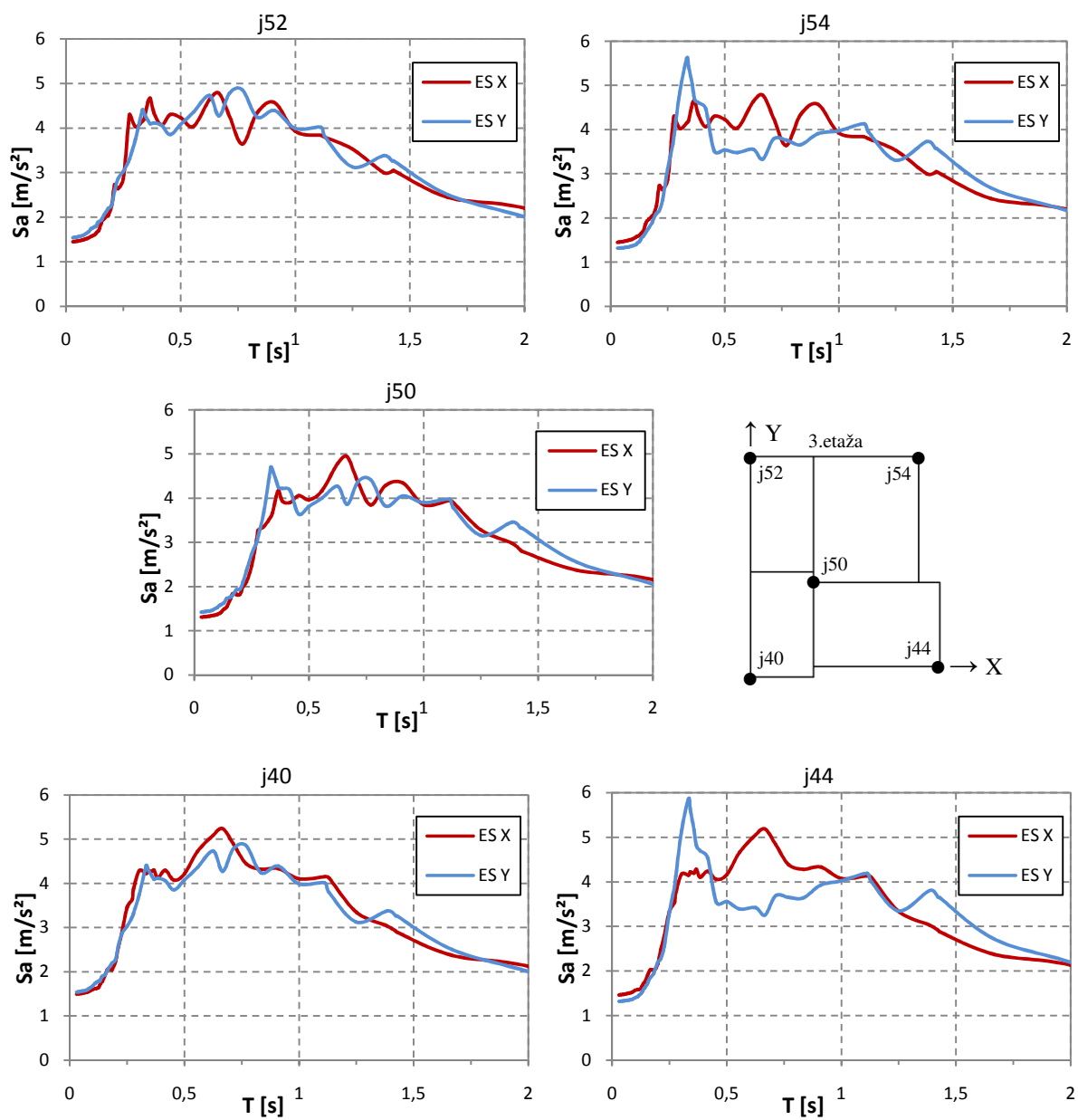


Slika 44: Primerjava etažnih spektrov po etažah pri PI 4 v smeri Y

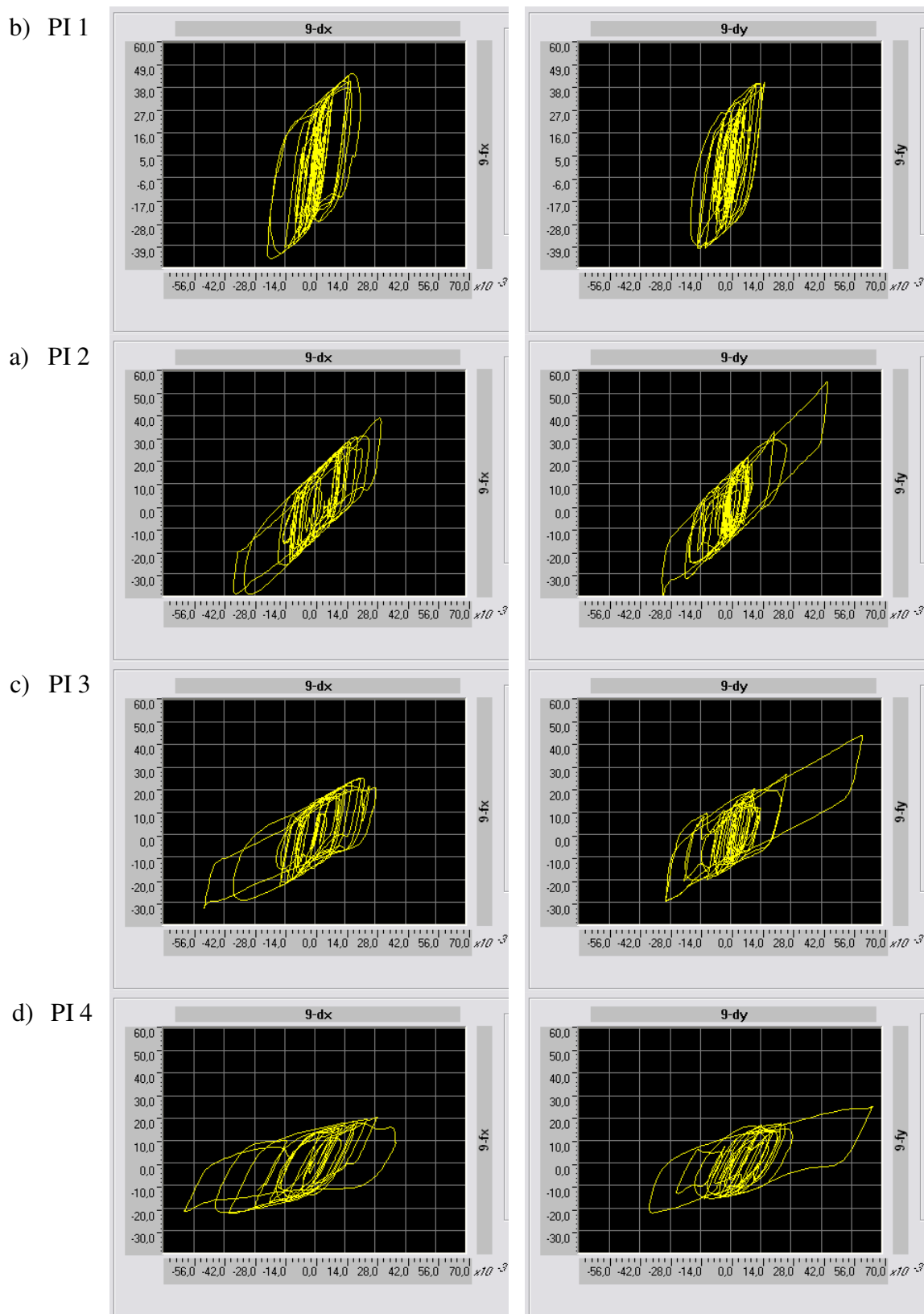
Nekonstrukcijskim elementom izolirane konstrukcije lahko določimo potresni vpliv po EC8 enako kot pri običajnih neizoliranih konstrukcijah (EC8, poglavje 10.9.6). Potrebno je upoštevati dinamične učinke izolacije. Etažni spekter po standardu konzervativno določi pospeške v celotnem območju period, vendar krivulje ES ne povzame konsistentno. V tretji etaži, pri osnovni periodi konstrukcije standard poda 3,5 krat večjo vrednost, najmanjša razlika je pri nihajnem času T_5 , ko je vrednost za polovico večja.

Po isti etaži se pospeški pri istih periodah le malenkost spreminjajo. Pri izoliranem sistemu je vpliv torzije manjši. Večjih ekstremov ni, maksimalne vrednosti se gibajo od 4 do 5 m/s^2 na intervalu od 0,25 s do 1,2 s. Odstopanje se pojavi v krajnih točkah etaže v smeri X, kjer je maksimum pri 0,3 s v vrednosti 6 m/s^2 .

Dejanske histerezne zanke (Slika 46) pokažejo vpliv izolatorja. Izolacijski sistem PI1 ima visoko mejo tečenja ($F_y^I = 33,3$ kN), zato večji del pomikov ne doseže dovolj velikih vrednosti, da bi se izolator plastificiral. Posledično reducira manj potresne energije. Pri nižji meji tečenja plastifikacija nastopi prej, tvorijo se večje histerezne zanke. Z manjšanjem togosti histereza postane bolj položna in dejanski pomiki se povečajo. Prav tako je opaziti večje histerezne zanke pri PI 4, medtem ko je pri PI 2 še vedno večja koncentracija zank v območju izhodišča koordinatnega sistema. Omeniti velja, da histerezne zanke niso povsem pravilne oblike, kot npr. prikazuje 32. Tam je prikazana histereza, ki je rezultat obremenitve samo v eni smeri. V analiziranem primeru so histerezni izolatorji obremenjeni v dveh medsebojno pravokotnih smereh, strižna sila v eni smeri pa je odvisna od pomikov v obeh smereh, kar nekoliko spremeni obliko.



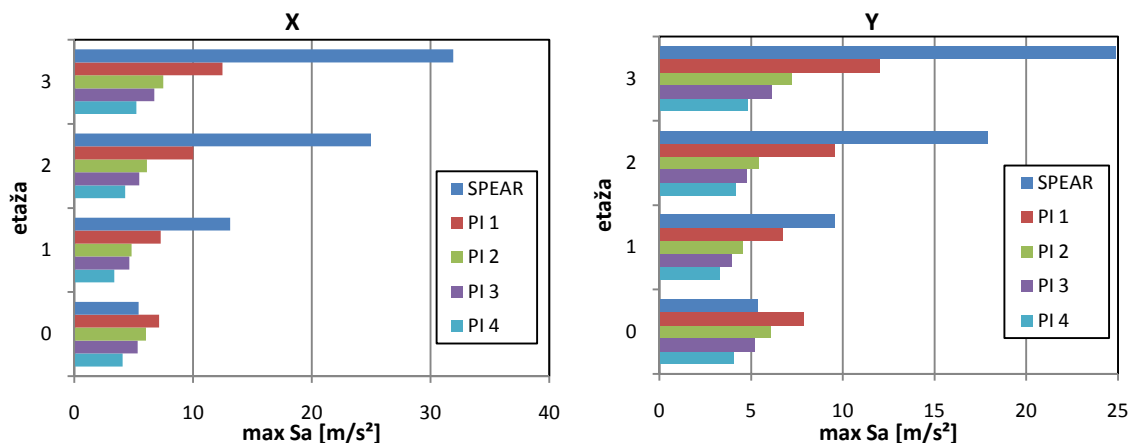
Slika 45: Spreminjanje etažnih spektrov (ES) po 3. etaži v smeri X in Y za konstrukcijski sistem PI 4



Slika 46: Histereze izolatorja I-9 v smereh glavnih osi X in Y za a) PI 1, b) PI 2, c) PI 3 ter d)PI 4 (na vertikalni osi je sila [kN], na horizontalni osi je pomik [m])

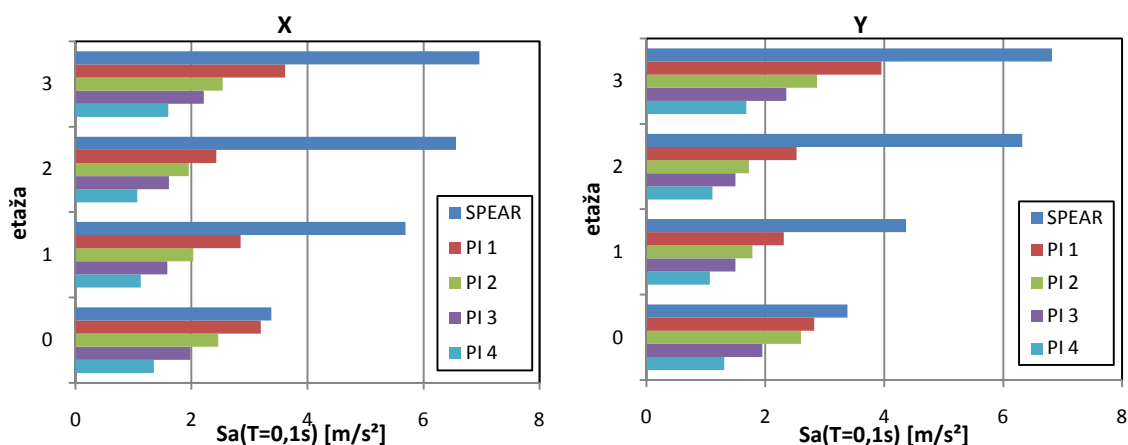
5 PRIMERJAVA REZULTATOV IZOLIRANE IN NEIZOLIRANE KONSTRUKCIJE

Primerjava etažnih pospeškov neizolirane konstrukcije SPEAR in štirih izoliranih sistemov iste konstrukcije je prikazana na slikah. Primerjava je narejena v točkah 1 nad togo podporo oziroma izolatorjem, 10 v prvi etaži, 25 v drugi etaži ter 40 v tretji etaži. Na sliki 47 je primerjava maksimalnih vrednosti etažnih spektrov, ne glede na to pri katerem nihajnem času nekonstrukcijskega elementa se zgodijo. Na Slika 48 so prikazani pospeški za komponento, ki ima glavno periodo $T_1 = 0,1$ s. Tukaj se dobi eksaktno primerjavo med konstrukcijskimi sistemi. Kot je bilo prej omenjeno, se pri klasični konstrukciji pospeški močno povečujejo z višino. V tretji etaži je pospešek za 55% večji kot v prvi etaži. Pri izoliranem sistemu PI 4 je ta sprememba 40%; torej višina tudi v tem primeru močno vpliva na relativno vrednost.



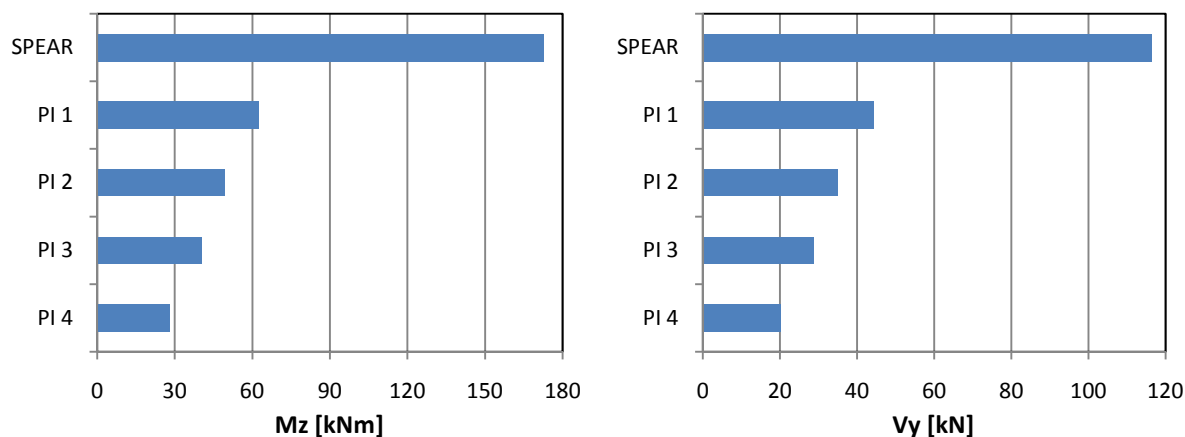
Slika 47: Primerjava maksimalnih vrednosti v etažnem spektru v smeri X in Y po etažah

Najbolj nas zanimajo absolutne vrednosti pospeška. V prvi etaži v smeri X ima neizolirana konstrukcija pospešek $5,7 \text{ m/s}^2$, PI 4 pa $1,1 \text{ m/s}^2$, kar pomeni petkratno razliko. V tretji etaži v smeri X ima neizolirana konstrukcija pospešek $7,0 \text{ m/s}^2$, PI 4 pa $1,6 \text{ m/s}^2$, kar pomeni štirikratno razliko. Pri konstrukciji SPEAR vrednosti v etaži 0 predstavljajo kar spekter odziva, medtem ko so pri izoliranih konstrukcijah vrednosti v etažnem spektru na vrhu izolatorja.



Slika 48: Primerjava pospeškov pri T = 0,1 s v smeri X in Y po etažah

Zaradi izolatorjev se v konstrukciji zmanjšajo tudi notranje sile. Moment M_z ter prečna sila V_y pri klasični konstrukciji in pri najbolj učinkovitem sistemu izolacije PI 4 se razlikujeta za šestkrat. Potrebno je upoštevati, da je bilo predvideno elastično obnašanje neizolirane konstrukcije.



Slika 49: Primerjava maksimalnih vrednosti momenta M_z in prečne sile V_y v krajnem stebri 9 v prvi etaži

6 ZAKLJUČEK

Konstrukcije, dimenzionirane po standardu Evrokod 8, se pri projektnem potresu lahko poškodujejo, vendar se ne smejo porušiti. S tem se zagotovi minimalno število žrtev zaradi potresnih vplivov. Četudi se konstrukcija ne poruši, lahko notranja oprema ali padajoči fasadni paneli zaradi neustrezne pritrditve predstavljajo življenjsko nevarnost. Pri nuklearnih elektrarnah, kemičnih objektih ter podobnih objektih večje pomembnosti poškodovane inštalacije povzročijo izpust radioaktivnih ali strupenih snovi, ki so nevarne za okolje. Po potresu je pomembno, da bolnišnice ostanejo funkcionalne. Poleg nepoškodovane konstrukcije je pogoj za to tudi nepoškodovana notranja oprema in aparature. Nekateri objekti vsebujejo zelo drago opremo, katere lahko preseže večkratno vrednost samega objekta. Ti primeri predstavljajo povod za dimenzioniranje opreme oz. nekonstrukcijskih elementov na potresne vplive.

V prvem delu diplomske naloge obravnavamo idealizirane konstrukcije (obrnjena nihala), na katerih se najlažje preučujejo potresni vplivi. Etažni spekter odziva predstavlja vrednost pospeška pri različnih periodah nekonstrukcijskih elementov na določeni točki konstrukcije. Nihala so modelirana v programu SAP2000, ki ima vgrajeno funkcijo za izračun etažnih spektrov. Analizo smo izvedli s tremi dejanskimi in tremi generiranimi akcelrogrami v pravokotni smeri glede na ekscentričnost. Pri centričnem nihalu je etažni spekter enoten po vsej etaži. Pri resonanci nekonstrukcijskega elementa s konstrukcijo je vrednost pospeška maksimalna. Pri ekscentričnem nihalu se etažni spekter po etaži spreminja. Večja ekscentričnost pomeni večje spreminjanje vrednosti pospeškov. Največje vrednosti se pojavijo v točki, ki je od centra rotacije najbolj oddaljena. Pri nihalu N2 z ekcentričnostjo 2,5 m so vrednosti ES v skrajni točki 50% večje glede na točko z minimalnimi vrednostmi ES. Pri nihalu N3, ki ima 5,0 m ekscentričnosti, pa je razmerje 100%. Pri nihalu s po višini razporejenimi masami, kar ponazarja večetažno konstrukcijo, se pokaže večanje etažnih pospeškov z višino ter enakovreden vpliv druge in tretje periode v najnižji etaži na ES.

Nato je etažni spekter določen na modelu konstrukcije SPEAR. To je trietažna nesimetrična konstrukcija. Vzbujena je hkrati v smeri glavnih osi X in Y s tremi generiranimi

akceleroگرامi, ki so normirani na maksimalen pospešek $0,2 \cdot g$. Pri tej konstrukciji se potrdijo ugotovitve dobljene na modelu nihala. Maksimalne vrednosti dobimo pri prvi periodi v smeri X ter drugi periodi v smeri glavne osi Y po večjem delu etaže. Izjema sta dve krajni točki. V spodnji etaži se maksimum pojavi tudi pri višjih periodah, kar kaže na velik vpliv višjih period v spodnjem delu konstrukcije. V območjih med periodami konstrukcije so vrednosti pospeškov manjše. Zaradi izrazite ekscentričnosti konstrukcije se etažni spekter tudi po sami etaži zelo spreminja. Tako so v tretji etaži največje vrednosti glede na najmanjše kar 60 % večje, tukaj znaša maksimalen pospešek 50 m/s^2 .

V tretjem delu so konstrukciji SPEAR dodani potresni izolatorji. To so elastomerni izolatorji s svinčenim jedrom, v katerih se sipa potresna energija. Nameščeni so pod stebri med dvema diafragmama. Program SAP2000 omogoča modeliranje nelinearnih elementov s histereznim obnašanjem. Rezultati so dobljeni z nelinearno časovno odvisno analizo. Uporabljeni sta dve analizi: hitra nelinearna analiza FNA ter direktna numerična integracija. Rezultati se praktično ne razlikujejo, v večjem delu spektra je FNA nekoliko konzervativnejša. V analiziranem primeru porabi FNA 50-krat manj računskega časa, zato je bolj racionalna. Primerjava med štirimi različnimi karakteristikami izolatorjev pokaže, da na učinkovitost vpliva čim nižja meja tečenja izolatorja ter manjša togost. Meja tečenja mora biti vseeno tolikšna, da se pri drugih projektnih horizontalnih vplivih konstrukcija ne premika. Vrednosti etažnega spektra se pri izolirani konstrukciji močno zmanjšajo. Maksimalna vrednost pospeška v tretji etaži je 6 m/s^2 , po sami etaži pa se pospeški bistveno ne spreminjajo. Redukcija maksimalnih pospeškov zaradi izolacije je do 8-kratna. Zanimivo je, da maksimum etažnega spektra ne nastopi pri lastni periodi izolirane konstrukcije, temveč v območju med periodami. Krivulja etažnega spektra nima tako izrazitih ekstremov.

Rezultati so bili primerjani z etažnim spektrom po EC8 . Standard podaja enostavno formulo za izračun potresnih sil na nekonstrukcijske elemente, ki se ne sme uporabiti za elemente, ki pri porušitvi predstavljajo tveganje za življenje. Formula ne zajame vpliva ekscentričnosti mase in poda pavšalno vrednost po določeni etaži. Prav tako ni mogoče podati dušenja konstrukcije in nekonstrukcijskega elementa ter stopnje duktilnosti konstrukcije. Izkaže se, da standard v analiziranem primeru večinoma ne poda konzervativnih vrednosti. V območju okoli osnovne periode je razlika največja in znaša do 4-kratne vrednosti. Oblika krivulje

ustreza bolj duktilnim konstrukcijam. Formula se lahko uporabi tudi za izolirane konstrukcije, tam so vrednosti dobljene s programom manjše od vrednosti po standardu.

VIRI

Ambraseys, N., Smith, P., Bernardi, R., Rinaldis, D., Cotton, F., Berge-Thierry, C. 2000. Dissemination of European Strong-Motion Data. CD-ROM collection. Bruxelles, European Council, Environment and Climate Research Programme.

Booth, E., Key, D. 2006. Earthquake design practice for buildings. Second edition. London, Thomas Telford Ltd: ch. 12.

Dolšek, M. 2007. Vezni elementi v programu SAP 2000. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 10 str.

Eurocode 1.1998. Osnove projektiranja in vplivi na konstrukcije, Del 2-4: Vplivi na konstrukcije – Vplivi vetra (prevzet ENV 1991-2-4: 1995 z metodo platnice), Slovenski predstandard SIST ENV 1991-2-4

Evrokod 8. 2005. Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij, Del 1: Splošna pravila, potresni vplivi in vplivi na stavbe, Slovenski standard, SIST EN 1998-1

Fajfar, P. 1984. Dinamika gradbenih konstrukcij. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 519 str..

Fajfar, P., Dolšek, M., Marušić, D. Stratan, A. 2006. Pre- and post-test mathematical modelling of a plan-asymmetric reinforced concrete frame building. New York, John Wiley & Sons, Ltd. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 35:1359-1379.

Kelly, T. E. 2001. Base Isolation of Structures. Wellington, Holmes Consulting Group Ltd: 214 str.

Medina, R. A., Sankaranarayanan, R., Kingston, K. M., 2006. Floor response spectra for light components mounted on regular moment – resisting frame structures. Amsterdam, Elsevier Ltd. Engineering structures 28: 1927-1940.

Medina, R. A., Sankaranarayanan, R. 2007. Acceleration response modification factors for nonstructural components attached to inelastic moment - resisting frame structures. New York, John Wiley & Sons, Ltd. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 36: 2189-2210.

Novak, D., Fajfar, P. 1994. Nelinearni etažni spektri odziva za racionalno aseizmično projektiranje opreme. V: Fischinger, M., Lopatič, J., Saje, F. (ur.). Zbornik 16. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije. Bled, 8. – 9. september 1994. Ljubljana, Društvo gradbenih konstruktorjev: Društvo za potresno inženirstvo: str. 95 – 102

Paskalov, A., Reese, S. 2003. Deterministic and probabilistic floor response spectra. Amsterdam, Elsevier Ltd. Soil Dynamics and earthquake engineering; 23: 605-618

Rozman, M. 2005. Nelinerna analiza nesimetrične armiranobetonske stavbe pri potresni obtežbi. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 132 str.

SAP2000. 2007. Analysis Reference Manual. Berkeley, Computers and Structures, Inc: 450 str.

Seismic Isolation Brochure. 2007. Nevada, Dynamic Isolation Systems Inc: 20 str.
<http://www.dis-inc.com/brochures.html> (8. 9. 2008)

Wilson, E. L. 2004. Static & Dynamic Analysis of Structures. Fourth Edition. Berkeley, Computers and Structures, Inc: ch. 12, 13, 18 - 21